HAL
open science

L'exobiologie ou l'origine chimique de la vie

André Brack

To cite this version:

André Brack. L'exobiologie ou l'origine chimique de la vie. Halbwachs J.L., Egret D., Hameury J.M. Formation planétaire et exoplanètes, CNRS, pp.309-332, 2006. hal-00113410

HAL Id: hal-00113410

https://hal.science/hal-00113410

Submitted on 13 Nov 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Formation planétaire et exoplanètes
Ecole CNRS de Goutelas XXVIII (2005)
Edité par J.L. Halbwachs, D. Egret et J.M. Hameury

L'exobiologie ou l'origine chimique de la vie

André Brack

Centre de biophysique moléculaire, CNRS, Orléans

Abstract. By definition, exobiology includes the study of the origin, evolution and distribution of life in the universe, terrestrial life serving as a reference in our search for extraterrestrial life. On Earth, life emerged in water about 4 billion years ago with organised molecular systems capable of self-reproduction and also capable of evolution. It is generally agreed that its main ingredients were liquid water and organic molecules, i.e. skeletons of carbon atoms flanked by hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur and phosphorus atoms. Organic matter might have been formed in the primitive Earth's atmosphere or near hydrothermal vents. A large fraction of prebiotic organic molecules might have been brought by extraterrestrial meteoritic and cometary dust grains decelerated by the atmosphere. The possibility that life might have evolved on early Mars, when water existed on the surface, marks it as a prime candidate in the search for microbial life beyond the Earth. Europa has an icy carapace and probably a subsurface region of water which might harbor a basic life form. The atmosphere and surface components of Titan are also of interest to exobiology for the insight into a hydrocarbon-rich, chemically evolving world. Furthermore, the detection of interstellar organic molecules and the discovery of extrasolar planets broaden the field of astrobiology to the whole Universe.

Table des matières

1. L'énigme du passage à la vie **309**
1.1 Introduction à l'exobiologie 309
1.2 Quelques repères 310
1.3 La matière première des premiers automates 311
Les filières terrestres. 311
Les sources extraterrestres. 313
1.4 Formation des molécules organiques extraterrestres . . . 314

1.5 Les acides aminés face au voyage spatial 315
1.6 La fabrication des automates 316
1.7 Une vie avant la cellule ? 318

2. La recherche de vie primitive 318
2.1 Sur Terre : la quête du fossile du premier automate . . . 319
2.2 Des automates simples et robustes 322
2.3 La recherche de vie extraterrestre 322
Mars. 322
Europe. 325
Titan. 326
Les exoplanètes. 326

3. Conclusion 328

1. L'énigme du passage à la vie

1.1 Introduction à l'exobiologie

L'exobiologie a pour objet l'étude de la vie dans l'Univers. L'idée d'une vie au-delà de la Terre est ancrée dans l'imaginaire humain depuis l'Antiquité. Epicure, 300 av. J.-C., écrivait déjà à Hérodote : " Les mondes sont en nombre infini...On ne saurait démontrer que dans tel monde des germes tels que d'eux se forment les animaux, les plantes et tout le reste de ce qu'on voit, pourraient n'être pas contenus ". Plus récemment, cette idée n'a cessé d'alimenter une vaste littérature de science-fiction. Dans le même temps, les progrès spectaculaires de la biologie moléculaire permettaient de mettre en évidence l'extraordinaire complexité de la vie cellulaire et de ses mécanismes de régulation. Se développa alors l'idée qu'une telle complexité ne pouvait être, à l'origine, que le résultat d'un concours de circonstances tout à fait exceptionnel. Antoine de Saint-Exupéry écrivait dans *Terre des Hommes* : (La Pléiade, 1959, p. 258) : " D'une lave en fusion, d'une pâte d'étoile, d'une cellule vivante germée par miracle nous sommes issus, et, peu à peu, nous nous sommes élevés jusqu'à écrire des cantates et à peser des voies lactées ". L'idée d'un acte isolé fondateur de la vie a été largement diffusée par Jacques Monod dans son ouvrage " Le hasard et la nécessité " (Editions du Seuil, Points, 1970, p.183) : " La vie est apparue sur la Terre : quel était avant l'événement la probabilité qu'il en fut ainsi ? L'hypothèse n'est pas exclue, au contraire, par la structure actuelle de la biosphère, que l'événement décisif ne se soit produit qu'une seule fois. Ce qui signifierait que sa probabilité *a priori* était quasi nulle ". Ce point de vue, qui soutient que le système d'origine est déjà trop complexe pour qu'il se reproduise une deuxième fois, n'est pas celui des chimistes. Ces derniers prônent la simplicité, donc le caractère répétitif de la vie.

L'exobiologie, par définition, inclut l'étude de l'origine de la vie terrestre prise comme référence, son évolution précoce et la distribution de la vie dans l'Univers. La vie terrestre apparut il y a environ 4 milliards d'années dans l'eau des océans. Selon Empédocle, des têtes sans jambes, des jambes sans têtes, des bras, des torses, se promenaient autrefois à la surface de la Terre. Un jour, par hasard, tous les éléments nécessaires à la constitution d'un individu complet se rencontrèrent et ainsi s'auto-organisa le premier homme. En transposant l'image d'Empédocle au niveau des molécules, l'émergence de la vie sur Terre peut être comparée à l'élaboration spontanée d'un automate chimique à partir de pièces détachées éparses. Par le jeu du hasard, un certain nombre de molécules s'auto-organisèrent et formèrent un automate capable de saisir d'autres molécules pour générer un deuxième automate à son image, produisant ainsi plus d'eux-mêmes par eux-mêmes en transmettant leur plan de mon-

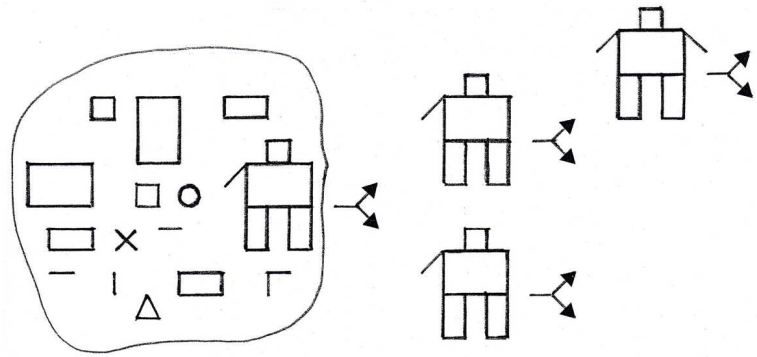

Figure 1.: *Petits automates chimiques capables d'auto-reproduction et d'évolution.*

tage. C'est l'*auto-reproduction.* Par suite de légères erreurs de montage, des automates plus aptes à transmettre leur plan de montage apparurent et devinrent les espèces dominantes. C'est *l'évolution.* Auto-reproduction et évolution sont donc les deux qualités qui caractérisent, *a minima*, le passage de la matière à la vie (Figure 1).

1.2 Quelques repères

Comment résoudre l'énigme du passage à la vie ? L'eau ne pose pas de problème majeur car il semble bien que la Terre était déjà couverte d'eau peu de temps après sa formation, il y a plus de 4 milliards d'années, comme l'indiquent les rapports des isotopes de l'oxygène mesurés dans des zircons (cristaux de silicate de zirconium contenant des traces d'uranium et de thorium qui permettent de les dater) vieux de 4,4 milliards d'années retrouvés récemment dans des sédiments d'Australie occidentale. Qu'en est-il des automates ? A quoi ressemblaient-ils ?

Dès 1953, date de l'expérience de Miller décrite plus loin qui marqua réellement le début de la chimie prébiotique, les chimistes ont cherché à reconstituer dans leurs tubes à essais des automates ressemblant à une cellule simplifiée à cause de la remarquable unicité du vivant contemporain et de son mode de fonctionnement cellulaire. Pendant des décennies, les chimistes se sont ainsi évertués a reconstituer en laboratoire des molécules indispensables au fonctionnement d'une cellule : les molécules de compartimentation (molécules membranaires), les molécules de l'information (ARN et ADN) et les molécules catalytiques (enzymes protéiques). La plupart des molécules biologiques sont réduites, c'est-à-

dire que les atomes de carbone du squelette moléculaire sont plus souvent liés à des atomes d'hydrogène qu'à des atomes d'oxygène.

Dans une cellule vivante, l'intérieur est séparé du milieu aqueux extérieur par une membrane constituée par des agrégats de lipides. Les lipides membranaires sont des molécules qui possèdent une partie hydrophile et une partie hydrophobe. Mises en présence d'eau, ces molécules s'agrègent pour enfouir les parties hydrophobes et exposer les parties hydrophiles. Le travail chimique de copie (auto-reproduction) est assuré par les enzymes, des protéines capables d'exercer une activité de catalyse, c'est-à-dire capable d'accélérer certaines réactions chimiques. Le plan de montage d'une cellule est contenu dans les acides nucléiques, ADN et ARN, très longues chaînes constituées par la répétition de nucléotides. Chaque nucléotide comporte un groupe phosphate, un sucre (ribose) et une base azotée accrochée au sucre.

1.3 La matière première des premiers automates

Par analogie avec le monde vivant contemporain, on considère généralement que la vie primitive utilisait déjà des molécules organiques. Les formes de carbone les plus simples capables de conduire aux molécules organiques sont gazeuses : dioxyde de carbone CO_2 et monoxyde de carbone CO pour les formes oxydées et méthane CH_4 pour la forme réduite. Quelles étaient les filières possibles, il y a 4 milliards d'années ?

Les filières terrestres. Quand on pense molécules gazeuses, on pense tout naturellement à l'atmosphère terrestre. L'idée de composés chimiques fabriqués dans l'atmosphère terrestre fut d'abord émise par le biochimiste russe Alexandre Oparin en 1924, puis par l'Anglais John Haldane en 1929, indépendamment d'Oparin. Oparin pensait que l'atmosphère primitive était dominée par le méthane CH_4, une forme réduite du carbone alors que pour Haldane, les molécules organiques se seraient formées à partir de dioxyde de carbone CO_2, une forme oxydée du carbone. L'hypothèse d'Oparin se trouva confortée en 1953 par l'expérience remarquable du chimiste américain Stanley Miller. Ce dernier remplit un ballon d'un mélange gazeux de méthane, d'ammoniac, d'hydrogène et de vapeur d'eau et soumit ce mélange à l'action d'un arc électrique simulant les orages de la Terre primitive (Figure 2).

Parmi les composés formés, il identifia l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde, véritables passages obligés conduisant aux molécules biologiques. Il isola également plusieurs acides aminés, les éléments constitutifs des protéines, dont la glycine, le plus simple des acides aminés. Depuis l'expérience de Miller, dix-sept des vingt acides aminés protéiques ont été isolés ainsi que certains éléments constitutifs des acides nucléiques. Cependant, les géochimistes nous apprennent que l'atmosphère terrestre pri-

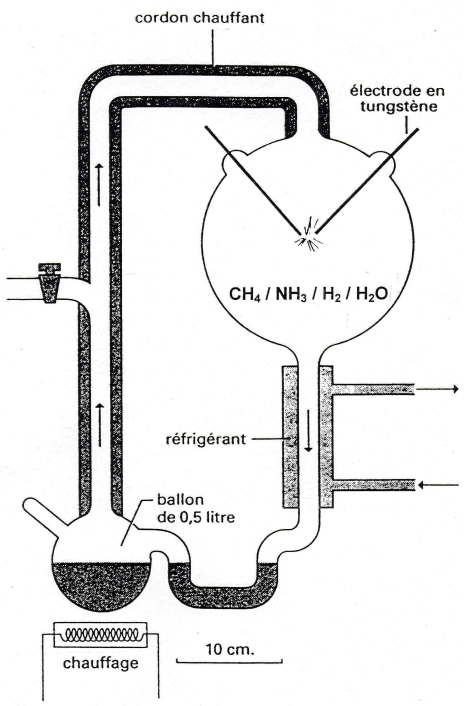

Figure 2.: *Appareil de Miller permettant la synthèse prébiotique d'acides aminés.*

mitive était essentiellement neutre, formée majoritairement de dioxyde de carbone CO_2, d'eau H_2O, et d'hydrogène sulfuré H_2S d'origine volcanique ou micrométéoritique, avec des quantités mineures d'autres gaz tels que méthane CH_4, monoxyde de carbone CO, et azote N_2.Lorsque l'on refait l'expérience de Miller en passant progressivement du méthane au dioxyde de carbone, la formation d'acides aminés devient de plus en plus difficile. Si l'atmosphère primitive était réellement dominée par du dioxyde de carbone, elle ne pouvait pas être la source exclusive de la matière organique nécessaire à l'émergence de la vie terrestre et d'autres filières ont dû contribuer à la production de pièces d'automates chimiques, filières océanique et spatiale.

Les sources hydrothermales sous-marines présentent un environnement favorable aux synthèses prébiotiques. Lorsque deux plaques tectoniques s'écartent, le magma remonte et se solidifie pour former les dorsales océaniques, véritables chaînes de montagne sous la mer. Au cours de son ascension et de son refroidissement, le magma se contracte et se fissure. L'eau de mer s'infiltre sur plusieurs centaines de mètres de pro-

fondeur et se réchauffe au contact du basalte chaud jusqu'à atteindre des températures de 350 ° C. L'eau se charge en gaz, hydrogène, azote, oxyde de carbone, dioxide de carbone, méthane, anhydride sulfureux, hydrogène sulfuré, puis s'échappe du fond de l'océan sous forme de véritables geysers. Les sources hydrothermales sous-marines constituent un milieu exceptionnel qui a peu évolué depuis quatre milliards d'années. Les éléments indispensables à la fabrication des pièces d'automates chimiques y sont présents : hydrogène, azote, monoxyde et dioxyde de carbone, hydrogène sulfuré, méthane et, bien sûr eau. Le magma fournit en continu l'énergie nécessaire sous forme de chaleur. Le milieu est protégé des effets destructeurs des rayons ultraviolets par la couche d'eau océanique qui amortit également le bombardement météoritique. Est-ce là le berceau des automates chimiques ? Une température de 350 ° C est trop élevée pour permettre la survie des automates, voire des pièces d'automates. Le record pour les bactéries hyperthermophiles qui vivent à des températures supérieures à 80 ° C au voisinage des sources hydrothermales est actuellement de 113 ° C. Il semble bien que ces bactéries hyperthermophiles proviennent de bactéries vivant à des températures plus agréables, inférieures à 80 ° C, qui se seraient adaptées aux températures extrêmes relativement récemment. Il est donc peu probable que les sources hydrothermales aient été le berceau des automates chimiques mais elles ont très bien pu produire certaines des pièces nécessaires à leur émergence.

Les sources extraterrestres. L'apport de molécules organiques extraterrestres reste de loin le plus important. Les sondes Véga 1 et 2, Giotto, Suisei et Sakigake ont montré que la comète de Halley est riche en matériaux organiques, le taux moyen en poids de carbone présent dans les grains cométaires étant estimé à 14%. Parmi les molécules identifiées, on retrouve l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde. Ces composés, ainsi que de nombreuses autres molécules d'intérêt prébiotique, ont été observés plus récemment dans les comètes Hyakutake en 1996 et Hale-Bopp en 1997.

Les météorites carbonées, représentées typiquement par les météorites d'Orgueil et de Murchison, renferment des composés organiques comme des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. Des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des kérogènes et des fullerènes (des ballons de foot en carbone) sont également présents. Des composés plus proches des composés biologiques ont été identifiés : acides carboxyliques, acides aminés, bases nucléiques, amines, amides, alcools, etc. La météorite carbonée de Murchison renferme plus de soixante-dix acides aminés différents. Au nombre de ceux-ci on trouve huit acides aminés protéiques. Il y a environ 55% de formes gauches et 45% de formes droites pour certains acides aminés présents dans la météorite de Murchison. L'occasion est donnée ici de mentionner une propriété remarquable des

atomes de carbone qui constituent l'ossature des systèmes vivants et, probablement, des automates chimiques qui nous intéressent. L'atome de carbone occupe généralement le centre d'un tétraèdre. Lorsque les groupes d'atomes qui occupent les quatre sommets du tétraèdre sont différents, l'atome de carbone devient asymétrique et se présente sous deux formes, une forme droite et une forme gauche, comme nos deux mains. Les deux formes, images l'une de l'autre dans un miroir, ne sont pas superposables. Il existe donc des acides aminés gauches et droits. Les systèmes vivants n'utilisent qu'une seule des deux formes possibles pour chaque grande famille de constituants biologiques, protéines, ADN, etc. C'est ainsi que les protéines n'utilisent que la forme gauche des acides aminés. Une vie qui utiliserait indifféremment et simultanément les deux formes gauches et droits des molécules biologiques semble très improbable. La découverte par les astronomes d'un rayonnement infrarouge fortement polarisé dans un nuage moléculaire de la nébuleuse d'Orion pourrait expliquer l'origine extraterrestre de cet excès de formes gauches.

Des collectes de poussières interplanétaires dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique par Michel Maurette permettent d'évaluer à environ 50 à 100 tonnes la quantité de grains interplanétaires arrivant tous les jours actuellement à la surface de la Terre. Environ 99% de cette masse est apportée par des micrométéorites dont le diamètre est compris entre 50 et 500 microns. Les micrométéorites sont apparentées aux météorites les plus primitives, celles du groupe des météorites carbonées représentées par la météorite de Murchison. Une analyse détaillée des teneurs en carbone de différents groupes de micrométéorites permet d'estimer à cent tonnes le flux total de carbone organique apporté tous les ans à la Terre. La quantité livrée à la Terre pendant la phase active du bombardement terrestre entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, quand le flux micrométéoritique était vraisemblablement mille fois plus intense qu'aujourd'hui, est estimée à 10^{23}g. Pour donner un ordre de grandeur, cette valeur représente cent mille fois la valeur actuelle du carbone biologique recyclé aujourd'hui à la surface de la Terre. Ces grains renferment une forte proportion de sulfures métalliques, d'oxydes, d'argiles qui sont autant de catalyseurs. Au contact de l'eau liquide, les grains ont donc pu fonctionner comme des microréacteurs chimiques transformant la matière organique des grains à l'aide des catalyseurs présents.

1.4 Formation des molécules organiques extraterrestres

Comètes et météorites sont riches en molécules organiques, mais, ces molécules, d'où viennent-t-elles ? Près de cent dix molécules différentes ont été identifiées à ce jour dans les nuages denses de gaz et de poussières du milieu interstellaire. Parmi ces molécules, quatre-vingt-trois contiennent du carbone, dont acide cyanhydrique HCN, ammo-

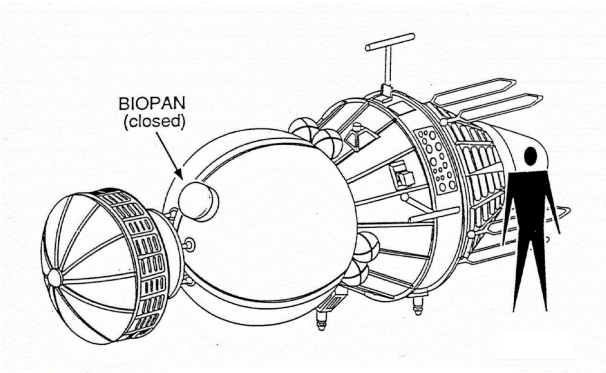

Figure 3.: *BIOPAN monté sur le satellite automatique russe FOTON.*

niac NH_3 et formaldéhyde H_2CO, molécules précurseurs qui conduisent généralement aux acides aminés. Pour vérifier que la synthèse d'acides aminés dans les conditions du milieu interstellaire est possible, un mélange de glaces d'eau, d'ammoniac, de méthanol, de monoxyde et de dioxyde de carbone a été irradié au Laboratoire d'astrophysique de Leyde aux Pays-Bas, dans des conditions mimant celles du milieu interstellaire (vide poussé de 10^{-7} mbar, température de -261 $^\circ$ C). Une fois ramenés à la température ambiante, les échantillons, ont été analysés au Centre de biophysique moléculaire du CNRS à Orléans. Nous y avons identifié seize acides aminés dont six (glycine, alanine, valine, proline, serine, acide aspartique) font partie des vingt acides aminés protéiques.

1.5 Les acides aminés face au voyage spatial

Les acides aminés fabriqués dans l'espace supportent-ils le voyage spatial ? On sait que les météorites, dont la masse est supérieure à cent grammes, peuvent transporter les acides aminés. Cependant, l'apport en météorites (aujourd'hui de l'ordre de cent tonnes par an) est très minoritaire par rapport à celui des micrométéorites. Des expériences spatiales ont été menées en orbite terrestre pour vérifier à partir de quelle taille une micrométéorite devient un transporteur possible d'acides aminés. Dans l'expérience BIOPAN-1, six acides aminés L présents dans la météorite de Murchison ont été exposés aux conditions de l'espace pendant quinze jours en juin 1994 à bord de la capsule automatique russe FOTON-8 (Figure 3).

Ils ont été exposés nus mais également enrobés dans une argile (la montmorillonite). Après récupération, les acides aminés ont été analysés à l'aide d'une technique qui permet de mesurer le taux de décomposition des acides aminés mais aussi le taux de racémisation, c'est-à-dire la

proportion de forme gauche qui a été éventuellement transformée en forme droite au cours de l'exposition. Les analyses effectuées après le vol révèlent des différences nettes de comportement se traduisant notamment par un déficit significatif des acides aminés acides (acide glutamique et acide aspartique) dans les échantillons exposés au rayonnement solaire. Aucun déficit n'est constaté lorsque les échantillons sont associés à des argiles. Aucune racémisation n'a été observée. Le second vol de dix jours en 1997 a confirmé les résultats du premier vol et a permis de montrer qu'au-dessous de 5 μm, l'argile n'offrait plus de protection totale contre le rayonnement solaire. Un troisième vol s'est déroulé en 1999 à bord de la station MIR. Pour cette mission, différentes protections minérales ont été utilisées, à différentes épaisseurs : une argile, une poudre de basalt et une poudre de météorite. Après trois mois en orbite terrestre, les acides aminés ont été détruits à hauteur de 50% en l'absence de protection minérale. A épaisseur égale, c'est la poudre de météorite qui a présenté le meilleur pouvoir protecteur. La poudre météoritique protège efficacement à partir d'une épaisseur de 5 μm. En d'autres termes, toute micrométéorite de taille supérieure à 5 μm représente un transporteur possible d'acides aminés dans l'espace.

1.6 La fabrication des automates

Nous avons vu que la matière première était présente en abondance, mais qu'en était-il des automates ? Les chimistes ont d'abord pensé que les automates primitifs devaient ressembler à des cellules simplifiées, en s'inspirant du vivant contemporain cellulaire et de l'universalité du code génétique. A partir de petites molécules organiques, les chimistes se sont donc efforcés de reconstituer en laboratoire les trois familles de longues chaînes biologiques indispensables au fonctionnement de la cellule.

Certaines substances organiques présentes dans les météorites carbonées de Murchison et d'Allende forment dans l'eau des cloisons qui ressemblent à des membranes. Des acides gras (chaînes hydrocarbonées terminées par une fonction acide comme l'acide acétique du vinaigre) sont notamment présents dans ces météorites. Toutefois, les membranes produites à l'aide de ces composés amphiphiles simples ne sont pas très stables, de sorte que des composés chimiques plus complexes ont vraisemblablement été nécessaires pour conférer une bonne stabilité aux membranes primitives.

Des mini-protéines ont été reconstituées en laboratoire. Une équipe de chercheurs japonais, en collaboration avec notre laboratoire à Orléans, a obtenu des chaînes renfermant jusqu'à huit acides aminés en faisant passer alternativement une solution d'acides aminés d'une chambre réactionnelle à 220 °C à une chambre à 0 °C, mimant ainsi les conditions de trempe thermique qui règnent à proximité des sources chaudes

sous-marines. Les argiles permettent également d'obtenir des chaînes de mini-protéines. Nous avons réussi à Orléans à reproduire les géométries des protéines, hélices-α et feuillets-β.

Toute une série de mini-protéines construites sur une alternance stricte d'acides aminés hydrophiles et hydrophobes a été préparée. Elles adoptent toutes une structure en feuillets dans l'eau par agrégation des groupes hydrophobes, à condition que le caractère hydrophobe soit bien marqué. Lorsque l'on ajoute de l'alcool à l'eau, la force des interactions hydrophobes qui génèrent les feuillets s'atténue et les miniprotéines adoptent alors une géométrie en hélice. C'est donc l'eau qui permet la structuration en feuillets par ses propriétés physiques spécifiques. Les mini-protéines à séquence alternée, capables de ce fait de prendre la géométrie en feuillets, sont très résistantes, ce qui a peut-être permis leur sélection sur la Terre primitive. La formation de feuillets requiert l'utilisation d'acides aminés de même chiralité, c'est-à-dire tous gauches ou tous droits. Lorsque les séquences alternées renferment à la fois des formes gauches et droites distribuées au hasard le long des chaînes, seuls les segments contenant au moins six acides aminés consécutifs de même chiralité s'agrègent en feuillets. De nombreux miniprotéines manifestent une activité catalytique. Par exemple, à Orléans, nous avons montré que des mini-protéines basiques ne renfermant que deux acides aminés différents coupent les ARN.

La grande majorité des travaux de reconstitution d'acides nucléiques prébiotiques porte sur les ARN car ils sont considérés comme étant plus anciens, plus primitifs, que les ADN. Certaines bases des nucléotides (les constituants élémentaires de l'ARN) sont obtenues facilement à partir de l'acide cyanhydrique en soumettant un mélange gazeux de méthane, d'éthane et d'ammoniac à des décharges électriques. Les bases sont également présentes en très petites quantités dans les météorites et peut-être même dans les comètes. La synthèse des sucres à partir de formaldéhyde fournit un mélange très complexe dans lequel le sucre recherché est très minoritaire. A ce jour, la synthèse des nucléotides, combinaison d'un phosphate, d'un sucre et d'une base, n'a pas pu être reproduite en laboratoire dans des conditions simulants l'environnement de la Terre primitive. Par contre, les argiles catalysent efficacement la formation des chaînes de nucléotides à partir des nucléotides. Les chimistes cherchent maintenant à exploiter des analogues, ou succédanés, des ARN. Les travaux, en cours, ont déjà donné des résultats encourageants. Cependant, la formation prébiotique d'ARN demeure encore inexpliquée.

1.7 Une vie avant la cellule ?

Peut-on envisager une vie primitive plus simple que la cellule ? Dans les années 1980, les biologistes ont découvert que certains ARN étaient capables non seulement de véhiculer l'information mais aussi d'exercer une activité catalytique, comme les enzymes protéiques. Très vite s'est développé l'idée d'un monde d'ARN berceau de la vie sur Terre. Le monde de l'ARN a constitué vraisemblablement un épisode dans l'histoire de la vie. La démonstration que l'étape clé de la formation de la liaison peptidique au cours de la biosynthèse des protéines est réalisée par catalyse de l'ARN sans intervention quelconque d'un acide aminé confirme l'existence probable d'un monde d'ARN ancestral de même que la découverte des *mimivirus* à ADN, macrovirus possédant des gènes communs à tous les organismes des trois branches du vivant, eucaryotes, bactéries et archea et qui pourraient être les descendants d'un monde viral ancestral. Reste cependant à comprendre la formation prébiotique de l'ARN qui n'a trouvé, à ce jour, aucune explication convaincante. Il est dès lors raisonnable de penser que l'émergence du monde de l'ARN a été préparée par des systèmes autocatalytiques plus simples, selon le schéma :

CHONS et eau ⇒ Robots ou catalyseurs ⇒ Monde viral à ARN ⇒ Cellules (ARN, protéines et membranes)

Certains pensent que l'autocatalyse s'est développée sur des surfaces minérales. Ils favorisent l'hypothèse selon laquelle des systèmes chimiques utilisant directement le dioxyde de carbone comme source de carbone, a l'instar des plantes et de certaines bactéries. Ces organismes vivants primitifs sont décrits comme des molécules organiques autocatalytiques se développant sur des surfaces minérales de pyrite (le fameux *or des fous*). La réaction du fer ferreux (FeS) sur l'hydrogène sulfureux (H_2S) produit d'une part de l'hydrogène qui réduit le dioxyde de carbone et de la pyrite qui sert de support minéral à la croissance autocatalytique du réseau organique (Figure 4).

De ce fait, il y a croissance simultanée du réseau organique et du support minéral. Le départ des molécules organiques de la surface minérale au profit de molécules mieux adaptées à la surface permet au système d'évoluer en se perfectionnant. L'idée d'une participation active des surfaces minérales, émise dès 1953 par l'Anglais J. Desmond Bernal, connait depuis peu un regain d'intérêt et de nombreux laboratoires se sont lancés dans cette chimie *on the rocks*.

2. La recherche de vie primitive

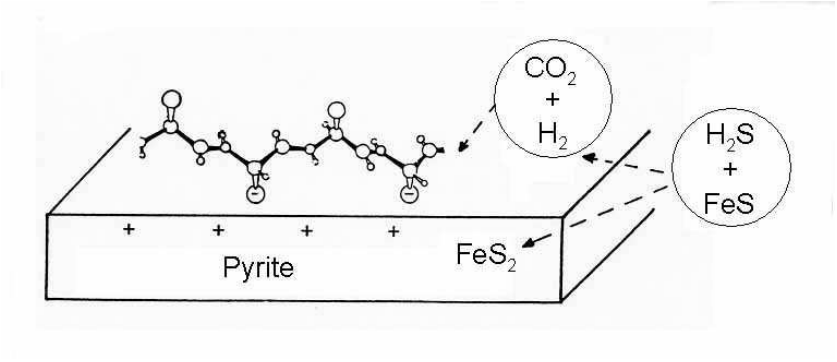

Figure 4.: *Modèle autotrophe de Wächtershäuser.*

2.1 Sur Terre : la quête du fossile du premier automate

Peut-on espérer trouver des automates fossilisés dans les sédiments très anciens ? Les microorganismes fossiles les plus anciens ont été trouvés dans les sédiments de Barberton en Afrique du Sud et du Pilbara en Australie. Ces sédiments, vieux de 3,2 à 3,5 milliards d'années, sont bien conservés et montrent l'existence d'une vie foisonnante dans des eaux littorales de faible profondeur, et peut-être même proche de la surface de l'eau (certains biofilms ont une structure feuilletée qui semble indiquer une vie bactérienne utilisant déjà l'énergie solaire). Les microfossiles identifiés comprennent des structures filamenteuses longues de dix à quelques centaines de microns de long, des bâtonnets de quelques microns de long et des structures sphériques et ovoïdes d'environ 1 micron de diamètre (Figure 5).

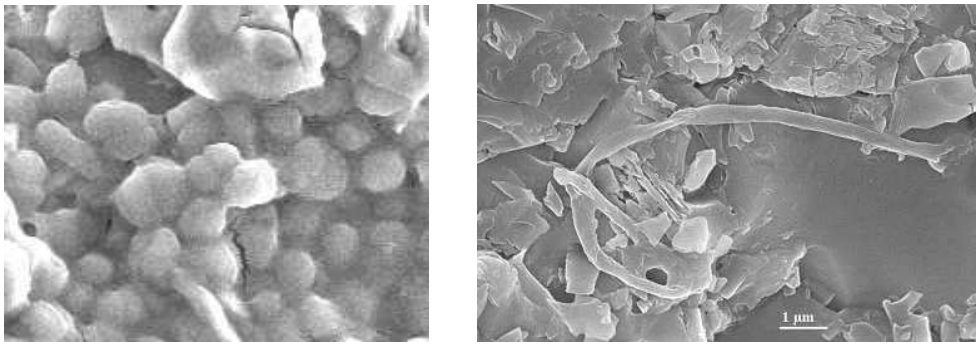

Figure 5.: *Fossiles de coques (à gauche) et de mattes bactériennes (à droite) dans les sédiments de Pilbara, Groupe de Warrawoona, 3.446 Gans (crédit Frances Westall).*

Ces structures ont été attribuées à des bactéries fossilisées. La quantité de carbone restant liée à ces microfossiles est généralement très faible (entre 0,01-0,5% avec des pointes exceptionnelles à 1%) ce qui rend l'analyse du carbone organique particulièrement difficile. Les isotopes du carbone ont cependant pu être mesurés et présentent un enrichissement variable mais néanmoins significatif en carbone 12, ce qui habituellement traduit une origine biologique. D'une manière générale, les molécules biologiques produites par photosynthèse sont caractérisées par un enrichissement en^{12}C par rapport aux carbonates minéraux. Ainsi, le rapport ^{12}C/^{13}C passe de 88,99 pour les carbonates minéraux de référence à des valeurs comprises entre 90,8 et 91,7 pour les molécules organiques biologiques.

Arguant d'une ressemblance entre les cyanobactéries modernes et les microfossiles du Pilbara, William Schopf, de l'université de Los Angeles, a décrit ces derniers comme étant des fossiles de cyanobactéries. Ces bactéries ancestrales auraient donc déjà pratiqué la photosynthèse oxygénée. Interprétation très importante car elle ferait remonter la photosynthèse oxygénée loin en arrière dans les temps géologiques alors que les indices biochimiques les plus anciens de la photosynthèse oxygénée trouvés dans des schistes carbonés, également en Australie, ne remontent qu'à 2,7 milliards d'années. Selon l'Anglais Martin Brasier, de l'université d'Oxford, les structures contiendraient bien du carbone organique enrichi en isotope 12, mais la matière organique serait d'origine purement chimique et non biologique. Elle pourrait provenir de la réaction de l'hydrogène sur le monoxyde de carbone (réaction dite de Fischer-Tropsch), deux gaz présents dans les fluides des sources hydrothermales. L'accumulation de la matière organique en microstructures serait due à la cristallisation du quartz dans la veine hydrothermale, l'enrichissement important en carbone 12 résultant de processus purement chimiques. L'explication de Brasier n'est cependant pas totalement convaincante car on voit mal comment la réaction de Fischer-Tropsch pourrait produire des macromolécules aussi complexes que les kérogènes (matière organique complexe, insoluble dans les solvants usuels) déposés dans les veines hydrothermales. Une explication intermédiaire pourrait être apportée par les travaux réalisés à Orléans, au Centre de biophysique moléculaire du CNRS, par Frances Westall. Des morphologies de microfossiles tels que biofilms, polymères, coques, filaments, bâtonnets, ont été observés au microscope électronique dans des échantillons de silice prélevés à Pilbara dans des zones jouxtant les veines hydrothermales de Schopf, mais jamais à l'intérieur même des veines hydrothermales. Ces morphologies contiennent du carbone identifié par microanalyse au microscope électronique. Il semble bien que les bactéries ancestrales vivaient, puis ont été fossilisées, dans des roches sédimentaires au voisinage

des veines hydrothermales. Les veines hydrothermales ont très bien pu entraîner la matière organique des bactéries mortes et/ou fossilisées (donc enrichis en carbone 12), matière organique qui aurait été redéposée plus haut dans les veines hydrothermales, pour former les fameuses structures carbonées complexes décrites par Schopf. Les structures de Schopf ne seraient donc que des restes de matière organique bactérienne et non pas des bactéries fossilisées. Cette explication est donc intermédiaire entre le tout bactérien de Schopf et le tout chimique de Brasier. Elle conforte néanmoins la présence de vie bactérienne il y a environ 3,5 milliards d'années.

Les roches les plus anciennes susceptibles de présenter des traces de vie sont des sédiments vieux de quelque 3,75 milliards d'années découverts dans le sud-ouest du Groenland. Ces sédiments témoignent de la présence permanente d'eau liquide, de gaz carbonique dans l'atmosphère et renferment des kérogènes, molécules organiques complexes. Le rapport isotopique du carbone est compris entre 90,2 et 92,4 pour la matière organique des sédiments du Groenland. Ces valeurs suggèrent, mais ne prouvent pas de manière certaine, l'existence d'une activité photosynthétique, donc d'une vie primitive, il y a 3,8 milliards d'années. En effet, cette matière organique très ancienne (quelques fois réduite à des cristaux de graphite) a subi d'importantes modifications au cours de la diagénèse[1]. Le produit final de cette dégradation, les kérogènes, se composent de macromolécules complexes stables résistantes, qui peuvent même être transformées en graphite pur pendant le métamorphisme. Tous ces traitements ont très bien pu générer les enrichissements en ^{12}C observés. Il faut aussi se méfier terriblement de la contamination éventuelle de ces roches par des microorganismes plus récents, contamination qui va, évidemment, biaiser les analyses. A cause des multiples transformations subies par ces roches, il y a fort peu de chances d'y retrouver des vestiges de microfossiles. Effectivement, aucunes structures ressemblant à des bactéries fossiles n'ont été découvertes dans les sédiments du Groenland.

Là aussi, il faut se rendre à l'évidence : l'espoir de retrouver des petits automates chimiques fossilisés depuis 4 milliards d'années, ou même des molécules organiques qui constituaient ces automates, est pratiquement nul. En fait, trois facteurs ont contribué à effacer leurs indices sur Terre : l'histoire géologique mouvementée de la Terre (et en particulier la tectonique de plaque), l'érosion due à la présence permanente d'eau liquide et la vie elle-même qui produit d'énormes quantités d'oxygène, un poison pour les molécules organiques réduites. On peut donc craindre

[1]La diagénèse est l'ensemble des processus qui transforment un sédiment frais en roche.

que les premières pages du livre de l'histoire de la vie restent blanches à jamais.

2.2 Des automates simples et robustes

Les automates primitifs étaient-ils simples ou très sophistiqués ? A l'évidence, un automate chimique ne pourra être facilement reconstitué en tube à essais que s'il est simple. La datation des cratères d'impacts lunaires suggère que les planètes du système solaire ont été soumises à un bombardement intense il y a 4 milliards d'années au moment où la vie est sensée avoir fait son apparition sur Terre. Un petit nombre de ces impacts fut probablement capable d'évaporer toute l'eau des océans primitifs. De ce fait, les automates chimiques devaient être suffisamment robustes pour pouvoir survivre aux impacts météoritiques et cométaires et éventuellement redémarrer après les plus gros impacts. Il est raisonable de penser que pour être robuste, la vie primitive devait être relativement simple et capable d'être répétée en plusieurs exemplaires.

2.3 La recherche de vie extraterrestre

La découverte d'autres exemplaires de vies sur d'autres corps célestes conforterait la relative simplicité de l'origine de la vie en apportant la preuve de son caractère répétitif. En identifiant à ce jour plus de quatre-vingt molécules organiques dans le milieu interstellaire, et en particulier le formaldéhyde et l'acide cyanhydrique, les radioastronomes ont démontré que la chimie organique est universelle. Il ne reste plus maintenant qu'à rechercher la présence permanente d'eau liquide. Présente en surface, elle signale l'existence d'une atmosphère qui permet l'apport en douceur des molécules organiques par le biais des micrométéorites. Comme les molécules organiques peuvent également se former dans les sources chaudes sous-marines, tout océan extraterrestre présentant les signes d'une activité hydrothermale constitue également un habitat biotique possible.

Mars. La planète Mars est, bien sûr, l'objet d'une attention toute particulière. Les lits asséchés observés par les missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder et Mars Global Surveyor indiquent clairement que Mars a connu dans sa jeunesse des écoulements permanents de fluides (Figure 6).

La sonde martienne Mars Odyssey placée en 2001 en orbite martienne par la Nasa est équipée d'un spectromètre qui mesure les rayons γ émis par le sol martien après impact des rayons cosmiques. Ce spectromètre a détecté de très importantes quantités d'atomes d'hydrogène présents en surface aux pôles mais également à soixante centimètres dans le proche sous-sol martien jusqu'à 60 $^\circ$ de latitude nord et sud. La

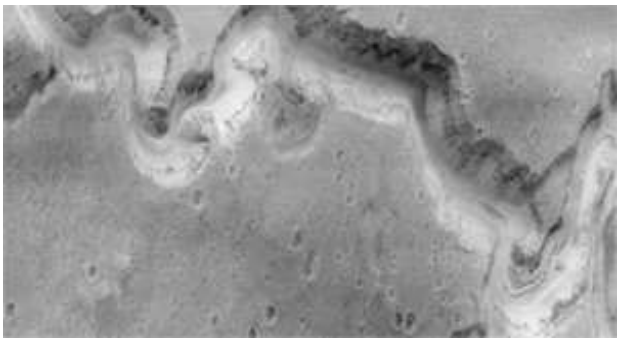

Figure 6.: *Canyon martien Nanedi Valles photographié par Mars Global Surveyor (NASA).*

présence d'hydrogène signe la présence de glace d'eau, permettant ainsi d'attribuer la formation des lits d'écoulement à la présence d'eau liquide coulant jadis à la surface de Mars. La présence permanente d'eau suppose une température constamment supérieure à 0 °C, température atteinte probablement grâce à l'existence d'une atmosphère dense générant un effet de serre important. Grâce à cette atmosphère, la planète a pu accumuler des micrométéorites à sa surface à l'instar de la Terre. En 1976, les deux sondes Viking ne détectèrent ni molécules organiques ni vie à la surface de Mars sur une profondeur de quelques centimètres. En fait, le sol martien semble renfermer des oxydants puissants produits par le rayonnement solaire dans l'atmosphère et/ou par des processus photochimiques au niveau du sol. La présence d'oxydants exclut toute accumulation de molécules organiques à la surface de la planète. Des calculs de simulation suggèrent que la diffusion des oxydants dans le sous-sol ne devrait pas dépasser une profondeur de quelques mètres. L'absence de matière organique à la surface de Mars pourrait également être due à des processus de dégradation directe par les UV solaires, l'atmosphère martienne ne possédant pas de couche protectrice d'ozone. Les sondes Viking n'ont pas trouvé de molécules organiques à la surface de Mars mais en mai 2005 on dispose de 34 météorites qui proviennent très probablement de Mars (http ://www2.jpl.nasa.gov/snc/). Ce sont les météorites SNC[2], dont la fameuse météorite ALH 84001 présentée comme renfermant des nanobactéries martiennes fossilisées. Cette affirmation est aujourd'hui de plus en plus battue en brèche. Les microfossiles se sont très probablement formés par des processus minéraux consécutifs à des infitration d'eau

[2]Les météorites SNC doivent leur acronyme à Shergotty, Nakhla et Chassigny, lieux de chute des trois sous-prototypes du groupe.

terrestre. La présence de cristaux de magnétite présentée comme preuve de la présence de vie martienne dans la météorite n'est pas non plus convaincante dans la mesure où des cristaux identiques ont été obtenus en laboratoire, d'une manière non biologique. Cependant, certaines de ces météorites SNC renferment des molécules organiques. Les ingrédients qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre étaient donc rassemblées sur Mars. Il est dès lors tentant de penser qu'une vie élémentaire de type terrestre ait pu apparaître et se développer sur la planète rouge.

En 1997, le robot martien Sojourner a analysé six sols et cinq roches autour du site d'atterrissage dans Ares Vallis. Les sols analysés sont tous identiques et très proches des sols analysés par les sondes Viking. Les roches, analysées sur quelques microns seulement, sont partiellement recouvertes de poussière du sol. La composition des roches rappelle celle de certains granites terrestres et se rapproche de celle de la croûte terrestre. Cependant, les résultats obtenus sont insuffisants pour pouvoir trancher entre une origine volcanique et une origine sédimentaire.

Le 2 juin 2003, l'Agence spatiale européenne a lancé la mission martienne Mars Express du pas de tir de Baïkonour. La mission consistait à placer un orbiteur muni de caméras stéréoscopiques, de différents spectromètres pour analyser l'atmosphère et la composition du sol et d'un radar capable de fouiller le sol sur plusieurs kilomètres pour y rechercher l'eau liquide et la glace. Un atterrisseur, appelée Beagle 2 en hommage au bateau de Charles Darwin, devait poser une station d'analyse martienne d'environ dix kilos à la surface de Mars capable de prélever des échantillons dans le proche sous-sol à l'aide d'une "taupe" auto-enfouisseuse et dans les roches de surface à l'aide d'un bras manipulateur. Le bras manipulateur devait placer contre les roches de surface un broyeur/carottier, une caméra, un microscope, un spectromètre à rayon X (donnant la composition en éléments chimiques) et un spectromètre Mössbauer (donnant le degré d'oxydation du fer). Les échantillons prélevés devaient être analysés par un spectromètre de masse installé sur l'atterrisseur après combustion par pallier de températures, technique permettant d'analyser les molécules carbonées, c'est-à-dire d'en déterminer la nature, minérale ou organique, ainsi que sa distribution isotopique. La sonde Beagle 2 s'est correctement séparée de l'orbiteur Mars Express en décembre 2003 mais n'a plus jamais donné signe de vie depuis cette date.

Si la vie est apparue sur Mars, la recherche de ses vestiges fossilisés sera rendue plus facile que sur Terre par le fait que les sédiments martiens anciens n'ont pas été détruits par des processus tectoniques, contrairement aux sédiments terrestres.

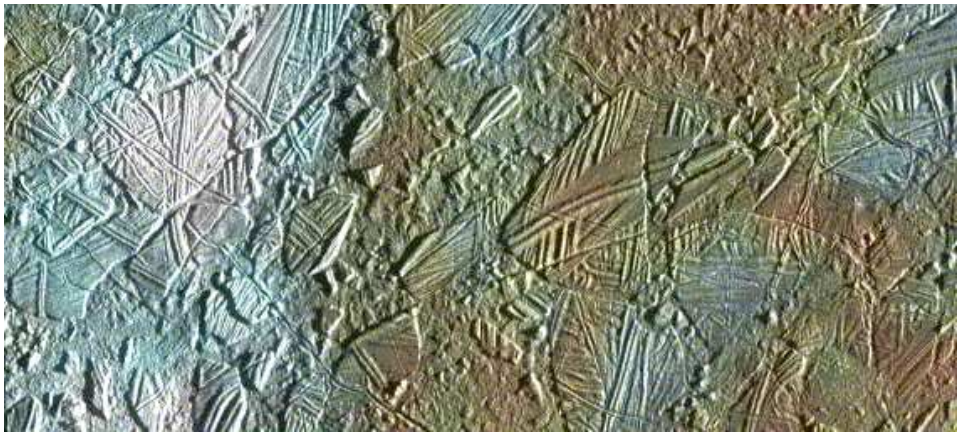

Figure 7.: *La surface glacée d'Europe photographiée par la sonde Galiléo (NASA).*

Europe. Europe, le satellite de Jupiter, pourrait bien présenter des environnements marins ressemblant aux sources sous-marines terrestres. Europe est le plus petit des satellites de Jupiter avec un rayon légèrement inférieur à celui de la Lune. Il orbite à une distance d'environ six cent mille kilomètres de Jupiter, donc suffisamment près pour être réchauffé par l'effet de marée dû au champ gravitationnel très important de la planète géante. En 1979 et 1980, la mission Voyager avait déjà photographié Europe et montré que sa surface était recouverte par de la glace entaillée de profondes crevasses. Depuis, le vaisseau spatial Galileo a fourni de très belles images montrant, notamment des blocs de glace ayant pivoté sur eux-mêmes (Figure 7).

La surface présente peu de cratères d'impacts ce qui suggère un remodelage continu de la surface par des phénomènes cryovolcaniques ou tectoniques. Selon l'un des modèles de structure interne proposé, il y aurait un océan d'eau liquide sous quelques dizaines de kilomètres de banquise, la chaleur nécessaire au maintien de l'eau à l'état liquide étant apportée par les fortes marées internes. La surface présente également des stries en forme d'arcs, interprétées comme provenant d'un stress dû à des marées océaniques sous-glaciaires. Des dépôts de sels ont été observés à la surface d'Europe par spectroscopie dans le proche infrarouge, dépôts qui pourraient provenir de remontées d'eau océanique salée. Enfin, la sonde Galileo a enregistré un champ magnétique induit dans le champ magnétique de Jupiter traduisant la présence d'un conducteur électrique. L'océan d'eau salée pourrait très bien jouer ce rôle de conducteur électrique. Toutes ces observations plaident en faveur de l'existence d'un océan sous-glaciaire d'eau salée. Il est maintenant important de savoir s'il existe sur Europe un magma capable de transférer la chaleur

du coeur planétaire vers le fond océanique pour créer des sources hydrothermales et, par conséquent, des molécules organiques. L'énergie de marée induite par Jupiter est-elle suffisante pour fondre les silicates à des températures supérieures à 1200 ° C ? La mise en évidence d'un magma sur Europe fait partie des objectifs prioritaires de l'exploration d'Europe actuellement à l'étude. Si Europe a maintenu une activité de marée et une activité hydrothermale sous-glaciaire, une vie bactérienne a pu y apparaître et y est peut-être encore active aujourd'hui. Europe apparaît de plus en plus comme un lieu privilégié du système solaire pouvant héberger de l'eau liquide et une vie bactérienne en activité.

Titan. Titan, le plus gros satellite de Saturne, possède une atmosphère dense de 1,5 bar constituée essentiellement d'azote (plus de 90%) mais aussi de méthane et d'un peu d'hydrogène. L'atmosphère renferme également d'épais brouillards d'aérosols organiques. Les observations glanées par la mission Voyager et les mesures faites à partir de la Terre indiquent clairement la présence de nombreux hydrocarbures et de nitriles[3] dans ce milieu. Parmi ces composés organiques figurent l'acide cyanhydrique, l'acétylène, le cyanoacétylène, véritables passages obligés de la chimie prébiotique. La modélisation des processus physicochimiques supposés se dérouler à la surface de Titan suggère la présence d'océan(s) de méthane et d'éthane liquide en équilibre avec les constituants de l'atmosphère. Titan représente un véritable laboratoire de production de composés prébiotiques à l'échelle planétaire. Bien que des traces de vapeur d'eau aient été récemment détectées par le satellite ISO dans la haute atmosphère, la température très basse (-180 ° C) régnant près de la surface interdit la présence d'eau liquide. Les molécules ne peuvent donc pas évoluer vers une vie de type terrestre. Vers quels systèmes complexes évoluent ces molécules en l'absence d'eau ? Existe-t-il une vie exotique basée sur la chimie du carbone et le méthane liquide ? La mission NASA-ESA Cassini-Huygens lancée en octobre 1997 devrait apporter des éléments de réponse en 2005. Malheureusement, la sonde Huygens ne porte aucun instrument capable de mesurer la chiralité des molécules organiques de Titan, véritable ligne de démarcation entre matière inerte et matière vivante.

Les exoplanètes. Au-delà du Système Solaire, la chasse aux planètes extrasolaires se pratique habituellement en mesurant la perturbation apportée à l'étoile par la planète. En septembre 1995, après un suivi systématique des vitesses d'une centaine d'étoiles à l'Observatoire de Haute-Provence, Michel Mayor et Didier Queloz découvrirent la présence

[3]Les nitriles sont les dérivés de l'acide cyanhydrique de type $R - C \equiv N$.

d'un corps de la moitié de Jupiter en orbite autour de l'étoile 51 Pegase. L'objet découvert était très proche de l'étoile et avait une température de 1500 °C. Quatre mois plus tard, Marcy et Butler décrivaient deux objets ayant 2,8 et 6,4 fois la masse de Jupiter près des étoiles 70 Virgin dans la constellation de la Vierge et 47 Uma dans la constellation de la Grande Ours. Les objets sont situés plus loin de l'étoile. La planète 70 Virgin, géante et probablement gazeuse, est peu propice à la vie. Elle peut, cependant, à l'instar de Jupiter et Saturne, avoir des satellites de la taille de la Terre avec des températures permettant la présence d'eau liquide. En mai 2005, le catalogue comptait cent cinquante cinq planètes géantes extrasolaires (http ://www.obspm.fr/encycl/catalog.html). Enfin, la méthode dite des transits consiste à détecter l'ombre d'une planète lorsqu'elle passe devant son étoile et provoque une mini-éclipse. Il s'agit donc de mesurer la faible occultation passagère de l'étoile provoquée par le passage de la planète devant celle-ci. Un petit nombre d'exoplanètes ont été mises en évidence à l'aide de cette méthode. La mission française COROT, en préparation, a précisément pour objectif de détecter des planètes extrasolaires selon cette méthode. La variation de luminosité sera directement donnée par le rapport entre la surface apparente de la planète et celle de l'étoile, soit environ 0,01 % pour une planète de la taille de la Terre autour d'une étoile comme le Soleil. En plus des exoplanètes géantes détectable par la méthode des perturbations décrite plus haut, COROT devrait donc détecter des planètes telluriques en orbite autour d'autres étoiles que notre Soleil. De plus COROT sera en mesure d'étudier la composition des atmosphères, et donc de détecter des planètes semblables à la Terre ou à Vénus.

La recherche de la vie sur les planètes extrasolaires ne peut se faire que par l'analyse spectrale de ses manifestations, singularités dans l'atmosphère et/ou message électromagnétique "intelligent" émanant d'une civilisation avancée extraterrestre. L'atmosphère terrestre renferme en permanence 21% d'oxygène alors que les atmosphères des autres planètes du système solaire n'en renferment que des traces. L'oxygène dans l'atmosphère terrestre est une singularité à deux titres : il est surabondant par rapport à la croûte terrestre et il devrait normalement disparaître par recombinaison avec les roches. Sa présence permanente est liée à l'existence d'une vie intense à la surface de la terre et ne manquerait pas d'attirer l'attention de tout extraterrestre observant la Terre à la recherche de la vie. La présence de grandes quantités d'oxygène atmosphérique va être révélée par la raie caractéristique de l'oxygène à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre dans la spectre visible de la planète. Pour des raisons pratiques, il est plus facile de rechercher la signature de l'ozone O_3, dans le spectre infrarouge à 9,6 μm. Dans l'hypothèse, extrêmement séduisante, où de l'oxygène atmosphérique extraterrestre serait mis en évidence, les

sceptiques ne manqueraient pas de faire remarquer que l'oxygène peut être produit par des mécanismes chimiques non biologiques. Quoi qu'il en soit, la présence simultanée d'ozone (donc d'oxygène), de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone apparaît aujourd'hui comme une signature probante d'une vie planétaire exploitant largement la photosynthèse. Deux projets actuellement à l'étude, portent sur la recherche d'exoplanètes de type terrestre. Le projet américain TPF (*Terrestrial Planet Finder*) et le projet européen Darwin/IRSI (*Infrared Space Interferometer*). Ce dernier consiste à placer une flotille de six télescopes spatiaux qui seront couplés dans l'espace pour analyser les atmosphères planétaires par interférométrie et y rechercher des singularités dues à une activité biologique.

Enfin, la détection par radioastronomie d'un signal électromagnétique "intelligent" (Programme Seti, *Search for Extraterrestrial Intelligences*), signal provenant d'une civilisation extraterrestre ayant atteint un niveau suffisant de développement technologique, apporterait la preuve indéniable de l'existence d'une vie extraterrestre. Le programme d'étude mérite d'être soutenu même si, *a priori*, la probabilité pour qu'une vie bactérienne extrasolaire évolue vers des systèmes vivants exploitant l'électromagnétisme ou la lumière laser soit extrêmement faible.

3. Conclusion

L'expérience remarquable de Miller a plus de cinquante ans. En démontrant qu'il était possible de former des acides aminés - les briques des protéines - à partir de méthane, le représentant le plus simple des molécules organiques, Miller suscita un énorme espoir : les chimistes allaient peut-être pouvoir reconstituer une vie primitive en tube à essais. Qu'en est-il après cinquante années d'efforts soutenus ? Force est de constater que le rêve n'a pas encore été réalisé. Pendant de très nombreuses années, les chimistes se sont efforcés de reconstituer en laboratoire les trois familles de molécules indispensables au fonctionnement de la cellule : les molécules de l'information ARN et ADN, les molécules catalytiques et les molécules de compartimentation. Ils ont réussi à reconstituer des précurseurs de membranes et des mini-protéines. Par contre, les chimistes n'ont pas réussi à reconstituer les molécules d'ARN. Même si la vie cellulaire a été précédée par un monde vivant d'ARN capable de fournir à la fois le plan de montage et l'outil pour effectuer l'autoreproduction, le problème reste entier car la synthèse des ARN primitifs reste très problématique.

Les chances de succès vont dépendre de la simplicité des automates à construire. Aussi est-il important de découvrir un deuxième exemple de

vie qui conforterait l'idée de simplicité en démontrant le caractère ubiquitaire de la vie. Les planétologues et les astronomes ont découvert des habitats possibles dans le système solaire et même au-delà. Les biologistes ont montré que la vie bactérienne peut survivre en s'adaptant à des conditions extrêmes (hautes et basses températures, hautes pressions, forte salinité) et à des environnements très diversifiés (fonds océaniques, sous-sol profond, pergélisol, espace), ce qui élargit considérablement l'éventail des niches biologiques extraterrestres. A ce jour, la vie n'est connue que sur Terre et il n'est pas possible de généraliser à partir d'un seul exemple. C'est la raison pour laquelle la recherche d'une "seconde vie" est devenue une priorité scientifique pour les années à venir. Tant que l'on ne dispose que d'un seul exemplaire de vie, on ne peut pas exclure l'idée que la vie terrestre résulte de la rencontre extraordinaire et unique d'un très grand nombre de molécules. Si dans plusieurs décennies, aucun autre exemple de vie n'a été découvert dans les nombreux habitats extraterrestres répertoriés, aucun signal intelligent n'a été perçu, ni aucune vie n'a pu être reconstituée en tube à essais, alors il faudra accepter l'idée que la vie terrestre pourrait bien être unique, que nous sommes peut-être seuls dans le vaste Univers et que nous ne saurons probablement jamais comment la matière devint vivante, voilà 4 milliards d'années sur notre petite planète.

Pour en savoir plus :

Livres

- *L'évolution chimique et les origines de la vie,* Brack, A. et Raulin, F., Masson (1991).
- *La chimie du vivant. De la protéine à la photosynthèse,* Brack, A. et Mathis, P.,Quatre à Quatre, Le Pommier (2000).
- *La vie est-elle universelle ?* Brack, A. et Leclercq, B., EDP Sciences (2003).
- *Et la matière devint vivante*, Brack, A. Le Collège de la Cité, Editions Le Pommier (2004).

Chapitres d'ouvrages

- *Origine de la vie, Brack, A.,* CD Rom, Encyclopaedia Universalis (1997).
- *L'asymétrie du vivant,* Brack, A., Pour la Science, Dossier Hors-série "Les symétries de la nature", Juillet 1998, pp.36-43.
- *Origine de la vie,* Brack, A., Supplément de l'Encyclopaedia Universalis, pp.743-750 (1999).

– *Sommes-nous seuls ?* Brack,A., *in* Le Grand Livre du Ciel, Bordas, pp. 92-115 (1999).
– *Origine et distribution possible de la vie dans l'Univers,* Brack, A., *in* Qu'est-ce que la vie ? Université de Tous les Savoirs, Odile Jacob, pp.37-46 (2000).
– *De l'origine de la vie terrestre à la vie dans l'Univers,* Brack, A., *in* L'origine de la vie sur Terre et dans l'Univers : L'Environnement de la Terre primitive, Eds. M. Gargaud, D. Despois et J.P. Parisot, Presses Universitaires de Bordeaux, pp.17-28 (2001).
– *De la naissance de la vie sur Terre à une vie universelle,* Brack, A., *in* Sur les traces du vivant : de la Terre aux étoiles, Eds. F. Raulin-Cerceau, P. Lena et J. Schneider, Le Pommier, pp. 71-95 (2002).
– *La chime de l'origine de la vie*, Brack, A., *in* L'origine de la vie sur Terre et dans l'Univers : Les traces du vivant, Ed. M. Gargaud, Presses Universitaires de Bordeaux (2003) pp. 61-81.