

# CAHIERS FRANÇOIS VIÈTE

Série I – N°4

2002

## *Exobiologie* *Aspects historiques et épistémologiques*

FLORENCE RAULIN CERCEAU & STÉPHANE TIRARD - *Présentation*

JEAN GAYON - *Préface*

MICHEL MORANGE - *Qu'est-ce que la vie ?*

MARIE-CHRISTINE MAUREL - *Notion d'Origines*

STÉPHANE TIRARD - *Les origines de la vie sur la Terre : un problème historique*

FLORENCE RAULIN-CERCEAU - *Histoire des concepts de la vie extraterrestre*

ANDRÉ BRACK - *Vers une vie plurielle*

FRANÇOIS RAULIN - *L'essor de l'exobiologie planétaire dans le système solaire*

JEAN SCHNEIDER - *L'exobiologie, l'imaginaire et le symbolique*

Centre François Viète  
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques  
Université de Nantes

## SOMMAIRE

- FLORENCE RAULIN CERCEAUET STÉPHANE TIRARD..... 3  
*Présentation*
- JEAN GAYON ..... 5  
*Préface*
- MICHEL MORANGE ..... 9  
*Qu'est-ce que la vie ?*
- MARIE-CHRISTINE MAUREL..... 23  
*Notion d'Origines*
- STÉPHANE TIRARD ..... 35  
*Les origines de la vie sur la Terre : un problème historique*
- FLORENCE RAULIN-CERCEAU ..... 49  
*Histoire des concepts de la vie extraterrestre*
- ANDRÉ BRACK..... 61  
*Vers une vie plurielle*
- FRANÇOIS RAULIN..... 81  
*L'essor de l'exobiologie planétaire dans le système solaire*
- JEAN SCHNEIDER ..... 93  
*L'exobiologie, l'imaginaire et le symbolique*

## VERS UNE VIE PLURIELLE

André BRACK\*

### Résumé

Sur Terre, le passage de la matière à la vie se fit avec des systèmes chimiques capables d'auto-reproduction et d'évolution. Deux voies sont explorées pour comprendre ce passage : la synthèse d'une vie artificielle en tube à essais et la recherche d'un deuxième exemple de vie sur un corps céleste présentant des conditions voisines de celles de la Terre primitive. Ces conditions existaient probablement sur Mars il y a 4 milliards d'années et existent peut-être encore aujourd'hui sous la calotte glaciaire d'Europe. Les molécules organiques détectées dans le milieu interstellaire et la découverte des planètes extrasolaires permettent d'envisager la présence de vie au-delà du système solaire.

L'idée d'une vie au-delà de la Terre est ancrée dans l'imaginaire humain depuis très longtemps. Épicure, vers 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 ».

---

\* Directeur de recherche au CNRS.  
Centre de Biophysique moléculaire, Orléans.

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* (Éditions 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 ». Mais 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 : ceux-ci prônent la simplicité.

Aujourd'hui, pour les chimistes, l'émergence de la vie est comparable à la formation spontanée d'un automate chimique à partir de molécules organiques constituées essentiellement de carbone, hydrogène, oxygène, azote (ou CHON) présentes dans l'eau, automates capables d'auto-reproduction (forme d'autocatalyse) et d'évolution vers des systèmes pérennes. Comme ces automates apparurent probablement il y a 4 milliards d'années pendant la phase de bombardement intense de la Terre (entre - 4,1 et - 3,8 milliards d'années), ils devaient nécessairement être suffisamment robustes et simples pour survivre à ces cataclysmes et éventuellement redémarrer plusieurs fois. Si tel est le cas, de tels automates doivent être reproductibles en tube à essais, et/ou sur une autre planète présentant un environnement voisin de celui de la Terre.

### **Recréer la vie en tube à essais : les molécules prébiotiques**

L'approche du chimiste apporte un éclairage particulier aux idées que l'on se fait des premières étapes du vivant. Le chimiste, par sa pratique de laboratoire, aborde cette question des origines sans convictions *a priori*, sans fidélité inébranlable à un concept : il émet des hypothèses qu'il essaie ensuite de confirmer ou infirmer par des faits expérimentaux ou des démonstrations. En l'occurrence, il va rechercher, de proche en proche, en l'absence de traces des événements prébiologiques, les différents types de fonctions qui ont pu être utilisés par les premiers systèmes vivants. Parallèlement, il essaie de reconstituer en laboratoire les molécules indispensables au fonctionnement d'une cellule, sur le modèle des cellules contemporaines : molécules de compartimentation, molécules catalytiques et molécules de l'information (plan de montage).

L'ensemble de ces données le conduit à proposer un scénario de l'émergence de la vie.

La vie apparut dans l'eau, et les premières molécules auto-reproductrices, ainsi que leurs précurseurs (molécules prébiotiques), furent probablement des composés organiques de type CHON, précurseurs des molécules biologiques contemporaines.

Les molécules d'eau, très abondantes dans le cosmos, participèrent vraisemblablement, à l'état liquide, aux mécanismes fondateurs de la vie primitive en échangeant des liaisons hydrogène avec les molécules organiques et en permettant leur diffusion. Les molécules organiques peuvent être élaborées à partir de molécules carbonées gazeuses (méthane, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone), azotées (azote, ammoniac) soumises à différentes formes d'énergie (décharges électriques, rayonnement UV ou cosmique, chaleur).

Le travail de reconstitution des molécules prébiotiques consiste donc à rechercher des milieux où les dérivés gazeux du carbone, comme le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone ou le méthane, peuvent réagir avec d'autres molécules simples comme l'hydrogène, l'ammoniac, l'eau pour former le formaldéhyde (le formol) et l'acide cyanhydrique (un poison violent), molécules susceptibles de conduire à une multitude de molécules organiques prébiotiques comme les acides aminés (Figure 1 page suivante).

L'atmosphère de la Terre primitive constitua peut-être un réacteur chimique propice à la synthèse des molécules organiques nécessaires à l'émergence de la vie. Cette hypothèse fut confortée, dans les années 1950, par les expériences du chimiste américain Stanley Miller, qui obtint quatre acides aminés, briques des protéines, en soumettant un mélange gazeux de méthane, d'hydrogène, d'ammoniac et d'eau à des décharges électriques. Il identifia également l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde, qui permettent d'accéder à la plupart des briques du vivant dans des conditions simples. Stanley Miller fut le premier à réaliser la synthèse d'acides aminés à partir d'un mélange de gaz et de décharges électriques avec la volonté délibérée de mimer l'origine de la vie<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Il est intéressant de noter que Walther Löb (1872-1916) décrivit dès 1913 la synthèse d'un acide aminé simple, la glycine, en soumettant un mélange de dioxyde de carbone, d'ammoniac et de vapeur d'eau à des décharges électriques. Löb ne se préoccupait pas d'origine de la vie, mais cherchait à comprendre l'assimilation de l'azote atmosphérique par les plantes. Son article intitulé « Über das Verhalten des Formamids unter der Wirkung des stillen Entladung: ein Beitrag zur Frage des Stickstoff-Assimilation », publié dans la revue allemande *Berichte* passa quasiment inaperçu et reste encore largement méconnu aujourd'hui.



gène sulfuré. L'énergie thermique est fournie en continu au système par le magma. Des traces d'acides aminés ont été obtenues en laboratoire à partir d'un mélange de méthane et d'azote en simulant les conditions des événements sous-marins. Des températures supérieures à 200°C sont nécessaires aux synthèses organiques, mais elles présentent en même temps un sérieux handicap car la survie des briques du vivant formées est très courte à ces températures. On peut alors envisager des phénomènes de trempe thermique, puisque la température de l'eau océanique au voisinage des sources est de l'ordre de quelques degrés Celsius.

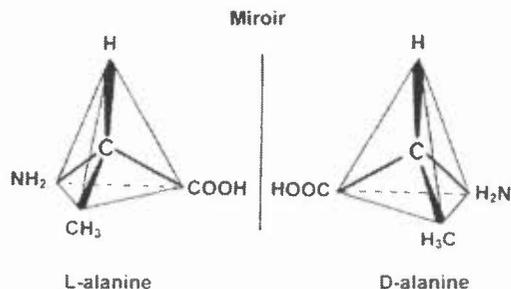
Les comètes ont pu apporter des quantités très importantes de molécules organiques extraterrestres. Les observations depuis la Terre ont permis la détection de l'acide cyanhydrique et du formaldéhyde dans la coma des comètes. En 1986, les analyses faites à bord des sondes russes Véga 1 et 2 et de la sonde européenne Giotto ont montré que la comète de Halley est riche en matériau organique, 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 d'autres molécules d'intérêt prébiotique ont été observés plus récemment dans les comètes Hyakutake en 1996 et Hale-Bopp en 1997. Les comètes se déplacent sur des orbites instables et succombent parfois au champ gravitationnel d'une planète. La collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en juillet 1994 en est un exemple récent. Ce genre de collision était vraisemblablement plus fréquent il y a 4 milliards d'années, les planètes orbitant autour du Soleil étant plus nombreuses. En percutant la Terre, les comètes ont pu fournir une fraction importante de l'eau et les grains cométaires ont dû fournir de grandes quantités de molécules carbonées.

La chimie qui se développe à la surface du noyau cométaire est encore mal connue. Lancée en 2003, la mission cométaire Rosetta devrait procéder en 2011 à l'analyse du noyau de la comète P/Wirtanen. Le vaisseau étudiera d'abord l'environnement de la comète en restant dans son sillage pendant plusieurs mois, puis une sonde s'y posera pour analyser la surface mais également la glace sous-jacente qui sera extraite par forage.

Une intéressante collection de micrométéorites a été extraite de la glace bleue de l'Antarctique et analysée par Michel Maurette à Orsay. Dans la gamme allant de 50 à 100  $\mu\text{m}$ , environ 80% des grains, vraisemblablement d'origine cométaire, renferment de la matière organique (2% de carbone) et n'ont pas fondu lors de la traversée atmosphérique. Des acides aminés y ont été détectés. On peut estimer à environ  $10^{17}$  tonnes la quantité

de carbone apportée par ces grains à la surface de la Terre pendant la phase de bombardement intense il y a 4 milliards d'années. A titre de comparaison, cette quantité représente environ 100 000 fois la quantité de carbone recyclée dans la biomasse actuelle. Les micrométéorites ont une composition voisine de celle des météorites carbonées comme, par exemple, la météorite de Murchison. Cette météorite renferme de nombreux composés organiques. Des composés d'intérêt biologique ont été identifiés : acides carboxyliques aminés, amides, alcools, etc. La météorite carbonée de Murchison, acides aminés, hétérocycles azotés, renferme plus de 70 acides aminés différents. Au nombre de ceux-ci on trouve 8 acides aminés protéiques.

Récemment, le minéralogiste américain John Cronin trouva un excès d'environ 9% d'énantiomères gauches pour certains acides aminés non protéiques présents dans cette météorite. La découverte d'un rayonnement infrarouge fortement polarisé dans un nuage moléculaire de la nébuleuse d'Orion pourrait expliquer l'origine extraterrestre de cet excès énantiomérique.



**Figure 2.** La plupart des acides aminés existent sous deux formes, images l'une de l'autre dans un miroir. Les protéines n'utilisent que la forme L (gauche)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Dans les molécules organiques, l'atome de carbone occupe généralement le centre d'un tétraèdre. Lorsque les groupes d'atomes aux quatre sommets du tétraèdre sont différents, l'image du tétraèdre dans un miroir ne lui est pas superposable et le carbone devient asymétrique. Il existe alors deux formes spéculaires (Figure 2) non superposables, images l'une de l'autre dans un miroir, appelées énantiomères (du grec *enantios*, opposé). Les molécules biologiques n'utilisent qu'une des deux formes spéculaires. On dit qu'elles sont homochirales (du grec *kheir*,

Des expériences spatiales ont été menées pour conforter l'hypothèse d'une importation d'acides aminés extraterrestres. Les études portent sur la stabilité des acides aminés dans l'espace et la polymérisation de dérivés d'acides aminés. Dans les expériences BIOPAN-1 et BIOPAN-2, des acides aminés présents dans la météorite de Murchison ont été exposés à l'état libre et associés à des minéraux poreux (argile) aux conditions de l'espace pendant 15 jours à bord de satellites automatiques russes FOTON. Les analyses effectuées après le vol révèlent une perte significative en acides aminés exposés au rayonnement solaire. Les déficits sont considérablement diminués lorsque les échantillons sont associés à des argiles. Un film d'argile d'épaisseur inférieure à 5  $\mu\text{m}$  ne protège plus efficacement les échantillons. De ce fait, des micrométéorites de taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$  ne devraient plus assurer une protection efficace contre le rayonnement UV solaire. Un troisième vol s'est déroulé sur la station MIR. Après trois mois en orbite terrestre, les acides aminés ont été détruits à hauteur de 50% en l'absence de protection minérale.

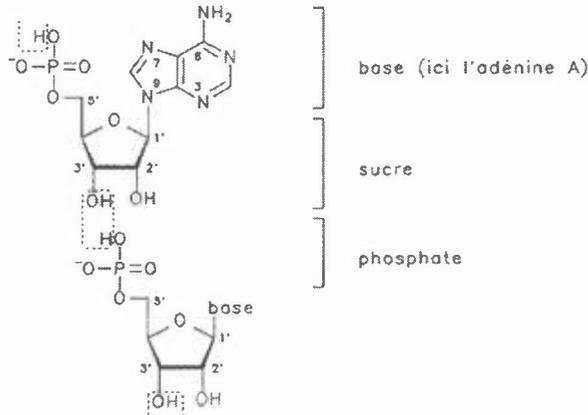
### **Recréer la vie en tube à essais : les molécules du vivant**

Les acides nucléiques actuels portent l'information génétique qui permet la formation d'une cellule-fille identique à la cellule-mère. Ce sont des chaînes très longues constituées par la répétition de nucléotides. Chaque nucléotide se compose d'un sucre (ribose doté d'un groupe OH pour l'ARN, désoxyribose pour l'ADN), d'une base (purine A, G ou pyrimidine T, U, C) et d'un groupe phosphate (Figure 3 page suivante).

L'établissement de liaisons hydrogène permet l'appariement spécifique des bases. Grâce à l'appariement des bases, l'ADN adopte une conformation stable en double hélice constituée par l'association tête-bêche de deux brins polynucléotidiques complémentaires. L'appariement des bases fournit également à l'ADN le moyen de transférer l'information qu'il porte imprimée dans sa séquence par un mécanisme d'auto-réplication : les deux brins complémentaires se séparent et chacun d'eux sert de matrice pour la synthèse d'une nouvelle chaîne. La copie se fait avec une excellente précision puisque le taux d'erreur de traduction est de l'ordre d'un acide aminé sur dix mille.

---

main). Une vie racémique qui utiliserait indifféremment et simultanément les deux énantiomères gauches et droits des molécules semble très improbable.



**Figure 3.** Chaque nucléotide se compose d'un groupe phosphate, d'un sucre et d'une base hétérocyclique.

La grande majorité des travaux de reconstitution en laboratoire d'acides nucléiques prébiotiques porte sur les acides nucléiques à ribose (ARN) car ils sont considérés comme étant plus anciens, plus primitifs, que les ADN à désoxyribose. Le phosphore est présent dans les roches ignées terrestres sous forme de fluoroapatite (un fluorophosphate de calcium) qui représente 0,6 % de la masse minérale totale. La chloroapatite est le phosphate minéral le plus abondant dans les météorites. La fluoroapatite n'est pratiquement pas soluble dans l'eau à pH 7, mais la solubilité peut être fortement augmentée par complexation avec un diacide comme, par exemple, l'acide oxalique.

Les bases puriques sont obtenues facilement à partir de l'acide cyanhydrique, ou en soumettant un mélange gazeux de méthane, d'éthane et d'ammoniac à des décharges électriques. Toutefois, les rendements de synthèse sont très faibles. Les bases puriques et pyrimidiques sont présentes dans les météorites et peut-être dans les comètes. La synthèse des sucres à partir de formaldéhyde fournit un mélange très complexe dans lequel le sucre recherché est très minoritaire. En décembre 2001, le minéralogiste George Cooper a décrit pour la première fois la présence d'un sucre (la dihydroxyacétone) et de plusieurs sucre-alcools (érythritol, ribitol) et sucre-acides (acide ribonique, acide gluconique) dans la météorite de Murchison, mais le ribose de l'ARN n'y a pas été détecté. La synthèse de nucléosides, combinaison covalente de la base et du ribose, peut être réalisée en chauff-

fant un mélange de ribose et de purine à l'état solide. Les rendements sont de l'ordre de quelques pourcents. Cependant, la base se lie en plusieurs endroits du sucre, sans préférence marquée pour la liaison naturelle. Signalement qu'aucune synthèse de nucléosides à pyrimidine n'a été décrite à ce jour. La fixation du groupe phosphate au nucléoside peut-être obtenue par chauffage. Le groupe phosphate se fixe sur le ribose mais sans aucune spécificité.

La formation d'une chaîne d'acide nucléique requiert l'élimination d'une molécule d'eau entre le groupe phosphate et le sucre. Le chimiste américain James Ferris a découvert une argile qui catalyse efficacement la condensation des nucléotides. La réplication chimique a été étudiée d'une manière intensive par le chimiste Leslie Orgel. Par exemple, les brins préformés de poly C (un polyribonucléotide à pyrimidine) sont capables de sélectionner les nucléotides complémentaires G (à purines) pour former une double hélice grâce à l'appariement des bases G...C. Les nucléotides G organisés le long de poly C peuvent alors se lier les uns aux autres, car la géométrie hélicoïdale amène les groupes réactifs en proche voisinage. La condensation est efficace et conduit à la formation de liaisons naturelles. La réaction est hautement spécifique, car seul le nucléotide activé G complémentaire de la matrice poly C est incorporé; si l'on présente à la matrice un cocktail de nucléotides, le nucléotide complémentaire est incorporé 100 à 500 fois plus efficacement. En l'absence de matrice, la condensation de G activé est très peu efficace et conduit à un mélange complexe de produits de petite taille.

La réplication chimique, non enzymatique, est donc possible. Cependant, elle se heurte encore à un certain nombre de difficultés. L'effet de matrice ne s'exerce qu'à partir d'une matrice préformée renfermant au moins 60 % de pyrimidine, les matrices à purine étant incapables de diriger la synthèse de nucléotides. Les chaînes-filles sont, de ce fait, constituées majoritairement de purines et sont donc stériles. Par ailleurs, dans les expériences de réplication chimique, la matrice est constituée de sucres D et les nucléotides activés sont également D. En alimentant la matrice droite avec des nucléotides L, la condensation est peu efficace. En utilisant un mélange racémique renfermant autant de nucléotides D que de nucléotides L, on observe une inhibition presque totale de la réaction car les nucléotides L empoisonnent la condensation des nucléotides D. La réplication chimique ne se développe qu'avec des molécules déjà triées, situation peu plausible sur la Terre primitive, compte tenu des données dont nous disposons à l'heure actuelle.

Les chimistes ont alors cherché à exploiter des analogues des acides nucléiques biologiques. Des travaux remarquables menés par le chimiste suisse Albert Eschenmoser, portant sur le rôle possible du phosphate de glycolaldéhyde ( $\text{CHO-CH}_2\text{O-PO}_3\text{H}_2$ ) dans l'évolution chimique, montrent que ce composé conduit facilement en présence de formaldéhyde à un sucre ribopyranose, c'est-à-dire un cycle oxygéné à 6 atomes. Il reste maintenant à montrer que les nucléotides à pyranose peuvent emmagasiner et transférer l'information de séquence comme le font les nucléotides biologiques.

Dans une cellule contemporaine, la copie de l'information chimique est assurée par des protéines chimiquement actives, les enzymes. Les 20 acides aminés utilisés par les enzymes, de type  $\text{NH}_2\text{-CHR-COOH}$ , comportent une fonction amine  $\text{NH}_2$  et une fonction acide  $\text{COOH}$  séparées par un seul atome de carbone. Ils diffèrent par la nature du substituant R. Celui-ci porte quelquefois une fonction chimiquement active, siège de l'activité catalytique. Les acides aminés ayant plusieurs atomes de carbone entre les fonctions amine et acide et les acides aminés disubstitués qui ont deux substituants carbonés sur l'atome de carbone central ne sont pas utilisés. Comme déjà mentionné, l'atome de carbone central est asymétrique. Pour chaque acide aminé, à l'exception de la glycine, il existe deux composés appelés énantiomères L et D. Les protéines n'utilisent que les énantiomères L. Une chaîne peptidique se forme par élimination d'une molécule d'eau entre les fonctions amine et acide des acides aminés. La chimie des peptides offre toute une panoplie d'agents d'activation utilisés pour condenser les acides aminés dans les solvants organiques. Dans l'eau, le nombre des agents de condensation est beaucoup plus limité, surtout lorsque l'on ne retient que les agents ayant pu être présents sur la Terre primitive. Des chercheurs japonais ont fait passer en circuit fermé une solution de glycine et de chlorure de cuivre d'une chambre de réaction portée à  $220^\circ\text{C}$  et 200 bars à une chambre maintenue à  $0^\circ\text{C}$  et 200 bars pour mimer les conditions de trempes thermiques qui règnent à proximité des sources chaudes sous-marines. Ils ont pu ainsi polymériser la glycine jusqu'au stade de l'hexamère.  $\sphericalangle 220^\circ\text{C}$ , en absence de trempes thermiques, on n'observe que la décomposition chimique de l'acide aminé. Le chimiste américain James Ferris a obtenu de longues chaînes peptidiques de 55 acides aminés en présence d'illite, une argile particulière. Dans notre équipe, à Orléans, nous avons montré que l'eau, par ses propriétés chimiques, oriente la réaction de polymérisation et permet la sélection des acides aminés protéiques.

Dans les protéines, la chaîne peptidique adopte essentiellement deux géométries rigides, l'hélice  $\alpha$  et les feuillets  $\beta$ . L'hélice  $\alpha$  est à enroulement

droit et est stabilisée par des liaisons hydrogène qui s'établissent à l'intérieur d'une même chaîne. Les feuillets  $\beta$  résultent de l'association de plusieurs chaînes reliées par des liaisons hydrogène. Les hélices  $\alpha$  sont faciles à obtenir : il suffit de prendre un acide aminé hydrophile (soluble dans l'eau car portant une fonction ionisable sur la chaîne latérale) et un acide aminé hydrophobe (très peu soluble dans l'eau) et de les polymériser sans se préoccuper de l'ordre d'enchaînement. Lorsque les chaînes sont suffisamment longues, une vingtaine d'acides aminés environ, elles adoptent dans l'eau la conformation en hélice  $\alpha$ . En revanche, les polypeptides construits sur une alternance stricte d'acides aminés hydrophiles et hydrophobes adoptent tous une structure en feuillet  $\beta$  dans l'eau par agrégation des groupes hydrophobes. Lorsque l'on ajoute de l'alcool à l'eau, la force des interactions hydrophobes qui génèrent les feuillets  $\beta$  s'atténue et le polypeptide adopte alors une conformation hélicoïdale  $\alpha$ .

C'est donc l'eau qui, par ses propriétés physiques spécifiques, permet la structuration en feuillets  $\beta$ . Les polypeptides à séquence alternée, capables de ce fait de prendre la géométrie  $\beta$ , présentent une bonne stabilité chimique. Dans les mêmes conditions expérimentales, les chaînes renfermant les mêmes acides aminés liés dans le désordre, sont dégradées beaucoup plus facilement. La dégradation est donc sélective. Elle a peut-être permis la sélection de séquences alternées, plus résistantes, contribuant ainsi à restreindre la complexité chimique au cours de l'évolution. La formation de feuillets  $\beta$  requiert l'utilisation d'acides aminés de même configuration, tous L ou tous D. Lorsque les séquences alternées renferment à la fois des énantiomères L et D distribués au hasard le long des chaînes, seuls les segments contenant au moins six acides aminés L (ou D) consécutifs s'agrègent en îlots  $\beta$ , optiquement purs. De nombreux peptides courts et certains polypeptides simples manifestent une activité catalytique, c'est-à-dire qu'ils sont capables d'accélérer certaines réactions chimiques. Par exemple, nous avons montré que les peptides basiques courts ne renfermant que deux acides aminés différents coupent les acides ribonucléiques.

Les membranes assurent la cohésion de la cellule. Elles sont formées de molécules amphiphiles qui possèdent à la fois une tête polaire hydrophile et des chaînes carbonées hydrophobes. Les acides gras forment des vésicules à condition que la chaîne hydrocarbonée renferme au moins dix atomes de carbone. Toutefois, les membranes produites à l'aide de ces composés amphiphiles simples ne sont stables que dans une gamme étroite de conditions expérimentales, de sorte que des composés chimiques plus complexes ont vraisemblablement été nécessaires pour conférer une bonne

stabilité aux membranes primitives. Les oligomères courts de l'isoprène représentent une piste intéressante. Leurs dérivés entrent dans la composition de certaines vitamines (E, K1, par exemple), de la chlorophylle, mais surtout dans celle des lipides de certaines archaebactéries (*halobacterium cutirubrum*, par exemple). À Strasbourg, l'équipe du chimiste français Guy Ourisson a obtenu des vésicules en fixant deux chaînes de diisoprène sur un groupe phosphate.

L'analyse des météorites carbonées permet de détecter la présence d'acides gras à huit atomes de carbone dans les extraits de la météorite de Murchison. Certaines substances organiques extraites des chondrites carbonées de Murchison et d'Allende forment, en milieu aqueux, des structures cloisonnées qui ressemblent à des membranes.

### **Un monde d'ARN**

Dans les années 1980, le biologiste américain Thomas Cech découvre que certains ARN étaient capables non seulement de véhiculer l'information, mais aussi d'exercer une activité catalytique à l'instar des enzymes protéiques. Très vite se développa l'idée d'un monde d'ARN berceau de la vie sur Terre. Le monde de l'ARN a tout au moins dû constituer un épisode dans la préhistoire de la vie. Des travaux remarquables, menés par les équipes des biologistes américains Gerald Joyce et Jack Szostak, montrent que l'évolution dirigée *in vitro* d'un ribozyme permet d'isoler des ribozymes mimant, ou presque, les enzymes protéiques. La démonstration récente 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. Reste maintenant à expliquer la formation prébiotique de l'ARN. Il est raisonnable de penser que l'émergence du monde de l'ARN a été préparée par des systèmes catalytiques qui restent à découvrir.

### **Rechercher une vie proche de la vie terrestre au-delà de la Terre**

Les observations faites par les missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder, Mars Global Surveyor et Odyssey indiquent clairement que Mars, dans sa jeunesse, a abrité de l'eau liquide à sa surface d'une manière continue. 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 ultraviolet solaire. La présence d'oxydants exclut toute accumulation de molécules organiques à la surface de la planète. En revanche, deux météorites martiennes renferment des molécules organiques. Même si les indices trouvés dans l'une d'elle sont trop ambigus pour conclure à l'existence passée d'une vie bactérienne sur Mars, les deux météorites martiennes témoignent de l'existence de molécules organiques dans le sol martien. Les ingrédients qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre étaient probablement rassemblés 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. Les océans ont dû générer d'importants gisements sédimentaires. Ces sédiments constituent des sites privilégiés pour la recherche de vestiges des molécules organiques et des bactéries fossilisées, à condition qu'ils soient à l'abri des rayons ultraviolets et des oxydants.

La NASA et le CNES ont étudié conjointement un programme de retour d'échantillons martiens. De son côté, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a confié à un Groupe d'Exobiologie le soin de définir la station idéale pour la recherche de traces de vie sur Mars. La priorité a été donnée au prélèvement et à l'analyse *in situ* des échantillons pour y rechercher des molécules organiques et des bactéries fossilisées. Le laboratoire *in situ* permettra le prélèvement par forage d'échantillons protégés des UV et des oxydants (gros rochers, proche sous-sol) et leur analyse organique, minérale et isotopique. Une version simplifiée de la station d'analyse martienne, appelée Beagle 2 (en hommage à Charles Darwin) par le Britannique Colin Pillinger, sera embarquée dès 2003 sur la mission européenne Mars Express.

Le vaisseau spatial Galileo a fourni de très belles images d'Europe, l'une des lunes de Jupiter. 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. Les images de Galileo montrent des blocs de banquise ayant pivoté sur eux-mêmes, vraisemblablement sur un sous-sol fluide. Selon l'un des modèles proposés, 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 serait apportée par les fortes

marées internes générées par les variations de l'important champ gravitationnel de Jupiter. Un transfert de chaleur du cœur planétaire vers la surface semblable à celui des événements hydrothermaux des océans terrestres permettrait la synthèse de molécules organiques. Une chimie organique prébiotique de type terrestre a donc pu se développer dans l'océan sous-glaciaire et conduire à l'apparition de la vie. Si Europe a maintenu une activité de marée et une activité hydrothermale sous-glaciaire, la vie bactérienne y est peut être encore active aujourd'hui. Europe apparaît donc de plus en plus comme un lieu privilégié du système solaire pouvant héberger de l'eau liquide et une vie bactérienne en activité. Des missions vers Europe sont actuellement à l'étude.

### **Et au-delà du système solaire ?**

Près de 110 molécules différentes ont été identifiées à ce jour dans les nuages denses de gaz et de poussières du milieu interstellaire. Il est généralement admis que le catalogue des molécules connues ne représente qu'une fraction des molécules présentes, la détection étant biaisée par le fait que seules sont facilement observables les molécules possédant un fort moment dipolaire. Les molécules interstellaires sont détectées par leurs raies spectrales dans l'infrarouge ou par leurs émissions dans les longueurs d'onde millimétriques. Parmi ces molécules, 83 contiennent du carbone et seulement 7 du silicium. Voilà de quoi décourager les auteurs de science-fiction: la chimie du silicium semble être moins inventive que celle du carbone et ne semble pas, à première vue, être capable de générer une vie élaborée, comparable à celle que nous connaissons.

Que reste-t-il de ces molécules après la formation mouvementée d'un système stellaire ? L'histoire de ces molécules depuis le milieu interstellaire jusqu'aux planètes, astéroïdes et comètes du système solaire est actuellement l'objet d'un intéressant débat basé essentiellement sur des mesures de rapports isotopiques. Certaines molécules auraient survécu dans les régions froides aux confins du système solaire ; d'autres auraient été complètement remodelées lors de l'accrétion.

Quoi qu'il en soit, le milieu interstellaire nous enseigne que la chimie organique est universelle. Mais existe-t-il d'autres niches susceptibles d'héberger de l'eau à l'état liquide en dehors du système solaire ? En septembre 1995, Mayor et Queloz, à la suite du suivi systématique des vitesses d'une centaine d'étoiles à l'Observatoire de Haute-Provence découvraient un corps, d'une masse de la moitié de Jupiter, en orbite autour de l'étoile 51

Pégase. Toutefois, l'objet présumé serait très proche de l'étoile et aurait 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 tournant autour des étoiles 70 Virgin (dans la constellation de la Vierge) et 47 Ursa (dans la constellation de la Grande Ourse) sur des orbites plus éloignées. La planète 70 Vir, 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. A la date de novembre 2002, le catalogue comptait une centaine de planètes géantes extrasolaires.

### **Comment détecter la vie extraterrestre ?**

L'enrichissement isotopique en carbone  $^{12}\text{C}$  et l'homochiralité des molécules biologiques sont certainement les signatures les plus remarquables de la vie terrestre. Grâce aux missions spatiales, les corps du système solaire sont devenus accessibles à l'analyse organique, minérale et isotopique directement sur le terrain. L'examen minéralogique des roches permet d'identifier des structures minérales macroscopiques résultant de l'activité bactérienne (biominéraux, comme par exemple les stromatolithes) mais aussi des microfossiles de bactéries. Enfin, la recherche d'anomalies dans l'environnement planétaire comme, par exemple, des teneurs particulièrement élevées en méthane dans l'atmosphère, permettrait de suspecter une vie bactérienne active.

Pour les planètes extrasolaires, la recherche d'une forme de vie est plus difficile. 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. La présence permanente d'oxygène est liée à la vie qui se développe à la surface de la Terre. La planète recherchée doit, par exemple, posséder de l'eau et de l'oxygène identifiable par sa raie caractéristique à 760 nm dans le spectre visible de la planète. Pour des raisons pratiques, il paraît plus judicieux de rechercher la signature de l'ozone dans le spectre infrarouge à 9,6  $\mu\text{m}$ . L'ESA étudie un interféromètre spatial infrarouge à 5-6 télescopes, Darwin-IRSI, qui permettra de distinguer le spectre de la planète de celui de l'étoile. La NASA étudie un dispositif similaire, appelé mission TPF (Terrestrial Planet Finder). Enfin, la détection d'un signal électromagnétique « intelligent » apporterait la preuve indéniable de l'existence d'une vie extrasolaire. À ce titre, le programme d'écoute SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence) mérite d'être sou-

tenu même si, *a priori*, la probabilité pour qu'une vie bactérienne extrasolaire évolue vers des systèmes vivants exploitant l'électromagnétisme reste très faible.

### La panspermie

La migration interplanétaire de bactéries contribuerait, elle aussi, à la dispersion de la vie dans l'univers. Bien qu'il soit difficile de prouver que des bactéries migrent effectivement d'une planète à une autre, migration appelée panspermie, on peut néanmoins essayer d'estimer les chances de survie au cours des trois étapes clés du processus. Ces étapes sont : (1) l'évasion de la planète mère, (2) le voyage dans l'espace, (3) l'entrée atmosphérique et l'arrivée au sol. Les météorites lunaires et les météorites SNC probablement d'origine martienne prouvent que l'expulsion de roches planétaires est possible. Des expériences en laboratoire simulant les accélérations subies au moment de l'évasion et les impacts subis au moment de « l'atterrissage » ont montré que les spores bactériennes survivent bien à ces traitements de choc.

Pour étudier la survie des bactéries dans l'espace, divers types de micro-organismes (spores bactériennes et spores de champignons), mais aussi des virus et des molécules biologiques, ont été exposés dans l'espace à bord des satellites Gemini, Apollo, Spacelab, Long-Duration Exposure Facility (LDEF), Foton et Eureca.

*A priori*, l'espace apparaît comme un milieu très hostile en raison du vide poussé, du rayonnement solaire et cosmique et des températures extrêmes. Les expériences spatiales ont montré que certains microorganismes résistent bien au vide de l'espace, à condition qu'ils soient protégés des radiations UV solaires. Par exemple, les spores de *Bacillus subtilis*, protégées des UV, ont survécu pendant 6 ans dans l'espace.

Le champ radiatif du système solaire a une composante solaire et une composante cosmique. Il est composé d'électrons, de particules alpha et d'ions lourds cosmiques. Ces derniers sont les plus dangereux et fixent, en fait, la durée de survie d'une bactérie dans l'espace. La durée maximale dont dispose une bactérie avant d'être atteinte par une particule a été estimée à  $10^5$ - $10^6$  années. Durant leur voyage spatial, les bactéries ont aussi à affronter la température extrêmement basse de l'espace (4K). En fait, des expériences menées en laboratoire dans des conditions simulant les conditions du milieu interstellaire ont montré que les effets des UV étaient diminués à ces très basses températures. Des taux de survie exceptionnellement

élevés ont été observés en combinant UV, vide et basses températures. Dans ces conditions, les spores bactériennes semblent pouvoir survivre pendant des centaines d'années.

## Conclusion

Les avancées significatives réalisées dans des disciplines très variées ont donné une cohérence à l'étude de la vie dans l'univers. Plus particulièrement, les recherches menées sur l'origine de la vie indiquent que les conditions qui ont participé à son émergence sur Terre existaient probablement sur Mars à la même époque. Par ailleurs, il existe peut-être des systèmes hydrothermaux produisant des molécules prébiotiques au fond de l'océan sous-glaciaire d'Europe. Enfin, les biologistes ont découvert que les bactéries sont capables de se développer dans des conditions extrêmes (de température, pH, ou pression, environnements à forte salinité, ou sédiments profonds), ce qui élargit considérablement l'éventail des environnements hospitaliers à la vie.

Pourtant, à ce jour, la vie n'est connue qu'en un seul exemplaire et de nombreuses interrogations demeurent quant à son origine et à son évolution précoce. Par exemple, la température à laquelle apparurent les automates chimiques primitifs est une donnée importante qui reste à déterminer. Les bactéries fossiles les plus anciennes ont été découvertes dans des roches sédimentaires âgées de 3,4-3,5 milliards d'années (région de Barberton dans l'Est de l'Afrique du Sud et région de Pilbara dans le Nord-Ouest de l'Australie) associées à des systèmes hydrothermaux. La découverte de micro-organismes hydrothermaux très anciens suggère que la vie est née à une température supérieure à 30°C. Cette dernière a-t-elle pu atteindre 113°C, température record à laquelle se développent certaines bactéries hyperthermophiles modernes ? Comme ces bactéries extrémophiles possèdent une enzyme qui leur est propre et qui est apparue relativement récemment, elles ne peuvent pas être considérées comme des bactéries ancestrales mais plutôt comme des bactéries thermophiles vivant entre 30 et 80°C qui se sont adaptées aux températures extrêmes. Par contre, les fossiles des micro-organismes hydrothermaux rendent tout à fait plausible une origine de la vie à des températures comprises entre 30 et 80°C.

Le degré de complexité des automates primitifs demeure aujourd'hui la grande inconnue. S'il a suffi de l'auto-organisation d'un petit nombre de molécules pour démarrer la vie, son démarrage a dû être rapide et ses chances d'apparition sur Terre et sur tout corps céleste présentant un

environnement voisin sont réelles. Mais, s'il a fallu la rencontre aléatoire de plusieurs milliers de molécules, l'événement risque d'être unique et restreint à notre planète. En plus de son immense attrait culturel, la découverte du premier second exemple de vie, artificiel ou naturel, conforterait l'idée de simplicité associée aux mécanismes mis en jeu. Aujourd'hui, les efforts entrepris dans les laboratoires de chimie, l'exploration de Mars et d'Europe et la découverte des exoplanètes permettent un réel optimisme.

Comment ont évolué les automates une fois mis en place ? L'évolution a permis au système de se perfectionner en se complexifiant et de s'adapter aux changements de l'environnement. Un perfectionnement continu a-t-il été nécessaire ? Intuitivement, on peut penser que le perfectionnement était nécessaire jusqu'à l'apparition du code génétique, véritable moteur universel du fonctionnement cellulaire. Après, l'évolution a-t-elle pu être neutre ? Quel rôle a joué la pression de l'environnement et de ses variations (Charles Darwin) comparé à celui des impacts cataclysmiques (Stephen Gould) ? Autant de questions qui touchent à l'histoire de la vie terrestre et qui pourraient trouver des éclairages nouveaux avec la découverte de vies extraterrestres.

Centre de Biophysique Moléculaire, CNRS, Orléans,  
brack@cnr-orleans.fr

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] BRACK André, « Origine de la vie », *Encyclopaedia Universalis*, supplément, 1999, pp. 743-750.
- [2] BRACK André, « Sommes-nous seuls ? », Bordas, Paris, 1999, pp. 92-15.
- [3] BRACK André, MATHIS Paul., *La chimie du vivant. De la protéine à la photosynthèse*, Quatre à Quatre, Le Pommier, 2000.
- [4] *L'Astronomie*, Spécial Exobiologie, Vol. 115, Juin 2001.

# Cahiers François Viète

La revue du *Centre François Viète*  
équipe de recherche en  
*Épistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques*  
de l'Université de Nantes  
(EA 1161)  
[www.cfv.univ-nantes.fr](http://www.cfv.univ-nantes.fr)

Les *Cahiers François Viète* publient chaque année les principales conférences du séminaire d'Histoire des sciences et des techniques du Centre. Des numéros spéciaux peuvent être consacrés à des thèmes particuliers, correspondant par exemple à des actes de colloque.

**Responsable de publication** - Stéphane Tirard

## **Comité de rédaction**

Guy Boistel (Nantes)      Jacques Gapaillard (Nantes)  
Céline Briée (Nantes)      Jean-Louis Kerouanton (Nantes)  
Olivier Bruneau (Nancy)      Pierre Teissier (Nantes)

**Secrétaire de rédaction** - Sylvie Guionnet

# Numéros Parus

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Série I, N°1 (1999)</b> | L'agro-alimentaire : histoire et modernité |
| <b>Série I, N°2 (2001)</b> | Varia                                      |
| <b>Série I, N°3 (2002)</b> | Varia                                      |

ISBN : 2-86939-202-8