

**Texte de la 2<sup>ème</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs réalisée le 2 janvier 2000  
par André Brack**

**La vie : origine et distribution possible dans l'Univers**

Le passage de la matière inanimée à la vie se fit vraisemblablement dans l'eau il y a 4 milliards d'années lorsque apparurent les premières molécules capables de s'auto-reproduire et d'évoluer. Empédocle explique ainsi l'apparition de l'homme: des têtes sans jambes, des jambes sans têtes, des bras, des torsos, 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 moléculaire, l'émergence de la vie sur Terre peut être comparée à l'élaboration spontanée d'un édifice moléculaire à partir de molécules éparses. Par le jeu du hasard, un certain nombre de molécules s'auto-organisèrent et formèrent une structure chimique capable d'assembler d'autres molécules pour générer une deuxième structure à son image, transmettant ainsi le plan de montage. Par suite de légères erreurs de montage, une structure plus apte à se reproduire apparut et devint l'espèce dominante. Quelle structure chimique ? Quel plan de montage ? Avec quelles molécules ? Combien de molécules ? Pour pouvoir répondre à ces questions, les scientifiques portent leurs efforts dans trois directions : recréer l'acte chimique originel en tube à essais, retrouver des formes fossilisées de cet acte chimique originel et rechercher des formes de vie voisines sur d'autres corps célestes.

**1/ Recréer la vie originelle en tube à essais**

Les premières molécules auto-reproductrices, et leurs précurseurs, furent probablement des molécules organiques construites sur un squelette d'atomes de carbone. Les atomes de carbone présentent deux caractéristiques qui sont d'excellentes signatures du vivant. L'atome de carbone possède deux isotopes stables  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$ . La transformation enzymatique du dioxyde de carbone et des carbonates en carbone organique par les plantes et les microorganismes privilégie systématiquement l'isotope 12 du carbone. D'autre part, 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. Le carbone devient asymétrique. Il existe alors deux formes spéculaires 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*, main). La vie terrestre viole le principe de parité: la vie et son image dans un miroir n'existent pas avec une égale probabilité. Une vie racémique (de *racemus*, raisin) qui utiliserait indifféremment et simultanément les deux énantiomères gauches et droits des molécules semble très improbable.

Les molécules carbonées ont pu être fabriquées dans l'atmosphère à partir de méthane. Cette hypothèse fut confortée par les expériences de simulation de Miller. Les géochimistes privilégient à présent une atmosphère primitive riche en dioxyde de carbone. Dans une telle atmosphère, la production des briques du vivant est peu efficace. Pour Günter Wächtershäuser, les molécules organiques primordiales se formèrent par réduction du dioxyde de carbone à partir de sulfures d'hydrogène et de fer. En laboratoire, ces deux sulfures et le dioxyde de carbone réagissent pour donner de l'hydrogène et une variété de composés carbonés soufrés. Dans certaines conditions, il se forme également des esters soufrés qui ont pu constituer, selon Christian de Duve, la principale source énergétique du monde vivant primitif.

Cependant, la température élevée, jusqu'à 350°C, est un sérieux handicap car les molécules organiques ne sont pas stables à ces températures. On peut envisager des phénomènes de trempe thermique en continu dans l'eau environnante à une température proche de 0°C. Cette hypothèse est en train d'être vérifiée en laboratoire.

La chimie organique est particulièrement active dans le milieu interstellaire. Les radioastronomes y ont identifié 83 molécules organiques différentes. Les comètes et les météorites ont pu apporter des quantités très importantes de molécules organiques extraterrestres. Huit des vingt acides aminés constituant les protéines ont été identifiés dans la météorite de Murchison. Récemment, John Cronin trouva un excès d'environ 9% d'énantiomères gauches pour certains acides aminés non protéiques présents dans cette météorite. La découverte récente d'un rayonnement infrarouge fortement polarisé dans la région de formation de l'étoile Orion OMC-1 suggère que le système solaire, pendant la phase d'accrétion, a pu être exposé à une forte polarisation circulaire, polarisation due à la diffraction du nuage de poussières. Une polarisation à des longueurs d'onde plus courtes aurait pu détruire les acides aminés droits et seuls les acides aminés gauches auraient été déposés à la surface de la Terre par les météorites, les comètes ou les grains interplanétaires.

Une intéressante collection de micrométéorites a été récemment extraite de la glace bleue de l'Antarctique et analysée par Michel Maurette. Dans la gamme allant de 50 à 100µm, 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 30.000 milliards de 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. A titre de comparaison, cette quantité représente environ 30 fois la quantité de carbone recyclée dans la biomasse actuelle. Pour conforter l'hypothèse d'une importation d'acides aminés extraterrestres, nous avons mené avec le CNES et l'ESA des expériences spatiales en orbite basse à bord de deux satellites russes automatiques FOTON (10 jours) et de la station MIR (3 mois). Les études ont porté sur la stabilité des acides aminés dans l'espace (dégradation chimique et racémisation) et la polymérisation de dérivés d'acides aminés et de peptides. Les résultats montrent une bonne stabilité des acides aminés lorsqu'ils sont protégés des UV par des surfaces minérales.

L'unité du vivant contemporain et, en particuliers, l'universalité du plan de montage suggèrent que la structure chimique originelle ressemblait déjà à une cellule. A partir des petites molécules organiques, les chimistes se sont efforcés de reconstituer en laboratoire les trois familles de pièces indispensables au fonctionnement de la cellule. Ils ont réussi à reconstituer deux des trois familles de molécules et ont montré que l'eau joue un double rôle de solvant et de réactif chimique. Ils n'ont pas réussi à reconstituer le plan de montage (ARN et ADN). Les chimistes estiment que la structure chimique originelle devait être plus simple qu'une cellule et qu'un monde d'ARN dans lequel les ARN, à l'image des ribozymes, auraient été capables non seulement de véhiculer l'information mais aussi d'exercer une activité catalytique à l'instar des enzymes. En effet, la synthèse spontanée de l'ARN dans les conditions de la Terre primitive apparaît comme très difficile, donc peu probable. La structure chimique originelle devait aussi être suffisamment simple et robuste pour pouvoir supporter les gros impacts météoritiques et cométaires et résister aux UV solaires qui, à l'époque, traversaient l'atmosphère sans être filtrés par l'ozone.

La reconstitution de la vie primitive en tube à essais est difficile car elle se heurte à la flèche du temps et à sa durée. A cause de la flèche du temps et de l'évolution, la vie primitive était nécessairement très différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. A cause du facteur

durée, la chimie en laboratoire ne pourra jamais reproduire strictement à l'identique les conditions de la chimie prébiotique. Les expériences permettent de conforter des hypothèses mais ne permettent pas de leur conférer une réalité historique indiscutable.

## **2/ Rechercher des formes fossilisées de la vie terrestre primitive**

Les signatures des tout premiers systèmes vivants terrestres ont été effacés par l'histoire géologique turbulente de la Terre et en particulier par la tectonique de plaques qui fait passer la plaque océanique riche en sédiments sous la plaque continentale, la présence permanente de ruissellements d'eau, le rayonnement UV solaire non filtré par la couche d'ozone (l'oxygène était absent de l'atmosphère primitive), par l'oxygène produit ultérieurement en grande abondance par les systèmes vivants et par la vie elle-même lorsqu'elle a conquis l'ensemble de la planète. Les microorganismes fossiles les plus anciens ont été découverts en Australie par l'Américain William Schopf dans les stromatolithes fossilisés. Ils sont vieux de 3,465 milliards d'années. A cette époque, la vie microbienne était présente sous forme de cyanobactéries filamenteuses, vraisemblablement photoautotrophes, c'est-à-dire capables de fabriquer leurs constituants fondamentaux à partir du dioxyde de carbone atmosphérique. Cette vie primitive était déjà diversifiée puisque onze variétés (taxa) différentes ont été observées. Les roches sédimentaires les plus anciennes ont été trouvées au Sud-Ouest du Groënland. Les sédiments d'Isua datent de 3,8 milliards d'années, ceux d'Akilia de 3,85 milliards d'années. Ils témoignent de la présence permanente d'eau liquide, de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et renferment des kérogènes, molécules organiques complexes. L'enrichissement en carbone 12 du carbone organique présent dans ces sédiments est troublant. L'enrichissement suggère, mais ne prouve pas, l'existence d'une activité photosynthétique, donc d'une vie primitive, il y a 3,8 milliards d'années. Ces maigres indices géologiques permettent de penser que la vie, à l'origine, était déjà fondée sur l'utilisation de l'eau et des molécules organiques mais ne permettent pas de comprendre le début de la vie terrestre.

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

S'il a suffi de quelques molécules pour démarrer la vie, son démarrage a dû être rapide et les chances d'apparition sur tout corps céleste présentant un environnement semblable à celui de la Terre primitive sont réelles. Chercher une vie extraterrestre, c'est d'abord 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. 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 site biotique possible.

### *1) Sur Mars ?*

Les observations faites par les missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder et Mars Global Surveyor indiquent clairement que Mars a abrité dans sa jeunesse de l'eau liquide à sa surface d'une manière permanente. La présence permanente d'eau suppose une température constamment supérieure à 0°C, température atteinte probablement grâce à l'existence d'une atmosphère dense de dioxyde de carbone 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 photolyse 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 3m. 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 n'ayant pas de couche d'ozone protectrice. Cette décomposition par photolyse directe ne devrait toutefois affecter que la première dizaine de microns de la surface des grains du sol et des roches. Par contre, les météorites SNC, EETA 79001 et ALH 84001, très probablement d'origine martienne, renferment des molécules organiques (Brack et Pillinger, 1998). Même si les indices trouvés dans ALH 84001 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 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. 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. Le programme martien de la NASA prévoit deux lancements à chaque créneau planétaire, tous les 26 mois à partir de 1996. 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 des andésites terrestres (roches ayant subi plusieurs fusions) et se rapproche de celle de la croûte terrestre. Cependant, les résultats obtenus sont insuffisants pour pouvoir trancher entre une origine volcanique et sédimentaire. La NASA centre maintenant tout son programme sur le retour d'échantillons en 2005. Le CNES sera associé à cette mission et souhaite installer à la surface de Mars un laboratoire permettant le prélèvement par forage d'échantillons protégés des UV et des oxydants (gros rochers, proche sous-sol) et leur analyse in situ, organique, minérale et isotopique (la vie terrestre se distingue de la matière purement minérale par un enrichissement en isotope 12 du carbone par rapport à l'isotope 13 car la fixation enzymatique du dioxyde de carbone atmosphérique par les plantes et les microorganismes favorise systématiquement l'isotope léger du carbone). De son côté, l'Agence Spatiale Européenne 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 sur place des échantillons prélevés pour y rechercher des molécules organiques et des bactéries fossilisées. Les échantillons seront prélevés dans le proche sous-sol sédimentaire à l'aide d'une foreuse installée sur la station fixe mais aussi dans les roches de surface à l'aide d'un petit véhicule automatique équipé d'une foreuse légère qui conférera une certaine mobilité au dispositif général. Une version simplifiée de la station d'analyse martienne, appelée Beagle 2 par le Britannique Colin Pillinger en hommage au bateau de Charles Darwin, pourrait même être embarquée dès 2003 sur la mission européenne Mars Express, actuellement en préparation.

## *2) Sous la glace d'Europe ?*

Le vaisseau spatial Galiléo 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 Galiléo montrent des blocs de banquise ayant pivoté sur eux-mêmes, vraisemblablement sur un sous-

sol fluide. 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 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, constitue une autre source possible d'énergie thermique. Si l'eau liquide est présente sous la couche glaciaire, il est possible que cette eau contiennent des molécules organiques provenant des événements hydrothermaux. Une chimie organique prébiotique de type terrestre a donc pu s'y développer et conduire à l'apparition de la vie. Si Europe a maintenu une activité de marée et une activité hydrothermal sous-glaciaire, la vie bactérienne 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. Des missions vers Europe sont actuellement à l'étude.

### *3) Au-delà du système solaire ?*

Les radioastronomes ont démontré que la chimie organique est universelle. En effet, 83 molécules organiques ont été identifiées à ce jour dans les nuages denses de gaz et de poussières du milieu interstellaire. Mais existe-t-il d'autres niches susceptibles d'héberger de l'eau en dehors du système solaire? En septembre 1995, les Suisses Mayor et Queloz après un suivi systématique des vitesses d'une centaine d'étoiles à l'Observatoire de Haute Provence découvraient un corps de la taille moitié de celle de Jupiter en orbite autour de l'étoile 51 Pegase (la précision des instruments actuels ne permet de voir que des planètes dont la taille est voisine de celle de Jupiter). Toutefois, l'objet présumé serait très proche de l'étoile et aurait une température de 1500°C, température trop élevée pour la vie. Quatre mois plus tard, les Américains 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 Vir, géante et probablement gazeuse, est peu propice à la vie. Elle pourrait, 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 ce jour, le catalogue compte 28 planètes géantes extrasolaires.

### **4/ Comment détecter une vie extraterrestre ?**

L'enrichissement isotopique en carbone 12 et l'homochiralité des molécules biologiques sont certainement les signatures les plus remarquables de la vie terrestre. Grâce aux missions spatiales, les planètes du système solaire sont devenues 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, permet de mettre en évidence une vie bactérienne active.

Pour les planètes extra-solaires, 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 la 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  $\mu\text{m}$ . Pour distinguer le spectre de la planète de celui de l'étoile, un groupe d'astrophysiciens français animé par Alain Léger propose la construction d'un interféromètre spatial infrarouge à cinq télescopes. Le dispositif Darwin-IRSI est actuellement à l'étude à l'Agence Spatiale Européenne. La NASA étudie un dispositif semblable appelé mission TPF. Enfin, la détection d'un signal électromagnétique "intelligent" (SETI) apporterait la preuve indéniable de l'existence d'une vie extra-solaire. Le programme d'écoute mérite d'être soutenu même si, a priori, la probabilité pour qu'une vie bactérienne extra-solaire évolue vers des systèmes vivants exploitant l'électromagnétisme reste très faible. Nombreux sont les scientifiques qui pressentent que la vie bactérienne n'est pas restreinte à la Terre. Reste maintenant à le prouver par l'expérience. Voilà certainement un défi scientifique majeur pour l'an 2000.

### **Bibliographie :**

- L'asymétrie du vivant, A. Brack, Pour la Science, Dossier Hors-série "Les symétries de la nature", Juillet 1998, pp.36-43.
  - Vie extraterrestre: les charmes de l'improbable, A. Brack, La Recherche, Février 1999, n°317, pp.50-52.
  - La vie dans le système solaire, F. Raulin et A. Brack, Pour la Science, Dossier Hors-série, Avril 1999, pp.40-42.
  - Origine de la vie, A. Brack, Supplément de l'Encyclopaedia Universalis, septembre 1999, pp.743-750.
  - Sommes-nous seuls ? A. Brack, in Le Grand Livre du Ciel, Bordas, Octobre 1999, pp. 92-115.
  - La chimie à l'origine de la vie, A. Brack, Pour la Science, N° Spécial, Décembre 1999, pp. 79-80.
  - *The molecular origins of life: assembling pieces of the puzzle* A. Brack, éditeur, Cambridge University Press, Cambridge (1998).
  - *Exobiology in the Solar System & the search for life on Mars* A. Brack, B. Fitton et F. Raulin, ESA Scientific Publication SP 1231 (1999).
  - *Life in the Solar System* A. BRACK, Adv. Space Res. 24 (1999) 417-433.
-



**Figure 1 :**

Les sédiments d'Isua datent de 3,8 milliards d'années. Ils témoignent de la présence permanente d'eau liquide, de dioxyde de carbone dans l'atmosphères et ils renferment des kérogènes, molécules organiques complexes.



**Figure 2 :**

Les observations faites par les missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder et Mars Global Surveyor indiquent clairement que Mars a abrité dans sa jeunesse de l'eau liquide à sa surface d'une manière permanente.