

Dès 1972, Mayo Greenberg, du Laboratoire d'astrophysique de Leide, aux Pays-Bas, simule les réactions photochimiques à la surface des grains interstellaires dans les nuages diffus et dans les nuages moléculaires. En irradiant des glaces à basse température à l'aide d'une lampe à ultraviolet, puis en réchauffant le système, il obtient des molécules organiques complexes. Depuis, il a publié de nombreux articles sur le sujet et a proposé, notamment, un modèle de formation des grains interstellaires qui fait autorité.

Le scénario proposé dans l'article de M. Bernstein et de ses collègues fait largement appel à des molécules organiques extraterrestres apportées par des poussières cosmiques. Cette hypothèse a notre faveur depuis plusieurs années et, dans notre laboratoire d'Orléans, nous essayons de la vérifier en exposant des acides aminés aux conditions de l'espace à bord de satellites en orbite autour de la Terre. Cette hypothèse s'est trouvée confortée par les collectes de micrométéorites effectuées depuis une dizaine d'années en Antarctique par Michel Maurette, du Laboratoire de spectrométrie nucléaire et spectrométrie de masse, à Orsay. Grâce à ces collectes, on évalue à 20 000 tonnes la quantité de grains interplanétaires reçus tous les ans par la Terre. Ces micrométéorites sont apparentées aux météorites chondritiques carbonées, dont la météorite de Murchison est l'exemple type.

Une analyse détaillée des teneurs en carbone (en moyenne, deux pour cent de la masse totale) de différents groupes de micrométéorites permet d'estimer à 130 tonnes par an le flux total de carbone apporté à la Terre. Durant la phase active du bombardement terrestre (de -4,2 à -3,8 milliards d'années), quand le flux micrométéoritique était probablement 1 000 fois plus intense qu'aujourd'hui, la quantité livrée à la Terre est estimée à 5×10^{13} tonnes. À titre de comparaison, cette valeur représente 50 fois la valeur actuelle du carbone biologique recy-

clable à la surface de la Terre. Comme les météorites carbonées, les micrométéorites contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des acides aminés.

Par ailleurs, les micrométéorites se présentent comme des agrégats complexes. C'est ainsi qu'une simple micrométéorite de 0,1 millimètre est composée de millions de petits grains minéraux enchâssés dans la matière organique. Ces grains renferment une proportion importante de sulfures métalliques, d'oxydes et d'argiles qui sont autant de catalyseurs chimiques potentiels. Au contact de l'eau liquide, les grains ont donc pu fonctionner comme de minuscules réacteurs chimiques transformant la matière organique des grains à l'aide des catalyseurs présents.

L'apport de molécules extraterrestres est particulièrement important, car il généralise la possibilité de la vie à toute planète ayant de l'eau liquide à sa surface. C'est le cas de Mars. Les observations faites par les missions martiennes *Mariner 9*, *Viking 1* et *2*, *Mars Pathfinder* et *Mars Global Surveyor* indiquent clairement que, dans sa jeunesse, Mars a abrité de l'eau liquide à sa surface, de manière permanente. Or, la présence permanente d'eau suppose l'existence d'une atmosphère qui permet l'accumulation de molécules organiques micrométéoritiques, à l'instar de la Terre (sans atmosphère, les molécules rebondissent). L'une des priorités de l'exploration de Mars va donc consister à rechercher les molécules organiques, puis à en analyser la chiralité et la composition isotopique : d'une part, l'excès des molécules organiques biologiques avec une chiralité gauche constitue une bonne signature de la vie ; d'autre part, les molécules biologiques se distinguent de la matière purement minérale par un enrichissement en isotope 12 du carbone par rapport à l'isotope 13.

A. BRACK,
Centre de biophysique moléculaire,
Orléans

des cœurs de silicate ou de carbone. La glace, essentiellement composée d'eau, contient aussi jusqu'à dix pour cent de molécules simples, tels du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, du méthane (CH_4), du méthanol (CH_3OH) et de l'ammoniac (NH_3).

Pour comprendre comment ces molécules interstellaires simples et abondantes réagissent dans la glace et engendrent les composés plus complexes que l'on observe dans les météorites, l'un de nous (L. Allamandola) décida de reproduire un nuage interstellaire en laboratoire.

Des cryostats et des pompes engendrent un vide froid à l'intérieur d'une chambre métallique d'environ 20 centimètres de côté. Au centre, un disque d'aluminium ou d'iodure de césium, gros comme une pièce de monnaie, joue le rôle d'un cœur de grain interstellaire. Des molécules, vaporisées dans la chambre, se condensent sur ce disque, qui grossit progressivement. Enfin une lampe émet à l'intérieur de la chambre un rayonnement ultraviolet analogue à celui des étoiles.

Même aux faibles températures et pressions, le rayonnement ultraviolet casse les liaisons chimiques, tout comme dans l'atmosphère terrestre, où ce rayonnement est connu pour ses effets néfastes (dans l'atmosphère terrestre, le rayonnement ultraviolet dissocie les liaisons chimiques, celles des chlorofluorocarbures notamment, et les atomes alors libérés détruisent les molécules d'ozone qui protègent notre planète).

Pris dans la glace interstellaire, les fragments moléculaires obtenus après cassure des molécules se recombinaient en structures complexes. Cette réaction serait impossible si ces fragments étaient libres de s'éloigner les uns des autres. Partout où l'on observe des grains de glace, des composés complexes se forment, notamment dans les régions intensément éclairées par des ultraviolets, comme autour des étoiles jeunes. Durant l'expérience de L. Allamandola, le grain de glace reçoit un rayonnement équivalent à ce qu'un grain interstellaire recevrait en plusieurs milliers d'années.

Dans une autre expérience, nous sommes partis d'une glace composée uniquement d'eau, de méthanol et d'ammoniac, dans les mêmes proportions que celles observées dans la glace extraterrestre et nous avons observé la formation de composés

complexes (cétones, nitriles, éthers et alcools), analogues à ceux qui ont été trouvés dans des météorites riches en carbone. Nous avons également fabriqué de l'hexaméthylènetétramine ($C_6H_{12}N_4$), une molécule connue pour produire des acides aminés dans l'eau chaude et acide. Des molécules avec 15 liaisons entre atomes de carbone se sont même formées dans le mélange.

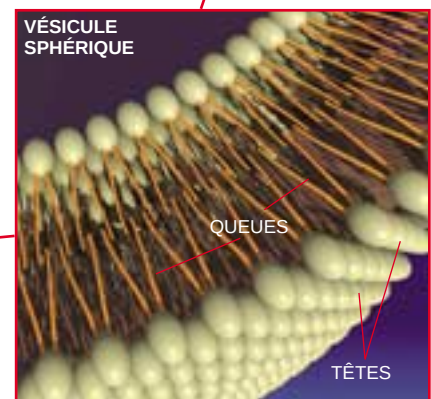
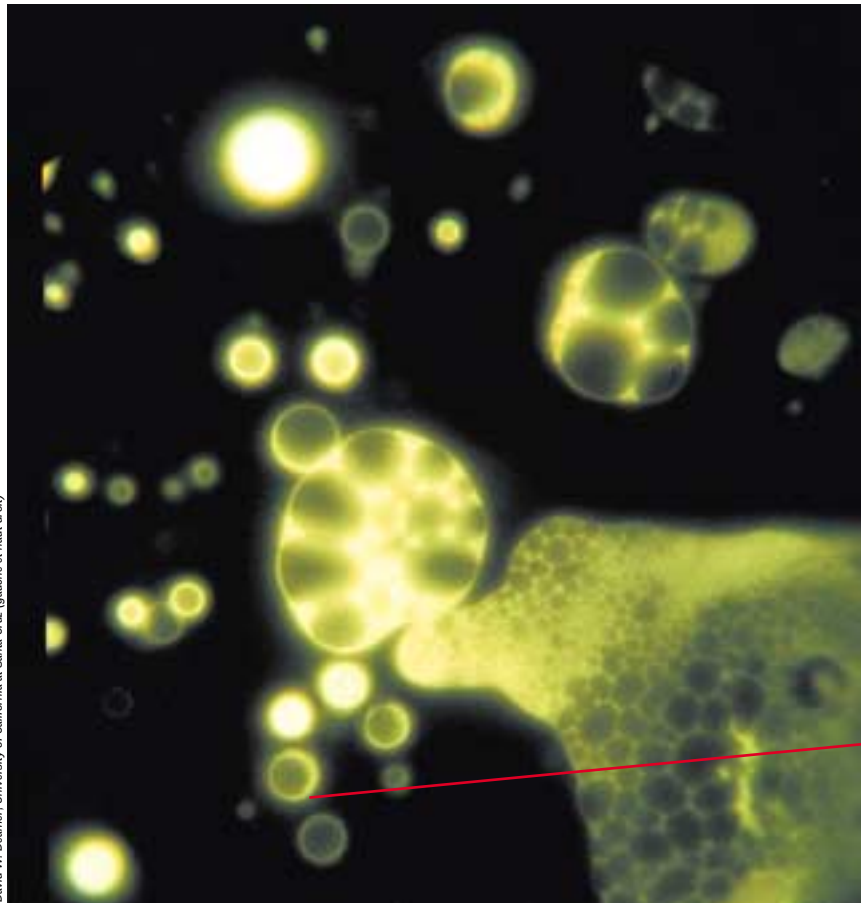
Certains de ces composés ont une propriété qui a peut-être joué un rôle dans l'apparition de la vie : lorsqu'ils

sont placés dans l'eau, ils s'assemblent spontanément en vésicules sphériques. Ces vésicules, analogues à des membranes de cellules, ressemblent étrangement à celles obtenues il y a dix ans à partir d'extraits de la météorite australienne de Murchison.

Quelles sont les conditions d'une telle auto-organisation? Les molécules, qui incluent en général une dizaine d'atomes de carbone, doivent être amphiphiles, c'est-à-dire qu'elles doivent posséder des têtes solubles dans

l'eau et des queues non solubles. Les têtes solubles sont exposées face à l'eau, tandis que les queues s'organisent à l'intérieur de la membrane. Dans certaines de ces vésicules, qu'elles proviennent de la météorite de Murchison ou de l'expérience en laboratoire, on a également observé de la fluorescence, signe que de la matière organique est piégée à l'intérieur.

Parmi les nombreuses molécules organiques créées, les plus intéressantes du point de vue biologique ont



5. LES MOLÉCULES AMPHIPHILES de l'espace ont peut-être abrité les précurseurs de la vie. Quand elles sont mélangées à l'eau, les chaînes hydrocarbonées avec des têtes polaires contenues dans les météorites (*en vert*) et des molécules similaires fabriquées en laboratoire dans les conditions du milieu interstellaire (*en bleu*)

s'organisent en vésicules sphériques. Les têtes hydrophiles des molécules se placent au contact de l'eau, à l'extérieur de la vésicule, tandis que leurs queues hydrophobes s'organisent à l'intérieur pour échapper à l'eau (*en bas à droite*). La fluorescence de ces sphères indique que des composés organiques sont piégés à l'intérieur.

Rendez-vous avec les comètes

Stardust

Le premier échantillon de comète de l'espace lointain

Une sonde traversera la chevelure gazeuse de la comète Wild 2 en 2004 et utilisera des gels poreux pour collecter des échantillons de poussières qui reviendront sur Terre en 2006.

Lancée le 7 février 1999 (NASA)

Space Technology 4/Chimpollion

Le premier atterrissage sur une comète

Un satellite sera placé en orbite autour de la comète Tempel 1 ; il enverra un petit véhicule qui atterrira sur le noyau rocheux de la comète en 2005. Le module d'atterrissage prendra des photographies et analysera des échantillons pris sous la surface.

Lancement prévu : 2003 (NASA)

Rosetta

L'étude approfondie d'une comète

Un satellite rejoindra la comète Wirtanen en 2013 et prendra des mesures pendant 11 mois, à partir de son orbite, tandis qu'un module d'atterrissage sondera la surface de la comète.

Lancement prévu: 2003 (Agence spatiale européenne)