

l'intérieur de la nébuleuse : l'échauffement de la glace de la nébuleuse primitive aurait dissocié les molécules, qui se seraient réorganisées lors de la formation des planètes.

Dans cette hypothèse, les molécules chauffées dans la nébuleuse solaire, puis gelées à l'intérieur des comètes, devraient porter les signatures isotopiques propres aux planètes et aux autres objets du Système solaire interne (jusqu'à l'orbite d'Uranus). Or, les poussières cométaires sont, pour la plupart, enrichies en éléments tels que le deutérium (un isotope de l'hydrogène dont le noyau contient un proton et un neutron). L'enrichissement en deutérium est caractéristique des réactions chimiques dans l'espace interstellaire froid, loin de la fournaise de la nébuleuse solaire. Aux températures voisines du zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$), peu de molécules d'isotopes lourds sont cassées, de sorte que ces molécules, tel le deutérium, s'accumulent avec le temps.

Lorsque deux hypothèses s'opposent ainsi, la vérité est souvent entre les deux. D'ailleurs les poussières spatiales contiennent à la fois des molécules qui ont été modifiées par une

chaleur intense et d'autres molécules non modifiées. Néanmoins, nombre d'observations effectuées dans les deux ans qui ont suivi l'étude des comètes Hale-Bopp et Hyakutake soutiennent l'hypothèse de l'héritage interstellaire des comètes. Ainsi, de nombreuses équipes ont constaté des similarités frappantes entre des molécules des comètes et celles des grains de glace interstellaires ; les enrichissements en deutérium étaient comparables. De surcroît, la mesure de l'état de spin des atomes d'hydrogène de la glace de la comète Hale-Bopp (qui révèle les transformations que la glace a subies) confirme que ces atomes n'ont jamais été à une température supérieure à 25 kelvins (-248°C).

Si la glace cométaire provient d'un nuage interstellaire, pourquoi n'en serait-il pas de même des molécules organiques ? Les astronomes voient la trace des composés organiques partout dans l'Univers, en particulier dans les nuages interstellaires. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont les molécules porteuses de carbone les plus abondantes de l'Univers : elles contiendraient au moins 20 pour cent du carbone galactique total.

Grâce aux observations astronomiques des nuages interstellaires, tel celui de la Nébuleuse de l'Aigle, on analyse la composition des particules microscopiques de poussière et de glace à des distances de plusieurs centaines d'années-lumière. Ces nuages sombres absorbent une partie du rayonnement infrarouge des étoiles proches. Lorsque le rayonnement non absorbé atteint la Terre, on sépare ses longueurs d'onde à l'aide d'un réseau (qui agit comme un prisme). On obtient un spectre indiquant quelles longueurs d'onde ont été absorbées par le nuage. Comme la lumière absente à ces longueurs d'onde correspond à des liaisons chimiques particulières, on déduit les caractéristiques chimiques du nuage absorbant.

Des nuages dans le laboratoire

En comparant les spectres infrarouges des nuages interstellaires avec des mesures en laboratoire effectuées sur des systèmes analogues aux glaces interstellaires, plusieurs équipes ont montré que les grains de glace dans les nuages sombres sont congelés sur

Matières premières ou vie réelle ?

L'idée de matériaux du vivant apportés sur Terre par les comètes et les météores est loin du concept de panspermie, selon lequel des organismes vivants dérivant dans l'espace auraient colonisé la planète. Au XVII^e siècle, après que le médecin italien Francesco Redi eut attaqué l'idée ancienne de génération spontanée, on a supposé que la vie ne pouvait provenir que de la vie. Suivant cette idée, le chimiste suédois Svante Arrhenius supposa en 1908 que le rayonnement des étoiles déplaçait des micro-organismes d'un monde à un autre.

Encore récemment, peu de scientifiques admettaient cette colonisation extraterrestre. En 1996, la découverte de structures minérales qui s'apparentent aux restes fossilisés de micro-organismes, sur la météorite martienne ALH84001, a ravivé la théorie de la panspermie, tandis que la même année, des scientifiques concluaient que les planètes internes avaient échangé des tonnes de débris, ces derniers milliards d'années. Peu de scientifiques pensent néanmoins que la vie soit jamais apparue sur Mars ou que des

organismes martiens aient survécu au voyage de 80 millions de kilomètres vers la Terre. Même si une bactérie résistait au choc la propulsant dans l'espace, le rayonnement ultraviolet et le vide extrêmement froid de l'espace, durant les millions d'années de périple, la détruiraient probablement (à moins que la bactérie ne reste à l'abri, au cœur de petites météorites).

Pourquoi supposer une colonisation martienne quand la vie a pu naître sur la Terre ? Si Mars bénéficiait de conditions propices par le passé, la vie y est peut-être apparue indépendamment ; après tout, les comètes et les météores qui ont ensemencé la Terre d'eau et de molécules organiques offraient le même service à tout le Système solaire.

En décembre 1999, une nouvelle sonde de la NASA ira chercher des signes de vie sur le sol martien. Toutefois, même si l'on trouve de la vie sur la planète rouge, on prouvera difficilement que ces organismes ont survécu au voyage jusqu'à la Terre et qu'ils s'y sont établis.



Paysage martien en 1997.

Jet Propulsion Laboratories/NASA

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 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