

de la faune sur une période de temps assez courte. Nous avons mis en évidence un changement important de structure des communautés à la transition entre l'Éocène et l'Oligocène, il y a environ 34 millions d'années. Ce changement reflète la crise climatique qui se produit à l'échelle du globe au tout début de l'Oligocène : dans le Quercy, le climat se refroidit et s'aridifie, et la forêt recule.

Les faunes anciennes de l'Éocène supérieur, avec de nombreuses espèces de moyenne et de grande taille, correspondent à des milieux forestiers et humides proches des forêts tropicales actuelles d'Afrique. Un léger décrochement observé dans la distribution des espèces vers 0,5 kilogramme témoignerait de la présence de zones ouvertes dans ces forêts. À partir du début de l'Oligocène, les espèces de grande taille sont moins nombreuses et les espèces de taille intermédiaire deviennent rares : les milieux sont plus arides et plus ouverts, et les paysages ressemblent aux savanes plus ou moins arborées de l'Est africain actuel. La réduction du nombre des espèces marque aussi un refroidissement, ou tout au moins une saisonnalité des températures, avec un hiver plus froid. Cette saisonnalité thermique, qui se superpose à une saisonnalité des pluies, laisse penser que, dès le début de l'Oligocène, le climat préfigurerait le climat méditerranéen actuel.

Cette détérioration climatique correspond à un événement paléogéographique important : l'Europe, jusqu'alors isolée vers l'Est par des bras

de mer, est mise en connexion avec l'Asie. Une vague d'immigration, connue sous le nom de Grande Coupure, se produit alors, bouleversant les faunes d'Europe occidentale. L'arrivée en Europe de nombreuses familles nouvelles est favorisée par le changement de milieu qui y est survenu.

Un laboratoire de l'Évolution

En 1977, lors du premier colloque de paléontologie consacré aux gisements des phosphorites du Quercy, la région a été qualifiée de «laboratoire naturel de l'Évolution». Cette appellation n'était pas usurpée : non seulement le Quercy est un exceptionnel observatoire de l'Évolution, mais il permet aussi de tester et de mettre au point de nouvelles méthodes d'analyse en paléontologie.

Les prospections continuent, et le temps est notre allié : dans les prochains siècles, l'érosion continuera de découvrir de nouvelles poches argileuses contenant de nouveaux fossiles. Des zones aujourd'hui boisées en cachent aussi de nombreuses. Les plus récentes découvertes ont étendu l'intervalle de temps connu par ces dépôts du Quercy sur une durée continue de près de 35 millions d'années, de l'Éocène inférieur (il y a 55 millions d'années) au Miocène inférieur (il y a 20 millions d'années), et de nouveaux gisements datés du Pliocène (entre 5 et 2 millions d'années) ont été identifiés. Dans le futur, on pourra suivre l'évolution de la faune du Quercy, donc de l'Europe de l'Ouest, sur toute la durée de l'ère tertiaire.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F

Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 104

Cécile MOURER-CHAUVIRÉ, Serge LEGENDRE et Bernard SIGÉ sont chercheurs au Laboratoire de paléontologie de l'Université Claude Bernard et du CNRS, à Lyon. Bernard MARANDAT est chercheur à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier.

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé aux fouilles ou qui les ont rendu possibles. La liste complète figure sur le site Web de *Pour la Science* (<http://www.pourlascience.com>).

International symposium on mammalian biostratigraphy and paleoecology of the European Paleogene, February 18th-21st 1987, édité par N. Schmidt-Kittler, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 10, pp. 1-311, Mainz, 1987.

S. LEGENDRE, *Les communautés de mam-*

mifères du Paléogène (Éocène supérieur et Oligocène) d'Europe occidentale : structures, milieux et évolution, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 16, pp. 1-110, 1989.

B. SIMON-COINÇON et J.-G. ASTRUC, *Les pièges karstiques en Quercy : rôle et signification dans l'évolution des paysages*, Bulletin de la Société géologique de France, vol. 162, n°3, pp. 595-605, 1991.

S. LEGENDRE et al., *Les Phosphorites du Quercy : 30 ans de recherche. Bilan et perspectives*, *Geobios*, mémoire spécial 20, pp. 331-345, 1997.

Tableaux de corrélations et synthèses, in *Actes du Congrès BiochroM'97*, édité par J.-P. Aguilar, S. Legendre et J. Michaux, Mémoires et Travaux de l'EPHE, Institut de Montpellier, vol. 21 pp. 769-805, 1997.



Les briques de la vie

MAX BERNSTEIN • SCOTT SANDFORD • LOUIS ALLAMANDOLA

Les premiers organismes vivants terrestres semblent s'être formés à partir de molécules organiques qui se sont elles-mêmes assemblées dans le cœur glacé des nuages interstellaires.

Les comètes ont longtemps semblé de mauvais augure. En 400 avant notre ère, les astronomes chinois en avaient déjà recensé 29 sortes, dont beaucoup annonçaient des catastrophes. L'idée d'Aristote, selon laquelle les comètes étaient un avertissement des dieux, subsista pendant deux millénaires dans la civilisation occidentale. Cependant, cette crainte n'est pas complètement infondée : l'écrasement d'une météorite géante sur la Terre a probablement fait disparaître les dinosaures, et, en 1994, les astronomes ont assisté à la chute de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter.

Malgré leur funeste réputation, ces vastes débris spatiaux pourraient avoir apporté la vie sur une Terre jadis stérile : depuis le début des années 1960, des scientifiques de diverses disciplines étudient comment les comètes et d'autres vestiges de la formation du Système solaire auraient pu apporter des molécules de gaz et de l'eau sur notre planète, et comment ces composants ont constitué l'atmosphère et les océans qui rendirent la planète habitable. Des «astrochimistes» pensent aujourd'hui que des matières premières nécessaires à la vie proviennent aussi de l'espace. Certaines de ces molécules organiques (des molécules contenant des atomes de carbone) auraient spontanément formé des vésicules, où se seraient effectués les premiers mécanismes cellulaires. D'autres molécules auraient absorbé une partie du rayonnement solaire ultraviolet, protégeant les molécules moins résistantes et transformant la lumière en énergie chimique, utilisable par les premières cellules.

L'origine des origines

Il y a près de cinq milliards d'années, un nuage interstellaire, froid et sombre, s'est condensé en un disque de gaz et de poussières en rotation, qui a engendré le Système solaire. La Terre, elle, s'est constituée peu après le Soleil,

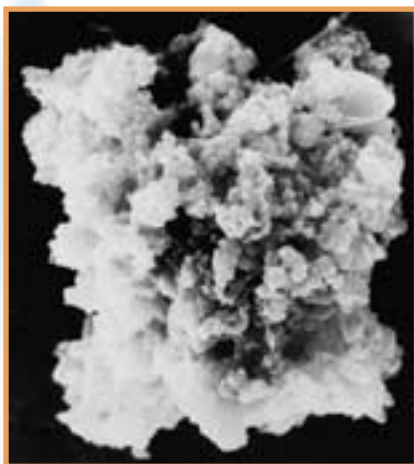
1. DES MOLÉCULES ORGANIQUES analogues à celles que l'on trouve dans les organismes vivants abondent dans les régions sombres des nuages interstellaires. Il y a plus de quatre milliards d'années, un tel nuage s'est effondré en un disque en rotation qui engendra le Soleil et les planètes. Quelques-unes des molécules fragiles ont échappé à la chaleur écrasante de la formation du Système solaire, à l'abri dans les comètes, au bord gelé du disque. Par la suite, les comètes et d'autres restes de nuages ont apporté ces molécules sur la Terre.

ASTÉROÏDES

COMÈTE

POUSSIÈRES

2. LES COMÈTES ET LES ASTÉROÏDES s'écrasaient fréquemment sur la Terre quand celle-ci s'est formée. Aujourd'hui encore, la Terre reçoit chaque jour des centaines de tonnes de poussières et de météorites venant de ces objets. Beaucoup de ces particules de poussière (microphotographie ci-dessous), la plupart d'une taille du millième de millimètre seulement, contiennent des molécules organiques fabriquées dans le nuage sombre qui a engendré le Système solaire. Les creux de la particule ci-dessous contenaient probablement de la glace, qui s'est évaporée quand la poussière s'est échappée de sa comète mère.



PARTICULE DE POUSSIÈRE

John P. Bradley MVA Inc.

MÉTÉORITE

il y a environ 4,5 milliards d'années. On a longtemps pensé qu'elle possédait très tôt l'eau et les ingrédients pour la vie, mais on soupçonne aujourd'hui qu'elle était, au contraire, chaude, sèche et stérile. Une myriade de débris spatiaux a bombardé notre jeune planète, créant des cataclysmes équivalents à l'explosion d'innombrables bombes atomiques. La Lune elle-même est peut-être un morceau de la Terre qui a été éjecté lors d'une collision avec une météorite de la taille de Mars. De tels impacts, courants jusqu'à il y a quatre milliards d'années, ont éradiqué tout balbutiement de vie qui aurait pu exister avant cette période.

Alors que l'étude des collisions météoritiques montre que la Terre est devenue habitable tardivement, on découvre que les premières traces de vie sont plus anciennes qu'on ne l'imaginait. Des microfossiles trouvés dans des roches anciennes d'Australie et d'Afrique du Sud montrent que la vie terrestre était présente il y a 3,5 milliards d'années. Mieux encore, on a découvert au Groenland des roches vieilles de 3,9 milliards d'années qui contiennent des formes de carbone (le noyau de l'atome contient six protons et un nombre variable de neutrons, qui définissent des isotopes) qui proviennent probablement d'organismes vivants. Ainsi, seulement 100 millions d'années environ après que la Terre est devenue habitable, les organismes vivants étaient suffisamment bien implantés pour que des traces de leur existence subsistent aujourd'hui. L'apparition de la vie sur la Terre fut si rapide que l'on suppose l'intervention de constituants extraterrestres.

Les premiers organismes unicellulaires de la planète résultent sans doute d'une série de réactions chimiques qui ont formé des molécules riches en carbone, tels les acides aminés. Dans les conditions adéquates, les acides aminés se sont enchaînés, formant des

protéines, qui sont à la fois les briques et les ouvriers de la vie. Au début des années 1950, à l'Université de Chicago, Stanley Miller montra comment ces acides aminés auraient pu eux-mêmes se former, à partir de molécules plus simples. Il envoya des étincelles dans un ballon en verre rempli d'un mélange de gaz qui ressemblait à l'«atmosphère» primitive de la Terre. Puis, après quelques semaines, il analysa le contenu d'un second ballon relié au premier, initialement rempli d'eau : des molécules organiques, dont des acides aminés, étaient apparus.

Si le choix des réactifs retenus par S. Miller est aujourd'hui contesté, la théorie de la soupe primordiale, où les ingrédients de la vie sont engendrés dans un étang ou dans un océan tiède, à la surface de la Terre, conserve ses partisans. Plusieurs variantes ont été proposées. Par exemple, certains pensent que les réactions biogéniques ont plutôt eu lieu dans les fonds marins, où l'épais nuage de minéraux jaillissant de sources hydrothermales aurait engendré les précurseurs des molécules nécessaires à la vie. D'autres biologistes, de plus en plus nombreux, localisent plutôt la source de molécules dans l'espace.

L'idée était ancienne : en 1961, Juan Oro, de l'Université de Houston, émit l'hypothèse d'une contribution extraterrestre, et Sherwood Chang, du Centre Ames de la NASA, relança la théorie en 1979. Depuis 1990, à l'Institut de recherche de l'intelligence extraterrestre aux molécules organiques à l'origine de la vie (SETI, soit *Search for Extra-Terrestrial Intelligence*), Christopher Chyba, soutient que des petites comètes, des météorites et des particules de poussière interplanétaire ont apporté l'eau et les gaz atmosphériques à la Terre.

La constitution des océans reste débattue, mais les solides spatiaux y ont certainement contribué. On estime que des centaines de tonnes de poussières tombent chaque jour sur la Terre.

Ces particules minuscules – les plus grosses ont la taille d'un grain de sable – parsèment le Système solaire, formant des étoiles filantes quand elles pénètrent dans l'atmosphère. L'idée nouvelle est la suivante : non seulement ces solides auraient déposé sur la Terre l'eau et les gaz qui ont favorisé l'apparition de la vie, mais ils auraient apporté des molécules organiques analogues à celles que l'on voit aujourd'hui dans les systèmes vivants.

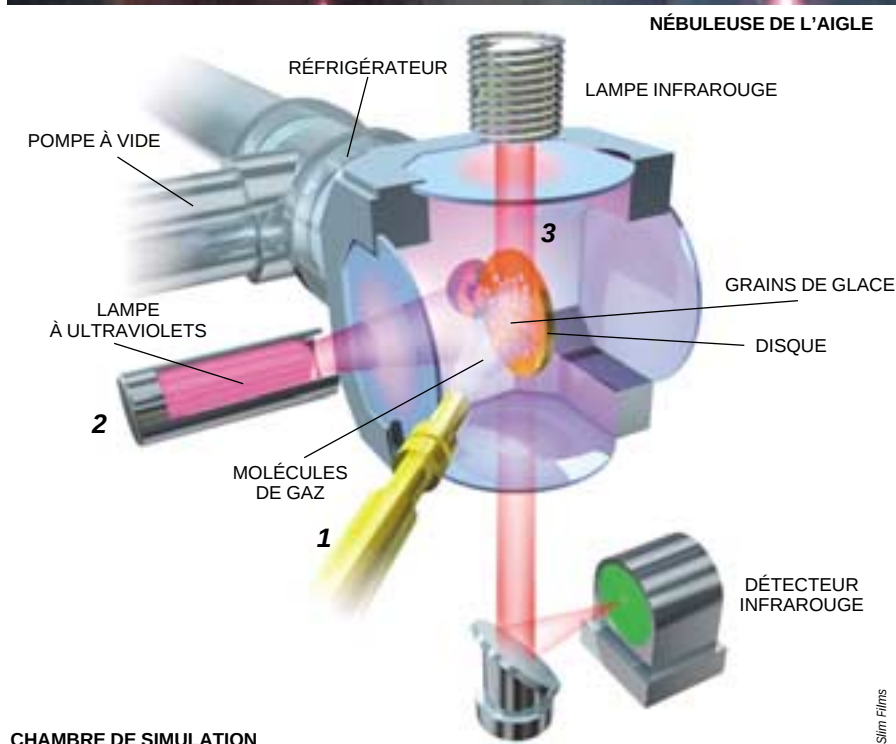
En effet, grâce à l'observation des comètes, on sait que ces visiteurs glacés abondent en composés organiques. En 1986, les caméras embarquées sur les sondes *Giotto* et *Véga* ont révélé que la surface de la comète de Halley comportait un matériau sombre qui ressemble au kérogène carboné de certaines météorites ; les spectromètres de masse ont décelé des traces de molécules riches en carbone. Plus récemment, l'observation depuis la Terre des chevelures et des queues des comètes Hyakutake et Hale-Bopp a révélé de nombreux composés organiques, tels le méthane et l'éthane. Plusieurs sondes spatiales exploreront d'autres comètes durant les 20 prochaines années (voir l'encadré de la page 75).

Lorsqu'une comète s'approche du Soleil, une part de sa matière est éjectée sous la forme de gaz et de poussières, dont une partie est ensuite attirée par la Terre. Des équipes de la NASA recueillent des particules cométaires dans la haute atmosphère, grâce à l'avion ER2, qui vole deux fois plus haut qu'un avion de ligne : à 20 kilomètres d'altitude, les poussières spatiales se collent à des plaques de plastique enduites d'huile, dans les collecteurs

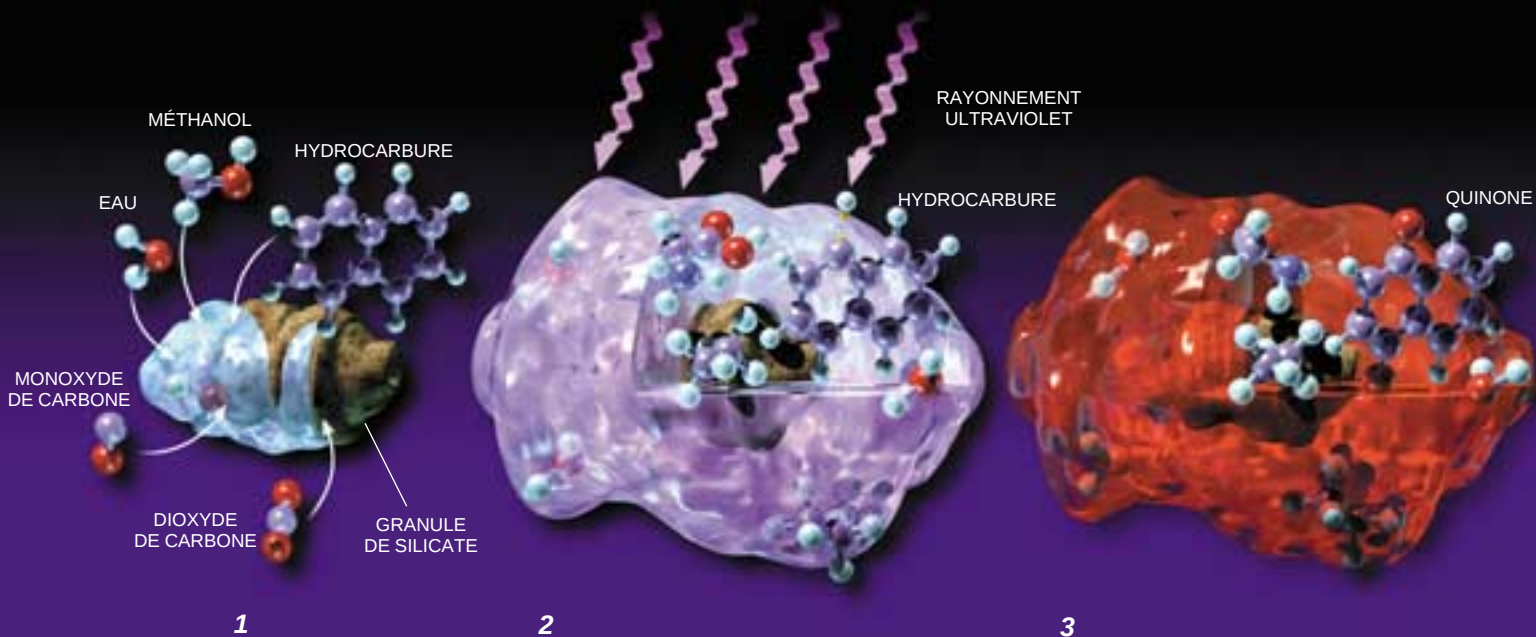
3. ON REPRODUIT EN LABORATOIRE les conditions des régions froides des nuages interstellaires, telle la Nébuleuse de l'Aigle (en haut à droite). À l'intérieur d'une chambre métallique de la taille d'une boîte à chaussures (à droite), un réfrigérateur et une pompe engendrent un vide glacé analogue à celui de l'espace. Des molécules simples, libérées sous forme gazeuse par un injecteur en cuivre (1), gèlent sur un disque analogue au cœur de silicate d'un grain de glace spatial. Une lampe à ultraviolets éclaire la glace ainsi formée d'un rayonnement similaire à celui des étoiles (2). Une lumière infrarouge, également analogue à celle des étoiles, est ensuite projetée à travers la glace (3). La comparaison des spectres d'absorption infrarouge obtenus avec cette chambre et ceux obtenus par satellites révèle que la composition de la glace fabriquée en laboratoire est très similaire à celle de la glace des nuages interstellaires.



Jeff Hester et Paul Scowen, Arizona State University et NASA



Slim Films



4. LA GLACE INTERSTELLAIRE commence à se former lorsque des molécules telles que l'eau, le méthanol et des hydrocarbures gèlent sur de microscopiques grains de silicate (des sortes de grains de sable) qui dérivent dans les nuages interstellaires denses (1). Alors que les grains de glace grossissent (jusqu'à un dix-millième de

millimètre), le rayonnement ultraviolet des étoiles proches casse quelques-unes des liaisons chimiques des composés gelés (2). Les molécules brisées se recombinent en structures, telles les quinones, qui ne se formeraient jamais si les fragments étaient libres de se disperser (3).

situées sous les ailes de l'avion. Avec ses collègues, l'un d'entre nous (S. Sandford) a analysé ces particules microscopiques et trouvé que certaines contenaient 50 pour cent de carbone : c'est plus que dans tout autre objet extraterrestre connu. Bien qu'en moyenne les poussières spatiales contiennent seulement dix pour cent de carbone, elles apportent quotidiennement 30 tonnes environ de substances organiques à la Terre.

Les gros astéroïdes qui s'écrasent sur la Terre sont mieux connus que les comètes et que les poussières interplanétaires. Constitués principalement de métal et de roche, certains contiennent également des molécules organiques, telles que des bases des acides nucléiques (les molécules constitutives de l'ADN), des cétones (molécules qui renferment le groupe C=O), des quinones (composés cycliques où deux atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes d'oxygène), des acides carboxyliques (contenant le groupe COOH), des amines (contenant le groupe NH₂) et des amides (contenant le groupe N(O)C). Parmi les composés organiques des météorites, 70 sortes d'acides aminés sont particulièrement importantes. Huit de ces acides aminés font partie du groupe des 20 acides aminés utilisés par les cellules vivantes pour fabriquer les protéines, mais ils ont une particularité qui se rapproche des acides aminés du règne vivant : leur chiralité.

Les acides aminés sont asymétriques et existent donc par paires, l'une étant l'image de l'autre dans un miroir. Comme nos mains, les acides aminés sont soit droits, soit gauches. Pour des raisons mal comprises et à de rares exceptions près, les acides aminés des organismes vivants sont gauches. Or, les expériences de S. Miller créent les deux formes en nombre égal. D'où l'intérêt de l'hypothèse extraterrestre : en 1993, John Cronin, de l'Université d'Arizona, a observé que la forme gauche de plusieurs acides aminés extraits de deux météorites était plus abondante que la forme droite. Pour certains, la chiralité gauche serait apparue sur Terre par hasard. Cependant, l'analyse des météorites carbonées indique que cette particularité moléculaire a pu être prédéterminée par une force physique extraterrestre.

Du point de vue biologique, les acides aminés sont peut-être les molécules organiques les plus importantes dans les météorites, mais ce ne sont pas les plus abondantes. La plupart des atomes de carbone des météorites sont dans des molécules de kérogène, un matériau composé en partie d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, tel le benzène. Les astrochimistes ont fait d'intéressantes découvertes dans la météorite martienne ALH84001. Ils y ont identifié des hydrocarbures identiques à ceux que l'on trouve dans la suie, dans la viande grillée ou dans

les gaz d'échappement automobiles (la météorite ALH84001 est celle où certains pensent avoir détecté des fossiles de micro-organismes martiens).

Glacière ou brasier ?

D'où viennent les molécules organiques que les comètes, les météorites et les poussières apportent sur la Terre ? Certains astronomes ont supposé que des réactions dans l'eau liquide diffusant à l'intérieur des comètes mères ou des corps parents des météorites sont en partie responsables de leur riche contenu organique (sous certaines conditions, l'eau liquide peut exister dans les comètes et dans les météorites). Toutefois, ces réactions ne pourraient engendrer la grande quantité de molécules organiques gelées des nuages interstellaires sombres.

Ces poussières gelées semblent plutôt être des vestiges de la formation du Système solaire : ce dernier est né de la condensation d'une nébuleuse, c'est-à-dire un disque de gaz et de poussières en rotation. Certains supposent que, lors de la naissance du Soleil et des planètes, ces glaces sont restées au bord du disque, à l'abri de l'effondrement. Dans ce réfrigérateur cosmique, la glace serait restée inaltérée durant des milliards d'années.

Pour d'autres, les molécules organiques extraterrestres sont nées à

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 Laboratory/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

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.

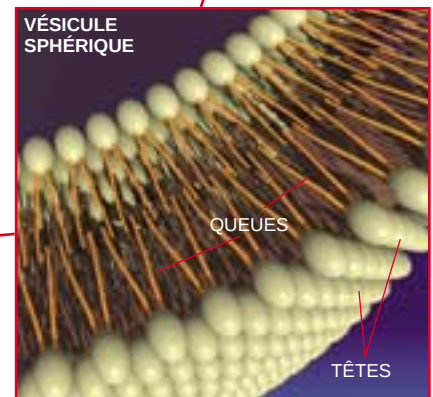
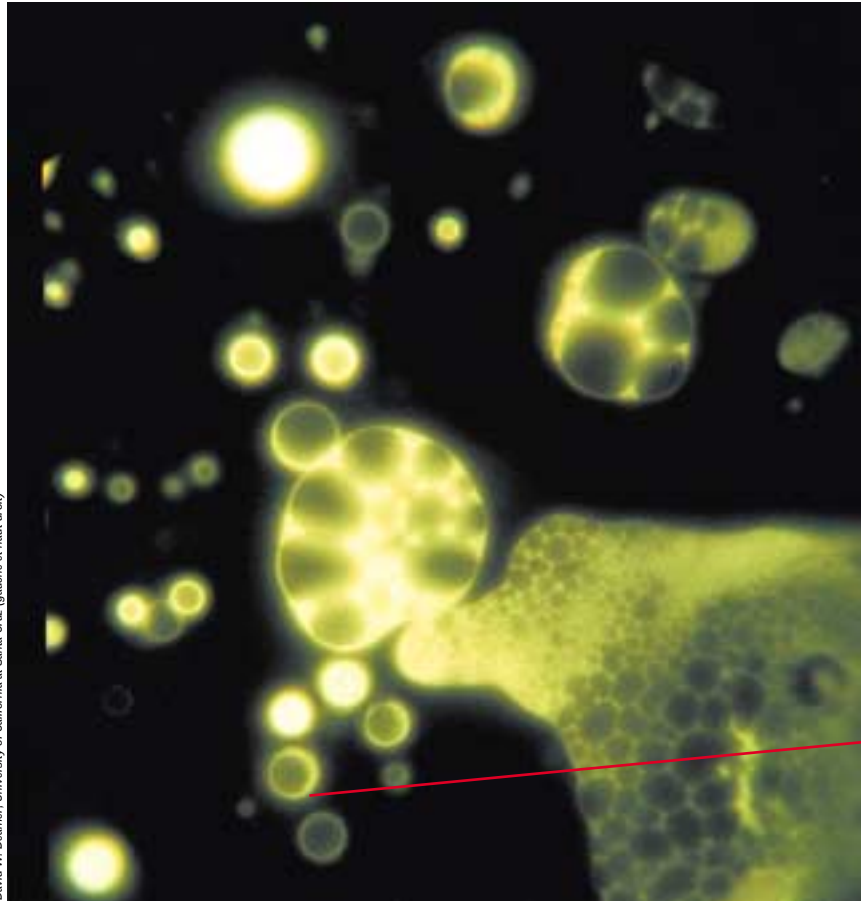
Certains de ces composés ont une propriété qui a peut-être joué un rôle dans l'apparition de la vie : lorsqu'ils

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)

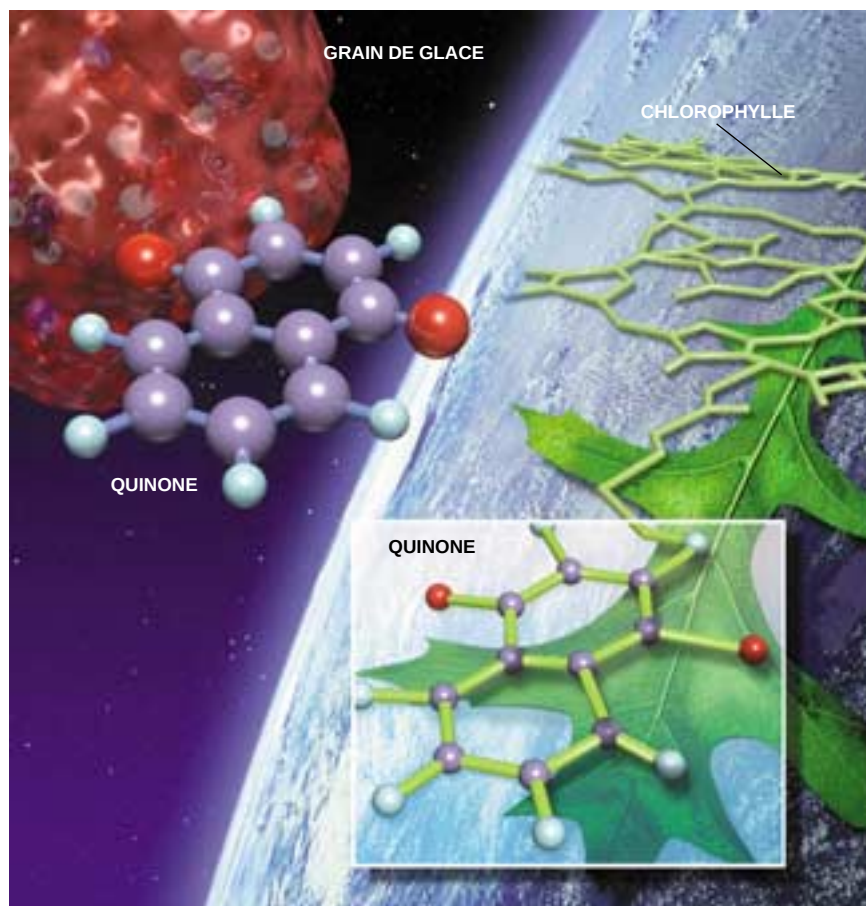
été obtenues à partir de glaces composées d'eau et des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont abondants dans les nuages. Dans les conditions interstellaires, ces hydrocarbures des météorites riches en carbone se transforment en de nombreux composants, notamment en alcools, en éthers ou en quinones. Omniprésents dans les systèmes vivants contemporains, les quinones stabilisent les électrons libres, propriété nécessaire aux cellules vivantes pour diverses activités de transfert d'énergie.

Cette aptitude joue un rôle essentiel dans la conversion de la lumière en énergie chimique, dans la photosynthèse. En outre, les quinones absorbent le rayonnement ultraviolet, qui menace les molécules fragiles comme les acides aminés. Les quinones extraterrestres auraient-elles protégé la Terre des ultraviolets avant que la couche d'ozone protectrice ne se forme? Les premières formes de vie terrestre ont-elles utilisé ces molécules pour capter la lumière et la transformer en énergie à l'aide d'un mécanisme primitif de photosynthèse?

Des molécules à la vie

Les expériences en laboratoire et les observations astronomiques nous ont appris que les conditions apparemment stériles de l'espace engendrent des composés organiques complexes, qui sont acheminés ensuite jusqu'à la Terre par les météorites et par les poussières. Les acides aminés, les quinones, les molécules amphiphiles et d'autres composés organiques extraterrestres semblent avoir favorisé l'apparition de la vie. Les acides aminés extraterrestres ont peut-être composé les premières protéines, et les molécules amphiphiles ont peut-être abrité des quinones qui auraient contribué à la récupération de l'énergie lumineuse ; toutefois, le rôle exact de ces différents composés organiques reste à élucider.

On peut aussi supposer que les molécules organiques extraterrestres n'aient été que des réactifs, à partir desquels la vie s'est formée. On peut imaginer qu'une molécule « tombée du ciel » a amorcé ou accéléré une réaction chimique importante pour le fonctionnement d'une vie primitive. Si les molécules initiatrices de la vie ont bien été réunies dans une soupe primordiale, les acides aminés de l'espace ont pu fournir les quantités critiques pour



6. LES QUINONES DE L'ESPACE ont une structure presque identique à celle des molécules qui aident la chlorophylle à transporter l'énergie lumineuse dans les cellules de plante.

permettre ces réactions. De même, si les événements prébiotiques ont eu lieu dans les fonds marins, ils ont pu bénéficier de composés extraterrestres qui tombaient en pluie dans les océans. En augmentant le rendement des réactions chimiques, l'apport de composés organiques a pu conférer un avantage évolutif certain. À la longue, cet ensemble de réactions chimiques simples serait devenu profondément ancré dans ce qui est aujourd'hui un ensemble de réactions biochimiques régulées par une protéine.

L'écart est colossal entre les composés organiques les plus complexes de l'espace et les molécules de l'héré-

dité et du métabolisme actuels. Cependant, l'omniprésence de ces molécules organiques spatiales indique que, si elles ont contribué à la vie sur Terre, elles ont également contribué, et contribuent toujours, au développement de la vie ailleurs que sur la Terre.

Des traces de conditions propices à la vie sur Mars suggèrent que d'autres lieux du Système solaire ont pu bénéficier d'une contribution extraterrestre. L'ubiquité des molécules organiques complexes dans l'espace et l'existence de planètes autour d'autres étoiles incitent à penser que la vie est présente sur d'autres systèmes planétaires que le nôtre.

Max BERNSTEIN, Scott SANDFORD et Louis ALLAMANDOLA travaillent au Laboratoire d'astrochimie du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

F. RAULIN, F. RAULIN-CERCEAU et J. SCHNEIDER, *La bioastronomie*, collection «Que-sais-je?», PUF, 1997.

J. CRONIN, *Pasteur, Light and Life*, in

Physics World, vol. 11, n° 10, pp. 23-24, octobre 1998.

A. BRACK et F. RAULIN, *La vie dans le Système solaire*, in *Dossier Pour la Science*, «Les terres célestes», pp. 40-42, 1999.

M. P. BERNSTEIN et al., *UV Irradiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ices : Production of Alcohols, Quinone And Ethers*, in *Science*, vol. 283, pp. 1135-1138, 19 février 1999.

