

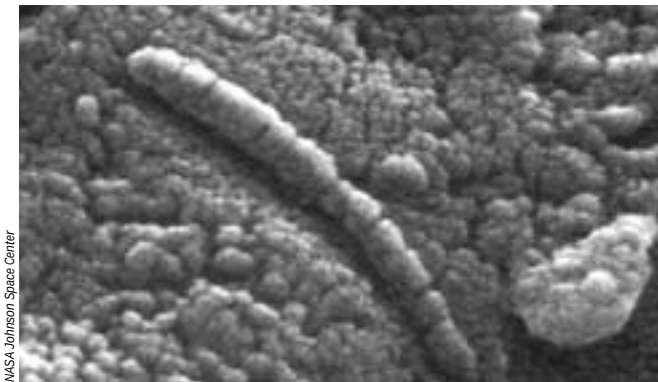
l'aspect sont très proches de minéraux terrestres déposés par des bactéries. L'intérieur des globules est riche en carbonate de magnésium et en carbonate de fer, et contient de petites quantités de carbonate de calcium et de carbonate de manganèse. Ces globules ne sont donc pas du simple calcaire, et leur composition est inhabituelle sur Terre : ils se sont probablement formés ailleurs. De fines particules de magnétite (un oxyde de fer) et de sulfures, de 10 à 100 nanomètres de côté, sont aussi présentes.

On trouve, sur Terre, des particules de magnétite associées à des bactéries fossilisées dans divers sédiments et

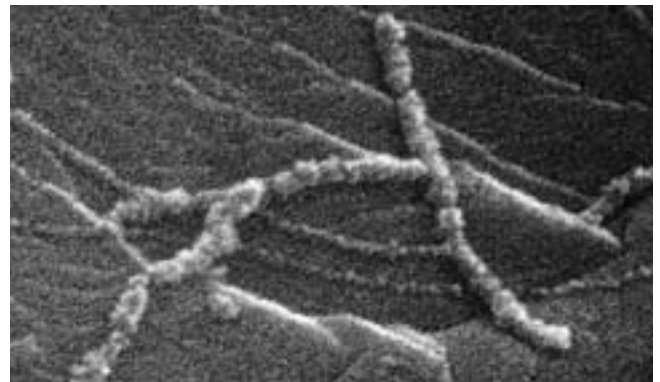
divers sols. Notamment, des particules de 20 à 100 nanomètres de côté sont présentes dans des calcaires terrestres anciens. Les cristaux de magnétites découverts dans ALH84001, de 40 à 60 nanomètres de côté en moyenne, leur ressemblent. Ils sont cubiques, en forme de larme ou irréguliers, et contiennent peu de défauts ou d'impuretés. Leur analyse, par microscopie électronique à transmission de haute résolution couplée avec une méthode d'analyse chimique locale, indique que leur taille, leur pureté, leur morphologie et leur structure cristalline sont proches de celles des magnétites produites par des bactéries terrestres. En outre, certains

cristaux de magnétite d'ALH84001 sont disposés en ligne, telles les perles d'un collier. Les bactéries terrestres déposent souvent de la magnétite dans cette configuration, parce que les cristaux issus du métabolisme du fer et de l'oxygène de l'eau s'alignent naturellement dans le champ magnétique terrestre.

Dans ALH84001, les globules de carbonate contiennent aussi des molécules organiques, dont nous attribuons l'origine à une activité microbienne. Sur Terre, les organismes vivants qui meurent se décomposent et libèrent des hydrocarbures, que l'on retrouve dans le charbon, la tourbe et le pétrole ; parmi ces molécules figurent des hydrocar-



4. UNE STRUCTURE SEGMENTÉE (à gauche) de 380 nanomètres de longueur a été découverte dans un globule carbonaté de la météorite ALH84001. Elle ressemble à une bactérie terrestre fossilisée (à



droite), découverte à 400 mètres de profondeur dans un type de formation géologique appelée basalte de la rivière Columbia (dans l'État de Washington).

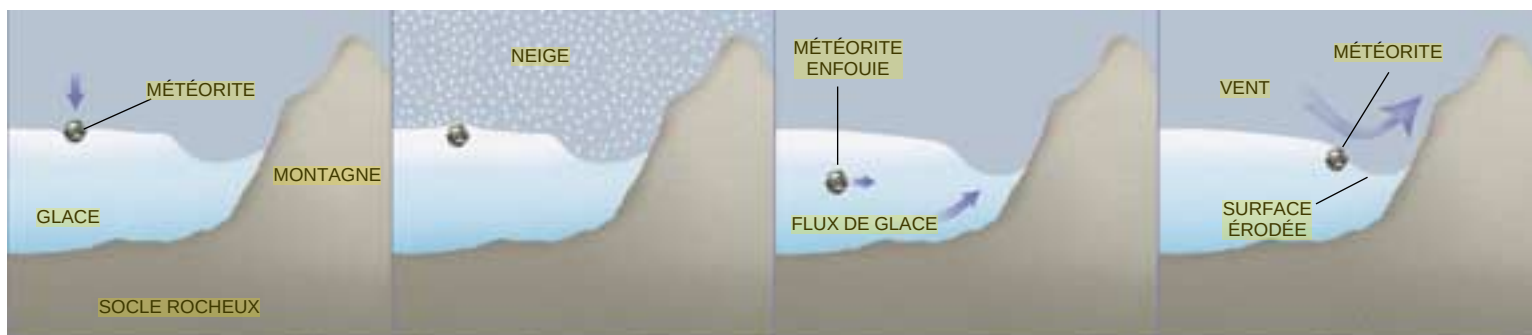
La sonde spatiale du pauvre

En 1969, une équipe japonaise travaillant près des monts Yamato, dans l'Antarctique, a découvert huit météorites dans un champ de glace âgé de plus de 10 000 ans. Ces météorites, de quatre types différents, n'étaient pas toutes tombées en même temps, mais elles avaient été rassemblées par l'écoulement de la glace.

Les météorites qui tombent sur l'Antarctique s'enfoncent dans la neige comprimée qui se transforme en glace, puis en « vieille » glace, de couleur bleuâtre. Sous l'action de la gravité, les masses de glace se déplacent de deux à trois mètres par an, de l'intérieur relativement élevé du continent antarctique vers la périphérie. Quand un obstacle, telle une chaîne de montagnes, bloque l'écoulement horizontal de la glace, celle-ci remonte. Simultanément, la surface de la glace est érodée par le vent

(la glace est directement transformée en vapeur d'eau), à la vitesse de deux à trois centimètres par an. Les météorites parviennent donc à la surface du champ de glace au pied des montagnes antarctiques, où elles s'accumulent. Sur la Terre, seul l'Antarctique présente cette association de glaciers en mouvement et de barrières montagneuses.

Depuis 29 ans, plus de 17 000 météorites ont ainsi été découvertes. La plupart proviennent de la ceinture d'astéroïdes, située entre Mars et Jupiter, mais 14 sont d'origine lunaire et six d'origine martienne. Récupérées à peu de frais, ces météorites sont des sondes spatiales peu onéreuses. Avant la découverte du gisement antarctique de météorites, les collections mondiales n'en contenaient que 2 000 à 2 500 spécimens différents.



bures aromatiques polycycliques. Nous pensons que les hydrocarbures aromatiques polycycliques assez simples présents dans ALH84001 sont aussi les produits de décomposition d'organismes vivants, transportés par un

liquide et piégés lors de la formation des globules.

La présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans un échantillon ne prouve pas que des processus biologiques s'y sont produits : des

météorites provenant de la ceinture des astéroïdes, entre Mars et Jupiter, où la vie n'est certainement pas présente, contiennent aussi de telles molécules organiques, tout comme des poussières planétaires ou interstellaires. On trouve

Y a-t-il vraiment des fossiles de bactéries dans ALH84001?

En août 1996, David McKay et ses collègues ont annoncé la découverte de fossiles de bactéries martiennes dans une météorite nommée ALH84001. Cette annonce est-elle un coup médiatique, destiné à obtenir des crédits pour les programmes d'exploration planétaires de la NASA? Cet argument, qui écarte les faits sans les examiner scientifiquement, n'est pas satisfaisant : l'affaire est sérieuse. Rien n'est définitivement résolu.

Les collections de météorites contiennent 14 éléments atypiques, des roches de type «lave», qui se sont formées il y a environ un milliard d'années (sauf ALH84001, dont la formation, au sein de la croûte de Mars, remonte à 4,5 milliards d'années environ). Elles viennent donc d'un corps où le volcanisme était encore actif, ce qui semble exclure que leur origine soit la ceinture des astéroïdes, située entre Mars et Jupiter. On écarte aussi Vénus, car l'énergie à fournir à une roche pour qu'elle quitte Vénus, puis l'orbite de cette planète et arrive sur Terre est très grande. Par défaut, la seule origine possible de ces roches est donc Mars. Comme cinq d'entre elles présentent une «signature atmosphérique» martienne, la majorité des planétologues acceptent cette origine martienne.

Ils n'oublient toutefois pas les problèmes que cela pose. Citons-en deux. D'abord, selon le comptage des cratères de météorites sur Mars, le volcanisme s'est éteint sur cette planète il y a un milliard d'années : les volcans de cet âge ne couvrent que quelques pour cent de la surface. Comme toutes les météorites «martiennes», sauf ALH84001, ont au plus un milliard d'années, on doit admettre que les astéroïdes qui ont percuté Mars et en ont éjecté des débris sont tombés préférentiellement sur les volcans les plus jeunes. Par ailleurs, pourquoi ces météorites martiennes sont-elles aussi nombreuses que les météorites lunaires, alors que Mars est beaucoup plus

éloignée de la Terre? D. McKay et ses collègues présentent bien les caractéristiques de la météorite ALH84001 : elle est fracturée, et ces fractures contiennent des concrétions carbonatées (les globules), avec de la magnétite, des composés organiques, une certaine composition isotopique et des structures «en forme de bactéries». Quels phénomènes sont-ils à l'origine de ces caractéristiques? L'équipe de la NASA conclut, un peu vite, qu'«une vie microbienne a certainement été en contact avec la roche». Cette interprétation mérite plusieurs critiques.

La première concerne la nature de la météorite : la roche est une pyroxénite, formée entre 5 et 100 kilomètres de profondeur environ. Elle est peu altérée par l'eau, et elle n'a donc pas résidé longtemps en surface. La vie qui s'y serait développée serait donc plus proche des bactéries terrestres découvertes récemment à grande profondeur dans la croûte terrestre que des bactéries usuelles vivant à la surface de la Terre. L'interprétation des résidus en est compliquée. De surcroît, les restes retrouvés seraient ceux d'organismes très petits : les biologistes doutent que toutes les activités métaboliques se déroulent dans un si petit volume, et l'existence sur Terre des nanobactéries évoquées n'est pas encore admise par tous. Alors sur Mars...

En outre, si l'on récolte au hasard une roche équivalente à ALH84001 sur Terre (aussi ancienne, et formée aussi profondément), on n'a quasiment aucune chance d'y trouver des fossiles. La vie a-t-elle été très abondante dans Mars, ou l'astéroïde percuteur a-t-il bien visé, nous donnant la chance extraordinaire de recevoir un échantillon exceptionnel?

D'ailleurs, ces formes fossiles sont-elles vraiment des formes biologiques, non minérales? A-t-on regardé avec autant de précision les structures

qui se forment par des réactions de chimie minérale dans les fissures de roches terrestres parcourues par l'eau? Certains chercheurs ont même prétendu que ces «vermisseaux» sont des artefacts dus aux procédés de métallisation préalables à l'observation au microscope électronique.

L'origine martienne des molécules organiques présentes dans ALH84001 est aussi contestée. Leur teneur en carbone 13 et en carbone 14 indiquerait une contamination pendant le séjour de la météorite en Antarctique.

Enfin, l'un des points les plus controversés est la température de formation des carbonates. D. McKay et ses collègues proposent qu'ils soient apparus à moins de 100 °C, et ils réfutent rapidement les 700 °C avancés par une autre équipe. La liste des températures, obtenues par différentes méthodes, proposées dans les publications spécialisées, est toutefois impressionnante : de 20 à 80 °C par géochimie classique, plus de 650 °C par l'étude des équilibres minéraux, moins de 300 °C par géochimie isotopique, plus de 550 °C par la morphologie des magnétites, moins de 325 °C par des arguments paléomagnétiques. Les températures mesurées par toutes ces équipes correspondent toutefois à des phénomènes différents, qui ont pu se produire à plusieurs étapes de l'histoire de la météorite et il n'est pas certain que ces possibles bactéries étaient contemporaines des globules ni de la magnétite...

La NASA a un projet de mission spatiale qui rapporterait des échantillons de roche martienne vers 2010. En attendant, bien que les données présentées par D. McKay et ses collaborateurs soient fiables, ils en oublient d'autres. Leur plaidoirie en faveur de la présence de fossiles martiens est intéressante, mais l'indicatif devrait souvent être remplacé par le conditionnel.

Pierre THOMAS,
École normale supérieure de Lyon