

collisions de comètes et d'astéroïdes avec les roches de la surface de Mars). Les bulles de gaz contenues dans cinq météorites ont la même composition chimique et isotopique, à un milliardième près, que l'atmosphère martienne analysée par les sondes *Viking*. Comment ne pas admettre que ces météorites proviennent de Mars?

L'hypothèse est corroborée par l'analyse chimique des minéraux et, notamment, par l'analyse isotopique de l'oxygène des silicates, oxydes de silicium qui sont le principal constituant des météorites. Au début des années 1970, Robert Clayton, et ses collaborateurs de l'Université de Chicago, ont montré que les abondances relatives d'oxygène 16, d'oxygène 17 et d'oxygène 18 dans les silicates sont caractéristiques de l'origine des météorites : les corps du Système solaire, formés dans des régions différentes du disque protoplanétaire qui entourait le Soleil au début de sa vie, ont des compositions isotopiques différentes en oxygène. Selon ce critère, on retrouve dans le même groupe ALH84001, les cinq météorites dont les bulles de gaz ont la même composition que l'atmosphère martienne et cinq autres météorites également trouvées dans l'Antarctique : toutes ces météorites seraient donc d'origine martienne.

Un long parcours

L'analyse isotopique permet aussi de reconstituer l'histoire d'ALH84001, avec la formation de la roche sur Mars, son voyage interplanétaire et son séjour sur Terre. Le dosage de trois groupes d'éléments radioactifs (les isotopes du rubidium et du strontium, ceux du néodyme et du samarium, et ceux de l'argon) a montré que 4,5 milliards d'années se sont écoulés depuis que la roche s'est solidifiée, à partir de matériaux en fusion. C'est beaucoup, même à l'échelle géologique : la cristallisation s'est produite peu après la formation de Mars il y a 4,55 milliards d'années. Par comparaison, les 11 autres météorites martiennes du groupe ont entre 1,3 milliard et 165 millions d'années.

La durée du voyage interplanétaire de la météorite est connue grâce à d'autres isotopes : l'hélium 3, le néon 21 et l'argon 38. Dans l'espace, les météorites sont bombardées par les rayons cosmiques, particules de grande énergie, qui produisent ces trois isotopes en interagissant avec les noyaux des atomes. Le calcul des vitesses de production et la mesure des abondances de ces isotopes indiquent la durée d'exposition de la météorite aux rayons cosmiques, donc son temps de transit entre Mars et la Terre : 16 millions d'années.

Enfin Timothy Jull, de l'Université d'Arizona, a estimé la durée de résidence de la météorite dans les glaces de l'Antarctique, à partir de l'abondance du carbone 14. Quand les silicates sont exposés aux rayons cosmiques dans l'espace, du carbone 14 est produit à partir d'azote 14. Puis un équilibre s'établit : cette production est compensée par la désintégration radioactive du carbone 14. Lorsque la météorite tombe sur Terre, la production de carbone 14 cesse, et l'équilibre est rompu : la désintégration dans la roche se poursuit, réduisant de moitié la quantité de carbone 14 tous les 5 700 ans. La différence entre l'abondance du carbone 14 à l'équilibre et celle qui est mesurée aujourd'hui dans les silicates de la météorite indique que cette dernière est sur Terre depuis 13 000 ans.

Dès sa découverte, en 1984, par la géologue américaine Roberta Score, la météorite ALH84001 a passionné les planétologues. De couleur gris verdâtre pâle, elle reposait dans le champ de glace qui se trouve à l'Ouest des monts Allan, en Antarctique. La composition de la roche indique qu'elle s'est formée lentement en profondeur ou dans la croûte primitive de Mars : constituée à 98 pour cent de gros grains d'orthopyroxène, un silicate de magnésium et de fer, elle contient aussi d'autres silicates, des aluminosilicates, des oxydes et des sulfures métalliques, ainsi que des carbonates et des silicates hydratés.

Nous étions surtout étonnés par la présence de globules de carbonate, de 20 à 250 micromètres de diamètre, qui tapissent les parois internes des fissures

de la météorite (voir la figure 2). Aucune des 11 autres météorites martiennes ne possède de tels globules, vraisemblablement déposés à partir d'un liquide saturé en dioxyde de carbone, qui a coulé dans les fissures après la formation des silicates. Ces globules carbonatés rassemblent plusieurs caractéristiques qui, isolément, ne prouvent pas l'existence de vie sur Mars mais qui, toutes ensemble, forment un faisceau d'indices très favorables : une vie microbienne a très certainement été en contact avec la roche, à une époque où le climat sur Mars était plus proche qu'aujourd'hui du climat terrestre.

Des informations précieuses proviennent tout d'abord d'analyses isotopiques, réalisées par Monica Grady, du Muséum britannique d'histoire naturelle, et d'équipes de la NASA et de l'Open University, en Grande-Bretagne. Dans les globules, le carbone 13 est plus abondant que dans n'importe quel carbonate terrestre naturel : ce carbonate ne s'est donc pas formé sur Terre, ni sur Mars. En outre, le carbone 13 est aussi plus abondant dans les globules de carbonate que dans les 11 autres météorites martiennes : cet enrichissement confirme la précipitation du carbonate à partir d'un liquide et non directement à partir de l'atmosphère martienne.

D'autre part, les abondances relatives des isotopes de l'oxygène indiquent que les globules se sont formés à des températures inférieures à 100 °C, compatible avec la vie microbienne telle que nous la connaissons sur Terre (des organismes survivent jusqu'à 115 °C environ). Ce résultat a été confirmé au début de 1997 par John Valley, de l'Université de Madison, mais il a été ensuite contesté par Ralph Harvey et ses collègues de l'Université Case Western Reserve, qui ont analysé la composition chimique des minéraux dans les carbonates et ont conclu que les carbonates se sont formés à 700 °C. Ce résultat contradictoire reste toutefois isolé, et il n'est pas certain que les carbonates analysés par cette équipe proviennent des globules.

Un autre indice de vie martienne est la présence, dans les globules carbonatés, de minéraux dont la nature et



3. UNE GOUTTELETTE D'EAU MARTIENNE a été extraite en 1991 par chauffage d'un morceau d'une météorite martienne. L'eau, qui

coulait jadis à la surface de Mars et n'y est plus présente que sous forme de glace, est indispensable à la vie.

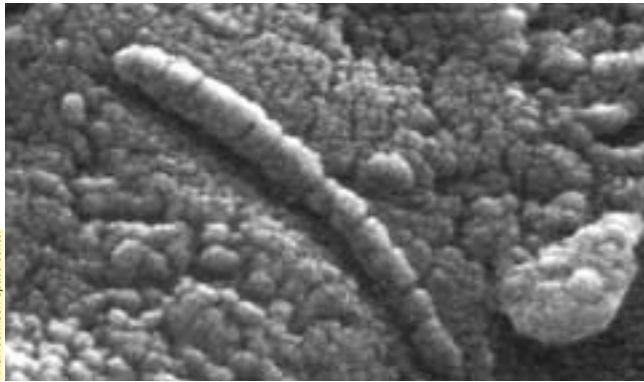
l'aspect sont très proches de minéraux terrestres déposés par des bactéries. L'intérieur des globules est riche en carbonate de magnésium et en carbonate de fer, et contient de petites quantités de carbonate de calcium et de carbonate de manganèse. Ces globules ne sont donc pas du simple calcaire, et 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

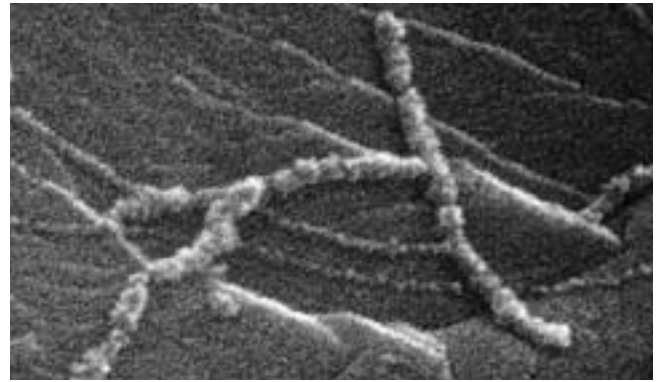
divers sols. Notamment, des particules de 20 à 100 nanomètres de côté sont présentes dans des calcaires terrestres anciens. Les cristaux de magnétites découverts dans ALH84001, de 40 à 60 nanomètres de côté en moyenne, leur ressemblent. Ils sont cubiques, en forme de larme ou irréguliers, et contiennent 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.

