

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

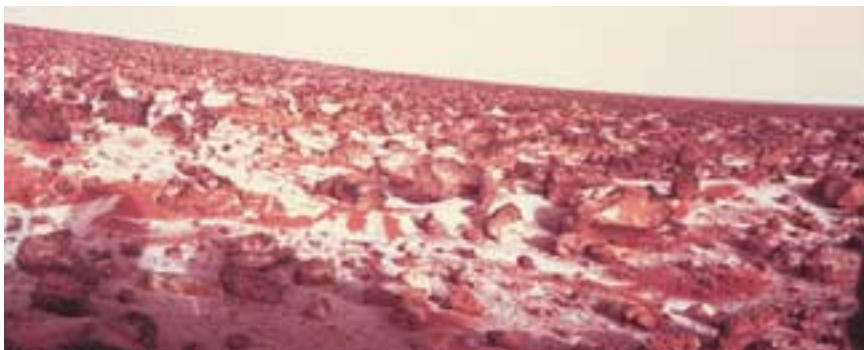
aussi des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les gaz d'échappement des automobiles, qui contaminent l'atmosphère terrestre. Toutefois, la localisation et l'association de ces hydrocarbures dans les globules carbonatés rend leur découverte intéressante : dans ALH84001, ils sont toujours dans des régions riches en carbonates, y compris dans les globules. Leur dépôt est donc associé à la circulation du liquide à l'origine des globules. En outre, Richard Zare et Simon Clemett, de l'Université de Stanford, ont montré, grâce à une technique analytique sensible, qu'ALH84001 contient peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques différents et que tous ont été retrouvés parmi les produits de décomposition de micro-organismes terrestres. Ces hydrocarbures étaient à l'intérieur de la météorite, où la contamination est très improbable : les carbonates sont bien martiens et contiennent les vestiges d'anciens organismes vivants.

Enfin, en 1996, une équipe de l'Open University a montré que le carbone de ces molécules organiques a une composition isotopique proche de celle de micro-organismes qui utiliseraient le méthane comme source nutritive. Si cette découverte est confirmée, elle sera l'une des indications les plus solides en faveur d'une activité biologique dans la météorite martienne.

Des fossiles de microbes ?

D'autres particularités de la roche indiquent qu'au moins des vestiges de microbes sont entrés en contact avec la roche : dans les globules de carbonate, on a trouvé des corps ovoïdes et tubulaires d'environ 380 nanomètres de long (voir la figure 4) qui seraient les restes fossilisés de microbes eux-mêmes. Une bactérie terrestre de cette taille pourrait sans difficulté contenir l'ensemble des organites nécessaires à son fonctionnement (la taille minimale est d'environ 250 nanomètres). D'autres structures tubulaires incurvées découvertes dans les globules ont des longueurs de 500 à 700 nanomètres.

D'autres structures, dix fois plus petites que les bactéries terrestres, sont présentes dans ALH84001 : ovoïdes de 40 à 80 nanomètres de long, corps tubulaires de 30 à 170 nanomètres de long et de 20 à 40 nanomètres de diamètre environ. Ce sont peut-être les fossiles de petits appendices de bactéries, analogues à ceux que possèdent certaines bactéries



NASA Jet Propulsion Laboratory

5. DE LA GLACE couvre parfois une partie du sol martien rocheux, rouge, sur à peine quelques micromètres d'épaisseur. La vie qui aurait laissé des traces sur la météorite ALH84001 se serait toutefois développée en profondeur, à plusieurs kilomètres de cette surface.

terrestres. Surtout, ces structures ovoïdes et allongées ressemblent, par leur taille et leurs formes, aux nanobactéries terrestres, de 20 à 400 nanomètres de long, dont des fossiles ont été découverts dans des basaltes du bassin de la rivière Columbia, dans l'État de Washington.

Si ALH84001 se trouvait sur Mars il y a 4,5 milliards d'années, lorsque la planète était plus humide, plus chaude et possédait une atmosphère plus dense, nous devrions trouver des indices que la roche a été en contact avec l'eau. Pourtant la météorite ne contient que de très petites quantités de minéraux argileux hydratés : elle n'a séjourné que peu de temps, voire pas du tout, à la surface de Mars, riche en eau. En outre, ces minéraux ont pu aussi bien se former pendant le séjour de la météorite en Antarctique.

Quand les traces de vie que nous observons dans ALH84001 sont-elles apparues ? Nous pourrions examiner cette question si nous connaissions l'âge des carbonates, mais nous n'avons qu'une certitude : les carbonates ont cristallisé dans les fissures de la météorite après la cristallisation de la roche elle-même. Des âges de 1,3 à 3,6 milliards d'années ont été avancés. Si les carbonates dans ALH84001 s'étaient formés voici 3,6 milliards d'années, ils seraient les vestiges de la toute première vie martienne.

Si des organismes vivants ont existé sur Mars, ils ont peut-être des descendants aujourd'hui, dans des nappes d'eau souterraines par exemple. Mars est abondamment couverte de basaltes, fracturés par un bombardement d'astéroïdes dans ses premiers 600 millions d'années. Ces fractures constituaient des voies d'infiltration pour l'eau et des abris pour la vie lorsque la planète s'est refroidie. Une situation analogue existe sur Terre : des espaces entre

des coulées de lave successives permettent la circulation et la retenue d'eau souterraine qui contient des bactéries vivantes. Des organismes pourraient aussi subsister ou se développer sur Mars autour de sources chaudes ou de systèmes hydrothermaux souterrains, où des déséquilibres chimiques seraient maintenus, comme sur les «cheminées chaudes» riches en minéraux des fonds océaniques terrestres.

Nous espérons maintenant une mission vers Mars qui rapporterait de nouveaux échantillons, afin de résoudre le problème de la vie sur cette planète. Les indications actuelles doivent devenir des certitudes.

Everett GIBSON, David MCKAY et Kathie THOMAS-KEPRTA travaillent au Centre spatial Johnson de la NASA à Houston. Christopher ROMANEK travaille à l'Université de Georgie.

Mars, sous la direction de Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder et Mildred S. Matthews, University of Arizona Press, 1992.

Harry Y. MCSWEEN, *What We Have Learned about Mars from SNC Meteorites*, in *Meteoritics*, vol. 29, n° 6, pp. 757-779, novembre 1994.

David S. MCKAY et al., *Search for Past Life on Mars : Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001*, in *Science*, vol. 273, pp. 924-930, 16 août 1996.

James FREDRICKSON et Tullis ONSTOTT, *Les micro-organismes de l'intérieur du Globe*, in *Pour la Science*, décembre 1996.

Michael H. CARR, *Water on Mars*, Oxford University Press, 1996.

Jay BARBREE, Martin CAIDIN et Susan WRIGHT, *Destination Mars : In Art, Myth and Science*, Penguin Studio, 1997.

Jeffrey KARGEL et Robert STROM, *Les changements climatiques sur Mars*, in *Pour la Science*, janvier 1997.
