

Dans le domaine des météorites, les martiennes occupent une place tout à fait particulière. Tout d'abord par leur rareté, car elles représentent une très faible part des météorites recensées à travers le monde, ensuite par leur intérêt car ce sont de précieux témoins de la surface de la planète Mars dont elles ont été extraites. *L'Astronomie* leur a consacré plusieurs pages au cours de l'année 2008, en particulier dans le numéro d'avril (n° 4) qui comporte un dossier consacré à « Mars la désertique ».

Les météorites martiennes sont principalement classées en 3 catégories, les shergottites, les nakhlites et les chassignites, constituant le groupe des SNC. Cependant, une météorite s'est révélée inclassable dans ce groupe, c'est ALH84001, découverte en 1984 en Antarctique. Nous lui consacrons l'un des deux articles qui suivent. L'autre article fait le point de recherches actuelles de datation sur l'ensemble des météorites martiennes et sur la nouveauté qu'elles apportent en matière de chronologie martienne.

L'HISTOIRE DE MARS dévoilée par les météorites

© NASA/JPL-Caltech

Mars est la planète du Système solaire la plus comparable à la Terre par sa morphologie et sa géologie. Cependant, alors que sur Terre les terrains anciens ont disparu du fait, principalement, de la tectonique des plaques, la surface martienne a conservé les traces des nombreux impacts météoritiques qu'elle a reçus depuis sa formation. Cette caractéristique a permis d'établir une chronologie relative à partir de comptages d'impacts. En effet, on peut admettre que, plus il y a d'impacts sur une surface, plus celle-ci est ancienne. Par ailleurs, grâce à l'analyse fine de météorites martiennes trouvées sur Terre, on a pu établir une chronologie absolue de l'histoire de Mars. Celle-ci est

basée sur des datations radiométriques, en utilisant les couples d'isotopes pères et fils d'éléments radioactifs sur les roches martiennes.

Jusqu'à récemment, ces deux chronologies étaient en désaccord (contrairement à celles réalisées aussi sur la Lune). Les âges absolus des météorites martiennes apparaissaient globalement plus jeunes (moins de 1,3 milliards d'années pour la plupart) que les surfaces observées (plus de 2 milliards d'années pour la majorité de la surface exposée). Mais de nouvelles analyses apportent de nouvelles informations et ces résultats ont d'importantes implications sur les interprétations des données géochimiques mais aussi des observations à

distance obtenus par les satellites. Les roches martiennes sont les seuls objets disponibles dans les laboratoires scientifiques pour effectuer des études minéralogiques et chimiques approfondies. Elles représentent donc une source d'information unique sur la composition et l'évolution de la surface mais aussi de l'intérieur de la planète.

NOUVELLE DATATION ABSOLUE DE MARS

Le groupe de recherche en géochimie de l'École normale supérieure de Lyon a refait les analyses des différents chronomètres radiométriques au sein de nombreuses météorites martiennes afin d'établir et comprendre leur histoire.



Météorite martienne NWA 4468 (675g) du groupe des shergottites. © G. Huppe.

Les météorites martiennes sont toutes d'origine mantellique (les magmas à leur origine ont été formés à grande profondeur) et elles ont la particularité de toutes témoigner de traces d'altération aqueuse et d'intenses chocs à la surface de Mars. Ceci représente une difficulté majeure pour l'interprétation des âges radiométriques obtenus. Elles sont regroupées en 3 classes principales : les shergottites, qui sont les météorites martiennes les plus répandues de type gabbro ou lherzolite, les nakhlites de type clinopyroxénite et les chassignites de type dunite. Une météorite additionnelle est l'unique orthopyroxénite ALH84001, découverte en Antarctique (lire l'article qui suit).

La cristallisation des nakhlites et chassignites est datée par les différents chronomètres utilisés autour de 1,3 milliards d'année (Ga) tandis que les shergottites montrent des âges beaucoup plus récents entre 0,2 et 0,5 Ga en utilisant les chronomètres dits conventionnels (par exemple Rb-Sr, Sm-Nd). Ces derniers sont basés dans ces roches sur la composition des phosphates, minéral soluble et donc facilement perturbé en présence de solution liquide. En utilisant la particularité unique du chronomètre Pb-Pb basé sur la composition isotopique du seul élément plomb, et sur sa présence dans une phase silicatée résistante à l'altération (un feldspath nommé maskelynite), des âges beaucoup plus anciens ont été mesurés, montrant deux groupes distincts de shergottites à 4,1 et 4,3 Ga. Notre groupe a aussi daté ALH84001 à 4,1 Ga, correspondant à la période de formation des shergottites. Ces âges très anciens sont en accord avec la chronologie basée sur la densité de cratères à la surface de Mars. Les âges plus récents trou-

vés au sein des shergottites, mais aussi dans certaines phases secondaires d'ALH 84001, des nakhlites et chassignites, mettent en évidence des périodes récentes de circulation de fluides potentiellement liés à des périodes d'intenses impacts reconnus dans le Système solaire interne. Ils permettent aussi de réinterpréter les données géochimiques (notamment des traces de radioactivités éteintes ^{146}Sm et ^{182}Hf) sur la différenciation et l'évolution du manteau martien, laissant la possibilité d'une convection mantellique globale et active pendant au moins les premiers 500 millions d'années de l'histoire de la planète. Cette période pourrait correspondre à la fin de l'existence de la dynamo magnétique et donc à la perte d'une atmosphère dense sur Mars essentielle à l'apparition et persistance de la vie.

Audrey Bouvier ■

audrey.bouvier@asu.edu

*School of Earth and Space Exploration
Arizona State University*

ALH84001, une énigme parmi les météorites martiennes

UN CAILLOU SUSPECT VITE OUBLIÉ

L'ensemble des météorites martiennes constitue le groupe des SNC. Cette abréviation vient des noms de trois météorites martiennes – Shergotty, Nakhla et Chassigny – dont la chute a été observée et qui représentent les 3 grands groupes de météorites martiennes : les shergottites (~25 météorites), les nakhlites (7) et les chassignites (seulement 2 exemplaires).

Mais une petite nouvelle (et pourtant doyenne de toutes) est venue perturber cette belle classification. Il faut dire que ALH84001 a eu une histoire bien mouvementée, entre sa cristallisation sur Mars il y a 4 milliards d'années, sa chute sur Terre il y a 13 000 ans, jusqu'à sa découverte en 1984, puis son heure de gloire en 1996.

Tout commence pour nous en 1984. Parmi d'autres, une météorite de 1,9 kg est découverte dans la région d'Alan Hills en Antarctique. La météorite est nommée en fonction de la date (1984) et de l'endroit (ALH = Alan Hills). Comme c'est de coutume, les météorites collectées sont ensuite rapidement décrites. Dès sa découverte, on lui trouve un air inhabituel, ce qui lui vaudra d'être la première météorite de la campagne de ramassage à être décrite, d'où son numéro 001. Cette description est succincte et se base sur la composition minéralogique de la météorite. Cela permet uniquement de faire un inventaire de ce qui a été ramassé durant la campagne. Les chercheurs se basent ensuite sur cette description pour choisir et étudier chaque météorite. Hélas, ALH84001 échoue à cette première épreuve et est classifiée en tant que diogénite, une variété rare de météorites qui proviendrait d'un gros astéroïde appelé Vesta. Et, mal rangée dans un tiroir, elle passe ainsi presque 10 ans dans l'anonymat.

LA SIGNATURE MARTIENNE

En 1993, un chercheur du NASA-Johnson-SpaceCenter de Houston s'intéresse de nouveau à elle, mais en tant que diogénite. Très rapidement, il observe plusieurs caractéristiques qui sont totalement incompatibles avec ce que cette météorite est censée être, par exemple, la présence de fer sous forme oxydée, ainsi que des carbonates dans les fissures de la roche. Afin de tirer cela au clair, la roche est analysée pour sa composition isotopique en oxygène. En effet, l'oxygène possède 3 isotopes dont les proportions varient au sein du Système solaire, mais qui restent au contraire constantes pour une seule planète. La signature isotopique en oxygène de ALH84001 se révéla identique aux autres SNC, et la météorite rentrera ainsi dans la famille des météorites martiennes, bien qu'elle n'appartienne à aucune des classes définies auparavant. Entre 1994 et 1996, plusieurs équipes tentent de mesurer l'âge de cristallisation de la météorite. Cette tâche se révéla difficile, parce que les minéraux qui composent la météorite contiennent très peu d'éléments chimiques normalement utilisés pour les datations. Bien que l'âge couramment proposé est de 4,5 milliards d'années, l'âge exact est encore inconnu, et oscille entre 3,8 et 4,5 milliards d'années. Quoiqu'il en soit, il s'agit d'un âge très ancien, plus vieux que presque toutes les roches terrestres et plus vieux également que les autres météorites martiennes.

LES QUATRE INDICES-CLÉS

Mais l'heure de gloire d'ALH84001 arrive en 1996, quand une équipe de chercheurs de la NASA déclare avoir trouvé des preuves d'activité biologique extraterrestre dans la météorite. Ils avancent ainsi plusieurs arguments, qui, pris séparément, ne constitueraient pas une preuve en soi, mais, présentés simultanément, semblent clairement indiquer l'existence de vie sur Mars : les fameux carbonates montrent une variation de leur composition chimique très particulière ; la présence de grains de magnétite ; la présence de matière organique associée aux carbonates ; les images de haute résolution prise au microscope électronique dévoilent des structures qui ressemblent à des fossiles de bactérie. Les chercheurs avancent également qu'il est improbable que ces caractéristiques soient liées à une contamination par l'environnement terrestre car elles ne sont retrouvées dans aucune autre météorite, pourtant recueillie au même endroit. Depuis, les scientifiques s'affrontent pour prouver que ces caractéristiques peuvent être expliquées par des processus non biologiques, ou représentent au contraire une preuve de vie. Reprenons chacun de ces indices.

Les carbonates et leur variation de composition – Les carbonates se présentent sous forme de petits globules de 100 à 250 microns de diamètre, et sont localisés dans les fissures et fractures de la météorite. Même s'ils ne représentent que 0,5 % de la météorite,

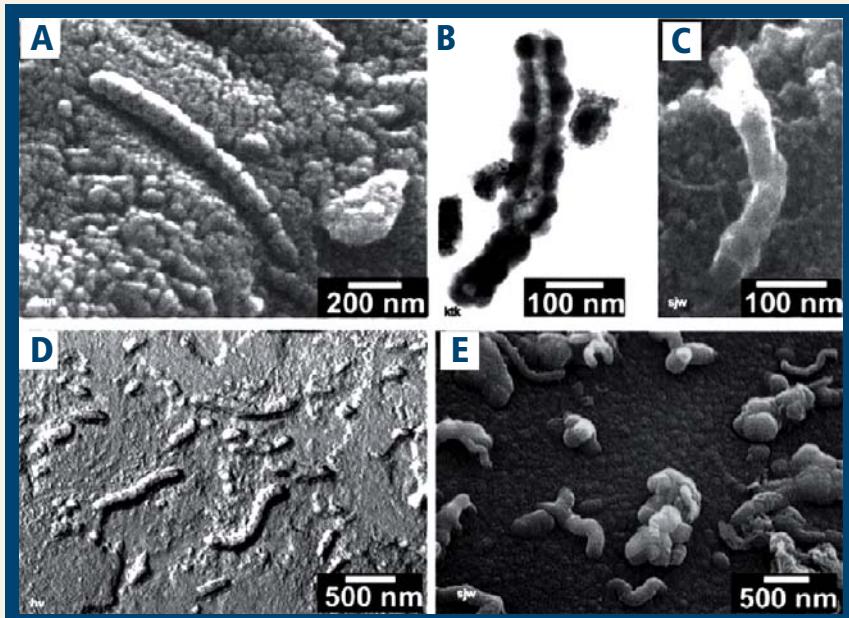


Météorite martienne ALH84001,0. © Nasa

ils contiennent tous les indices biogénétiques. Leur centre est composé de carbonate de calcium (calcite), tandis que les couches extérieures, concentriques, sont formées de carbonates de fer (sidérite) et de magnésium (magnésite). La couche la plus externe contient des petits grains de magnétite et les fameux fossiles. L'âge des carbonates oscillerait entre 1,4 et 3,9 milliards d'années, indiquant qu'ils sont systématiquement plus jeunes que la roche elle-même. Il ne fait donc aucun doute que ces carbonates sont d'origine martienne, puisque la météorite est arrivée il y a environ 13 000 ans sur Terre, après avoir erré 15 millions d'années dans l'espace. En 1996, l'équipe de la Nasa avait proposé que la variation chimique des carbonates soit liée à l'action de la vie martienne. Mais plus simplement, la circulation d'un fluide hydrothermal dans les fractures de la roche, dont la composition change dans le temps peut également expliquer la variation de composition. Il a été estimé que ces variations de composition pourraient être liées à un fluide riche en CO_2 , à très haute température (700 °C), éventuellement lors d'un impact de météorite sur Mars. Une telle température rendrait toute vie impossible. Cependant, d'autres expériences ont permis de reproduire les mêmes petits globules présentant les mêmes variations chimiques à des températures plus modestes, et acceptables pour le développement de la vie (de 0 à 150 °C). Ainsi, à partir d'une solution aqueuse riche en calcium, fer et magnésium dans laquelle sont injectées des bulles de CO_2 , portée à 150 °C et à 4,7 fois la pression atmosphérique (c'est-à-dire une pression suffisamment élevée pour que l'eau reste liquide), des globules présentant exactement les mêmes caractéristiques que dans ALH84001 (forme, variation chimique concentrique et présence de petits grains de magnétite dispersés) ont été observés. Si les carbonates indiquent clairement la présence d'eau dans le passé de Mars, leur fameuse variation chimique ne constitue donc pas une preuve de vie martienne.



Globules de carbonates, orange au centre (calcite), puis noir (sidérite) et blanc (magnésite). Le diamètre des globules fait 100 à 200 microns. © Nasa



Nanofossiles dans ALH84001 (A et D) et structures biogénétiques dans des roches terrestres (B, C et E). © Gibson et al., 2001.

ces supposées bactéries martiennes mesurent de 20 à 100 nm. Elles sont en fait jusqu'à 100 fois plus petites que leurs homologues

terrestres, et sont donc appelées des nanofossiles. En fait, les biologistes ont indiqué que la taille de ces nanobactéries n'est pas compatible avec la vie, car il n'y a tout simplement pas assez de place pour contenir le matériel biochimique nécessaire. La limite inférieure de la taille d'une bactérie a été estimée à 100 nm. Cependant des cellules viables mesurant seulement de 80 à 100 nm ont été observées dans le sang de mammifères. De plus, il existe une grande similarité entre les nanofossiles d'ALH84001 et des structures biogénétiques retrouvées dans des roches terrestres, ce qui pourrait indiquer que si les nanofossiles ne sont en fait pas vraiment des fossiles, ils représenteraient l'action des bactéries sur leur environnement. Toutefois, des expériences de dissolution d'oxyde de calcium (CaO) dans de l'eau et en présence de CO₂ mais sans aucune bactérie ont montré la croissance de petits cristaux de calcite, ayant exactement la même forme que les nanofossiles.

EN CONCLUSION

Toutes les preuves d'une activité biologique sur Mars proposées en 1996 ont depuis trouvé une autre explication abiotique. Cela ne signifie pas que la vie n'existe pas sur Mars, mais seulement que chaque observation peut être expliquée de deux manières opposées, et ne constitue donc pas un argument en faveur de la vie sur Mars. Toutefois, il semble clair maintenant que l'eau sous forme liquide, nécessaire à la vie, a existé sur Mars dans le passé. La vie bactérienne est exceptionnellement résistante à des conditions environnementales extrêmes. Les bactéries peuvent même survivre aux terribles rayons cosmiques dans l'espace, tout en devenant même plus virulentes après leur exposition. Les rovers et autres sondes terrestres envoyées sur Mars ont donc sans doute apporté une grande quantité de bactéries terrestres. Finalement, si le mystère de la vie martienne passée reste intact, la vie actuelle pourrait en tout cas être d'origine terrestre !

Vinciane Debaille ■

*Université libre de Bruxelles
Department of Earth
and Environmental Sciences*

Les grains de magnétite – Comme dit précédemment, la couche externe des globules de carbonates montre la présence de petits grains de magnétite. Plusieurs espèces de bactéries sont capables de former des cristaux de magnétite afin de s'orienter en utilisant le champ magnétique terrestre. Ces magnétites bactériennes (ou magnétosomes) sont généralement alignées selon l'axe de la bactérie, en formant une chaîne. Si une seule chaîne de magnétite a bien été observée jusqu'à présent dans ALH84001, les cristaux de magnétite la composant sont en fait trop petits pour servir de boussole. Environ seulement 25 % des cristaux de magnétite sont suffisamment larges pour remplir ce rôle, et ressemblent aux magnétosomes des bactéries terrestres. Cependant, les grains de magnétite sont alignés avec les bords des grains de carbonates. Il n'y a aucune explication d'origine bactérienne à cela. Au contraire, la décomposition à haute température des carbonates de fer pourrait expliquer la position des magnétites. Toutefois, il a été proposé récemment que le produit de la décomposition thermique des carbonates de fer soit de l'oxyde de fer pur, pas de la magnétite. Il y a en fait 6 critères pour qu'un grain de magnétite soit un magnétosome : taille et forme du cristal, structure cristalline parfaite, chaîne de magnétite, élongation de la structure du cristal de magnétite, pureté chimique. Si ces 6 critères ont bien été observés dans ALH84001, ils ne l'ont pas encore été simultanément sur le même grain de magnétite. Finalement, l'expérience recréant la formation des globules de carbonates (voir précédemment), montre qu'il est également pos-

sible de créer de petits grains de magnétite sans aucune aide biologique.

La matière organique – Des molécules organiques complexes (hydrocarbures aromatiques polycycliques, ou HAP) ont été retrouvées dans la météorite, et pourraient être liées au processus de désintégration et de fossilisation des bactéries. Cette hypothèse était corroborée par le fait que les HAP avaient été observés uniquement autour des globules de carbonates, ce qui laissait supposer une relation entre la matière organique, les carbonates et les bactéries. Mais plus tard, des HAP ont été découverts partout dans la roche, ce qui a bien sûr affaibli cette hypothèse. En fait, les isotopes de l'oxygène et du carbone ont permis de montrer qu'environ 80 % de la matière organique d'ALH84001 est en fait d'origine terrestre. Cela n'est pas très étonnant, car il ne faut pas oublier que la météorite a séjourné 13 000 ans dans les glaces de l'Antarctique avant d'être retrouvée. Toutefois, il reste donc 20 % qui serait donc d'origine extraterrestre. Mais il ne faut pas se leurrer. Même d'origine extraterrestre, les HAP peuvent également se former dans des conditions totalement inorganiques, à haute température. Des HAP ont d'ailleurs été retrouvés dans des météorites provenant de la ceinture d'astéroïdes, où la vie est clairement impossible.

Les fossiles de bactéries – Bien que visuellement spectaculaire, la présence des fossiles n'avait pas été mise en avant comme la meilleure preuve de vie par l'équipe de la Nasa en 1996. En effet, si ces fossiles ressemblent comme deux gouttes d'eau à des bactéries terrestres,