

ORIGINE DE LA VIE – I

ORIGINE EXTRATERRESTRE DE LA VIE ?

Robert SIX

I. LA METEORITE ALH84001

Dans l'article précédent, dans les conclusions, nous abordions la possibilité d'un ensemencement de notre planète par des météorites. L'analyse de certaines structures trouvées dans la météorite **ALH84001**, probablement d'origine martienne, pourrait nous apporter un début de réponse. Cette dernière a été découverte en Antarctique, dans les Allan Hills situées à l'extrémité de la chaîne transantarctique dans la région de la Terre Victoria, **le 27 décembre 1984**. C'est au cours d'une expédition du programme ANSMET qu'elle fut découverte. Elle aurait été, d'après la NASA, formée sur Mars, à partir d'une lave fondue, **il y a environ 4 Ga. Vers 15 Ma**, la percussion de Mars par une météorite l'aurait éjecté, et après un long périple dans le système solaire elle aurait atteint notre Terre **il y a environ 13.000 ans**.

II. CARACTERISTIQUES DE AHL84001

Lors de sa découverte, **ALH84001** se présentait sous la forme d'un bloc rocheux de **17 x 9,5 x 6,5 cm** d'un **pooids de 1,93 Kg**. La majorité de sa surface était recouverte d'une croûte de fusion d'un gris verdâtre, d'une remarquable fraîcheur. Les zones internes mises à nu présentaient un aspect grisâtre.

Selon la nomenclature en vigueur pour la dénomination des météorites, les trois lettres **ALH** rappellent le lieu de collecte : **Allan Hills**. Le **nombre 84** fait référence à l'année de sa découverte. Etant la première météorite trouvée dans cette zone de recherche, lors de cette expédition, on lui attribua le **nombre 001**. Son aspect insolite ayant retenu l'attention des chercheurs, elle fut immédiatement expédiée au centre Johnson de la NASA, où elle fut examinée.

Sur la base de sa composition minéralogique, **ALH84001** a été classée parmi les **achondrites**. Les météorites qui sont des fragments d'astéroïdes sont réparties en deux grandes classes :

- **rocheuses**, qui représentent **90% des météorites** connues. On divise celles-ci en **chondrites** (qui referment de nombreuses inclusions minérales sphériques : les chondres) et en **achondrites** (dans lesquelles les minéraux ne forment pas de chondres) ;
- **métalliques**, constituées presque exclusivement de nickel et de fer ;

On peut également rencontrer des météorites métallo-rocheuses ou mixtes.

La composition de ces corps célestes dépend de l'astéroïde dont elles proviennent ou des parties de celui-ci s'il a été fragmenté.

III. ORIGINE DE ALH84001

En première analyse, en 1985, ALH84001 fut classifié comme étant une diogénite, groupe relativement rare d'achondrites provenant de Vesta, bloc rocheux d'assez grande taille de la ceinture des astéroïdes.

Les diogénites sont des achondrites pauvres en calcium (moins de 3%), avec des pyroxènes moyennement riches en fer (hypersthène).

C'est la composition inhabituelle d'ALH84001 et la limite de la classification des météorites en vigueur à l'époque qui provoqua la confusion. En 1993, de nouvelles analyses permirent de lui attribuer une origine martienne. Ces analyses sont basées sur plusieurs techniques, comme l'évaluation du pourcentage de certains atomes radioactifs instables se transformant en atomes stables. En effet, les proportions des couples $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{87}\text{Ru}/^{87}\text{Sr}$ sont les plus utilisées pour dater des roches et des météorites de plus de 3 Ga. Plus il y a d'atomes stables (Pb et Sr) plus la roche est ancienne. Les sondes Viking qui se sont posés sur Mars en 1976 ont permis de récolter des renseignements sur les éléments principaux du sol martien. En comparant les compositions d'atomes et de leurs isotopes d'ALH84001 avec celles relevées sur Mars, les scientifiques de la NASA ont constaté qu'elles étaient identiques. Ce qui prouve bien l'origine martienne de la météorite !

De plus, en mesurant le taux de décroissance naturel des isotopes, ils sont arrivés à la conclusion que ce bout de roche était âgé de 4,5 Ga, alors que les planètes se sont formées aux alentours de 4,56 Ga.

Alh84001 est l'un des deux plus vieux cailloux du système solaire trouvés sur Terre. Une autre météorite, Canyon Diablo, a été récoltée dans le Meteor Crater en Arizona. Elle a été datée de 4,54 Ga. La plus ancienne météorite connue à ce jour est celle de 4,56 Ga qui est tombé, en 1969, à Allende au Mexique. D'un poids de deux tonnes, elle s'est brisée en plusieurs morceaux lors de l'impact. Elle contient du carbone et des cristaux interstellaires en provenance d'une autre étoile.

IV. COMPOSITION

ALH84001 est une roche cristalline constituée en majorité par une seule espèce minérale, le pyroxène. Pour rappel, les pyroxènes sont des minéraux essentiels des roches magmatiques et métamorphiques que l'on rencontre couramment dans les laves basaltiques. Ces isosilicates cristallisent dans le système orthorhombique (orthopyroxènes) ou monoclinique (clinopyroxènes). Dans notre météorite, ce sont des orthopyroxènes qui se présentent sous forme de cristaux relativement grossiers pouvant atteindre 5 mm de long. Du fait de sa grande richesse en orthopyroxènes, les géologues la désignent sous le terme d'orthopyroxénite.

En plus de ses 97% de pyroxènes, ALH84001 contient d'autres minéraux, tels que des oxydes de fer (chromite et magnétite), des sulfures de fer (pyrite et pyrrhotite), des phosphates (apatite), des plagioclases métamorphisés en maskelynite par l'impact, de l'olivine, de la silice et des petits nodules de carbone.

V. GENESE D'ALH84001

L'histoire d'ALH84001 est assez complexe. Elle a dû cristalliser, il y a 4,5 Ga à partir d'une poche de magma profonde dans la croûte martienne. Durant le refroidissement

du bain silicaté, les cristaux de pyroxènes se sont formés et se sont accumulés et cimentés par sédimentation sur le fond de la chambre magmatique pour former une orthopyroxénite.

Aux alentours de 4,2 Ga, un premier impact affecte la croûte martienne et la poche magmatique solidifiée, la rapprochant vraisemblablement de la surface. Des cavités et des fissures se forment permettant à des fluides hydrothermaux de percoler à travers la masse et d'y déposer des minéraux, dont des carbonates.

Un deuxième impact beaucoup plus récent éjecte dans l'espace ce qui sera ALH84001. Pour qu'une roche puisse atteindre une vitesse de libération suffisante, il faut que l'impact soit tangentiel à la surface de l'astre percuté. Deux cratères martiens ovales, résultat d'un impact tangentiel, pourraient faire de bons candidats potentiels. Ils sont situés dans la région d'Evros Vallis et d'Hesperia Planum.

Ensuite, la météorite va errer dans le système solaire pendant 15 Ma avant d'entrer en collision avec la Terre. Durant la traversée de l'atmosphère terrestre, elle perdra, par ablation, une couche rocheuse de près de 5 cm. Elle attendra 13.000 ans avant d'être ramassée un beau jour de décembre 1984.

Avec ses 4,5 Ga, c'est la plus ancienne des météorites martiennes connues à ce jour.

VI. INDICES EN FAVEUR D'UNE VIE MARTIENNE

C'est le 6 août 1996 qu'ALH84001 fit son entrée triomphale dans l'Histoire, lorsque la NASA (en collaboration avec trois universités et un chercheur de la société Lockheed Martin) annonce dans un article avoir découvert en son sein des traces d'une vie fossile martienne. Coup de pub pour relancer l'intérêt du Congrès américain et obtenir des subsides, ou réalité d'une observation de structures biogéniques ?

Quatre types d'indices, suggérant l'existence probable d'une vie sur Mars, il y a 4,5 Ga, sont relevés :

- structures ressemblant à des bactéries fossiles telles que celles découvertes dans des roches de 3,5 Ga sur Terre (voir articles sur les plus vieilles roches) ;
- des carbonates présentant une zonation chimique très particulière ;
- des nanocristaux de magnétite, semblables à ceux élaborés par des bactéries sensible au champ magnétique terrestre ;
- des molécules organiques (HAP) analogues à celles qui se forment à la mort des cellules vivantes.

L'équipe de chercheurs de la NASA avait insisté sur le fait que pris séparément, ces indices ne prouvaient pas la possibilité d'une vie sur Mars, mais que dans le contexte d'une association spatiale (ils sont amalgamés ensemble au sein de nodules carbonatés), l'hypothèse d'une origine biologique était la plus plausible et la plus raisonnable.

Toutefois, sept ans après l'annonce spectaculaire et de nombreux travaux réalisés sur les différents éléments d'ALH84001, des explications abiotiques plausibles ont été avancées. Nous allons reprendre les quatre types d'indices et analyser succinctement les résultats de ces diverses études.

VII. LES NANOFOSILES

C'est par **micrographie électronique** que les chercheurs détectèrent des structures tubulaires d'apparence biologique qui évoquaient des bactéries fossilisées dans un contexte minéral contenant des acides aminés (alanine, glycine, sérine) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), généralement considérés comme des marqueurs biologiques. Pourtant, une caractéristique majeure les différencie des bactéries terrestres : leur grandeur !

Ces structures mesurent **entre 20 et 100 nanomètres**, soit **100 fois moins** en taille que les bactéries terrestres, et **un million** de fois inférieure en volume. Conséquences :

- avec les moyens technologiques actuels, il est difficile de déceler les détails ;
- en dessous d'une taille de **200 nanomètres**, les microbiologistes considèrent qu'un organisme n'est pas viable, vu l'étroitesse de l'espace disponible pour ranger la machinerie cellulaire nécessaire aux fonctions vitales. Cependant, des recherches récentes montreraient qu'il pourrait exister sur Terre des organismes de cette taille : dans les basaltes de la croûte, ou les sources chaudes du Yellowstone (USA).

De nombreuses équipes de chercheurs se sont penchées sur l'hypothèse de la NASA pour la rejeter. Les nanofossiles ne seraient que des excroissances cristallines à la surface des carbonates, ou des minéraux. Une contamination par des bactéries terrestres n'est pas non plus à exclure. Celles-ci auraient pénétré la météorite avant de se fossiliser.

Certains opposants à l'origine biologique de ces structures, parlent d'artefacts liés au procédé de préparations des échantillons (métallisation pour microscopie électronique). Les échantillons sont recouverts d'un dépôt d'une très fine pellicule de métal (or ou or-palladium) afin de les rendre conducteurs pour éviter l'accumulation des électrons à leur surface. La formation durant cette opération de grumeaux peut être possible. L'observation à l'aide d'un **microscope à force atomique** permet d'éviter ce type de préparation tout en gardant la même résolution qu'un **microscope électronique**. Les structures dans ce cas de figure apparaissent bien dans les nodules, écartant donc l'hypothèse des artefacts.

Des examens plus approfondis ont révélé la présence de structures semblables à des biofilms. Les biofilms sont des films gluants sécrétés par les bactéries dans un environnement favorable à leur développement. C'est ce type de processus qui est mis en oeuvre dans la formation des stromatolites. Dans le cas d'**ALH84001**, rien ne permet d'avancer que ces structures ont une origine martienne. En effet, lors de son séjour dans l'Antarctique, elle aurait pu être contaminée par des microorganismes terrestres.

Enfin, les différentes équipes chargées des analyses travaillent sur des fragments différents de la météorite. Les structures observées ne sont pas les mêmes et peuvent correspondre à des éléments abiotiques comme biotiques. Pour les chercheurs de la NASA, les structures étudiés par les autres équipes sont bien trop nombreuses, trop ordonnées, trop rapprochées et trop petites pour correspondre à des nanofossiles. Les nanofossiles 'vrais' sont, au contraire, isolés, incurvés, et se recourent selon des angles variables.

VIII. LES GLOBULES DE CARBONATES

Bien qu'ils n'occupent **que 0,5%** de la roche, ces globules de carbonate sont extrêmement importants, car ils renferment toutes les structures biogéniques : nanofossiles, molécules organiques, cristaux de magnétite. De plus, leur zonation chimique pourrait constituer une preuve de l'existence d'une activité biologique au sein de la météorite. Ils apparaissent sous forme de petites sphères orange, ou sous forme de galettes et peuvent obstruer les fissures. Indubitablement, ils sont d'origine martienne.

Les carbonates, d'une taille de **100 à 250 µm**, occupent presque exclusivement les cavités et les fissures dont **ALH84001** est truffé. Ils présentent une zonation concentrique particulière, à la manière d'un oignon, c'est-à-dire constituée de plusieurs couches. La partie centrale, de couleur orangée, formée principalement de carbonate de calcium (calcite), est entourée de trois anneaux respectivement noir, blanc et à nouveau noir. Les anneaux interne et externe sont composés de carbonates de fer (sidérite), tandis que l'anneau central blanc est constitué de carbonate de magnésium (magnésite). La zone externe contient des grains minuscules de magnétite et de sulfures. Le rapport manganèse/fer, au sein des nodules de carbonates présente des variations non négligeables du centre vers la périphérie.

L'équipe de la NASA voyait dans ces zonations, le résultat de réactions d'oxydoréduction placées sous contrôle biologique. Cependant des études contradictoires démontraient que ce genre de phénomènes pouvait avoir une origine abiotique : un fluide de composition chimique variable dans le temps peut déposer des dépôts concentriques similaires à ceux observés dans les fissures d'**ALH84001**. Certains chercheurs, dans un premier temps, avaient même vu dans ces nodules, des squelettes de foraminifères, protozoaires marins constituant le plancton. Heureusement, cette hypothèse a été abandonnée à la suite des objections d'un paléontologue de renom.

La controverse concernant l'âge et la formation de ces nodules de carbonate reste vive. Pour une bonne partie de la communauté scientifique, ils atteindraient **3,9 à 4 Ga**. D'autres estiment qu'ils seraient nettement plus jeunes : **500 à 600 Ma** après la formation de la météorite. Quand à leur formation, pour les uns, il s'agirait de l'interaction d'un fluide très riche en CO₂ avec des silicates, à des températures assez élevées (**700° C**). Pour d'autres, qui s'appuient sur les isotopes de l'oxygène, certains gaz rares et la magnétisation résiduelle de la météorite, il s'agirait d'une précipitation des carbonates dans des conditions moins drastiques (**entre 0° C et 80° C**).

L'argument en faveur de cette dernière conclusion est qu'ALH84001 possède un magnétisme fossile, conservé par un sulfure de fer, la pyrrhotite. Lors de sa formation, certains minéraux de la roche ont acquis une orientation particulière, sous l'action du champ magnétique de la planète d'origine. Cette orientation peut toutefois être effacée si la roche est portée au-delà d'une certaine température qui varie selon les minéraux : **580° C** pour la magnétite, **325° C** pour le sulfure de fer. Il est donc probable qu'ALH84001 n'est pas subit d'augmentation de température au dessus du seuil de démagnétisation du sulfure de fer.

IX. NANOCRISTAUX DE MAGNETITE

Nous avons vu que la dernière couche des nodules de carbonate comportait des petits cristaux (entre 10 et 75 nm) de magnétite, un oxyde de fer répondant à la formule Fe_3O_4 . La majorité de ces cristaux sont semblables à ceux que l'on rencontre dans toutes les laves terrestres. Cependant une petite population d'environ 25% présente des caractéristiques particulières, que l'on ne retrouve que chez les bactéries sensibles au champ magnétique.

Sur Terre, plusieurs espèces de bactéries, les **magnétotactiques**, possèdent ce genre de structures qui leur permet de s'orienter dans leur environnement, généralement très appauvris en oxygène. Elles peuvent se déplacer suivant les lignes du champ magnétique terrestre jusqu'à trouver le gradient optimal d'oxygène. C'est probablement un avantage évolutif par rapport à une recherche selon les trois axes de l'espace.

Les **magnétosomes** sont constitués de minuscules cristaux de magnétite (entre 30 et 100 nm) enveloppés d'une membrane. Ils sont alignés, formant des chaînes selon le grand axe de la bactérie. Ce sont des objets uniques dans le monde du vivant (et même dans le monde de la technologie humaine), de part leur taille, leur rapport longueur sur largeur, leur élongation, leur système cristallin (hexaoctaédrique tronqué), leur grande pureté chimique, leur absence de défauts. Actuellement, aucun procédé autre que biologique n'est à même de produire des cristaux dotés de ces caractéristiques, ce qui est en faveur d'une origine biochimique pour les cristaux trouvés dans ALH84001.

Une dernière caractéristique pouvant confirmer cette origine biologique est la configuration en forme de collier, inconnue dans le monde minéral, que prennent ces cristaux de magnétite. Les chaînettes de magnétite observées sous la surface d'ALH84001 possèdent les six propriétés particulières dues aux bactéries : tailles et formes homogènes, espaces entre cristaux, liés à la présence d'une gangue de matière organique, orientation particulière, flexure des chaînes après la mort de la cellule, présence d'une membrane entourant la chaîne.

Malgré ces arguments, certains chercheurs considèrent que ces cristaux ont une origine abiotique : cristaux pouvant se former par précipitation chimique à partir de fluides chauds ; décomposition thermique (450° C) du carbonate de fer (sidérite) sous l'action de la chaleur dégagée par un impact météoritique.

D'autres minéraux pouvant avoir une origine biologique ont également été détecté dans la zone externe des nodules de carbonate. Il s'agit de sulfure de fer. Sur Terre des bactéries sulfato-réductrices sont à même de réduire des sulfates (SO_4^{2-}) en sulfures, afin de produire de l'énergie. Ces sulfures sont parfois enrichis en ^{32}S par rapport au sulfate d'origine, ce qui confirme leur origine biochimique. Des analyses sur des échantillons d'ALH84001 n'ont pas montré un enrichissement en ^{32}S par rapport au ^{34}S , ce qui remet en cause l'hypothèse biologique. Des mesures sur des cristaux plus petits situés dans les alentours immédiats des cristaux de magnétite permettraient de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Mais, les instruments scientifiques sont malheureusement à la limite de leurs capacités pour ce genre de mesures.

X. LES HAP

Les chercheurs de la NASA ont également relevé la présence de molécules organiques complexes, les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). On les rencontre, sur Terre, au niveau des cadavres cellulaires, car elles constituent les produits terminaux de décomposition des organismes vivants. Dans ALH84001, ces HAP sont concentrés à nouveau dans les nodules de carbonate à proximité des nanofossiles. Conclusion logique vite émise par les scientifiques : il s'agit des résidus des cadavres de cellules martiennes fossilisés.

Ici également, une controverse s'est développée. Après une nouvelle analyse, il semble que la distribution des HAP ne se limite pas aux nodules, mais plutôt à l'ensemble de la météorite. Cette étude est toutefois sujette à caution du fait que les échantillons ont été traités avec des solvants organiques qui ont pu contaminer la météorite.

Il est évident que le problème de contamination doit être pris en compte, car une météorite qui atterri sur Terre est très vite envahie par des organismes terrestres. Ainsi, 80% de la matière organique trouvée sur ALH84001 est d'origine terrienne, ce qui est logique après un séjour de 13.000 ans.

Grâce au ^{14}C découvert sur ALH84001, les chercheurs ont pu dater les molécules organiques. En effet le ^{14}C ne se produit qu'au niveau de l'atmosphère terrestre et possède une durée de vie relativement courte à l'échelle des temps géologiques. Ces molécules se situeraient entre 11.000 et 5.200 ans et se sont donc formées après l'arrivée de la météorite sur Terre. On a également trouvé des acides aminés (sérine, glycine, alanine) qui sont clairement d'origine terrestre.

Les HAP ne sont pas des molécules exclusivement biologiques. Elles peuvent se former à partir d'autres composés organiques sans intervention de la vie. Les HAP d'ALH84001 peuvent avoir été importés sur Mars par des chondrites carbonatées au même titre que la Lune qui est enrichie par la chute de météorites qui la bombardent.

XI. CONCLUSIONS

Près de 15 ans après l'annonce de la NASA, malgré la quantité impressionnante d'études, d'analyses, de travaux effectués sur ce morceau de caillou de près de 2 Kg, aucune preuve concluante n'a été apportée à ce dossier en faveur d'une quelconque vie martienne. Seuls, les nanocristaux de magnétite constituent le seul indice en faveur de l'hypothèse biologique a avoir résisté aux innombrables contre-expertises.

Cette découverte a toutefois provoqué une flambée d'intérêt à travers le milieu scientifique pour la recherche de microfossiles dans les plus vieilles roches terrestres, entraînant le développement de techniques de microanalyses de plus en plus pointues et l'identification de biosignatures à même de reconnaître avec certitude des traces possibles de vie dans des matériaux extraterrestre.

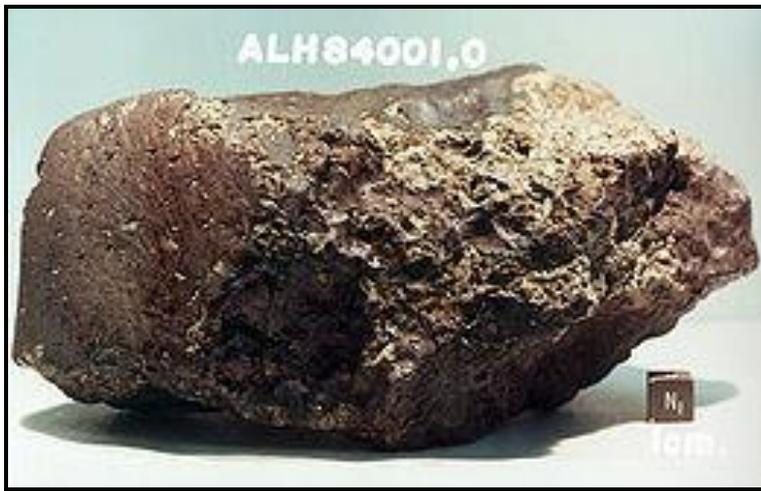


Fig. 1 – ALH84001

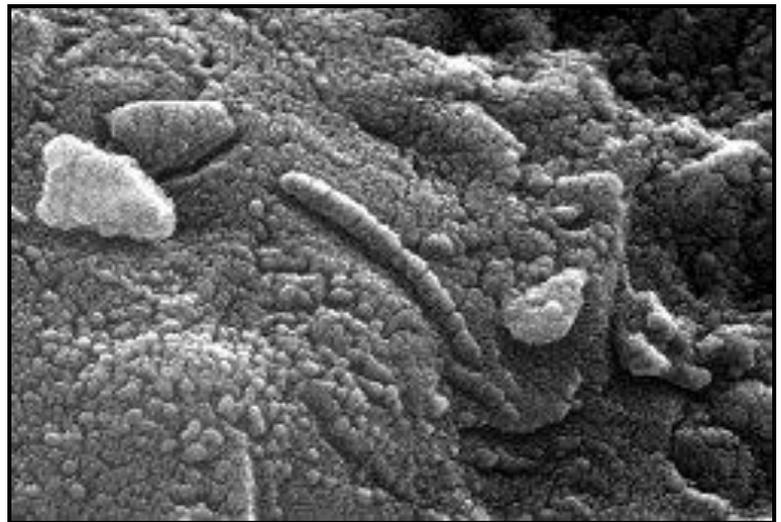


Fig. 2 – Nanofossiles découvert sur ALH84001

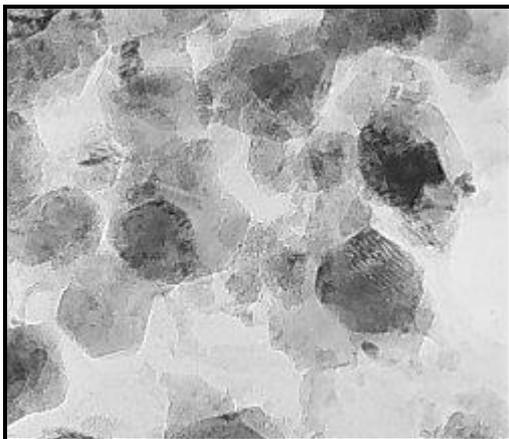


Fig. 3 – Grains de magnétite

XII. BIBLIOGRAPHIE

- ❖ http://fr.wikipedia.org/wiki/ALH_84001
- ❖ **BENDJOYA P.** (1998) – *Collisions dans le système solaire*, Belin.
- ❖ **MEINESZ A.** (2008) – *Comment la vie a commencé*, Belin – Pour la Science.