

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.

Agrégats métalliques et nombres magiques

MATTHIAS BRACK

L'observation de minuscules agrégats métalliques révèle pourquoi les solides réagissent différemment des atomes qui les composent.

Quand on chauffe un morceau de métal jusqu'à l'évaporation et que l'on injecte la vapeur dans une chambre à vide, le jet se condense en minuscules agrégats composés de quelques atomes à quelques milliers d'atomes. Ces agrégats métalliques, de taille bien inférieure à celle des grains de sable, constituent un arrangement de la matière aux propriétés étonnantes.

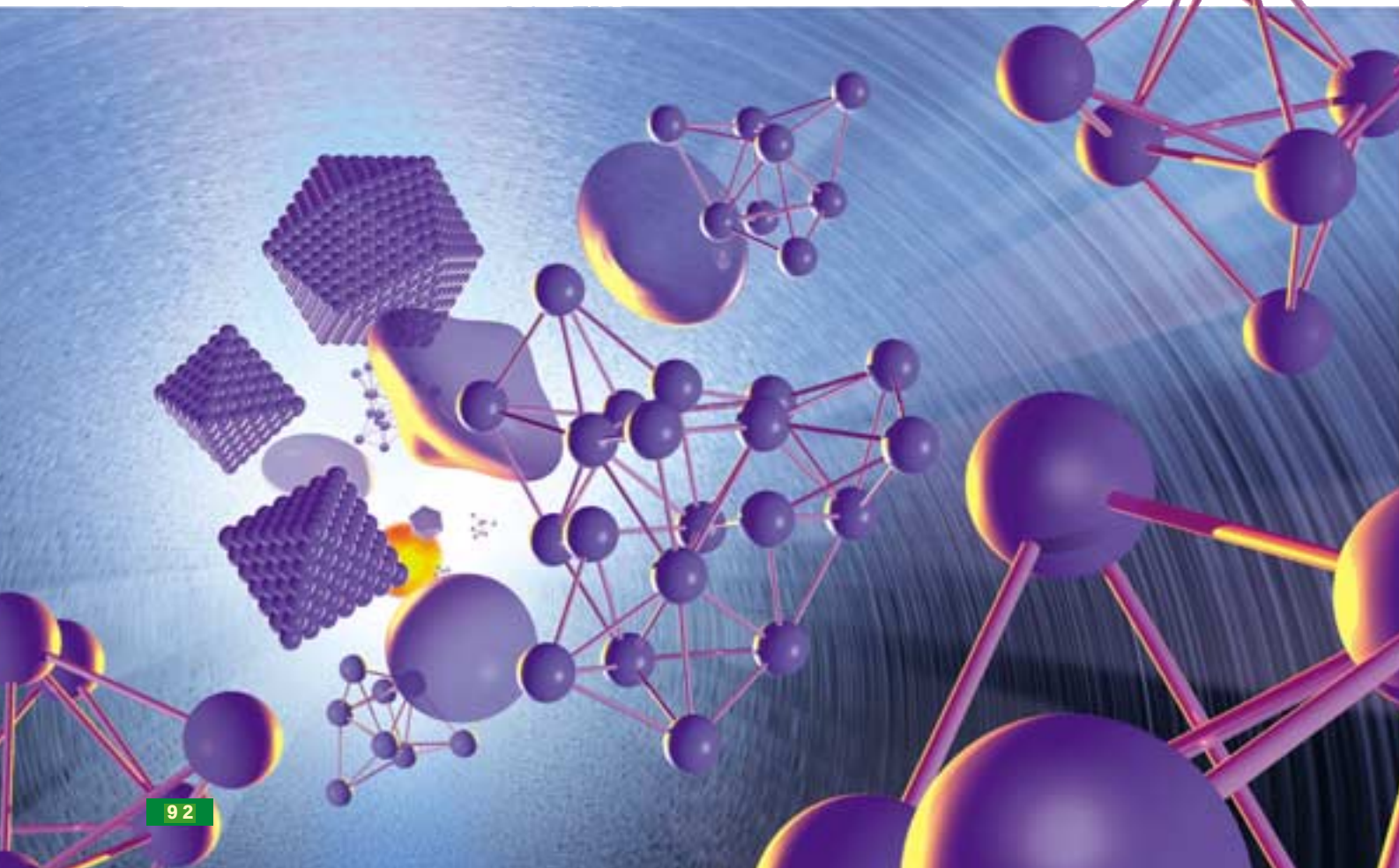
Bien que la plupart des expériences sur les agrégats mettent en jeu de minuscules solides, les agrégats métalliques

peuvent, en principe, être arbitrairement grands. Ce sont des systèmes intermédiaires entre les atomes, ou les molécules isolées, et les solides, ou les liquides macroscopiques. En ce sens, ils relient le microcosme au macrocosme.

Les physiciens s'étonnent de leurs propriétés. Pourquoi certains d'entre eux sont-ils plus stables que d'autres? À partir de combien d'atomes les propriétés d'un agrégat ressemblent-elles à celles de la matière organisée? Comment la structure d'un agrégat change-t-elle lorsqu'on lui ajoute des atomes?

Les chimistes, également, s'intéressent beaucoup aux agrégats, car ils savent que certains agrégats métalliques sont de remarquables catalyseurs de réactions chimiques. Ils aimeraient une meilleure compréhension de leurs propriétés, car ils en auraient ainsi une meilleure maîtrise. Après dix années de recherche, cette compréhension est proche.

Examinons d'abord pourquoi, lorsque l'on forme des agrégats métalliques,





certaines tailles se forment plus fréquemment que d'autres. L'exploration des éléments chimiques, au siècle dernier, a fait apparaître un phénomène analogue : les éléments les plus stables possèdent 2, 10, 18, 36 ou 54 électrons. Ce sont les «gaz rares», qui sont chimiquement inertes. Puis, au cours du XX^e siècle, les physiciens ont découvert que les noyaux atomiques contenant 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 protons ou neutrons sont également exceptionnellement stables. Pour cette raison, ces noyaux sont dits «magiques». Le noyau du plomb, qui contient 82 protons, est «magiquement stable», et la forme de cet élément contenant 126 neutrons est «doublement magique».

Stabilité magique

Les agrégats métalliques peuvent être également magiques. En 1984, des physiciens de l'Université de Berkeley ont étudié des agrégats formés à partir de sodium métallique chauffé. Ils ont observé que les agrégats à 8, 20, 40 ou 58 atomes sont beaucoup plus nombreux que les autres. Cette abondance est due à leur exceptionnelle stabilité.

Aujourd'hui les physiciens savent que, quand on chauffe des agrégats instables à une température suffisante, ils perdent des atomes et se transforment en agrégats plus petits et plus stables. Pour les agrégats stables de sodium chaud, la séquence des nombres magiques continue avec 92, 138, 198, 344, 442, 554... Les agrégats de sodium (et de plusieurs autres métaux) contenant ce nombre d'atomes demeurent stables même lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à devenir des gouttelettes liquides.

Pourquoi ces nombres ? Parce que les électrons de liaison ne peuvent avoir que certaines énergies.

Dans les atomes isolés, les électrons surnuméraires par rapport au nombre d'électrons des gaz rares sont faiblement liés et

s'éloignent facilement de l'atome. Ces électrons «de valence» sont responsables des différentes propriétés chimiques des éléments.

Dans un agrégat métallique (ou dans un morceau de métal plus gros) les électrons de valence ne restent pas attachés à leur atome d'origine, mais se déplacent librement entre les atomes : ils sont délocalisés. Néanmoins, ils demeurent à l'intérieur ou à proximité de l'agrégat, parce qu'ils sont attirés par les charges devenues positives des atomes qu'ils quittent (sans les électrons de valence, les charges positives du noyau ne sont plus équilibrées par un nombre égal de charges négatives, et l'atome, précédemment neutre, devient un ion positif).

Pour comprendre pourquoi un agrégat particulier est stable, les physiciens devraient calculer la configuration détaillée de tous les ions internes et de tous les électrons de valence. Le calcul de cette configuration est difficile, mais on obtient de bons résultats en modélisant un agrégat métallique par une «gelée» homogène, chargée positivement et capable d'attirer les électrons de valence.

Les énergies des électrons de valence sont quantifiées, c'est-à-dire que leurs énergies ont des valeurs déterminées, jamais des valeurs intermédiaires. En outre, dans un agrégat métallique tout comme dans un atome, les énergies accessibles ne sont pas espacées régulièrement, mais groupées en paquets de niveaux proches, séparés par de grands espaces. Pour des raisons historiques, ces paquets de niveaux d'énergie sont nommés couches électroniques, bien que les électrons ne soient pas phy-

siquement dans des couches. Le nombre d'électrons que peut contenir chaque couche est limité et, lorsqu'une couche est pleine, l'atome ne réagit pas avec les autres atomes. Les atomes dont les couches sont entièrement remplies sont ainsi particulièrement stables.

Dans les agrégats métalliques, les nombres magiques correspondent au nombre d'électrons de valence qui remplissent complètement une ou plusieurs couches et rendent ces agrégats stables (le même phénomène préside à la stabilité des noyaux atomiques : lorsque les protons et les neutrons remplissent complètement une couche, le noyau est stable).

Les agrégats métalliques les plus stables sont quasi sphériques ; les autres sont étirés ou aplatis, comme des crêpes ou des ballons de rugby, voire des poires, des citrons, des diamants ; parfois même, ils ne présentent aucune symétrie. Dans tous les cas, la forme est celle pour laquelle l'énergie totale de l'agrégat est minimale. Comme le même phénomène de déformation se retrouve à propos des noyaux atomiques, les physiciens des agrégats ont repris certains outils théoriques utilisés en physique nucléaire.

La mécanique quantique décrit parfaitement les couches électroniques des agrégats et les nombres magiques qui leur correspondent. Cette théorie est peu intuitive, mais on peut comprendre l'existence des nombres magiques en se fondant uniquement sur les concepts classiques, qui s'appliquent aux objets macroscopiques.

On doit alors utiliser la théorie des orbites périodiques, mise au point au début des années 1970 pour établir une passerelle entre la mécanique quantique et la mécanique classique. À l'aide de cette théorie, on détermine les énergies des principales couches dans un système contenant des électrons ou d'autres petites particules.

1. LORSQUE DU MÉTAL EST VAPORISÉ dans une longue tuyère où règne le vide, les agrégats métalliques créés peuvent être de petites molécules avec des liaisons rigides, de gros agrégats d'atomes qui s'empilent en polyèdres réguliers, ou bien des «gouttes liquides». Au cours d'expériences différentes, on obtient ces différentes variétés en abondance.