



11. REPRISE DU CONCRÉTIONNEMENT sur le plan de cassure d'une stalagmite de la grotte de Rialb. La grotte est située dans la zone épiscopale du séisme de 1428 en Catalogne. Les géologues tentent de dater l'âge de la cassure.

Les perturbations engendrées dans le karst par des événements sismiques affectent une structure à géométrie connue à un moment donné de l'évolution karstique. Le cas le plus favorable à ce type d'étude est une galerie fossile, horizontale, riches de dépôts divers, dont le concrétionnement est encore actif. Le rejeu brutal le long d'une faille recoupée par le réseau peut provoquer un décalage de la section de la galerie, comme dans la grotte de Tavel, en Languedoc.

En Lombardie, dans le réseau de Virginia Macchi, c'est un joint de stratification, remobilisé en faille inverse par un séisme postérieurement à la genèse de la conduite forcée, qui décale la galerie. Le rejet de la faille est visible dans le vide karstique, associé à un écaillage frais de la paroi. À Trieste, la «Grotta del guano» a enregistré des mouvements néotectoniques compressifs qui ont décalé la voûte de la galerie et les cupules de corrosion.

Le rejeu tectonique en décrochement à composante verticale peut décaler la discontinuité initialement empruntée par la karstification. Le rejet est alors

visible le long de la galerie. Ce type de mouvement a été signalé dans le massif karstique suisse de Sieben Hengste par P.-Y. Jeannin (Université de Neuchâtel) ou dans la grotte d'Arphilia, dans les Pyrénées-atlantiques (Pierre-Saint-Martin), où une faille recoupe postérieurement une galerie sèche sans respecter les orientations préalables des vides karstiques.

Les mouvements sismiques de failles et les ondes sismiques associées déplacent les masses au sein de la cavité. Dans la grotte du Père Noël, en Belgique, apparaissent des effondrements de blocs de la voûte, des chutes de colonnes stalagmitiques et de blocs en équilibre critique, des cônes d'éboulis frais non stabilisés et des écaillages sur les discontinuités tectoniques remobilisées.

La plupart de ces observations ont été réalisées dans des zones où se sont produits des séismes déjà connus et référencés dans les catalogues historiques. Les datations précises des anomalies ont validé la méthode. L'objectif des géologues est maintenant d'appliquer cette approche de la paléosismicité à des régions où aucun séisme historique n'est recensé.

Les concrétions des grottes sont un sujet d'analyse subtil : les découvertes de grottes, dont la fréquence est amplifiée par le développement de la spéléologie, amènent une matière nouvelle qu'il est passionnant – et utile d'étudier.

Paul DUBOIS est ingénieur géologue, ancien Directeur de l'Exploration à Elf-Aquitaine, membre associé du comité des applications de l'Académie des Sciences. Bertrand GRELLET est docteur en géologie, responsable du secteur Recherche et Développement de la Société GEOTER, à Montpellier. L'identification des paléoséismes à travers l'analyse des déformations en grottes est une des techniques développées au sein de cette société en collaboration avec le Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations nucléaires de l'IPSN et le Laboratoire des sciences géographiques et de l'aménagement de l'Université de Provence (J.-L. Guendon et P. Ambert).

L'essentiel des données et documents photographiques présentés dans cet article a été acquis à la grotte de Clamouse, près de Montpellier. Clamouse, qui présente une extraordinaire richesse et une diversité de concrétions de calcite et d'aragonite est actuellement la cavité souterraine de France la plus étudiée par carottage, datations et prélèvements automatiques d'eau de percolation. Sont associées à ces recherches des équipes de chercheurs français et étrangers, parmi lesquels Y. Quinif (Faculté polytechnique de Mons, Belgique), S. Frisia et A. Borsato (Musée Trentin de sciences naturelles, Trente, Italie), A. Bini (Département de sédimentologie, Fac. des sciences, Milan, Italie), F. Mc Dermott (Univ. de Dublin), P. Audra (Département de géographie, Univ. de Nice), J.-J. Delannoy (Département de géographie, Univ. de Grenoble).

A. BINI, Y. QUINIF, O. SULES et A. UGGERI, *Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie)*, in *Karstologia*, n° 19, pp. 23-30, 1992.

P. DELANGE, *Étude de la néotectonique dans l'endokarst : exemple de la moyenne Durance*, DEA Univ. de Provence, 1995.

P. FORTI et D. POSTPISCHL, *Seismotectonics and Radiometric Dating of Karst Sediment*, in *Proceedings of the Workshop on Historical Seismicity of Central Eastern Mediterranean Region*, Enea Cre Casaccia, pp. 320-333, 1998.

D. GENTY, *Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites*, in *C.R. Acad. Sci.*, tome 317, série II, pp. 1229-1239, 1993, Paris.

A. LEVRET, Ph. COMBES et Th. GRANIER, *Sismicité et archéologie : une approche pluridisciplinaire*, Actes du colloque Génie parasismique et aspects vibratoires dans le génie civil, AFPS, pp. 19-27, 1996.

Y. QUINIF, D. GENTY et R. MAIRE, *Les spéleoéthèmes : un outil performant pour les études paléoclimatiques*, in *Soc. Géol.*, tome 165, n° 6, pp. 603-612, 1994, France.

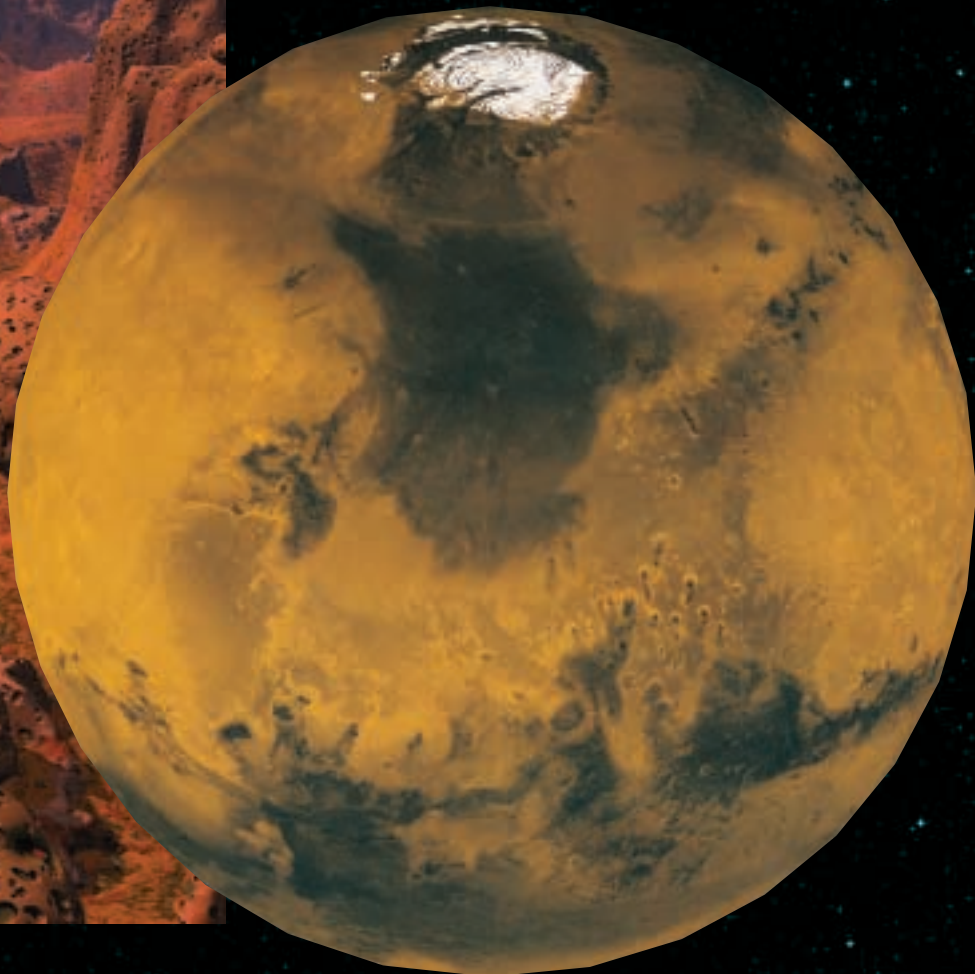
Les changements climatiques sur Mars

JEFFREY KARGEL • ROBERT STROM

Mars, planète aujourd'hui sèche et gelée, aurait autrefois été couverte de rivières, d'océans et de glaciers. A-t-elle abrité la vie ?



1. AUJOURD'HUI LA SURFACE DE MARS est sèche : la mosaïque d'images prises par des sondes spatiales en orbite (*ci-dessous*) révèle que la faible quantité d'eau contenue dans la mince atmosphère martienne se condense souvent en givre, particulièrement près du pôle Nord (*zone blanche*), où elle forme une calotte de glace permanente. La région polaire australe, où les températures sont inférieures, serait couverte en grande partie de dioxyde de carbone gelé. Un paysage martien typique (*à gauche*) ne présenterait donc aucune trace d'eau, sauf peut-être quelques plaques de givre ou des vallées creusées par des écoulements passés.



En août 1996, des planétologues de la NASA annoncent qu'une météorite originaire de Mars porte des traces de vie extraterrestre fossile. Le président des États-Unis célèbre la découverte, et la NASA envisage de modifier son programme d'exploration de Mars afin d'accélérer le retour sur Terre de roches martiennes. C'est ainsi une vieille histoire qui recommence : au début de ce siècle, l'astronome américain Percival Lowell avait vu sur Mars, au télescope, un vaste réseau de canaux bordés de végétation et avait convaincu le public de l'époque que les conditions climatiques à la surface de cette planète devaient ressembler à celles qui règnent sur Terre.

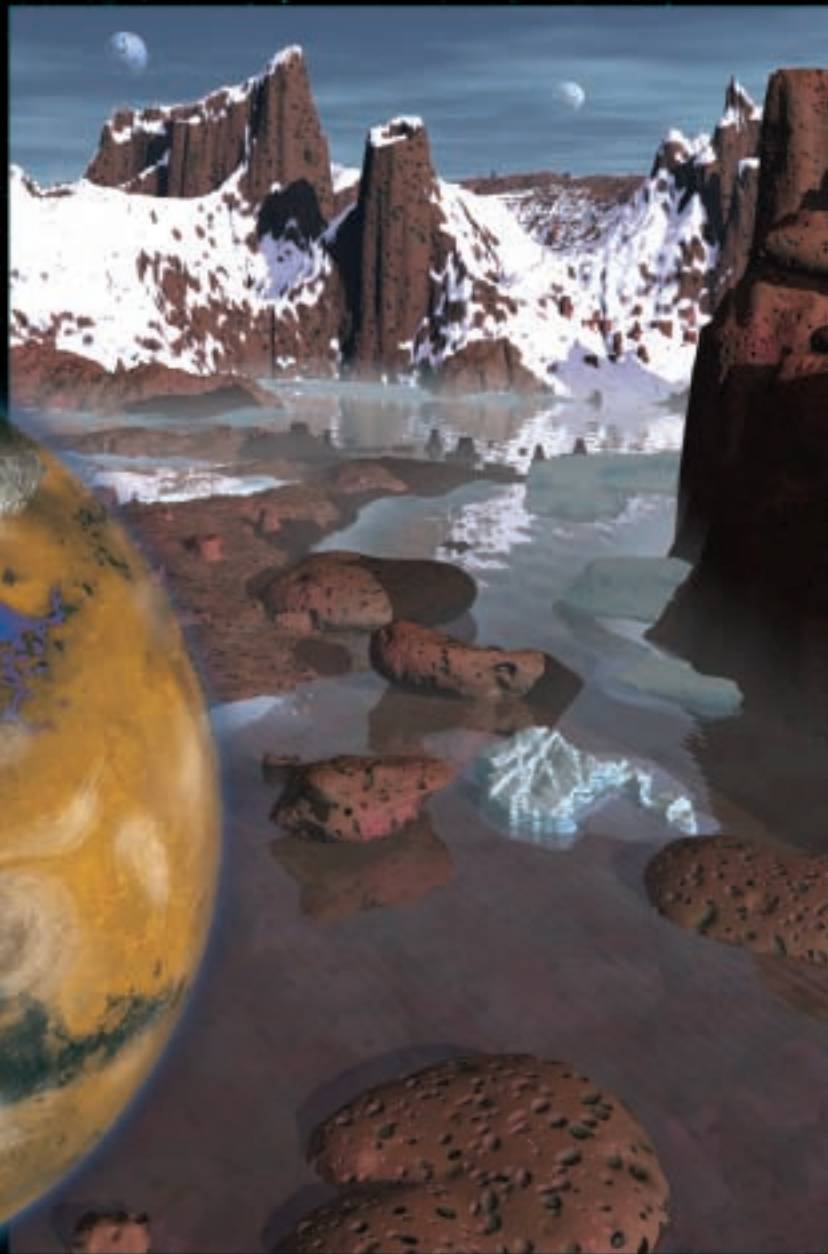
Le survol de Mars par les trois sondes *Mariner*, dans les années 1960, avait toutefois mis un terme à ces suppositions : l'environnement actuel de Mars est hostile à la vie.

Les quelques images floues qui avaient été retransmises par les sondes *Mariner* étaient beaucoup plus précises que les observations de Lowell. Elles ne montraient ni canaux, ni eau, ni végétation, mais une surface couverte de cratères. En outre, l'atmosphère de Mars est ténue : à la surface de la planète, la pression de ce voile gazeux, surtout composé de dioxyde de carbone, est inférieure à 1 000 pascals, soit 100 fois inférieure à la pression atmosphérique terrestre au niveau de la mer.

Son éloignement du Soleil (la distance entre Mars et le Soleil est 1,5 fois celle entre la Terre et le Soleil) et la minceur de son atmosphère font de Mars une planète glacée. En surface, la température moyenne est de -60°C à l'équateur et de -123°C près des pôles. Aux latitudes tropicales, sur les versants exposés au Sud, l'eau gelée atteint parfois 0°C à la mi-journée, en plein été, lorsque le rayonnement solaire l'a suffisamment chauffée, mais elle s'évapore alors rapidement, à cause de la faible pression atmosphérique, sans passer par l'état liquide.

Bien que l'atmosphère contienne ainsi une petite quantité d'eau, et que des nuages de glace d'eau se forment

2. DANS LE PASSÉ, MARS a été temporairement entourée d'une épaisse atmosphère qui a réchauffé la planète par effet de serre et a créé des conditions propices à la fonte du sol gelé. De l'eau se serait alors écoulée en surface et accumulée dans des lacs et dans des mers (*ci-dessous*). Certaines de ces étendues d'eau auraient été couvertes par une banquise (*zones blanches*) ou assombries par des sédiments en suspension (*panaches rouges*). Le paysage de la page précédente aurait été bien différent (*à droite*) si de l'eau liquide avait été présente à la surface de la planète.



parfois, les principaux phénomènes météorologiques martiens sont des tempêtes de poussières ou de dioxyde de carbone. L'hiver, un blizzard de dioxyde de carbone gelé balaie le pôle : quelques mètres de cette neige sèche s'y accumulent, tandis que le dioxyde de carbone gelé de la calotte polaire de l'autre hémisphère s'évapore dans l'atmosphère.

Le climat de Mars n'a pas toujours été aussi froid et sec. Les nombreuses données obtenues par les missions *Mariner* et *Viking* (dans les années 1970) indiquent que l'histoire climatique de la planète a été ponctuée d'épisodes relativement chauds ; à certaines époques, d'énormes volumes d'eau se sont librement écoulés en surface.

Des coulées de boue

La plupart des cratères anciens sont érodés, contrairement aux cratères lunaires. En revanche, les grands cratères jeunes sont généralement ceints de structures analogues à des coulées de boue : on suppose que la chute d'astéroïdes ou de comètes a fondu une partie du pergélisol (sol gelé saturé

d'eau), et que le cratère ainsi formé aurait atteint une nappe phréatique d'eau liquide.

Toutefois, les cratères martiens ne sont pas tous entourés de coulées boueuses. Les plus petits ressemblent à leurs cousins lunaires, avec de simples traînées de matière sèche éparpillées autour d'eux. Seuls les cratères d'un diamètre supérieur à quatre kilomètres environ près de l'équateur et supérieur à un kilomètre près des pôles ont une couronne de coulées boueuses fossiles. Pourquoi cette différence ? Parce que la couche de surface sans glace est plus épaisse près de l'équateur (elle atteint 800 mètres) que près des pôles : sous les tropiques martiens, la chaleur abaisse le niveau qui sépare l'eau gelée de l'eau liquide, dans le sous-sol. Ainsi, près de l'équateur, seul un corps très gros peut former un cratère assez grand qui creuse la couche supérieure sèche, réchauffer le pergélisol sous-jacent et libérer un torrent de boue.

Les planétologues ont trouvé plusieurs confirmations de l'existence d'eau gelée dans le sol. Notamment, ils ont observé que des paysages de Mars ressemblent à des paysages ter-

restres façonnés par les glaciers, avec des moraines déposées à la lisière de fonte des glaciers et des eskers, lignes sinueuses de sable et de gravier déposées par des cours d'eau circulant sous les glaciers (voir la figure 6). Des terrains grêlés ressemblent au thermokarst terrestre, qui se forme lorsque la fonte de la glace contenue dans le sous-sol peu profond provoque l'effondrement de la surface en trous et en canyons. Les tabliers rocheux couverts de débris que l'on aperçoit sur les flancs de certaines montagnes martiennes seraient des glaciers jonchés de décombres ou, plus vraisemblablement, des « glaciers rocheux » semblables à ceux du massif alpin et des Vallées sèches de l'Antarctique. La forme caractéristique de ces pentes résulte de milliers de cycles de gel et de dégel, qui font lentement glisser le mètre supérieur de terrain, gorgé d'eau, ou d'un lent glissement de la glace.

De surcroît, des vallées sinueuses, larges d'un kilomètre et longues de plusieurs centaines de kilomètres, forment de vastes réseaux. Elles auraient été formées par des écoulements d'eau. D'autres vallées martiennes ont des

3. LE CYCLE DE L'EAU, sur Mars, au cours des périodes humides. Une atmosphère épaisse transportait probablement une bonne partie de l'eau évaporée des lacs et des mers. La vapeur d'eau se condensait ensuite en nuages et précipitait. Cette pluie ruisselait à la surface

de la planète et s'infiltrait dans le sol. La neige formait des glaciers, qui devaient alimenter des lacs glaciaires. Une circulation hydrothermale, associée peut-être à des sites volcaniques, apportait en surface l'eau de réservoirs souterrains profonds.

Edwars Bell

