



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.

L'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, *Archimède*, présente deux sujets sur «La mémoire des stalagmites et l'histoire des concrétions», les 14 et 21 janvier 1997 à 20 heures.

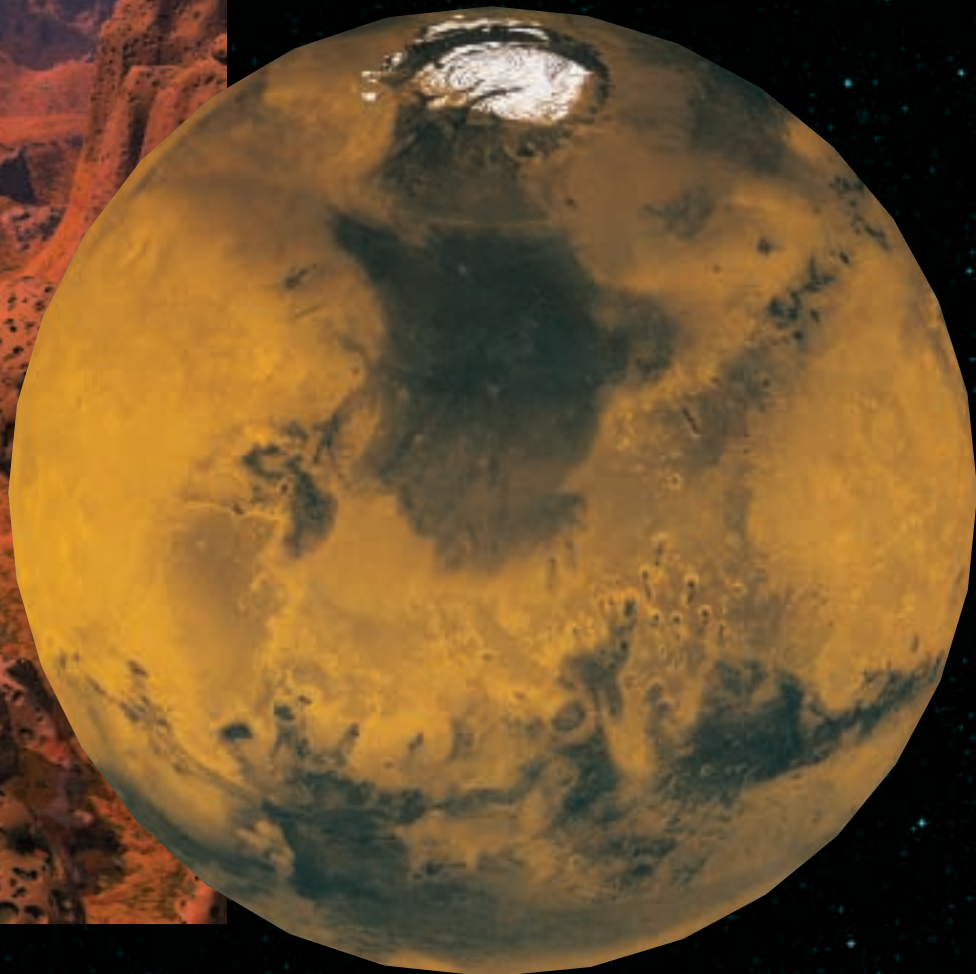
Les changements climatiques sur Mars

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.

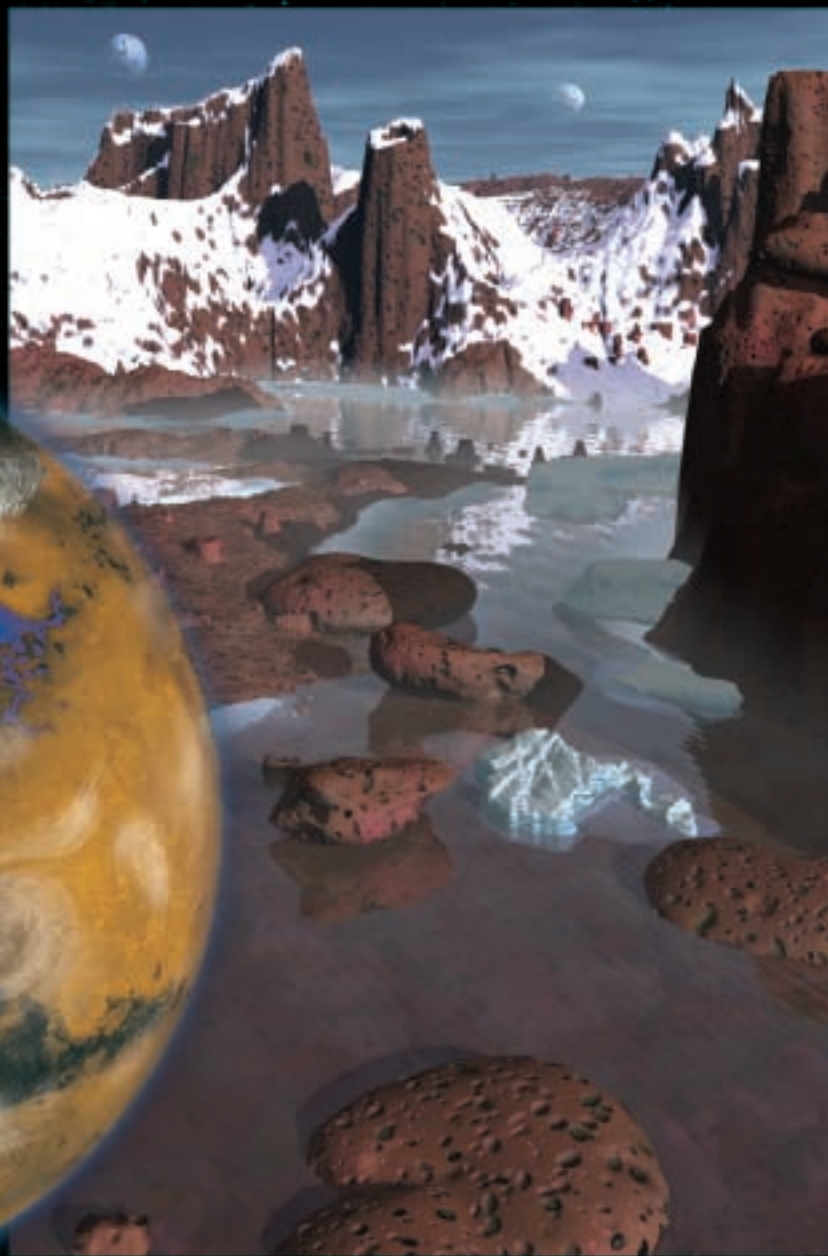
Le survol de Mars par les trois sondes *Mariner*, dans les années 1960, avait toutefois mis un terme à ces suppositions : l'environnement actuel de Mars est hostile à la vie.

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.



Paysages martiens : Susan Kitchens. Mosaïques : avec l'aimable autorisation d'Alfred McEwen et de la NASA. Ajouts numériques sur le globe : Slim Films

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-

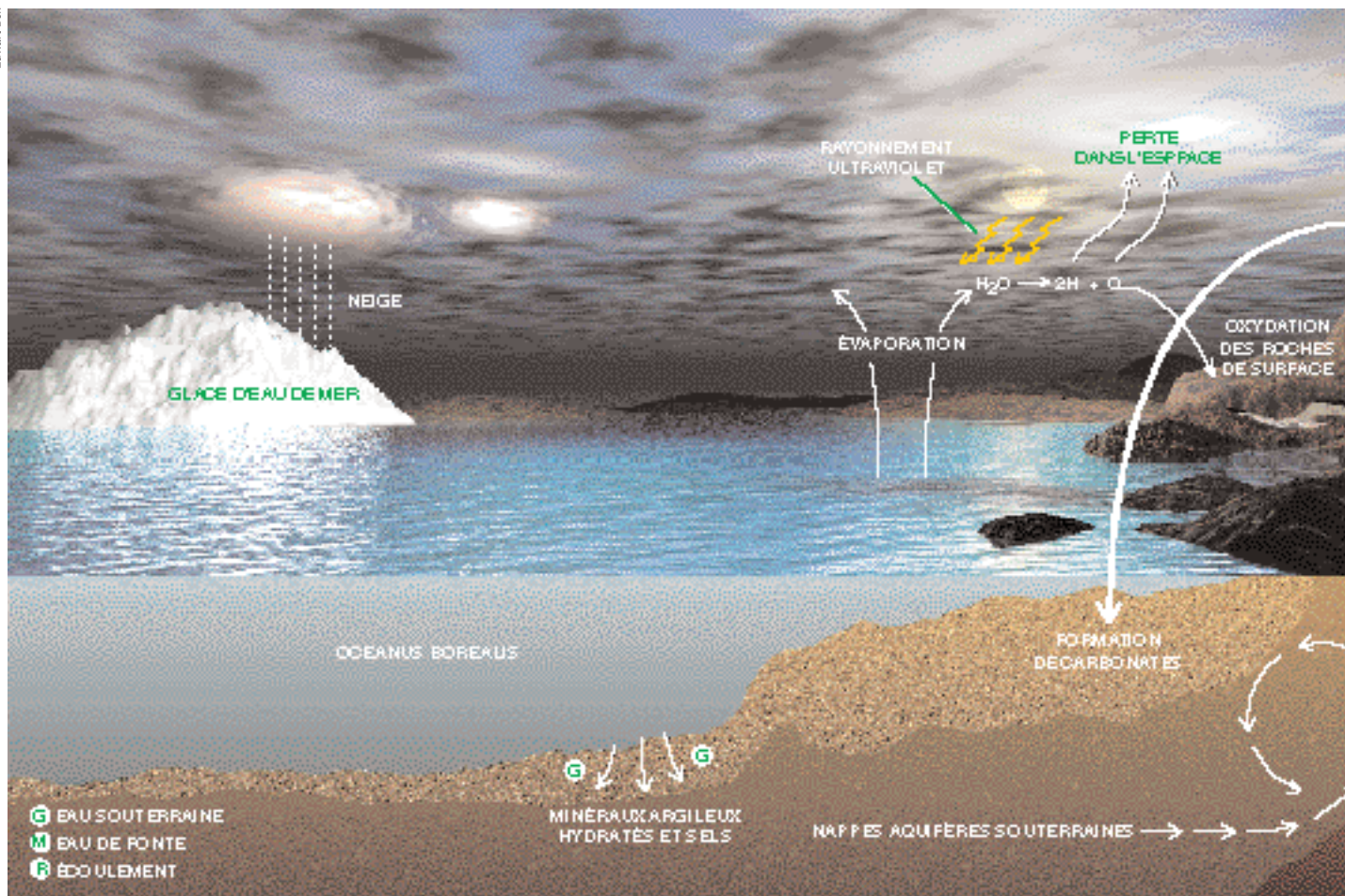
restres façonnés par les glaciers, avec des moraines déposées à la lisière de fonte des glaciers et des eskers, lignes sinueuses de sable et de gravier déposées par des cours d'eau circulant sous les glaciers (voir la figure 6). Des terrains grêlés ressemblent au thermokarst terrestre, qui se forme lorsque 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



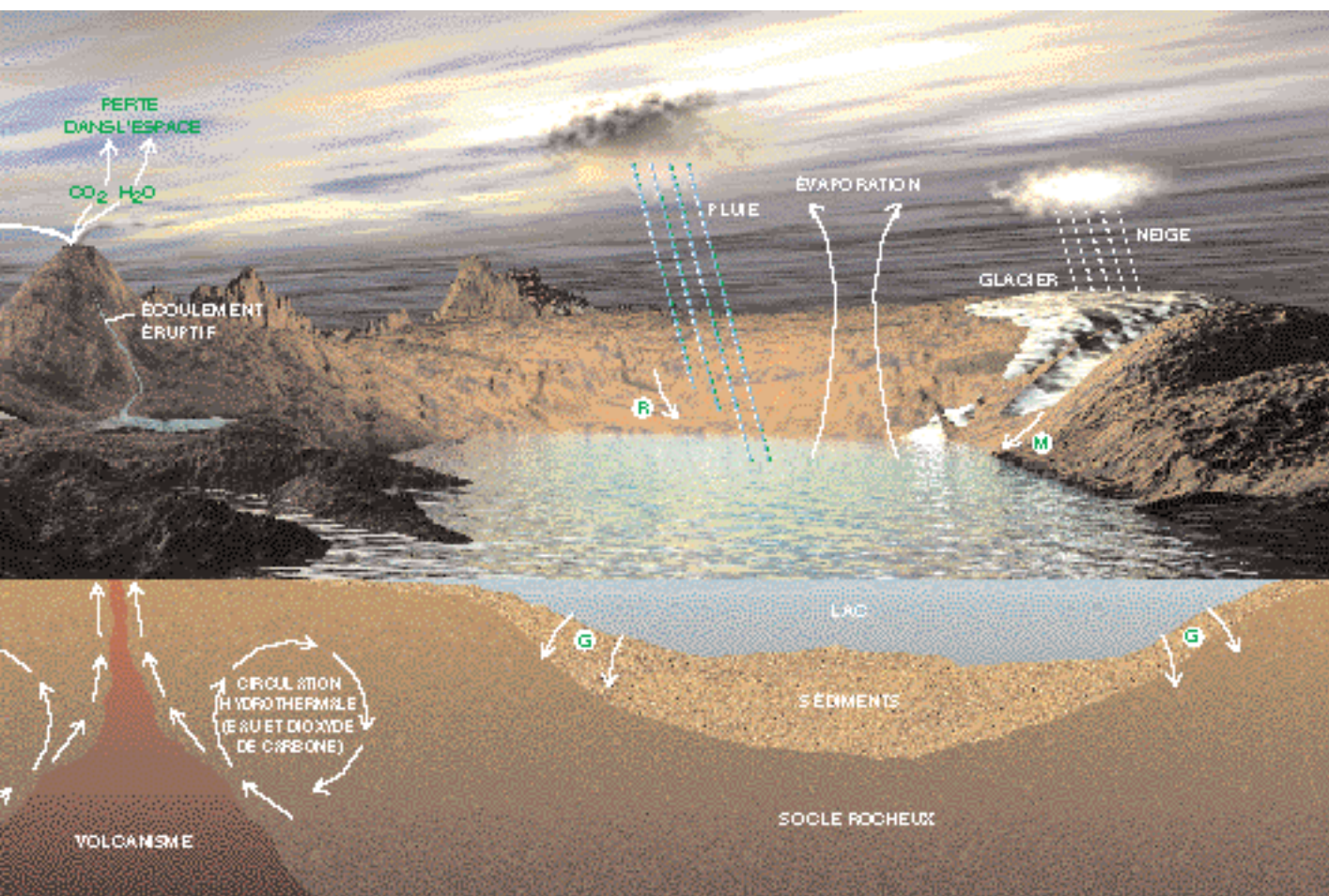
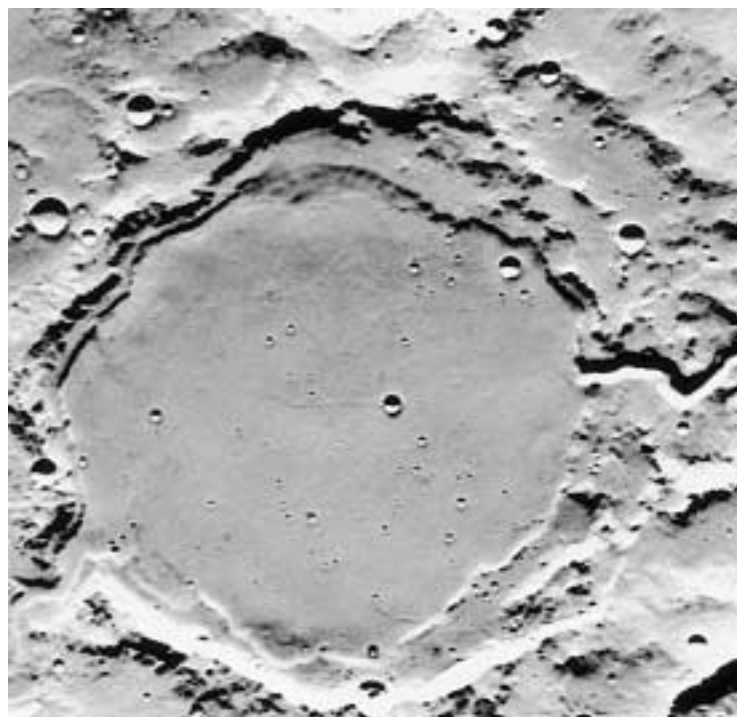
ouvertures émoussées et des affluents courts, caractéristiques d'une érosion par de nombreuses sources. Ce phénomène, fréquent sur la Terre, résulte de l'écoulement de l'eau, qui lessive les roches et le sol, comme sur une plage où la mer se retire. Ces écoulements assez réguliers ont eu lieu jusqu'à il y a 3,8 milliards d'années.

Les photographies révèlent aussi d'énormes chenaux d'écoulement plus récents, dont certains s'étendent sur plus de 200 kilomètres de large et plus de 2 000 kilomètres de long. Ils partent de «terrains chaotiques», encombrés par de gros blocs qui se seraient effondrés après une résurgence d'eau souterraine. L'écoulement vio-

lent de cette eau a creusé les chenaux, découpant des îles effilées de plus de 100 kilomètres de long et creusant des fondrières de plusieurs centaines de mètres de profondeur. Des structures semblables, mais plus petites, se forment sur la Terre : en Islande, l'inondation catastrophique consécutive à l'éruption d'un volcan sous un

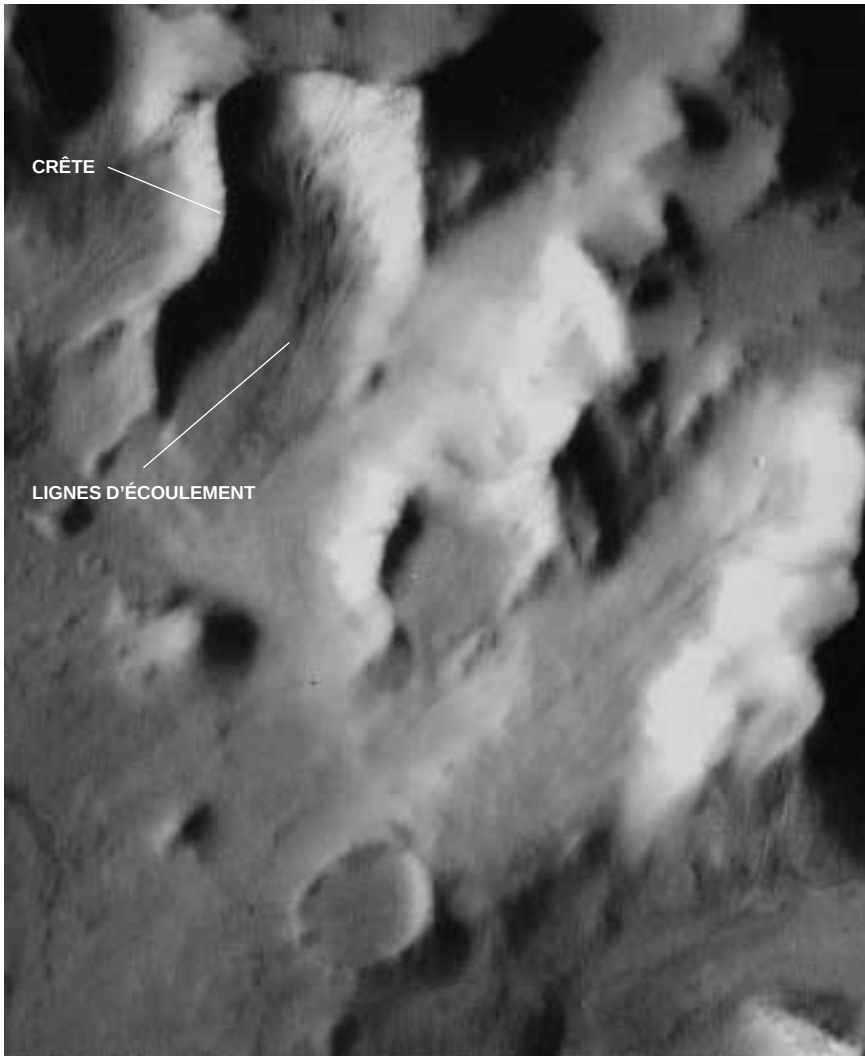


4. DES LACS DE CRATÈRES se forment, sur la Terre, dans des dépressions creusées par les impacts d'astéroïdes ou de comètes. Le cratère du Nouveau Québec (ci-dessus) est un tel lac. On suppose que le cratère à fond lisse observé sur les plateaux martiens (à droite) a aussi été empli d'eau, car il présente à la fois un dépôt en terrasse (en bas, à gauche) et un chenal d'écoulement profondément incisé (à droite).





Jeffrey S. Kargel



5. CE GLACIER ROCHEUX (à droite), en Alaska, s'effondre à partir d'une dépression semi-circulaire caractéristique des montagnes sculptées par les glaciers. Il ressemble beaucoup à certaines structures de Mars (à droite), où des lignes d'écoulement longitudinales émergent des crêtes montagneuses incurvées.

glacier laisse un champ semblable de vallées et de chenaux.

Selon la géométrie des chenaux d'écoulement martiens, l'eau qui les a creusés s'écoulait à plus de 250 kilomètres à l'heure. Elle aurait pu former un océan de 150 mètres de profondeur sur toute la planète (l'eau ne s'est toutefois pas écoulée en une seule fois). Cette énorme quantité d'eau provenait-elle d'un lac profond situé dans Valles Marineris, une région de Mars partiellement tapissée de couches sédimentaires qui semblent être d'anciens dépôts lacustres? Ou d'un grand réservoir, sous le pergélisol, qui aurait été réchauffé par la chaleur interne de la planète?

L'écoulement de cette eau souterraine aurait commencé après que le pergélisol qui la surmontait s'était aminci et affaibli : la cause de cet amincissement? Il n'en manque pas : réchauffement climatique, éruption volcanique, soulèvement tectonique, impact d'une météorite, séisme... Le dioxyde de carbone qui saturait l'eau souterraine aurait alors jailli en énormes geysers, dès l'apparition en surface, tel un gigantesque siphon d'eau de Seltz qui a dû déstabiliser les couches souterraines. Ce mécanisme explique la formation de terrains chaotiques, les inondations et les coulées de boues d'une ampleur rarement égale sur la Terre.

Mers et océans

Des réseaux de vallées qui s'étendent sur certaines hautes terres de Mars débouchent sur des dépressions tapissées de sédiments. Ces plaines auraient été couvertes d'eau. Les plus grands de ces lacs martiens remplissaient deux gigantesques bassins d'impact, Hellas et Argyre.

Selon plusieurs équipes, les inondations répétées des chenaux d'écoulement se vidèrent, au Nord, dans une succession de lacs et de mers temporaires. De nombreuses caractéristiques des bords de ces anciens bassins marqueraient les endroits où les glaciers se jetaient. D'épaisses couches sédimentaires déposées dans ces mers recouvriraient aujourd'hui la plus grande partie des plaines septentrionales. Le volume de l'une des plus grandes mers septentrionales de Mars aurait été équivalent à ceux du golfe du Mexique et de la Méditerranée réunis.

Un océan martien a peut-être aussi existé. Dès 1973, Henry Faul, de l'Université de Pennsylvanie, l'a proposé dans un article au titre romantique : *La falaise de Nix Olympica*. Les observations disponibles à l'époque n'ont convaincu aucune revue scientifique de le publier, mais les informations acquises durant les missions *Viking* lui ont redonné du crédit.

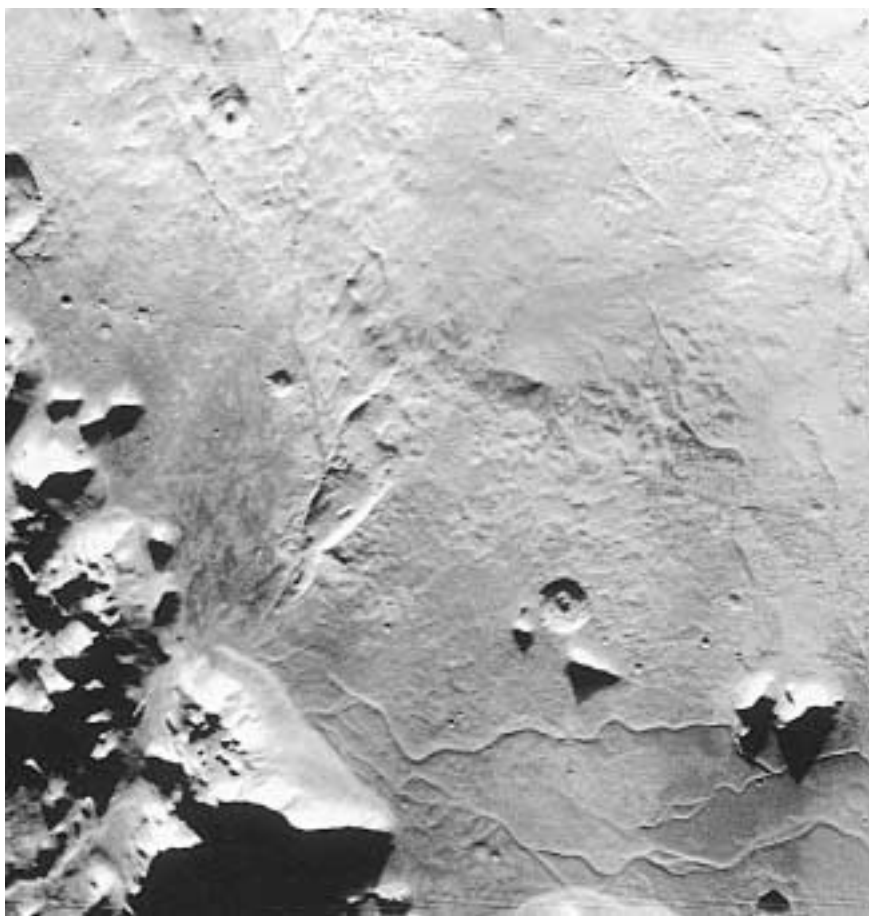
Ainsi, en 1989, Timothy Parker et ses collègues du Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena observèrent que de nombreuses formations, dans les plaines nordiques, paraissaient résulter d'une érosion côtière et reformulèrent l'hypothèse d'un océan septentrional, en la cachant derrière le titre banal de *Morphologie de transition dans la région occidentale Deuteronilus Mensae de Mars : conséquences pour la modification de la limite entre les basses et les hautes terres*. Le titre de leur article suivant, *Géomorphologie côtière des plaines septentrionales de Mars*, était plus explicite. Nous avons nommé Oceanus Borealis cet océan qui couvrirait probablement une superficie quatre fois supérieure à celle de l'océan Arctique, et nous avons proposé un modèle des cycles de l'eau sur Mars qui prend en compte cet océan. La plupart des planétologues admettent aujourd'hui que de vastes étendues d'eau se sont formées périodiquement dans les plaines septentrionales de Mars, mais peu acceptent qu'il y ait eu un véritable océan. Selon certains, il ne s'agissait que d'un océan de boue.

La nature des roches martiennes témoigne aussi de la présence passée d'eau sur la planète : de la Terre, la spectroscopie de Mars révèle la présence de minéraux argileux, et les deux sondes *Viking* qui se posèrent sur Mars découvrirent que le sol contient de 10 à 20 pour cent de sels. Les roches martiennes, comme les roches terrestres, forment des minéraux argileux et des sels par des réactions chimiques en présence d'eau.

Comment étudier ces roches ? En recueillant des roches martiennes qui ont été éjectées dans l'espace par les impacts d'astéroïdes ou de comètes et qui sont ensuite tombées sur la Terre. Selon Allan Treiman, de l'Institut d'études lunaires et planétaires de Houston, et James Gooding, de la NASA, des minéraux de certaines de ces météorites sont altérés chimiquement en présence d'eau salée froide, alors que d'autres le sont par des solutions hydrothermales



Bradford Washburn, avec l'aimable autorisation de Panopticon Gallery



NASA

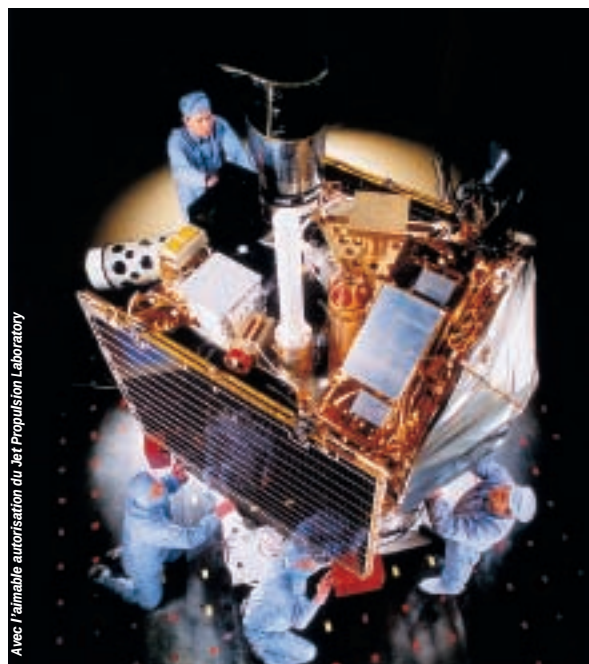
6. LES ESKERS sont des rides sinueuses, composées de sable et de gravier, qui sont déposées par les cours d'eau qui coulaient sous une couche de glace. Ils décorent le paysage près de la pointe d'un glacier dans la vallée de Tasnuna, en Alaska (*en haut*). Des eskers semblent aussi exister au fond du bassin d'Argyre, sur Mars (*en bas*), indiquant que des glaciers en fusion ont jadis couvert la région.

La procession des sondes martiennes

Huit programmes scientifiques d'exploration de Mars sont en cours ou en préparation (la mission russe *Mars '96* s'est perdue lors de son lancement, le 16 novembre 1996). La première sonde *Mars Global Surveyor* (ci-dessous, en haut) a été lancée le 5 novembre 1996 ; au cours de l'été 1997, elle se placera en orbite autour de Mars et dressera une carte précise de la surface.

Le 4 décembre 1996, la NASA a lancé *Mars Pathfinder*, qui se posera dans l'embouchure d'un ancien chenal d'écoulement, le 4 juillet 1997. Cet «amarsissage» se déroulera 21 ans, jour pour jour, après l'arrivée de *Viking 1* sur la planète rouge. *Mars Pathfinder* libérera un petit véhicule à six roues (ci-dessous, en bas) qui explorera les environs immédiats de la sonde.

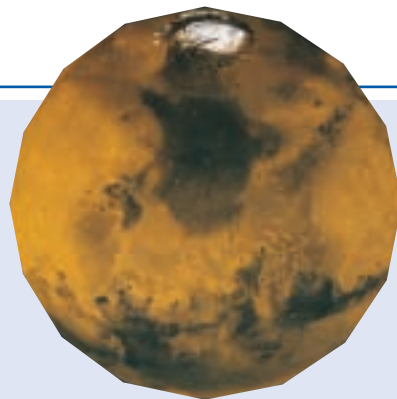
Au cours des dix prochaines années, quatre vaisseaux spatiaux se placeront en orbite autour de Mars, et quatre sondes devraient se poser sur la planète (calendrier à droite). Une mission de récupération d'échantillons était prévue pour 2005,



MARS SURVEYOR est ici en cours de préparation.



CE ROBOT MOBILE explorera la surface de Mars.



Calendrier des missions vers Mars

5 novembre 1996 (États-Unis)

Mars Global Surveyor

La NASA a envoyé un vaisseau spatial qui se placera en orbite autour de Mars et effectuera un relevé de la surface de la planète. Il arrivera en juillet 1997.

4 décembre 1996 (États-Unis)

Mars Pathfinder

Cette sonde se posera dans un ancien chenal d'écoulement le 4 juillet 1997 ; elle libérera un robot mobile qui explorera le site.

1998-1999 (États-Unis)

Mars Surveyor

Une sonde en orbite poursuit les observations en insistant sur la localisation des dépôts isolés de dioxyde de carbone en surface. Un module explore la région polaire australe.

1998-1999 (Japon)

Planète B

Un satellite explore la haute atmosphère de Mars.

2001 (États-Unis)

Mars '01

Un satellite et un module poursuivent des études de la surface de Mars.

2001 (Russie)

Mars '01

Un ou plusieurs modules, avec peut-être des véhicules mobiles, explorent la surface.

2003 (États-Unis)

Mars '03

Un satellite restera en orbite et une sonde se posera pour explorer des régions qui pourraient avoir abrité la vie.

2005 (États-Unis)

Mars Surveyor '05

Un vaisseau spatial se posera, recueillera des échantillons et les rapportera sur Terre.

plus chaudes. Ils en déduisent que Mars a eu un climat relativement chaud et humide, et que des sources chaudes auraient jailli à sa surface.

Le climat martien a-t-il un jour été propice à la vie? L'équipe de David McKay, de la NASA, a répondu positivement à cette question après avoir découvert, dans les fissures d'une météorite martienne de 3,5 milliards d'années, des composés organiques, des carbonates, des sulfures de fer et de la magnétite dont ils attribuent la formation à l'activité de micro-organismes. Ces conclusions sont toutefois vigoureusement contestées.

Le destin de l'eau

Qu'est devenue l'énorme quantité d'eau qui a un jour coulé à la surface de Mars? Une partie peut s'être infiltrée dans le sous-sol et avoir gelé dans le pergélisol; une autre peut s'être figée sur place (elle serait cachée sous un manteau de poussière et de sable, sur la majeure partie du sol des plaines septentrionales); une autre encore peut s'être évaporée, avant de se perdre dans l'espace ou de retomber en neige aux pôles.

Indépendamment, des physiciens ont étudié les isotopes de l'hydrogène dans la vapeur d'eau martienne et ils ont conclu que des quantités considérables de vapeur d'eau se sont échappées dans l'espace au cours du temps. Ce résultat théorique s'accorde avec la détection, par des sondes spatiales soviétiques, d'atomes d'oxygène et d'hydrogène (provenant de la dissociation de la vapeur d'eau par le rayonnement solaire) qui s'éloignent de Mars. La perte continue de ces éléments signifie qu'à une époque Mars contenait assez d'eau pour remplir Oceanus Borealis.

L'eau n'est pas la seule substance perdue par Mars : le dioxyde de carbone qui s'en est échappé aurait constitué une épaisse atmosphère, responsable d'une pression en surface trois fois supérieure à celle qui existe à la surface de la Terre. L'effet de serre créé par ce gaz aurait alors réchauffé la plupart de la surface de Mars au-dessus de 0 °C. C'est un élément supplémentaire en faveur de l'hypothèse d'un climat martien passé plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui.

Quand et pendant combien de temps ce climat chaud et humide a-t-il régné sur Mars? Plusieurs périodes de réchauffement se seraient produites : la perte continue d'eau et de dioxyde

de carbone font supposer que le premier milliard d'années de l'existence de Mars fut relativement chaud et humide, mais certaines périodes chaudes seraient plus récentes. Selon Timothy Swindle, de l'Université d'Arizona, les minéraux d'une météorite martienne produits par altération aqueuse se seraient formés il y a 300 millions d'années à peine (avec toutefois une grande incertitude).

Si la morphologie martienne a été produite par des glaciers comme ceux qui existaient lors des périodes glaciaires terrestres, alors les conditions climatiques se sont maintenues quelques milliers d'années, mais pas plus d'un million d'années : notamment, elles n'ont pas duré assez pour que l'érosion efface les cratères d'impacts météoritiques, comme sur Terre. S'il n'y a pas eu d'érosion glaciaire généralisée, ces durées doivent être multi-

pliées par 10 ou par 100. En outre, au tout début de l'histoire de la planète, il y a quatre milliards d'années, avant la formation des cratères visibles aujourd'hui, l'érosion a pu durer plus longtemps, lissant le visage de Mars. En entrant dans l'âge mûr, ce visage est devenu froid, sec et grêlé, rajeuni seulement en certains endroits par de courtes périodes plus chaudes.

Mécanique céleste

D'où proviennent ces variations climatiques? Peut-être des variations de l'obliquité, c'est-à-dire de l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la perpendiculaire au plan orbital. L'obliquité de Mars, comme celle de la Terre, est aujourd'hui d'environ 24 degrés. Jacques Laskar et Philippe Robutel, du Bureau des longitudes, ont calculé que cette inclinaison peut varier suivant



Avec l'aimable autorisation de Victor R. Baker



NASA

7. DES COLLINES EN FORME DE LARME, sculptées par les inondations du lac glaciaire Missoula, apparaissent dans le sol parsemé de vallées et de chenaux de l'Est de l'État de Washington (en haut). De telles collines effilées parsèment le fond des vastes chenaux d'écoulement sur Mars, se formant communément derrière des bords surélevés de cratères (en bas).

Quelle vie sur Mars ?

La présence de vie sur Mars a toujours suscité des débats passionnés, de Percival Lowell qui y voyait des canaux aux scientifiques de la NASA qui jouent sur la corde «vie extraterrestre» pour obtenir des crédits du Congrès des États-Unis. Mars est une planète riche en eau : en surface et jusqu'à quelques kilomètres de profondeur, cette eau est aujourd'hui exclusivement sous forme de glace ou de vapeur. Des formations géologiques montrent que de l'eau liquide coulait, voire stagnait (dans des mers et dans des lacs), à la surface de Mars jusqu'il y a 3,5 milliards d'années. Le climat martien, s'est ensuite refroidi : l'effet de serre a diminué parce que la faible gravité martienne a mal retenu le dioxyde de carbone. Mars a été mis au "congélateur" depuis 3,5 milliards d'années.

Il y a 4 à 3,5 milliards d'années, la vie est née et a prospéré sur Terre sous la forme d'êtres primitifs, telles des bactéries. Les «ingrédients» nécessaires à la formation de cette vie semblent être l'eau liquide, des molécules organiques (présentes en abondance dans les comètes et dans les météorites) et des argiles. Comme ces ingrédients existaient simultanément sur Mars, il est raisonnable de penser que, les mêmes causes produisant les mêmes effets, une vie primitive y soit apparue. Ces formes de vie auraient été congelées en même temps que l'eau : les roches mar-

tiennes contiennent peut-être des traces fossiles de cette vie primitive.

Il n'est pas totalement impossible que des formes de vie subsistent sur Mars, mais elles seraient congelées ou réfugiées dans les couches profondes de la planète (à plus de cinq kilomètres), où l'activité géothermique maintient l'eau à l'état liquide. Toutefois ces formes de vie ne seraient pas beaucoup plus évoluées que celles que portait la Terre il y a 3,5 milliards d'années. Bien que les modèles de mouvement chaotiques de l'axe des pôles indiquent que Mars se serait brièvement réchauffé à plusieurs reprises depuis 3,5 milliards d'années, nous n'avons pas de preuves formelles de tels réchauffements. De toute façon, la durée cumulée de ces réchauffements n'aurait pas été très longue et n'aurait pas permis une évolution vers des êtres complexes. En outre, selon certains astronomes, la vie n'a évolué sur la Terre que grâce à la Lune, qui empêche les mouvements chaotiques de l'axe de rotation de la Terre et qui évite que le climat terrestre subisse des variations trop brusques ou trop importantes. Cette stabilité climatique est évoquée pour expliquer l'évolution vers les formes complexes qui demandent du temps et une relative continuité des conditions. Sur Mars, est-il raisonnable de proposer que les mêmes causes aient produit des effets inverses ?

Pierre THOMAS, ENS de Lyon

une dynamique chaotique, avec des transitions parfois rapides, qui atteignent 60 degrés tous les dix millions d'années environ. En outre, la direction de l'inclinaison et la forme de l'orbite de Mars varient cycliquement avec le temps.

Ces variations et, notamment, les grands basculements de l'axe de rotation provoqueraient des extrêmes saisonniers de température. Pendant les périodes de forte obliquité, même avec la mince atmosphère actuelle, les températures estivales aux hautes et moyennes latitudes martiennes seraient devenues positives jour et nuit, et les hivers auraient été encore plus rudes qu'ils ne le sont aujourd'hui.

L'atmosphère aurait été bouleversée par ce réchauffement estival de l'un des pôles : son épaissement, par l'évaporation de la calotte polaire réchauffée, ou de l'eau souterraine ou du pergélisol riches en dioxyde de carbone, aurait créé un effet de serre. De l'eau qui aurait alors coulé en surface aurait réagi chimiquement avec les roches, formant des sels et des roches calcaires, et le stockage du dioxyde de carbone atmosphérique dans ces calcaires aurait réduit ainsi l'effet de serre. Un retour à une obli-

quité inférieure aurait refroidi encore plus la planète ; la neige carbonique serait tombée en surface, amincissant davantage l'atmosphère et renvoyant Mars à son état glacial.

Les sondes automatiques qui visiteront Mars au cours de la prochaine décennie permettront de tester cette hypothèse. Les expéditions ont commencé en novembre 1996, avec le lancement d'une sonde américaine ; elles devraient s'achever en 2005 par le retour sur Terre de roches martiennes.

La sonde *Mars Surveyor*, qui est partie le 5 novembre 1996, se placera en orbite autour de Mars et photographiera la planète avec une résolution

de quelques mètres : sur des cartes topographiques détaillées, nous rechercherons des dépôts de glace, ainsi que de nouvelles traces d'anciens glaciers, lacs et rivières. La sonde *Mars Pathfinder*, qui est partie le 4 décembre 1996, se posera dans un chenal d'écoulement, encombré de roches, qui alimentait une ancienne mer. Elle libérera alors un petit véhicule, qui explorera les abords immédiats. Les informations rassemblées par ces prochaines missions nous donneront une image plus claire de l'aspect de Mars durant son dernier épisode de climat plus clément, il y a 3,5 milliards d'années ou peut-être moins.

Jeffrey KARGEL est membre de l'équipe d'astrogéologie de l'Institut géologique américain. Robert STROM est professeur à l'Université d'Arizona.

V.R. BAKER, R.G. STROM, V.C. GULICK, J.S. KARGEL, G. KOMATSU et V.S. KALE, *Ancient Oceans, Ice Sheets and the Hydrological Cycle on Mars*, in *Nature*, vol. 352, pp. 589-594, 15 août 1991.

J.S. KARGEL et R.G. STROM, *Ancient Glaciation on Mars*, in *Geology*, vol. 20, n° 1, pp. 3-7, janvier 1992.

J.S. KARGEL et R.G. STROM, *The Ice Ages*

of Mars, in *Astronomy*, vol. 20, n° 12, pp. 40-45, décembre 1992.

T.J. PARKER, D.S. GORSLINE, R.S. SAUNDERS, D.C. PIERI et D.M. SCHNEEBERGER, *Coastal Geomorphology of the Martian Northern Plains*, in *Journal of Geophysical Research E (Planets)*, vol. 98, n° 6, pp. 11061-11078, 25 juin 1993.

Sur le World Wide Web : <http://cmex-www.arc.nasa.gov>
<http://mpfwww.jpl.nasa.gov>
<http://www.gpl.nas.gov/mgs>

