

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>