

VRAI OU FAUX

Faut-il s'étirer après le sport ?

Ce n'est pas prouvé. Cela ne diminue presque pas les courbatures et risque de nuire aux muscles. En revanche, des étirements plus réguliers peuvent être bénéfiques.

Guillaume Millet



On préconise souvent de s'étirer après le sport. Certains pensent que cela favorise la récupération, en augmentant le débit sanguin : des métabolites (petites molécules produites par les cellules) qui s'accumulent dans les muscles pendant l'effort et qui perturbent leur contraction seraient ainsi évacués. Cependant, aucune étude scientifique ne l'a confirmé. Une seconde vertu communément attribuée aux étirements est l'atténuation des raideurs musculo-tendineuses (les courbatures) qui surviennent après les efforts soutenus. Est-ce vraiment le cas ?

En 2011, Robert Herbert, de l'Institut George pour la santé mondiale, à Sydney, en Australie, a publié une synthèse portant sur 12 études de la question. Lors de ces études, les participants étaient interrogés sur l'intensité de leurs courbatures au lendemain d'une séance de sport, suivie ou non d'étirements. R. Herbert a conclu que les étirements consécutifs au sport ont des effets très faibles : en moyenne, les douleurs perçues un jour après l'effort diminuent de moins de un pour cent.

Notons toutefois que l'une des 12 études estimait cette diminution à quatre pour cent, ce qui commence à représenter un soulagement perceptible. Sa crédibilité est renforcée par le nombre élevé de participants (plus de 1 200, contre 10 à 30 habituellement pour ce genre d'études), mais ses conclusions sont à nuancer : il était demandé aux participants de s'étirer avant et après le sport, de sorte qu'on ne peut isoler les effets

des étirements postérieurs à la séance de ceux qui lui sont antérieurs.

Quoi qu'il en soit, cela suggère que les étirements peuvent avoir des effets positifs. Et en effet, certaines études indiquent que, pratiqués régulièrement, ils renforcent les muscles. Les dommages musculaires associés au sport et leurs conséquences (inflammations, gonflements des fibres musculaires) seront alors moins importants. Ces dommages sont, par exemple, des allongements excessifs des sarcomères, des enchevêtrements de protéines internes aux cellules musculaires ; dans ces dernières, des enchaînements de sarcomères se contractent par glissement des protéines les unes le long des autres.

Moins de dommages musculaires

En 2011, Huo-Cheng Chen, de l'Université Chiayi, à Taïwan, et ses collègues ont demandé à des participants d'effectuer des étirements réguliers pendant deux mois. Ils les ont ensuite soumis à un type d'efforts connus pour causer de grands dommages musculaires – et donc d'intenses courbatures. Ils ont ensuite analysé divers paramètres physiologiques et conclu à des dommages moins importants par rapport à un groupe contrôle qui n'avait pas effectué d'étirements.

Comment ces derniers renforcent-ils les muscles ? Des étirements assez réguliers pourraient augmenter le nombre de sarcomères en série dans les fibres musculaires ; dès lors, chaque sarcomère serait moins sollicité. De même, la longueur et la

souplesse des tendons s'accroîtraient. Les caractéristiques des muscles et des tendons (et donc la propension aux courbatures) étant variables, les bénéfices des étirements seraient plus ou moins importants selon les personnes. Si vous vous sentez souvent raide après un effort, n'hésitez donc pas !

En résumé, il semble que les étirements ne diminuent pas notablement les courbatures s'ils sont faits uniquement après l'activité sportive. Pire : étirer un muscle trop fatigué et fragilisé risque de l'endommager encore plus. Après une compétition ou une séance épuisante, mieux vaut donc s'abstenir. D'autant plus s'il fait froid, car, après un exercice physique, le système immunitaire est temporairement affaibli, et il est ainsi préférable de vite se changer et se mettre au chaud.

En revanche, des étirements réguliers et progressifs, en dehors de toute séance sportive ou après une séance légère, seraient bénéfiques. On peut les effectuer soit en commençant par un petit échauffement (dix minutes de vélo d'appartement, un peu de corde à sauter, etc.), soit à froid ; dans ce dernier cas, on veillera à s'étirer encore plus progressivement que d'habitude. Les effets restent à confirmer, notamment par des études de plus longue durée : celles évoquées ici ne s'étendent que sur trois mois au maximum, de sorte qu'on ignore les conséquences d'étirements réguliers à plus long terme. ■

Guillaume MILLET est professeur de physiologie de l'exercice à l'Université de Saint-Étienne.

COLLECTION POUR LA SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilletables numériques fiables
et pratiques sur l'actualité scientifique

Accédez facilement à **l'essentiel**
sur un **thème marquant** de l'actualité
scientifique grâce à :

- **une sélection d'articles de référence**
parus dans *Pour la Science*
et *Cerveau & Psycho*
- **compilée dans un feuilletable**
numérique de 35 pages environ
- **téléchargeable en format**
PDF au prix de 3,99€
(compatible avec
ordinateur et tablette).



Des dizaines de sujets à découvrir sur
www.pourlascience.fr/petitsthemes

Actuellement
en kiosque

Durant près de 3 000 ans, l'Égypte pharaonique
a commercé ou guerroyé avec les Libyens,
Nubiens, Perses, Grecs, Romains...

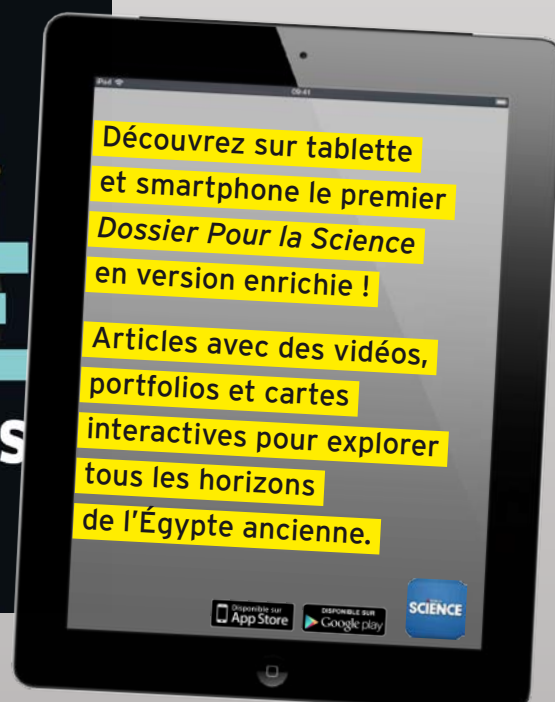
La civilisation égyptienne était à la croisée
des mondes qu'elle irrigua de sa splendeur.



1 VOYAGE À GAGNER

Participez au grand
QUIZ PHOTOS
TRÉSORS D'ÉGYPTÉ

[www.pourlascience.fr/
quizphotos-tresordegypte](http://www.pourlascience.fr/quizphotos-tresordegypte)



Feuilletez les premières pages sur www.pourlascience.fr



Mars insolite

Des paysages à couper le souffle

p. 26 - Valles Marineris, mémoire géologique de Mars, par Jessica Flahaut, Pascal Allemand et Cathy Quantin-Nataf •

p. 34 - Mars, un remodelage permanent, par Alfred McEwen • p. 42 - Mars en images, par Jessica Flahaut et Pierre Thomas

Dossier

Dans sa trilogie sur Mars, l'auteur américain Kim Stanley Robinson raconte comment l'homme arrive sur la planète rouge et la transforme pour la rendre habitable. Le premier opus, *Mars la Rouge*, ouvre sur ces quelques lignes : « Mars était vide avant notre arrivée. Ce qui ne veut pas dire qu'il ne s'y était jamais rien passé. » En fait, il s'y est passé – et s'y passe encore – de nombreux événements géologiques. La surface de la planète a été façonnée par le volcanisme, la tectonique, l'eau et le vent. Cela a conduit, par exemple, à la formation de la montagne la plus haute du Système solaire, Mons Olympus qui culmine à 21 229 mètres, et d'un canyon gigantesque, Valles Marineris (voir page 26), dix fois plus étendu que le Grand Canyon aux États-Unis.

Ces paysages racontent l'histoire de la planète et les nombreux instruments qui y ont été envoyés depuis les années 1960 nous en ont transmis des bribes.

Récemment, tout s'est accéléré. Les images envoyées par les sondes en orbite, telles *Mars Express* et *Mars Reconnaissance Orbiter*, et les robots mobiles, *Opportunity*, *Spirit*, *Phoenix* et *Curiosity*, nous ont fait découvrir des paysages... à couper le souffle (voir page 42). Mars est tout à la fois la Lune, la Terre et... Mars. Paysages grandioses et surprenants.

Les traces de la présence d'eau – douce, mais aussi salée – s'accumulent (voir page 34). On connaissait *Mars la Rouge*, *Mars la Bleue* se dévoile. Et si l'homme, un jour, s'y installe, la planète deviendra-t-elle *Mars la Verte*, comme l'envisageait K. S. Robinson dans la suite de sa saga ?

Sean Bailly

Les récentes observations à très haute résolution de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter ont révélé de nouveaux paysages au fond du canyon de Valles Marineris. L'histoire géologique de la région se précise.

L'un des aspects les plus frappants de la surface martienne est sans aucun doute la présence du canyon Valles Marineris. Il tient son nom de la sonde *Mariner 9* qui l'a photographié pour la première fois en 1971. Avec 3500 kilomètres de longueur et 300 kilomètres de largeur, ce système tectonique complexe recouvre un quart de l'équateur martien. Il est ainsi près de dix fois plus étendu que le Grand Canyon du Colorado, aux États-Unis. Outre ses dimensions spectaculaires, Valles Marineris présente un intérêt géologique inestimable, car ses parois, parfois hautes de dix kilomètres, mettent au jour des roches et des structures qui retracent l'histoire du canyon, de sa région et de la planète Mars.

Les premières images, en 1965, ont offert une vision quasi lunaire de la planète rouge : désertique et constellée de cratères. Mais, depuis, les différentes sondes et les robots au sol ont montré que l'histoire géologique de Mars était très riche.

Valles Marineris en est l'un des exemples les plus saisissants. Nous en examinerons les paysages ainsi que les divers phénomènes qui les ont façonnés : le volcanisme, la tectonique – les mouvements de la croûte martienne qui n'a pas de dynamique de plaques comme la Terre – ou encore le vent et l'eau. À partir de ces observations, il est possible de retracer l'histoire géologique du canyon et celle de la planète.

Les planétologues ont aussi étudié les roches du canyon. On y trouve de la croûte primitive, vestige de la formation de la planète, de la roche volcanique, mais aussi des minéraux hydratés, tels des sulfates et

Valles Marineris

mémoire géologique de Mars

Jessica Flahaut, Pascal Allemand et Cathy Quantin-Nataf



L'ESSENTIEL

- Valles Marineris est un canyon de 3 500 kilomètres de long. Ses parois ont enregistré l'histoire géologique de la région.
- Le poids du dôme de Tharsis, à l'Ouest, a exercé des contraintes sur la croûte martienne, provoquant sa rupture et l'ouverture du canyon.
- Le volcanisme, l'eau et la tectonique ont façonné les paysages variés de Valles Marineris.
- De nombreuses traces d'érosion, d'écoulements et de dépôts sédimentaires montrent que de l'eau liquide a coulé en abondance dans la région.

des argiles, signes de la présence ancienne d'eau liquide dans cette région. La mission *Mars Express*, arrivée en orbite en 2004, a effectué des observations dans le canyon de Valles Marineris et a apporté de précieuses informations sur la présence d'eau liquide sur Mars. Ainsi, grâce au spectromètre OMEGA, elle a détecté une importante présence de dépôts contenant des sulfates, des minéraux hydratés riches en soufre. Ceux-ci datent de l'ère de l'Hespérien (il y a entre 3,7 et 3,2 milliards d'années).

Par ailleurs, *Mars Express* a aussi observé des argiles à la surface de la planète, en dehors du canyon. Ces découvertes ont permis d'attester la présence d'eau liquide à la surface de la planète il y a plus de 3,7 milliards d'années, pendant l'ère géologique martienne la plus ancienne, le Noachien (il y a entre 4,1 et 3,7 milliards d'années). Le climat était alors vraisemblablement chaud et humide.

Comprendre l'histoire du canyon

Une nouvelle sonde était nécessaire pour répondre aux questions que se posaient les planétologues : Quelles sont les étapes de la formation de Valles Marineris ? Quels phénomènes ont façonné ses paysages ? Que peut-on en déduire sur l'histoire de la planète rouge ? Il fallut attendre 2006 et l'arrivée en orbite de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter*. Les objectifs de la mission visaient à décrire le climat et la géologie de la planète. L'équipement embarqué proposait des résolutions qui permettaient d'analyser le canyon en détail. En particulier, la caméra HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment* pour Expérience d'imagerie scientifique à haute résolution) prenait des images des structures du canyon. Le spectromètre CRISM (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* pour Spectromètre compact d'imagerie de reconnaissance pour Mars) analysait la composition des roches.

Que nous ont révélé les images de HiRISE et les analyses de CRISM ? Elles ont permis une analyse fine de la composition des roches qui constituent les diverses structures de Valles Marineris. Le canyon principal s'accompagne d'un système de failles orientées Est-Ouest, le long desquelles

1. À LA SURFACE DE LA PLANÈTE ROUGE, Valles Marineris ressemble à une cicatrice sombre de 3 500 kilomètres de long.

©NASA/JPL-Caltech/USGS

se sont formés de nombreux fossés d'effondrement et des dépressions. L'ensemble crée une série de paysages linéaires uniques sur Mars. Au fond du canyon, on trouve de nombreuses dépressions interconnectées: des chasmata. Le sol de ces chasmata est souvent recouvert d'épais dépôts stratifiés, de glissements de terrain ou encore d'ensembles de buttes nommés chaos.

Des parois de dix kilomètres de hauteur

Les premiers éléments pour comprendre comment le canyon s'est formé sont ses parois. Celles-ci sont une source inestimable d'informations. En effet, elles exposent une coupe géologique sur plus de dix kilomètres de hauteur. Abruptes, les parois ont une morphologie dite en « éperons et ravines » (voir la figure 2a). Il s'agit de talus où, localement, sur les éperons, des roches affleurent. L'érosion et les mouve-

■ LES AUTEURS



Jessica FLAHAUT est postdoctorante à la Faculté des sciences de la Terre et du vivant de l'Université libre d'Amsterdam. Elle a été lauréate du Prix Le Monde de la recherche universitaire 2012.



Pascal ALLEMAND est professeur au Laboratoire de géologie de Lyon, Université Lyon 1.



Cathy QUANTIN-NATAF est maître de conférences au Laboratoire de géologie de Lyon, Université Lyon 1.

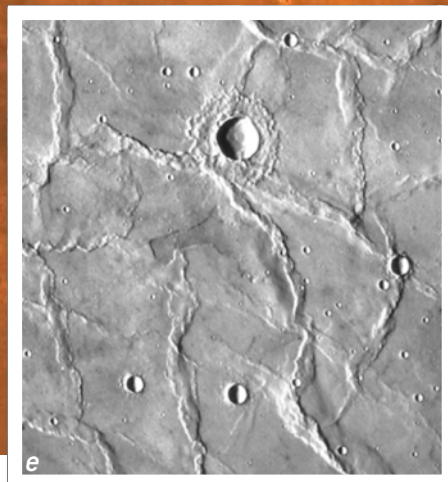
ments tectoniques propres à Mars sont à l'origine de ces structures. Mais comment ces parois sont-elles apparues ?

Pour répondre à cette question, regardons à l'Ouest de Valles Marineris. On y trouve le dôme de Tharsis avec Olympus Mons – le plus haut relief du Système solaire, culminant à 21 229 mètres – et les trois volcans alignés de Tharsis Montes, Ascraeus Mons (18 225 mètres), Pavonis Mons (14 058 mètres) et Arsia Mons (17 761 mètres).

Cet ensemble volcanique s'est formé à la fin du Noachien. Sous le poids du dôme de Tharsis, la lithosphère (la croûte et la partie supérieure du manteau martien) a fléchi, s'est soulevée par endroits et a craqué, donnant naissance à Valles Marineris. Ce



2. LES PAYSAGES DE VALLES MARINERIS sont très variés et témoignent du fait que le volcanisme, l'activité tectonique et l'eau ont contribué à façonner les paysages. À l'Ouest, Noctis Labyrinthus présente un réseau complexe de dépressions connectées. Le canyon et ses chasmata (ses vallées) s'étendent ensuite sur environ 3 500 kilomètres vers l'Est. Les parois [a] en « éperons et ravines » sont parfois le lieu de glissements de terrain [d]. D'autres activités tectoniques sont visibles sur les plateaux avec un quadrillage de rides et de failles [e]. Le volcanisme apparaît dans les strates des parois qui contiennent de la roche volcanique, mais aussi des infiltrations de roches riches en olivine [b]. L'eau a aussi joué un rôle important dans les paysages de la région, les cônes alluviaux [c] en sont un exemple.



dernier est un graben, c'est-à-dire un fossé d'effondrement bordé de failles qui apparaissent sous l'influence de forces d'extension horizontales appliquées à la lithosphère. Le bloc central s'est affaissé et constitue le fond du canyon. Les blocs voisins forment les plateaux surplombant le canyon. La naissance de Valles Marineris date d'il y a environ 3,5 milliards d'années.

Les parois du canyon permettent de faire de la stratigraphie en étudiant les couches géologiques qui affleurent. En l'absence de bouleversements structuraux, les couches les plus profondes sont les plus anciennes. Ainsi, les roches les plus anciennes sont à la base des versants du canyon, alors que les plus récentes affleurent au sommet des plateaux. En outre, Valles Marineris présente les roches les plus anciennes exposées à la surface de la planète.

L'érosion et la tectonique rendent difficile l'étude de la stratigraphie. Les couches ne sont pas toujours visibles. Souvent, les parois sont le siège d'impressionnants glissements

de terrain (voir la figure 2d). Ces éboulements forment de vastes lobes de débris qui se sont écoulés sur le fond plat du canyon, jusqu'à 100 kilomètres de leur source. Leur forme ne dépend que de la géométrie du canyon, aussi bien pour les glissements de terrain les plus anciens (3,5 milliards d'années) que pour les plus récents (50 millions d'années). Ainsi, les phénomènes qui les ont provoqués sont probablement de même nature. Les volumes déposés s'étendent de 10 kilomètres cubes jusqu'à plus de 5000 kilomètres cubes, et sont donc en moyenne dix fois plus importants que les glissements terrestres. Cela s'explique surtout par une gravité martienne plus faible. Les glissements de terrain se terminent par un bourrelet caractéristique des écoulements de débris rapides, qui se mettent en place à des vitesses de plusieurs dizaines de kilomètres par heure. Cela implique des coefficients de frottement faibles, qui écartent les processus dominés par l'eau.

En certains endroits, l'analyse des strates reste possible et montre une différence

prononcée entre la partie Ouest et la partie Est de Valles Marineris. À l'Ouest, les murs du canyon sont constitués d'un empilement de couches horizontales et parallèles, d'aspect sombre et friable. Ces couches ont été interprétées comme une accumulation de laves et de cendres volcaniques sur plus d'une dizaine de kilomètres de hauteur. Ces laves proviendraient de l'activité des gigantesques volcans du dôme de Tharsis.

Le rôle des volcans

À l'Est, l'empilement de couches volcaniques est limité à la partie supérieure des parois. À la base des versants, on trouve des roches peu communes sur Mars. D'après une étude spectrale qui analyse la lumière réfléchie par les matériaux, ces roches claires et fracturées sont riches en orthopyroxènes. Elles sont similaires à la météorite martienne ALH84001 qui est âgée de plus de 4,1 milliards d'années. Cette météorite et les roches du fond de Valles Marineris pourraient être des échantillons de la



croûte primitive martienne. Cette croûte, qui constitue l'enveloppe la plus externe de la planète, aurait été créée par cristallisation d'un océan de magma se refroidissant peu de temps après la formation de la planète.

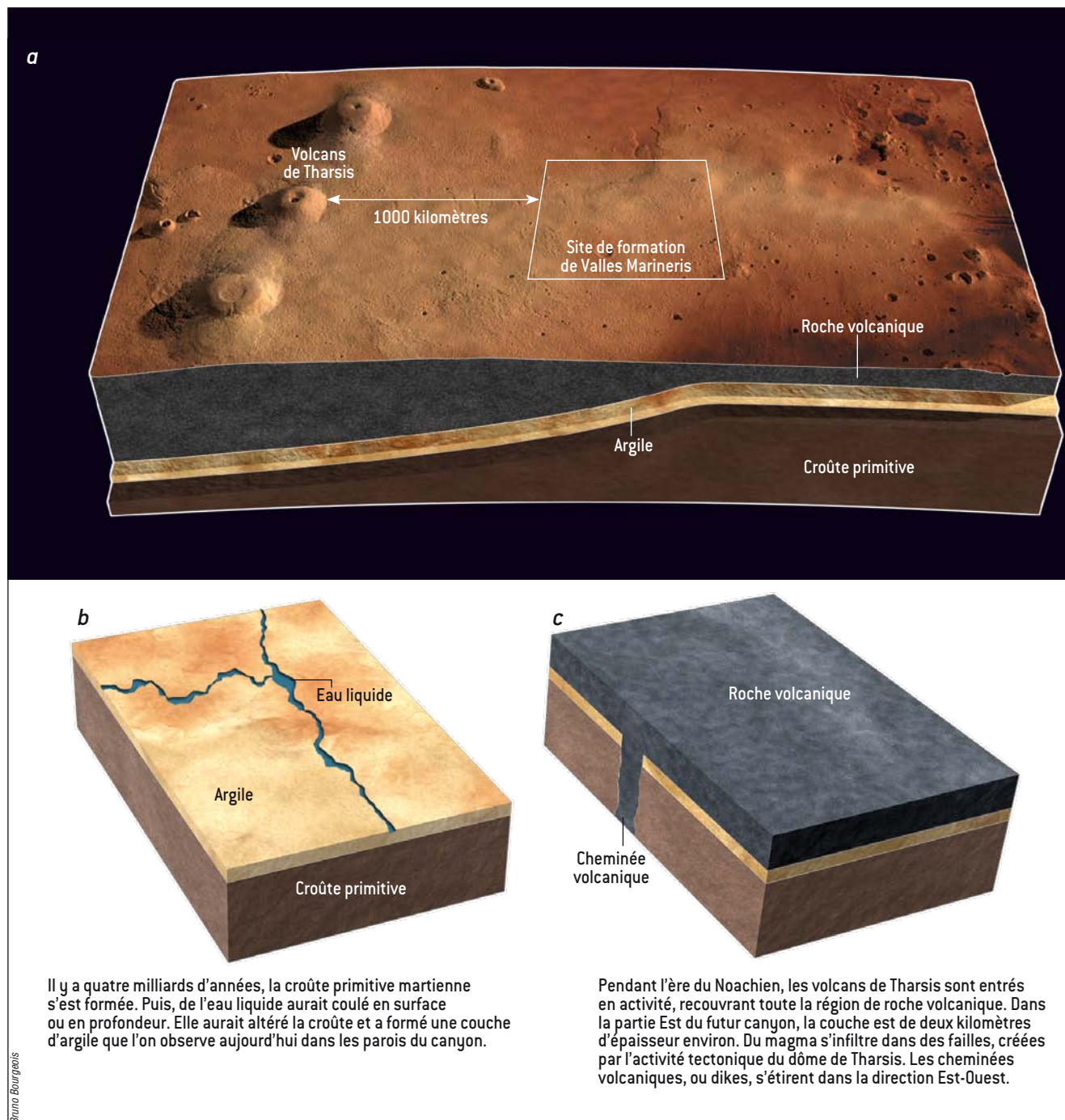
Ces roches pourraient ainsi représenter les premiers témoins de la différenciation ainsi que de la solidification de la planète, il y a plus de quatre milliards d'années! Elles se sont formées avant le canyon. De telles roches n'existent pas sur Terre,

puisque la majeure partie de la croûte a été recyclée par la tectonique des plaques, un processus absent sur Mars. La plupart des roches présentes en surface sont très anciennes, mais elles ont souvent été modifiées, altérées et modifiées par les impacts de météorites et l'érosion.

Les roches claires de la base des versants n'ont pas échappé à cette règle. Le bombardement météoritique, très intense au début de l'histoire de la pla-

nète rouge, peut être responsable de leur aspect fracturé.

Une autre altération est observée sur la partie supérieure de la croûte primitive. Une épaisse couche argileuse suggère que la croûte a subi une transformation en présence d'eau peu de temps après sa mise en place. Comme nous le verrons, cette couche permet de mettre en évidence des conditions environnementales différentes pendant le Noachien.



D'autres observations mettent en évidence la différence de composition entre les structures des parois du canyon de l'Est et de l'Ouest, dont la ligne de démarcation passe par Coprates Chasma. Les cratères de météorites de huit à dix kilomètres de diamètre présentent un pic central qui se forme pendant le rebond consécutif à l'impact météoritique. Le pic contient des matériaux du sol provenant d'une profondeur comprise entre une et deux

fois le diamètre du cratère. À l'Ouest, les pics des cratères sont constitués de roches volcaniques, à l'Est de croûte primitive.

L'origine de cette séparation est encore discutée : elle pourrait représenter la limite d'un ancien mégacrater situé à l'Ouest, qui crée un bassin accumulant du matériel volcanique et s'enfonçant à mesure qu'il se remplit, ou bien une mégafaille qui déplace la croûte en profondeur à l'Ouest et la fait remonter en surface à l'Est.

Ainsi, les observations de la paroi permettent d'ébaucher l'histoire géologique de Mars et de Valles Marineris. Suite à la formation de la planète, le magma se serait différencié et aurait formé la croûte martienne il y a quatre milliards d'années. Puis le volcanisme, pendant le pré-Noachien et le Noachien, a recouvert la croûte primitive d'épais dépôts volcaniques. Cette couverture a été plus importante dans la partie Ouest de Valles Marineris.

L'ÉVOLUTION DE VALLES MARINERIS

Les informations collectées par la sonde MRO et celles qui l'ont précédée permettent de reconstituer les grandes lignes de l'histoire géologique de Valles Marineris. Le canyon s'est formé à l'Est du dôme de Tharsis (a) il y a 3,5 milliards d'années. Cet ensemble volcanique serait à l'origine des forces qui se sont exercées sur la lithosphère (la croûte martienne et la partie supérieure du manteau), dont le comportement est élastique à grande échelle : la lithosphère a dû fléchir sous le poids du dôme de Tharsis et craquer à distance.

L'étude des parois du canyon montre qu'avant la formation de celui-ci, la croûte primitive a subi des altérations dans sa partie supérieure avec la

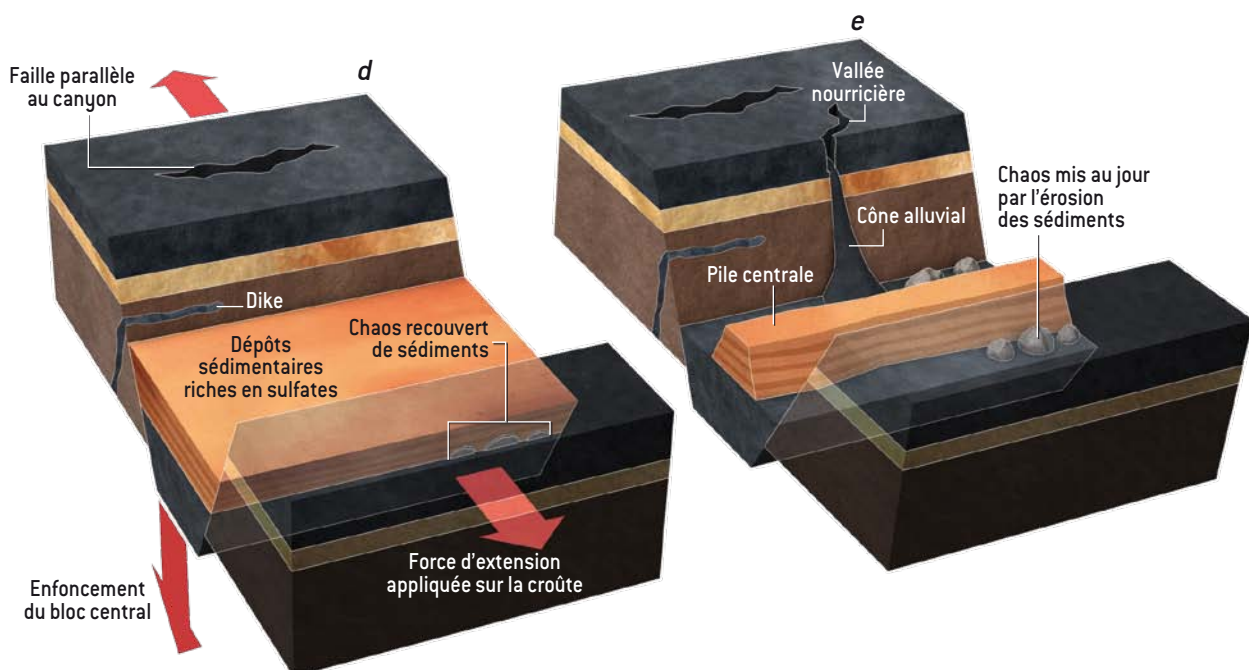
formation d'argile au contact de l'eau liquide (b). Puis à la fin du Noachien, il y a environ 3,7 milliards d'années, l'activité volcanique a recouvert l'ensemble de roche volcanique. La future région Ouest du canyon présente une épaisseur de matériau volcanique plus importante, sans doute parce qu'il existait dans cette zone un bassin qui s'est rempli de roche volcanique et qui s'est affaissé progressivement. La coupe (a) illustre une hypothèse sur la forme du bassin. À l'Est, l'épaisseur de roche volcanique est plus faible (c).

Les différentes forces qui se sont exercées sur la lithosphère ne sont pas encore bien comprises, mais elles ont conduit à un enfoncement

du bloc central, qui constitue aujourd'hui le fond du canyon (d).

Les observations de MRO révèlent de nombreux détails sur Valles Marineris liés à une activité tectonique ou volcanique. On observe, par exemple, des failles et des dikes – des cheminées volcaniques – parallèles au canyon.

Aujourd'hui, l'eau ne coule plus dans le canyon. Mais de nombreuses traces persistent (e) : des traces d'érosion ou encore des cônes de débris. L'analyse des dépôts stratifiés riches en sulfates montre, en particulier, que les conditions environnementales de la planète ont changé il y a 3,5 milliards d'années.



Il y a 3,5 milliards d'années, des forces d'extension ont conduit à l'effondrement du bloc central, découpant des parois inclinées, parfois hautes de dix kilomètres. Des failles parallèles au canyon se sont formées. Les parois révèlent les dikes et leur forme linéaire caractéristique. L'effondrement des sols riches en glace, à l'Est, a créé des chaos, recouverts plus tard par des dépôts stratifiés riches en sulfates.

Les murs du canyon et les dépôts stratifiés ont été façonnés par des écoulements d'eau provenant des éruptions de Tharsis, à l'Ouest, ou du sous-sol. L'eau a aussi déferlé des plateaux par des vallées nourricières, charriant des dépôts qui se sont accumulés au pied des falaises sous la forme de cônes alluviaux.

La formation du dôme de Tharsis a exercé des contraintes sur la lithosphère, jusqu'à sa rupture et la formation du canyon.

Une autre manifestation volcanique est observable dans Valles Marineris. Il s'agit de filons verticaux, qui s'étirent dans la direction Est-Ouest, parallèles au canyon. Ces filons apparaissent dans la croûte primitive des parois du canyon sous la forme de bandes, longues de plusieurs kilomètres et larges d'environ 50 mètres (voir la figure 2b). Elles sont plus sombres et enrichies en olivine, un minéral silicaté. Ces filons correspondent très certainement à des cheminées volcaniques, nommées dikes, qui pénètrent dans la roche environnante. Le magma monte dans les cheminées puis refroidit ; il cristallise et forme de l'olivine. Ces dikes pourraient aussi expliquer l'empilement de laves observé au sommet des versants. Certaines cheminées ont pu émerger sur la partie supérieure des parois où de la lave s'est répandue.

De tels dikes sont fréquemment observés sur Terre, mais rarement sur de si grandes dimensions. Leur orientation parallèle au canyon suggère un lien avec la tectonique régionale, responsable de la formation d'une grande partie des paysages de Valles Marineris, et du canyon lui-même. La période de formation des dikes n'est pas connue, mais le magma aurait pu s'infiltrer dans des failles créées à la même période que le canyon. Selon Jeffrey Andrews-Hanna, de l'École des mines du Colorado, la dilatation du magma dans les dikes a permis de désolidariser les blocs de la lithosphère. Cela aurait favorisé l'effondrement du bloc central formant le fond du canyon. Les dikes renferment aussi des informations sur la composition primitive du manteau de la planète, où le magma prend sa source.

Manifestation de la tectonique

La tectonique, responsable en grande partie de l'ouverture du canyon, s'exprime aussi par la présence d'autres structures. Noctis Labyrinthus (voir la figure 2), la partie occidentale de Valles Marineris, est un ensemble complexe de dépressions fermées ou reliées par d'étroits couloirs parfois partiellement comblés de dépôts sédimentaires ou de matériau volcanique. Les bords de ces dépressions suivent soit la direction Est-Ouest des failles du graben de Valles Marineris, soit le sens d'un système de failles orien-

BIBLIOGRAPHIE

J. Flahaut *et al.*, **Morphology and geology of the ILD in Capri/Eos Chasma (Mars) from visible and infrared data**, *Icarus*, vol. 207, pp. 175-185, 2013.

J. C. Andrews-Hanna, **The formation of Valles Marineris : 3. Trough formation through super-isostasy, stress, sedimentation, and subsidence**, *Journal of Geophysical Research Planets*, vol. 117, n° E6, 2012.

J. Flahaut, **Minéralogie de Valles Marineris (Mars) par imagerie hyperspectrale : histoire magnétique et sédimentaire de la région**, thèse de doctorat de Université de Lyon 1, 2011.

B. K. Lucchitta *et al.*, **Topography of Valles Marineris : Implications of erosional and structural history**, *Journal of Geophysical Research Planets*, vol. 99, n° E2, pp. 3783-3798, 1994.

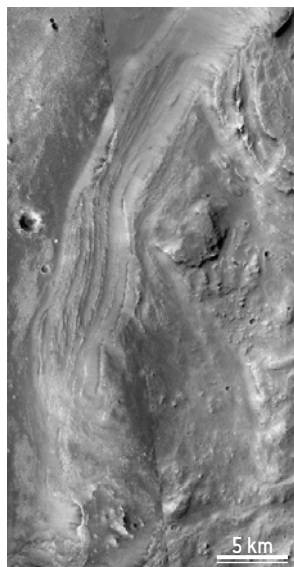
tées Nord-Sud visibles au Nord de Noctis Labyrinthus. L'origine de ces dépressions est encore débattue. Elle serait liée à des forces d'extension de la lithosphère et à un réchauffement de la croûte supérieure par du magma. Ce dernier phénomène aurait entraîné la fusion de glace contenue dans les premiers kilomètres de la croûte. L'eau aurait percolé en profondeur le long des failles d'extension en produisant un effondrement des roches au-dessus. On obtiendrait ainsi cette morphologie de dépressions fermées ou faiblement reliées.

Un sol façonné par l'eau

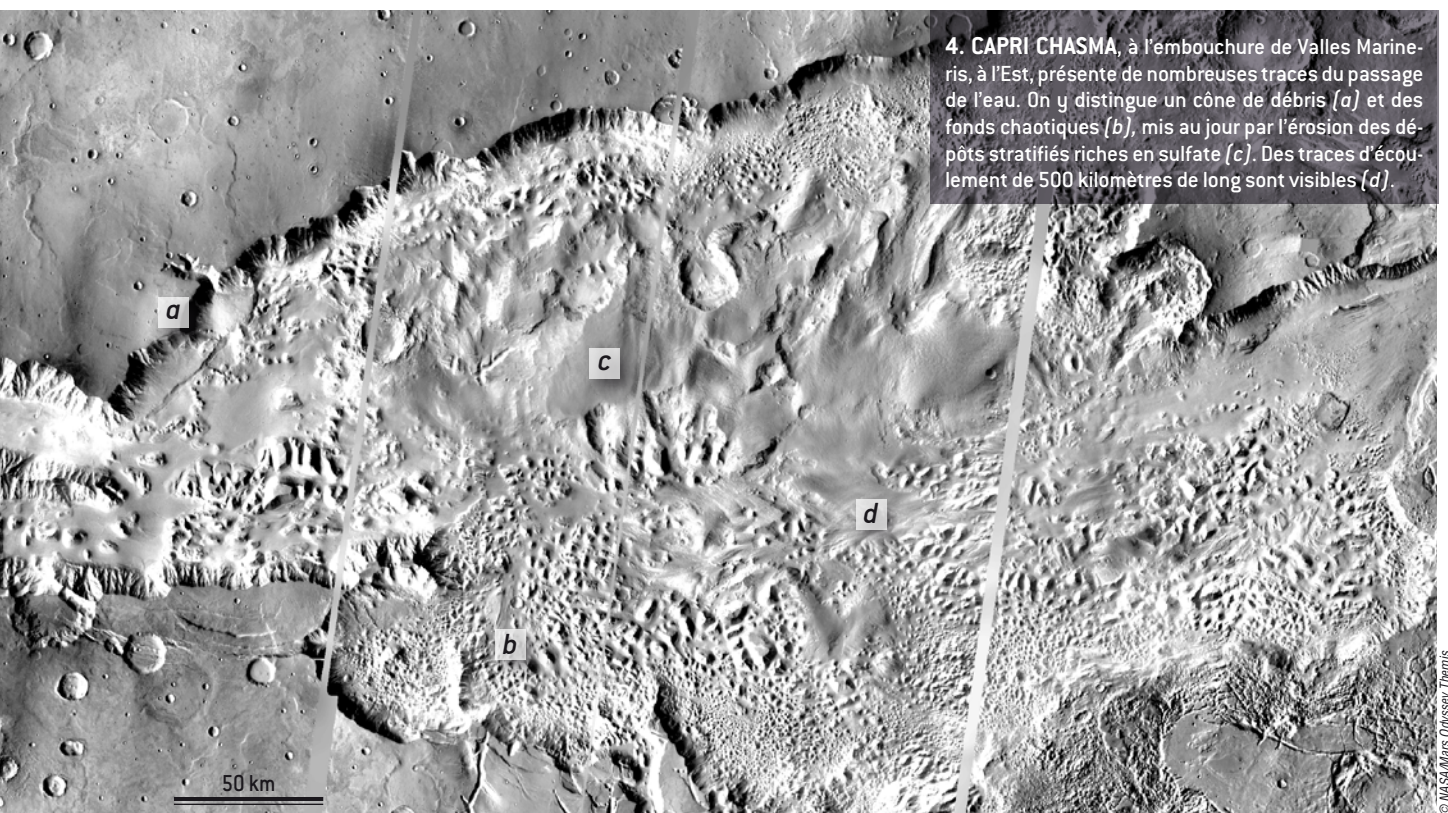
Mais ces témoignages confirment que le volcanisme et la tectonique ont largement participé à façonner Valles Marineris. Cependant, l'eau a aussi modelé ses paysages. Par exemple, les murs du canyon sont parfois recouverts de cônes alluviaux de forme triangulaire, qui prennent leur source dans des vallées nourricières en amont, sur les plateaux (voir la figure 2c). Cette physionomie les distingue des glissements de terrain. Les cônes sont formés d'un amas de matériaux transportés au pied des reliefs par l'eau.

À l'embouchure de Valles Marineris, à son extrémité Est, on observe des terrasses : des zones planes, étagées, ravinées au sein des murs par une activité fluviale soutenue (voir la figure 3).

Cependant, les parois du canyon ne sont pas les seuls témoins du passage de l'eau. L'eau a coulé, érodé, sculpté et redéposé des matériaux à de nombreuses reprises à l'intérieur du canyon. Le fond des chasmata situés à l'Est, tels Capri Chasma et Ganges Chasma, diffère des autres chasmata car il est recouvert d'un ensemble de buttes et de blocs anguleux, de quelques kilomètres d'envergure, formant une topographie rugueuse, ensemble nommé chaos ou fond chaotique (voir la figure 4). Les régions chaotiques sont fréquentes plus à l'Est de Valles Marineris, dans la région de Margarifer Terra, où elles sont observées en association avec des chenaux de débâcle, creusés par des déferlements d'eau. Ainsi, les buttes chaotiques recouvrant le fond de la partie Est du canyon ont été créées lors de brefs et intenses écoulements d'eau, sur et sous la surface, au moment de l'ouverture de Valles Marineris. Ces déferlements d'eau auraient été issus de la fonte de glace sous



3. LES PAROIS DE VALLES MARINERIS, à l'Est, ont été creusées par l'écoulement répété d'eau liquide. Elles ont formé des terrasses.



4. CAPRI CHASMA, à l'embouchure de Valles Marineris, à l'Est, présente de nombreuses traces du passage de l'eau. On y distingue un cône de débris [a] et des fonds chaotiques [b], mis au jour par l'érosion des dépôts stratifiés riches en sulfate [c]. Des traces d'écoulement de 500 kilomètres de long sont visibles [d].

© NASA/Mars Odyssey/Thémis

la surface, liée ou non à du volcanisme. Cela a pu déstabiliser le sous-sol, causant l'effondrement des terrains et formant les reliefs accidentés.

Le plus grand réservoir de sulfates de Mars

Les dépôts stratifiés sont les formations les plus énigmatiques de la région. Le sol de presque tous les chasmata, y compris le fond chaotique, est recouvert de ces dépôts stratifiés, épais de plusieurs kilomètres, à sommet plat et à fort albédo. Leur origine est inconnue, mais ces dépôts seraient liés à une sédimentation en milieu lacustre, à l'altération de restes de matériaux constituant les murs des canyons, à la formation d'édifices volcaniques sous-glaciaires, ou à l'accumulation de dépôts éoliens ou volcaniques. Le spectromètre OMEGA à bord de *Mars Express* a montré que ces matériaux sont riches en sulfates. Le volume gigantesque des dépôts fait de Valles Marineris le plus grand réservoir de sulfates à la surface de la planète. La présence de sulfates implique l'action de l'eau liquide au moment ou après la formation de ces sédiments.

L'âge de ces dépôts est mal défini, mais il a été montré que la formation des sulfates est postérieure à l'ouverture du canyon et à la mise en place des fonds chaotiques qui ont été recouverts par les sédiments dans un premier temps. L'activité hydrologique ne s'arrête pas là, puisque les dépôts stratifiés ont été érodés, formant des buttes qui mettent au jour les fonds chaotiques. Bien qu'une grande partie de cette érosion puisse être attribuée au vent, qui laisse des crêtes sur les reliefs et qui accumule les particules les plus fines dans les dépressions, souvent sous forme de dunes, certaines morphologies caractéristiques ne peuvent correspondre qu'à une érosion par l'eau. C'est le cas des gigantesques stries Est-Ouest de Capri Chasma (voir la figure 4d). Ces marques d'écoulement s'étendent sur environ 500 kilomètres de longueur et 40 kilomètres de largeur et se terminent près des terrasses creusées dans les murs à l'embouchure Est du canyon.

L'étude des dépôts montre que la planète a connu un changement de conditions environnementales il y a 3,5 milliards d'années, au moment de l'ouverture du canyon, qui se traduit par une évolution

des types de dépôts sédimentaires. La présence de sulfates au sein de dépôts stratifiés, au cours de l'Hespérien, traduit une altération à pH acide, alors que les argiles détectées dans les laves des terrains noachiens se forment à un pH neutre. Néanmoins, ce changement de chimie en surface ne semble pas lié à un changement climatique brutal, puisque l'eau liquide aurait été présente en abondance dans la région durant tout l'Hespérien. Peut-être une étude plus approfondie de Valles Marineris nous révélera-t-elle les causes de ces modifications environnementales.

La sonde MRO a permis de faire des observations plus détaillées de Valles Marineris et a précisé l'histoire géologique de la région, même si la chronologie des événements qui ont façonné les paysages du canyon n'est pas encore parfaitement établie.

Ainsi, pendant les premiers « âges » de la planète rouge, la croûte primitive se serait formée et la couche d'argile se serait constituée sous l'influence de l'eau. Puis seraient venus les temps des bouleversements géologiques avec les éruptions volcaniques et l'ouverture du canyon. Enfin, l'érosion de l'eau aurait sculpté les parois et le sol de Valles Marineris. ■

1. DES TRAÎNÉES SOMBRES

sur les pentes escarpées de l'intérieur du cratère Hale indiqueraient la présence de réserves d'eau salée liquide.

Mars, un remodelage

L'ESSENTIEL

- Des images en haute résolution réalisées en orbite sur plusieurs années montrent que la surface change en permanence.
- L'eau serait responsable de certaines de ces variations, mais pas de la formation des ravines. Ces dernières seraient surtout façonnées par le dioxyde de carbone quand il se sublime.
- Sur des pentes chauffées par le Soleil, les planétologues auraient repéré des écoulements d'eau salée qui pourraient héberger une vie martienne.



permanent

La surface de Mars change en permanence.
Des lignes sombres apparaissent sur certaines pentes.
S'agit-il de traces d'écoulements d'eau liquide ?

Alfred McEwen

Sauf mention contraire, les illustrations sont de la NASA/JPL/Univ. d'Arizona