

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

La découverte de traces d'eau sur Mars semble si banale que c'est devenu une plaisanterie parmi les spécialistes de la planète rouge : « Félicitations ! Vous êtes la millième personne à découvrir de l'eau sur Mars ! »

La plupart de ces découvertes reposent soit sur des traces de l'écoulement d'eau disparue depuis longtemps, soit sur la présence actuelle de glace, de vapeur d'eau ou de minéraux hydratés. La découverte d'eau liquide, aujourd'hui, à la surface de Mars, pourrait changer le cours de l'exploration martienne : là où il y a de l'eau liquide sur Terre, il y a presque toujours de la vie. Confirmer l'existence d'eau liquide sur Mars relancerait l'espoir de trouver des formes de vie extraterrestre encore existantes.

En juin 2000, la NASA a dévoilé des informations qui n'avaient rien de banal : une caméra de la sonde *Mars Global Surveyor* avait identifié de nombreuses structures de surface qui ressemblaient aux ravines terrestres, qui sont sculptées par des écoulements d'eau. Un communiqué de presse de la NASA annonçait qu'avec la découverte des ravines, il « pourrait y avoir, aujourd'hui encore, des sources d'eau liquide à la surface de la planète rouge ou à faible profondeur ». Les ravines ont attiré l'attention de nombreux planétologues parce qu'on pensait qu'elles étaient creusées par des écoulements d'eau ou de coulées de débris humides.

Mais plusieurs questions se sont immédiatement posées. Des dizaines de milliers de ces ravines, mesurant parfois plusieurs kilomètres de longueur, sillonnent les pentes situées aux latitudes moyennes de Mars. Elles impliquaient des quantités importantes de liquide très difficiles à expliquer. En outre, la pression atmosphérique de la planète est si basse (moins de un pour cent de celle de la Terre) que toute l'eau pure de surface gèle inévitablement, s'évapore ou bout rapidement. En effet, les conditions de température et de pression sont très proches du point critique de l'eau pure.

Certains chercheurs ont supposé que les ravines étaient des reliques du passé, quand la planète connaissait de plus grandes variations climatiques. Puis, en 2006, de nouvelles données de *Mars Global Surveyor* ont montré que du matériau de couleur claire s'était échappé des ravines au cours des années précédentes. Il fallut admettre que les ravines ne sont pas des structures du passé : elles continuent à évoluer.

Alors que le mystère s'épaississait autour des ravines, une nouvelle sonde venait d'arriver en orbite autour de Mars : *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), avec à son bord HiRISE (*High-Resolution Imaging Science Experiment* pour Expérience d'imagerie scientifique à haute résolution), dont je suis le chef de projet. HiRISE, la plus puissante caméra jamais embarquée sur une sonde interplanétaire, allait bientôt apporter des données cruciales.

Des zébrures à flanc de colline

Pendant que l'imagerie détaillée de MRO démêlait les mystères des ravines, un étudiant de mon laboratoire a découvert une curieuse caractéristique de la surface de Mars qui n'avait encore jamais été observée : des zébrures superficielles, qui s'écoulent à flanc de colline, et qui croissent lentement et changent avec les saisons d'une façon qui suggère qu'il s'agit d'écoulements d'eau liquide. Ces zébrures sont désormais la preuve la plus convaincante de la présence d'eau liquide sur Mars. Elles nous ont apporté de nouvelles idées qui expliqueraient comment de l'eau liquide peut exister dans un environnement aussi défavorable, et la meilleure indication en date que Mars pourrait toujours abriter une niche près de la surface, où de la vie subsisterait.

Dès les prémices de la mission, nous avions conçu HiRISE en ayant à l'esprit les ravines et autres structures à petite échelle. La caméra nous a permis d'examiner ces caractéristiques avec plus de détails que tout ce qui se faisait jusque-là. HiRISE peut photographier n'importe quelle partie de la surface de Mars, en couleurs, avec une résolution inférieure au mètre (entre 0,25 et 0,32 mètre par pixel). La sonde est capable de pointer la caméra sur une zone intéressante lors de plusieurs passages en orbite afin de détecter d'éventuelles variations dans le paysage. En outre, elle peut cartographier le sol en stéréoscopie, pour livrer une vue tridimensionnelle.

Grâce à la combinaison de la haute résolution et de la couleur, ainsi que de prises de vue répétées sur plusieurs années, HiRISE a amélioré notre connaissance de la surface de Mars. Nous avons vu de nouveaux sites d'impact constellant la surface, des avalanches de roches, du givre et de la glace, ainsi que des tourbillons de poussière et de sable (voir la figure 2).

■ L'AUTEUR



Alfred McEWEN est professeur de planétologie à l'Université de l'Arizona. Il est chef de projet sur la mission HiRISE.

■ BIBLIOGRAPHIE

V. Chevrier et E. Rivera-Valentin, *Formation of recurring slope lineae by liquid brines on present-day Mars*, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, n° 21, L21202, 2012.

A. S. McEwen et al., *Seasonal flows on warm Martian slopes*, *Science*, vol. 333, pp. 740-743, 2011.

J. Bell, *Mars : un passé humide*, *Pour la Science*, n° 352, février 2007.

M. Malin et K. Edgett, *Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars*, *Science*, vol. 288, pp. 2330-2335, 2000.

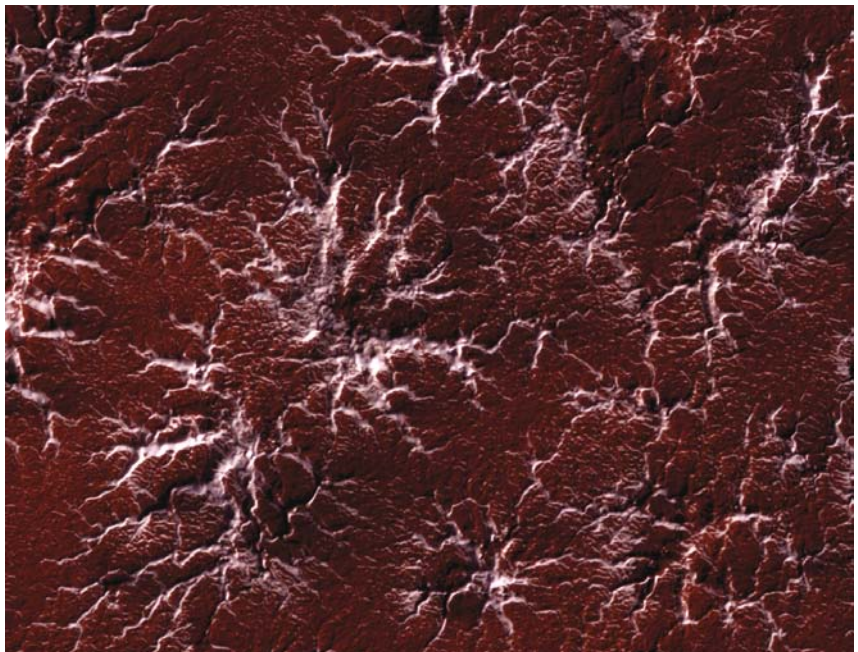
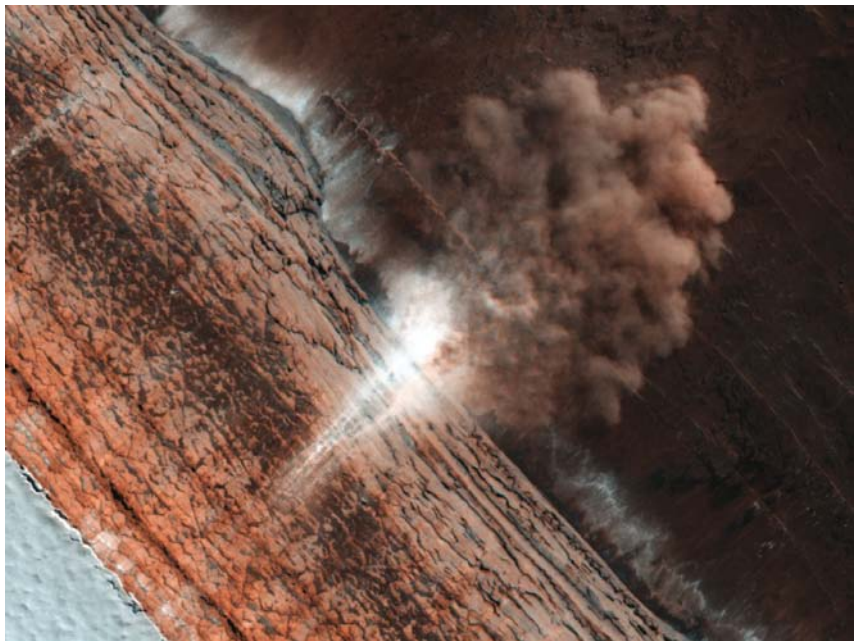
HiRISE a très vite commencé sa campagne de cartographie de la surface. Une des premières images, prise dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Sud, montrait une pente avec les mystérieuses ravines découvertes par la mission *Mars Global Surveyor*. À cause de la saison d'hiver austral, une grande partie de ce versant exposé au Sud était dans l'ombre du cratère. Du givre, essentiellement du dioxyde de carbone gelé, couvrait presque toute la pente, sauf au fond de certaines ravines. L'absence de givre suggérait que quelque chose se passait dans la ravine elle-même.

La glace carbonique creuse les ravines

Il a fallu deux années martiennes (presque quatre années terrestres) pour surprendre de nombreuses ravines en train de changer, mais les données ont fini par révéler que les ravines se transformaient quand du givre de dioxyde de carbone couvrait le sol : de nouvelles alcôves se développaient, ainsi que des chenaux et des cônes de débris. Nous avons déjà vu à l'œuvre du dioxyde de carbone gelé (aussi nommé glace carbonique ou « glace sèche »). D'une part, dans les régions polaires de Mars, la sublimation saisonnière du dioxyde de carbone (son passage direct de l'état solide à l'état gazeux) produit d'étranges jets froids, semblables aux éruptions de geysers. D'autre part, sur les dépôts en couches de glace et de poussière près du pôle Sud de Mars, la sublimation du dioxyde de carbone crée des « araignées », des réseaux en étoiles de chenaux résultant de l'écoulement du gaz piégé sous la glace sèche et de l'érosion qu'elle provoque. On n'observe pas de telles structures sur Terre.

Les ravines de Mars ressemblent tellement aux ravines ou aux grands ravins sur Terre que de nombreux chercheurs supposaient qu'elles avaient été façonnées par des processus identiques. Cependant, nous avons fini par montrer qu'elles pouvaient aussi se former par un processus totalement inconnu sur Terre. Avec mes collègues, nous avons fini par conclure que le dioxyde de carbone déclenche la formation de ravines par un processus sans eau, tel que la sublimation de glace sèche, qui, comme un liquide, arrache des débris de roche et de sol.

Supposer que la glace carbonique creuse les ravines nous a permis de répondre à



2. DE NOMBREUX PHÉNOMÈNES TRANSFORMENT LA SURFACE MARTIENNE, tels [de haut en bas] des avalanches de poussière, des « araignées » de givre de dioxyde de carbone, qui creusent des ravines au fil des hivers, et des tourbillons de poussière (ici hauts de 800 mètres).

plusieurs questions, par exemple : pourquoi les ravines se forment-elles de préférence sur les versants orientés vers les pôles, entre 30 et 40 degrés de latitude Sud, et sur toutes les pentes escarpées entre 40 degrés de latitude Sud et le pôle ? Ce sont les pentes les moins ensoleillées, et cette configuration correspond à la distribution saisonnière de la glace de dioxyde de carbone. Ou encore : pourquoi les ravines sont-elles beaucoup plus actives dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord ? Étant donné la position actuelle de Mars dans le cycle de précession orbitale, les hivers austraux sont plus longs que les hivers boréaux, si bien qu'il s'accumule davantage de givre dans le Sud (voir l'encadré page 39).

Quand de la glace sèche recouvre le sol, les températures de la surface et de l'atmosphère sont égales à celle du point de solidification du dioxyde de carbone, c'est-à-dire environ -125°C (pour la pression atmosphérique martienne). L'eau pure gelant à 0°C , la saison du givre de glace carbonique est le moment de l'année où la présence d'eau liquide est la moins probable.

Je commençais à me dire que l'érosion actuelle de la surface martienne était essentiellement le fait du givre de dioxyde de carbone et que l'idée de la présence d'eau liquide aujourd'hui sur Mars était en train de tomber... à l'eau. À toutes les latitudes sur Mars, nous avons observé que des mécanismes ne mettant pas en œuvre l'eau, par exemple le vent, modifient la surface de la planète. Mais nous avons aussi montré que, dans certaines régions, la couverture saisonnière de dioxyde de carbone joue le même rôle.

En 2010, j'en étais à ce stade de mes réflexions quand un étudiant, Lujendra Ojha, travaillant sur les données de HiRISE, a découvert quelque chose de très intéressant. Il voulait créer des modèles numériques du terrain à partir de paires d'images stéréoscopiques de HiRISE. Je lui avais suggéré d'utiliser une paire d'images d'une ravine où nous avions repéré des chenaux. La première image avait été acquise deux mois avant la seconde, et nous voulions voir si quelque chose avait changé durant ce court laps de temps. Il a comparé les images, et ce qu'il a trouvé était pour le moins curieux. Sur l'image la plus récente, de nombreuses lignes sombres et étroites descendaient de zones rocheuses escarpées, et ces stries étaient absentes sur la première image.

Je ne savais pas quoi penser de ces lignes anormales. Nous avons réuni davantage d'informations. Tout d'abord, nous avons examiné toutes les paires stéréo acquises sur des pentes abruptes. Nous avons déjà enregistré des centaines d'images pour étudier des ravines, des cratères d'impact bien préservés et des affleurements du substrat rocheux. Parmi ces photographies, nous avons trouvé d'autres exemples de ces curieuses caractéristiques de surface. À chaque fois, nous voyions la même chose : des lignes sombres sur des pentes raides près du substrat rocheux. Toutes ces lignes étaient situées aux latitudes moyennes australes sur des pentes faisant face à l'équateur, pendant l'été : la période la plus ensoleillée, qui est aussi la saison opposée à celle où le dioxyde de carbone est actif. Des lignes sombres qui dévalent les pentes nous ont aussitôt fait penser à de l'eau ou à des sols humides, mais mes collègues et moi-même voulions rester prudents.

Nous avons pensé que ces étranges écoulements sur des pentes chaudes pourraient bien, en réalité, être le fait d'eau salée.

Avant de pouvoir déterminer ce qui était à l'origine de ces pentes striées, nous devions recueillir davantage de renseignements sur leurs conditions d'apparition. Nous pensions que ces écoulements estivaux augmentaient lentement durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, puis s'estompaient ou disparaissaient pendant les saisons froides, avant de se reformer l'été suivant.

Comme nous n'avions pas identifié les écoulements de saison chaude avant le deuxième été austral martien de *Mars Reconnaissance Orbiter*, nous avons dû attendre le troisième été austral, au début de 2011, pour tester nos hypothèses. Nous avons sélectionné six sites pour suivre de près les changements et en avons observé ponctuellement quelques autres. Ces observations ont confirmé ce que nous pressentions, et nous avons publié nos résultats dans la revue *Science*, en août 2011. L. Ojha a été submergé de coups de téléphone de son pays natal, le Népal.

Dans notre article, nous désignons les caractéristiques d'écoulement par l'expression *recurring slope lineae* (lignes

de pente récurrentes), un nom qui décrit le phénomène sans rien présumer de son origine. Si nous avions parlé de « traces d'écoulement d'eau », nous aurions donné, à tort, l'impression que nous étions sûrs de la façon dont elles s'étaient formées.

27°C l'après-midi !

Mais, lors de la publication de cet article, nous étions de plus en plus convaincus que l'eau jouait un rôle dans ce phénomène. Après tout, les lignes de pente récurrentes étaient présentes dans des environnements inhabituels : les latitudes moyennes, sur les pentes de l'hémisphère Sud, où les étés sont plus chauds qu'au Nord. Un instrument à bord de la sonde *Mars Odyssey* a mesuré, dans ces régions, des températures de surface allant jusqu'à 27°C l'après-midi ! Des températures positives semblent parfaitement adaptées à la présence d'eau liquide, mais c'est oublier que la pression atmosphérique sur Mars

est faible, de sorte que l'eau pure s'évapore ou bout rapidement. Il y a donc peu de chances que les lignes de pente récurrentes contiennent de l'eau pure.

Et s'il s'agissait d'eau salée ? C'est une substance bien différente. La surface de Mars est très salée, d'après les renseignements fournis par les atterrisseurs et rovers, par les spectromètres en orbite, et par l'analyse chimique des météorites martiennes. Toute eau coulant à la surface de Mars ou sous la surface devrait aussi avoir une teneur élevée en sels.

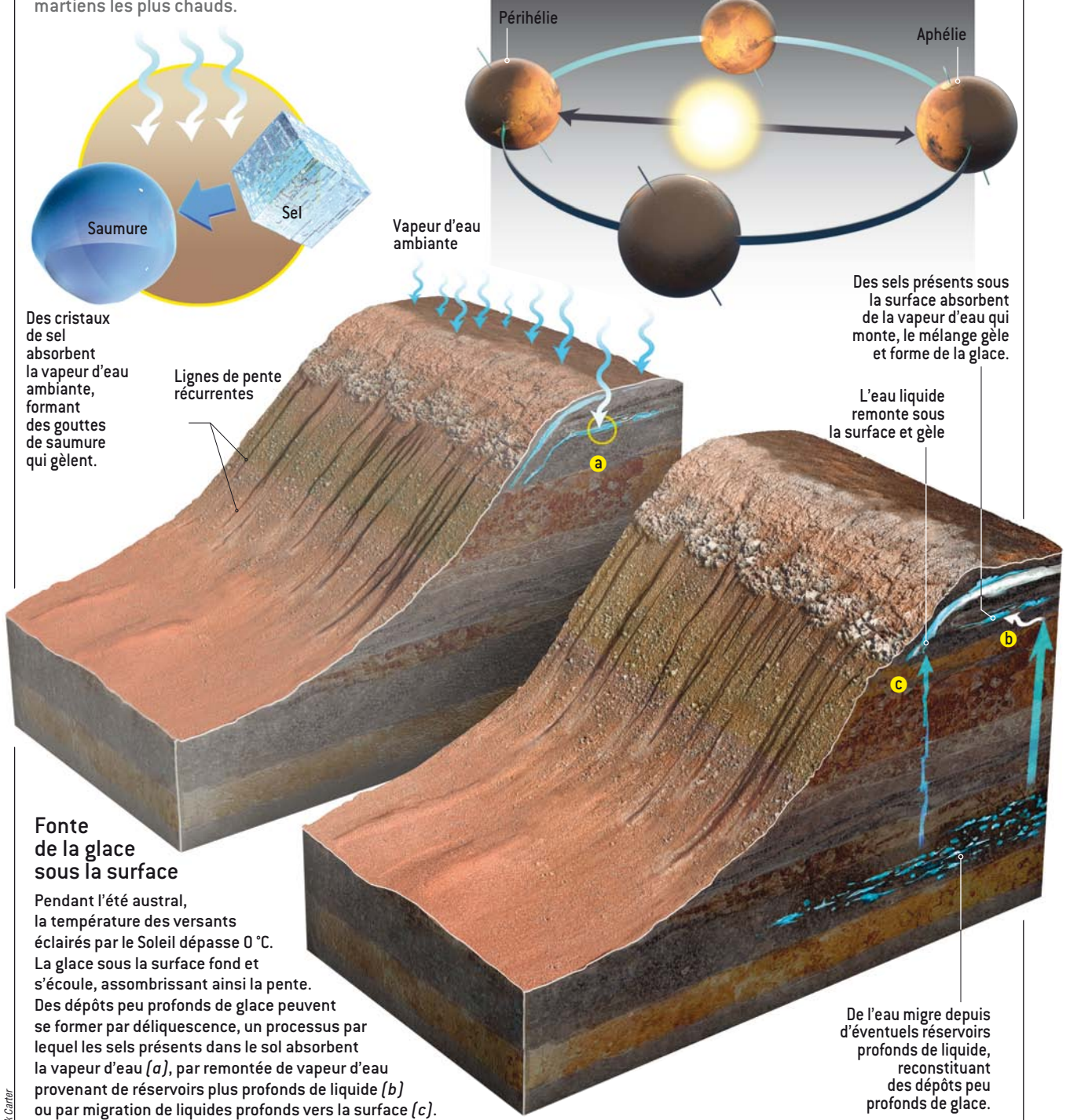
Quand de l'eau salée refroidit, soit elle se transforme en partie en glace, soit une partie de ses sels précipite, soit les deux à la fois. Le liquide restant se trouve dans sa composition « eutectique », c'est-à-dire présentant une concentration en sels lui permettant de rester liquide à des températures très inférieures à 0°C . Le terme de sel est à prendre dans le sens général d'un cristal associant un ion métallique et un ion non métallique. Une saumure de sulfate de fer ou de perchlorate de calcium (deux sels répandus sur Mars) dans sa composition eutectique peut rester liquide jusqu'aux alentours de -68°C . En outre, ces liquides eutectiques persistent bien mieux que l'eau pure : ils s'évaporent dix fois moins vite. Les propriétés inhabituelles des saumures eutectiques leur permettraient d'être beaucoup plus stables sur Mars que l'eau pure,

DE L'EAU LIQUIDE SUR MARS ?

Les planétologues débattent encore de l'origine des lignes sombres qui apparaissent chaque année sur les pentes australes martiennes. Toutefois, il est vraisemblable que la fonte saisonnière de dépôts peu profonds de glace d'eau salée en soit responsable. Les coupes de la pente illustrent divers mécanismes possibles qui apporteraient de la glace d'eau sous la surface, où la lumière du Soleil peut la faire fondre au cours des mois martiens les plus chauds.

L'été austral : le grand dégel

Mars décrit une orbite elliptique qui amène la planète rouge bien plus près du Soleil au périhélie qu'à l'aphélie. L'inclinaison de Mars varie (par « précession ») à des échelles de plusieurs dizaines de milliers d'années ; actuellement, la planète atteint le périhélie à peu près au moment de l'été austral, produisant des étés plus chauds dans cet hémisphère. Les lignes sombres apparaissant sur les versants Sud pendant les mois chauds pourraient correspondre à de la glace fondue.



Chuck Carter

et nous avons commencé à penser que ces étranges écoulements sur des pentes chaudes pourraient bien, en réalité, être de l'eau salée.

Nous avons envisagé d'autres hypothèses. Un phénomène sec, ou presque sec, pourrait-il expliquer ces observations? Aucun processus purement sec, tel que des chutes de pierres ou des glissements de terrain, n'est en mesure d'expliquer le caractère saisonnier, la croissance progressive et la sensibilité à la température, et nous n'avions jamais observé quoi que ce soit d'approchant sur la Lune, un astre desséché.

Nous avons ensuite envisagé que des composés volatils tels que de la vapeur d'eau puissent jouer un rôle, même mineur. Si des substances volatiles agglomèrent des particules du sol, l'élévation de la température permettrait à cette colle de se sublimer, laissant échapper des grains qui, libérés, dévaleraient les pentes. Mais cette hypothèse ne pouvait pas expliquer pourquoi les lignes de pente récurrentes disparaissent. En revanche, nous avons supposé que de l'eau coule quand il fait chaud, puis gèle la nuit. C'est effectivement ce qui semblait le mieux expliquer les observations.

Des écoulements d'eau salée

Une telle activité de surface existe aussi sur Terre. En Antarctique, des traces d'eau d'aspect semblable sont formées par le ruissellement à faible profondeur de saumures; or les chercheurs ont trouvé des microbes vivant dans ces traces d'eau de l'Antarctique. Mais les ravines nous ont appris que les apparences peuvent être trompeuses. En outre, les comparaisons avec ce que l'on observe sur Terre ont une pertinence limitée: il fait beaucoup plus froid la nuit sur Mars qu'en Antarctique, et la couche active de sol non gelé y est beaucoup plus mince.

Nous n'étions pas la première équipe, ni même la deuxième à suggérer la présence d'eau liquide sur Mars. Des clichés de la mission *Phoenix* ont montré ce qui ressemblait à des gouttelettes d'eau sur les pieds de l'atterrisseur robotique. Cette idée me semblait assez folle, jusqu'à ce que j'entende parler du processus de déliquescence, par lequel des sels absorbent la vapeur d'eau atmosphérique quand la température et l'humidité relative de l'air sont élevées en même temps. Si les

rétroussées de *Phoenix* avaient soulevé des sels de perchlorate au moment de l'atterrissage, les conditions auraient pu être réunies pour que ces sels absorbent de l'eau et fassent apparaître des gouttelettes.

Peut-on expliquer les lignes de pente récurrentes par la déliquescence? C'est tentant, mais c'est un processus qui, à partir d'un air martien raréfié, ne peut produire que de minuscules quantités d'eau, certainement pas assez pour que des torrents coulent le long des pentes, à moins qu'un mécanisme ne permette une accumulation progressive au fil du temps.

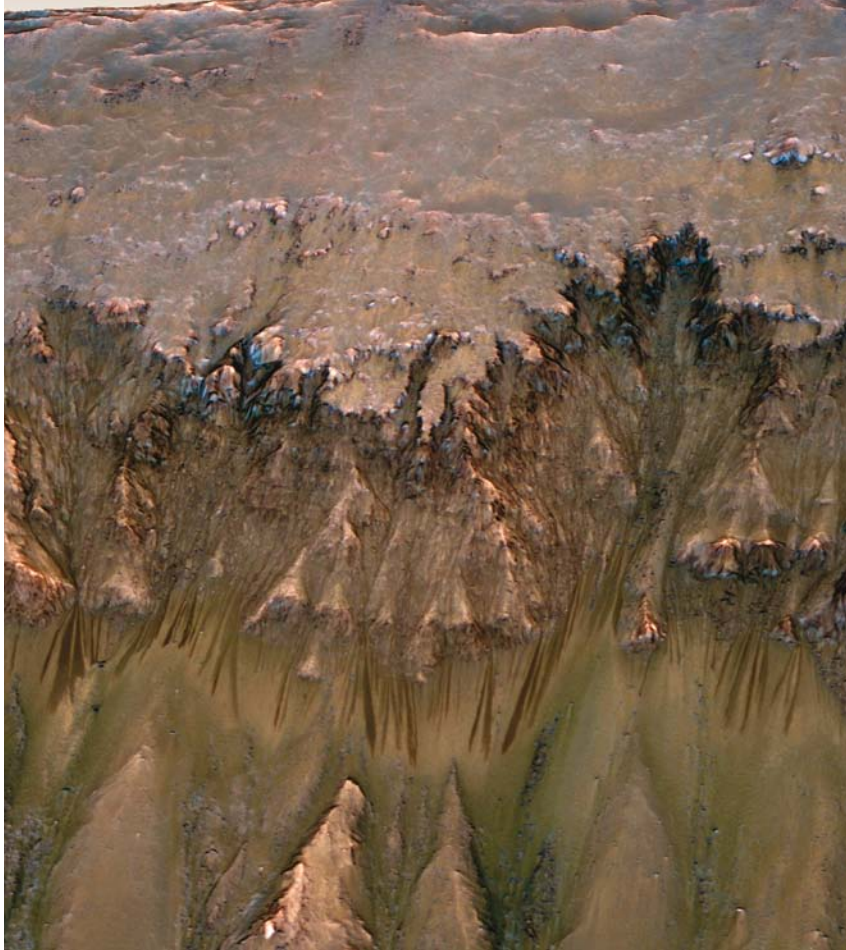
Peut-être les lignes de pente récurrentes sont-elles dues à de la glace fondant sous la surface? Nous savons, d'après la télédétection de neutrons, que les latitudes moyennes à élevées recèlent des étendues de glace peu profondes. Dans certains cratères d'impact récents, que nous avons découverts avec

HiRISE, de la glace a été mise à nu à des latitudes aussi basses que 40 degrés dans l'hémisphère Nord, un peu plus près de l'équateur que nous ne l'attendions.

À quoi ressemblent ces dépôts de glace? La glace présente sous la surface jonchée de roches est remarquablement propre, contenant peu de poussière de sol. Cela signifie que cette glace ne résulte pas de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, un processus qui remplit les vides entre les fines particules du sol. Elle ne semble pas non plus provenir d'un vestige de chutes de neige, qui ne subsistent pas longtemps à la surface et disparaissent en se sublimant. On imagine plutôt que de l'eau salée diffuse depuis les profondeurs et regèle en formant une couche de glace propre sous la surface.

Ce mécanisme évite diverses difficultés liées à la sublimation. Parce que la glace





3. DES ÉPISODES RÉCENTS D'ÉROSION OU DE DÉPÔT dans les ravines martiennes (*page ci-contre*) apparaissent en bleu sur cette image en fausses couleurs. Le givre de glace carbonique est probablement à l'œuvre plutôt que l'eau. En revanche, ce sont peut-être bien des écoulements d'eau qui produisent les lignes de pente récurrentes qui strient les parois de certains cratères (*ci-dessus*).

d'eau pure se sublime beaucoup plus vite que la glace d'eau salée, presque toute la glace qui s'est formée à faible profondeur sous la surface, à une époque passée où régnait un climat différent, aurait disparu. Seule resterait la glace la plus salée. En revanche, les pentes escarpées exposées au Soleil pourraient absorber assez de chaleur durant l'été pour que fonde la glace d'eau salée qui s'y trouve.

Nous disposons d'observations qui vont dans ce sens. Le maximum d'activité des lignes de pente récurrentes correspond non pas au moment où la surface est réchauffée au maximum, mais au pic des températures enregistrées à faible profondeur sous la surface, qui se produit quelques mois plus tard. Reste une difficulté : si les températures estivales sont assez élevées pour faire fondre la glace saumâtre, alors la réserve de glace devrait disparaître petit à petit. Disparaît-elle effectivement ? Les lignes de pente récurrentes ne sont-elles actives que pendant quelques années ou quelques décennies en un endroit donné ? Les réserves se reconstituent-elles d'une façon ou d'une autre, qu'il nous reste à découvrir ?

Malgré toutes ces preuves indirectes, il n'y a pas eu, jusqu'à présent, d'identification directe d'eau sur les sites des lignes de pente récurrentes. Le spectromètre de MRO pourrait y parvenir, mais il lui manquera peut-être la résolution spatiale suffisante pour discerner des stries aussi fines à la surface. En outre, l'orbite de MRO est telle que la sonde observe en permanence l'après-midi sur Mars, quand l'eau n'est probablement pas abondante ni même présente à la surface. Grâce aux études réalisées en laboratoire, nous savons aujourd'hui que l'eau salée peut être stable à la surface de Mars, mais soit en début de journée, soit en début de nuit.

L'humidité relative de l'atmosphère décroît quand l'air se réchauffe le matin, et augmente quand l'air se refroidit le soir. La température et l'humidité relative sont alors toutes deux assez élevées pour que certains types de sels absorbent de l'eau par déliquescence et la retiennent. Le soir, ce processus peut avoir lieu après le coucher du Soleil, mais il est alors difficile de faire des observations ciblées. Le matin, la déliquescence se produit après le lever du Soleil.

De futurs projets de sonde spatiale en orbite autour de Mars munie d'un spectromètre à haute résolution et utilisable à différentes heures de la journée sont à l'étude. Ils pourraient, à terme, confirmer la présence d'eau liquide (ou l'infirmier !).

Des environnements favorables à des extrêmophiles ?

Si les lignes de pente récurrentes reflètent bien la présence d'eau liquide, la question qui viendra ensuite sera celle de l'environnement habitable pour des microbes adaptés à une salinité élevée. Nous avons fait beaucoup de progrès dans la connaissance des organismes extrêmophiles sur Terre (ces espèces qui peuvent survivre à des températures très basses ou très élevées, à une sécheresse ou une salinité extrêmes, à une forte exposition aux rayonnements, etc.). Nous savons que de tels organismes ne se contentent pas de survivre, mais peuvent aussi se reproduire à des températures inférieures à -20°C dans certains liquides.

Certaines solutions eutectiques ne sont pas habitables (à notre connaissance), et il n'est donc pas toujours vrai que là où il y a de l'eau liquide sur Terre, il y a de la vie. Mais dans beaucoup des sites de lignes de pente récurrentes, il fait vraisemblablement plus de -20°C jusqu'à une profondeur de quelques centimètres pendant certaines parties des journées d'été. Et les extrêmophiles de la planète rouge, s'ils existent, pourraient être plus tolérants aux extrêmes martiens que les microbes terrestres.

Tout cela reste de la spéculation. Pour l'instant, nous travaillons à mieux comprendre la nature des lignes de pente récurrentes. Nous avons désormais identifié beaucoup plus de sites présentant de tels sillons actifs que dans notre travail initial. D'autres chercheurs ont réalisé des études en laboratoire et des études de terrain en Antarctique pour essayer d'observer et de reproduire sur Terre ce que HiRISE voit depuis son orbite autour de Mars. Nous espérons que nous réussirons à expliquer ce phénomène et à confirmer que l'eau liquide est vraiment responsable des lignes de pente récurrentes. Peut-être que parmi la multitude de découvertes d'eau sur Mars, la 1001^e sera la bonne ! ■

MARS

en images

Jessica Flahaut et Pierre Thomas

Mars n'est pas la planète déserte qu'on a pu imaginer. Elle se révèle d'une grande richesse. Les images prises depuis l'espace ou au sol en témoignent.

En 1965, une sonde, *Mariner 4*, a survolé Mars pour la première fois. Les images transmises étaient décevantes : par un malencontreux hasard, les caméras ratèrent les endroits intéressants et ne montrèrent que des images de surface déserte et ressemblant à la Lune. Depuis, neuf sondes ont été mises en orbite autour de Mars ; trois atterrisseurs fixes et quatre robots mobiles s'y sont posés. Toutes ces missions spatiales ont collecté des millions de données analytiques (composition des roches, données météorologiques...). Mais surtout, elles ont pris des milliers d'images du haut d'une orbite ou au sol. Toutes montrent que Mars ressemble à la Lune, à la Terre et... à Mars. Elle a ses caractéristiques propres, par exemple une atmosphère qui se transforme en neige carbonique chaque hiver aux pôles et redevient gazeuse avec l'été.

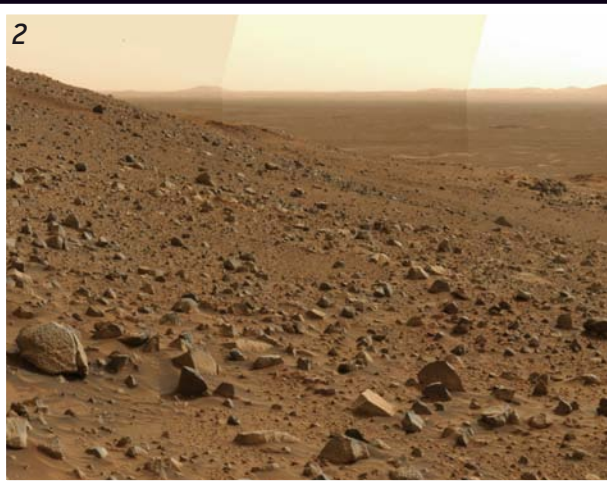
Ces images, s'ajoutant aux données analytiques, permettent de reconstituer en partie l'histoire de Mars. De surcroît, elles sont magnifiques. Grâce à des jeux de filtres, la NASA a reconstitué ce que verrait un homme se promenant sur Mars, ou ce que verrait un œil humain si ces paysages étaient transportés sur Terre et éclairés avec une « lumière terrestre ». Ce portfolio vous révélera les beautés et l'étrangeté de cette planète et, surtout, vous fera rêver...

La mégadune du cratère Russell (1) est le siège de coulées sombres qui correspondent à des avalanches de poussière et de sable, déclenchées par la sublimation printanière de la glace de dioxyde de carbone qui recouvre la dune en hiver.





© NASA/JPL Université d'Arizona

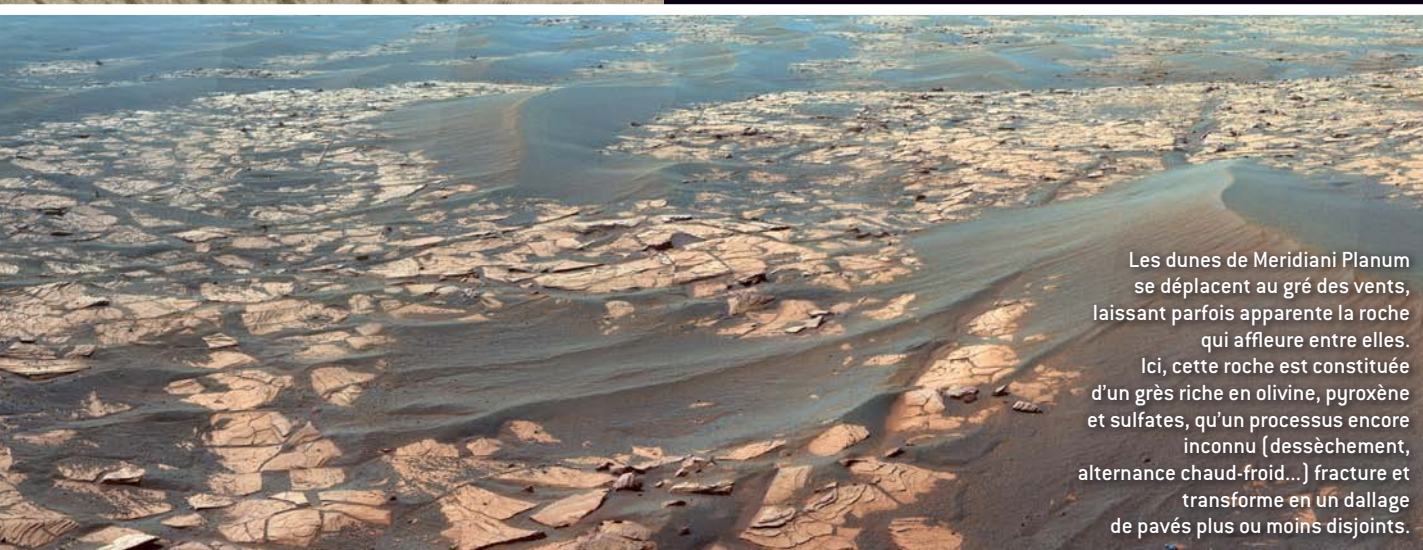


© NASA/JPL Cornell



© NASA/JPL Cornell

La majorité des paysages photographiés par les robots depuis le sol de Mars correspond à des « champs de cailloux » ou des dunes. Le robot *Spirit* a photographié les flancs des collines de Columbia et la plaine occupant le fond du cratère Gusev (2). *Opportunity* a laissé ses traces dans un vaste champ de dunes recouvrant Meridiani Planum (3).



Les dunes de Meridiani Planum se déplacent au gré des vents, laissant parfois apparente la roche qui affleure entre elles. Ici, cette roche est constituée d'un grès riche en olivine, pyroxène et sulfates, qu'un processus encore inconnu (dessèchement, alternance chaud-froid...) fracture et transforme en un dallage de pavés plus ou moins disjoints.

© NASA/JPL Cornell



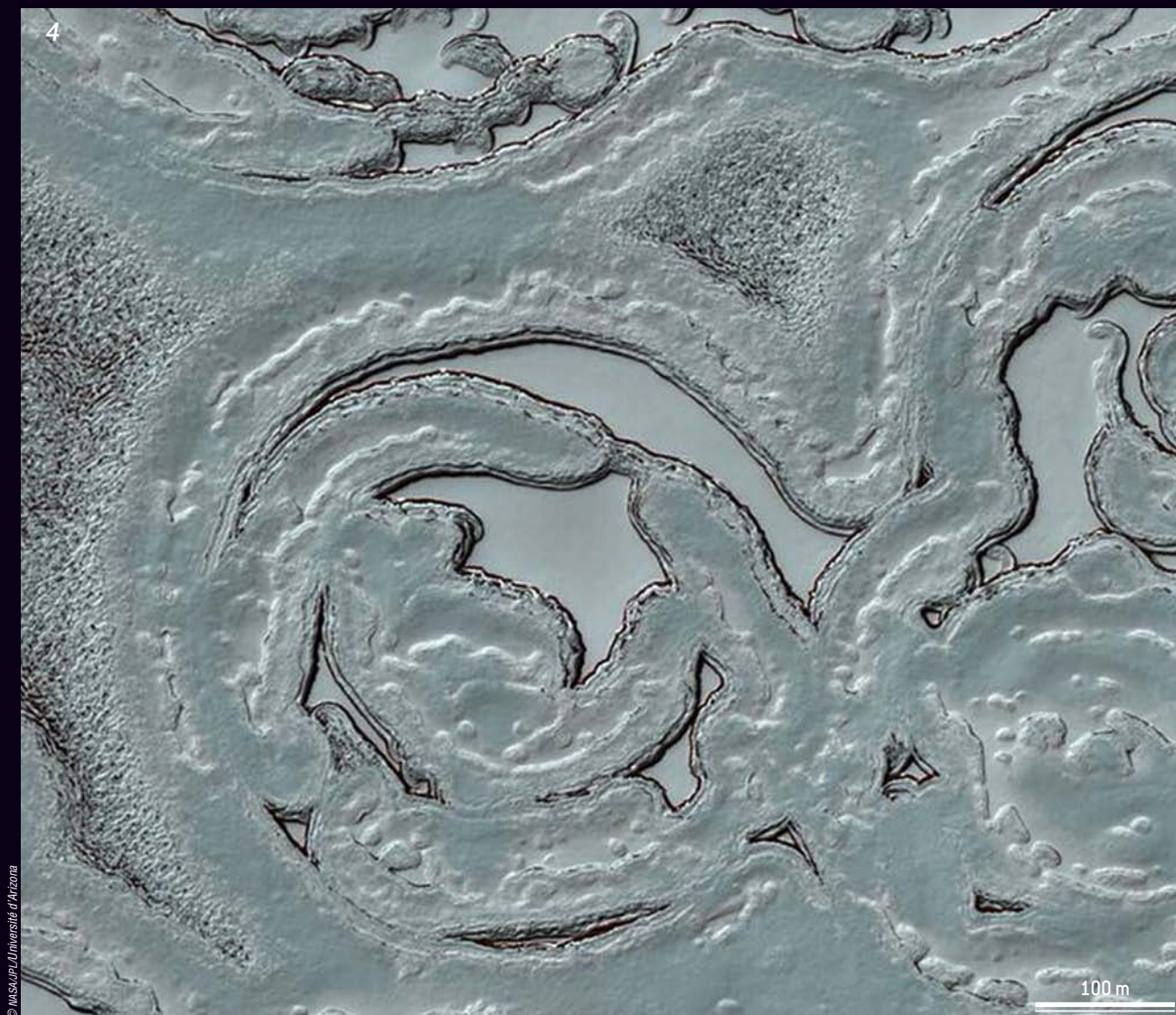
© NASA/JPL/MAIN SPACE SCIENCE SYSTEMS



© NASA/JPL/UNIVERSITÉ D'ARIZONA



Différents phénomènes sculptent la surface de Mars. L'érosion des empilements sédimentaires d'Arabia Terra (1) montrent qu'ils forment des «millefeuilles sédimentaires». Les alvéoles (2) sont des dunes polygonales, accumulées sur le fond d'un cratère. Des vents provenant de plusieurs directions ont formé ces polygones de quelques centaines de mètres de « diamètre ». La coulée de lave (3) provient du volcan Arsia Mons et recouvre les plaines de Daedalia Planum situées à quelque 600 kilomètres au Sud-Est du volcan.



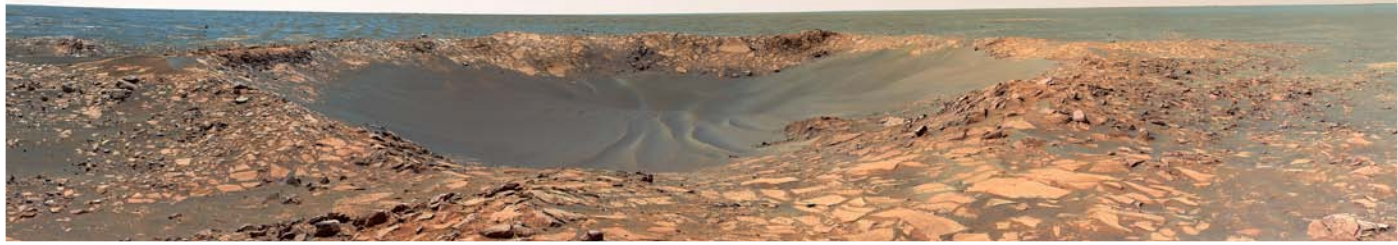
© NASA/JPL/Université d'Arizona



© NASA/JPL/Malin Space Science Systems/L. Fehnaut

Les « gruyères » martiens (4), nommés «swiss cheese» par la NASA, sont visibles en été, lorsque la glace de dioxyde de carbone qui recouvre la calotte polaire Sud commence à se sublimer. Des dépressions se creusent jusqu'à atteindre une couche plus résistante située dix mètres plus bas et qui contient de la glace d'eau. Cette couche crée un fond plat. Le phénomène de sublimation se propage alors latéralement, creusant des chenaux, ici photographiés par la caméra HiRISE. Les réseaux de rides (image de la caméra CTX sur la sonde MRO, 5) à la surface des terrains sédimentaires de Terra Meridiani ont, quant à eux, été formés par l'action de l'eau liquide. Ils pourraient correspondre à des paysages « karstiques », témoins d'un réseau hydrologique plus ou moins superficiel ou souterrain (maintenant effondré) développé dans des roches solubles contenant des sulfates.

1

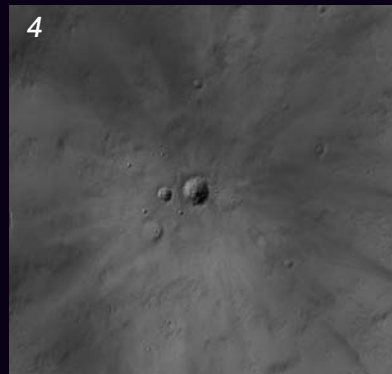


Les cratères Beagle (1) et Santa Maria (2) ont seulement quelques dizaines de millions d'années et sont peu dégradés par l'érosion. Les images d'*Opportunity* montrent qu'ils sont remplis de dunes et de sable transporté par le vent. Les cratères (3 à 8) photographiés en 2011 sont encore plus jeunes. La sonde MRO montre que leurs éjectas n'ont pas encore été recouverts de sable. Ces cratères, entre 10 et 50 mètres de diamètre, ont moins de six ans. Ils n'existaient pas en 2005 lorsque la sonde a survolé ces secteurs une première fois.

3



4



5



10



9



© NASA/JPL/Corbis

Les cratères d'impact qui percent Meridiani Planum constituent des « fenêtres » ouvertes dans le sous-sol de Mars. Les bords de ces cratères (Endurance, 9, et Victoria, 10) mettent au jour les roches. Ils nous racontent l'histoire géologique ancienne de Meridiani Planum : une succession de couches sédimentaires, parfois déposées par les vents (en bas des falaises), parfois déposées dans des mares peu profondes (en haut des falaises). Il y a 3,5 milliards d'années, Meridiani Planum était un vaste champ de dunes qui a été recouvert d'eau.



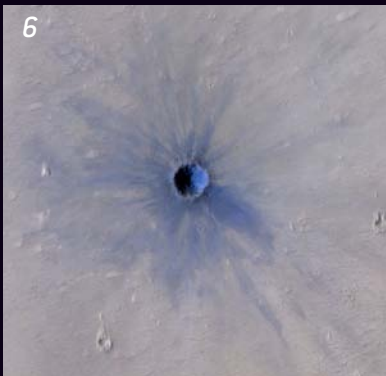
2



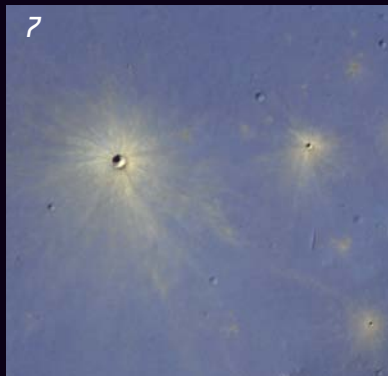
© NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASI (à droite)/UMI (à gauche)



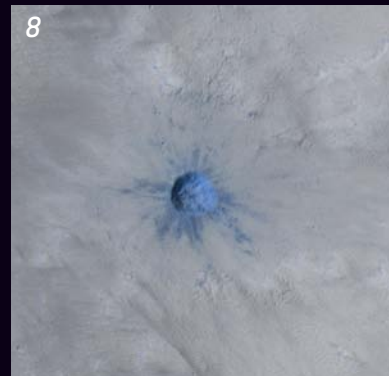
6



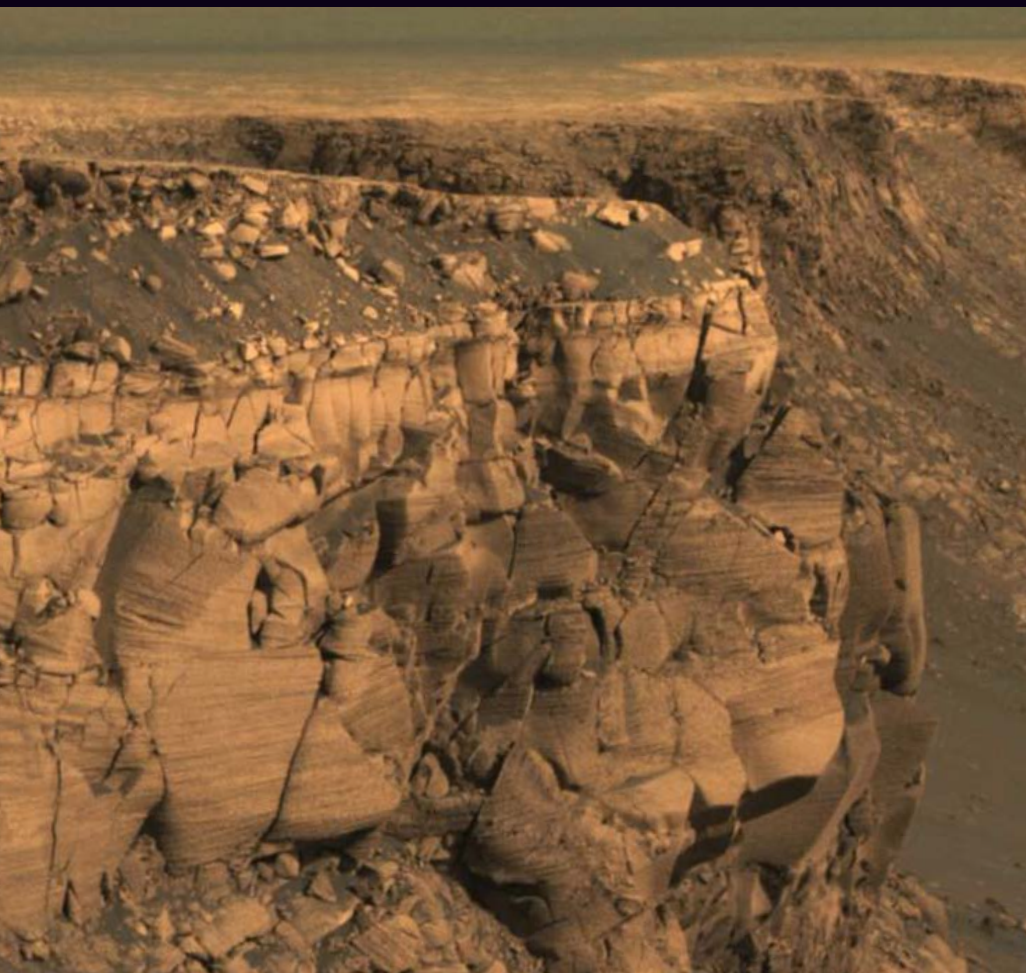
7



8

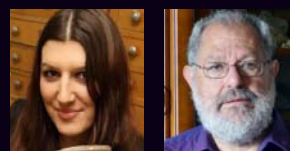


© NASA/JPL Université d'Arizona



© NASA/JPL/Cornell

■ LES AUTEURS



Jessica FLAHAUT est postdoctorante à la Faculté des sciences de la Terre et du vivant de l'Université libre d'Amsterdam.

Pierre THOMAS est géologue au Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE) et professeur à l'École normale supérieure de Lyon. Il est le responsable scientifique d'un site traitant de l'actualité scientifique et géologique sur Mars.

<http://planetterre.ens-lyon.fr/planetterre/ressources/dossiers-thematiques/nouvelles-mars>

Par-delà l'horizon

À ses débuts, la théorie quantique a semblé imposer des limites à la science et aux techniques.

L'exemple du calcul quantique montre qu'au contraire, de nouveaux horizons s'ouvrent.

Au XIX^e siècle, quelqu'un, probablement Camille Flammarion, a représenté la quête de la connaissance par une gravure. Agenouillé dans un paysage terrestre stylisé, un voyageur passe la tête à travers le firmament, là où ciel et terre se rencontrent, et contemple l'inconnu (*voir la figure page 53*). Un temps réputée issue de la Renaissance, la « gravure sur bois de Flammarion » invite à deux interprétations diamétralement opposées de ce qu'est la connaissance.

Selon la première, elle n'est limitée que par une barrière imaginaire que l'activité scientifique finit toujours par franchir ; selon la seconde, la connaissance est limitée par une barrière véritable que l'on ne peut franchir que par l'imagination. Dans cette dernière vision, nous serions donc enfermés à l'intérieur de la bulle finie de ce qui nous est familier. Nous ne pouvons

donc espérer comprendre que le monde de notre expérience directe, tandis que ce qui se trouve à l'extérieur de la barrière reste inaccessible à la compréhension et à l'explication. L'activité scientifique ne fait-elle que nous dévoiler l'impossibilité de dépasser notre horizon habituel, ou transcende-t-elle la bulle du familier pour révéler des horizons nouveaux ? Nous allons voir que, dans le domaine du calcul, elle nous a amenés à franchir la barrière infranchissable que semblait constituer l'horizon quantique derrière lequel se trouve le monde microscopique.

Pour beaucoup, la théorie quantique montrerait clairement que c'est la seconde vision – la vision pessimiste de la connaissance – qui s'impose. Les théoriciens ont très tôt enseigné à son propos une irrationalité délibérée : « Si vous pensez que vous comprenez la théorie quantique, c'est que vous

ne la comprenez pas. » « Vous n'avez pas le droit de poser cette question. » « La théorie est insondable, et donc le monde aussi. » « Les choses sont comme cela, sans raison ni explication. » Voilà le genre de phrases qu'on lisait dans les manuels de physique quantique et les textes de vulgarisation...

Pour autant, les avancées des dernières décennies contredisent ces allégations. Depuis que la théorie quantique existe, les physiciens ont souvent pensé que des obstacles en découlent, qui empêchent d'exploiter la nature quantique aussi facilement que la physique classique (non quantique) nous a habitués à le faire. Toutefois, aucun de ces obstacles ne s'est jamais concrétisé. Au contraire, la théorie quantique s'est révélée libératrice. Loin d'être limitantes, les propriétés fondamentalement quantiques telles que la superposition des états, leur intrication, la quantification et l'aléatoire se sont montrées d'une grande fécondité. Grâce à elles, toutes sortes de dispositifs aux effets presque miraculeux, tels les lasers, les circuits intégrés, les horloges atomiques, etc., ont été mis au point.

Et ce n'est que le début. Nous allons exploiter de plus en plus les phénomènes quantiques au sein de systèmes de communications et de calcul d'une puissance