

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.

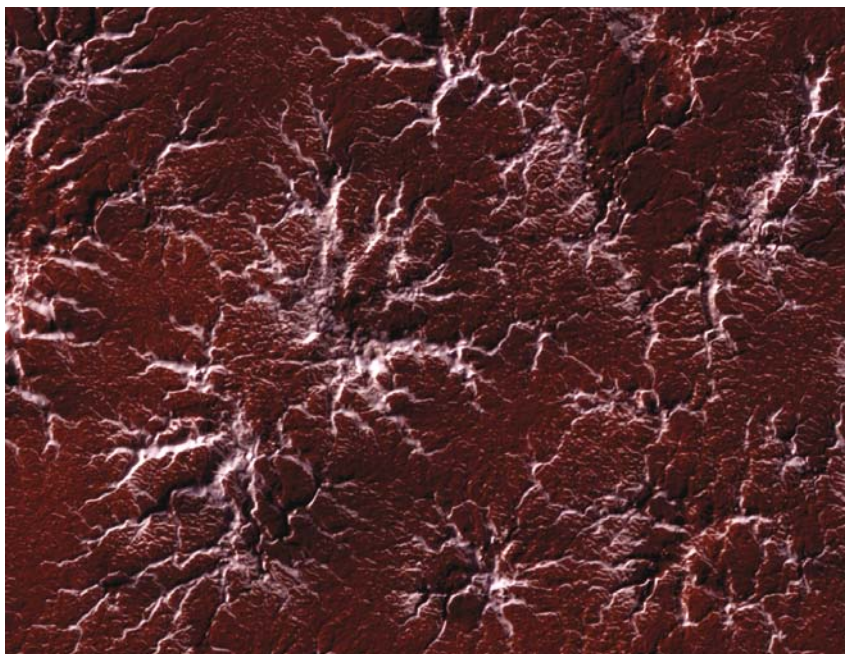
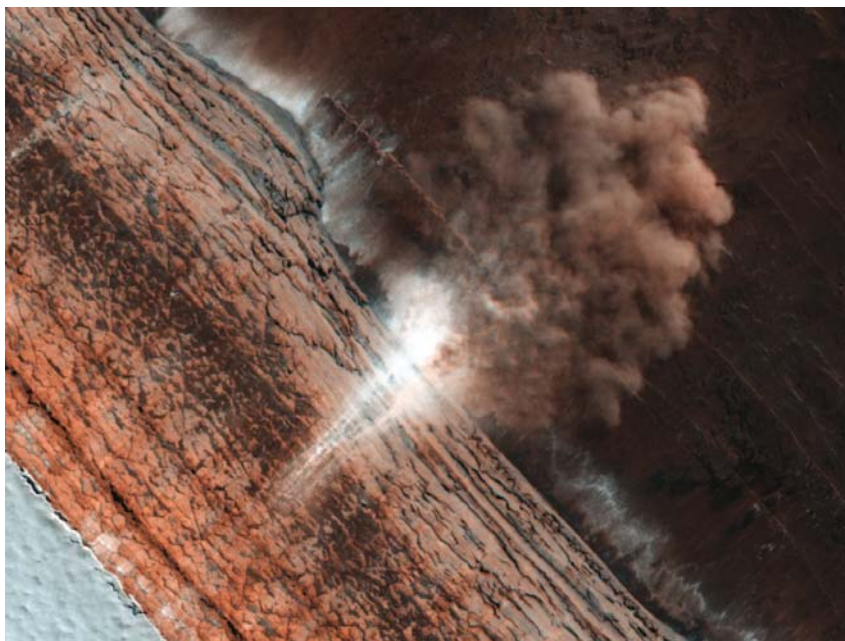
HiRISE a très vite commencé sa campagne de cartographie de la surface. Une des premières images, prise dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Sud, montrait une pente avec les mystérieuses ravines découvertes par la mission *Mars Global Surveyor*. À cause de la saison d'hiver austral, une grande 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,