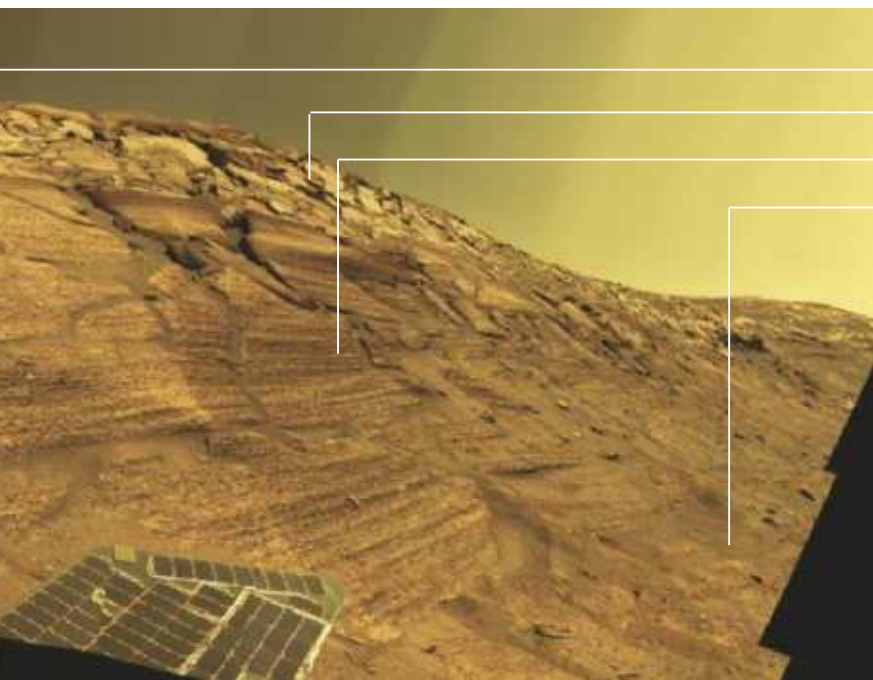




Sédiments riches en sulfates déposés par l'eau

Sable laminé d'origine éolienne

Sable éolien déposé en couches rugueuses

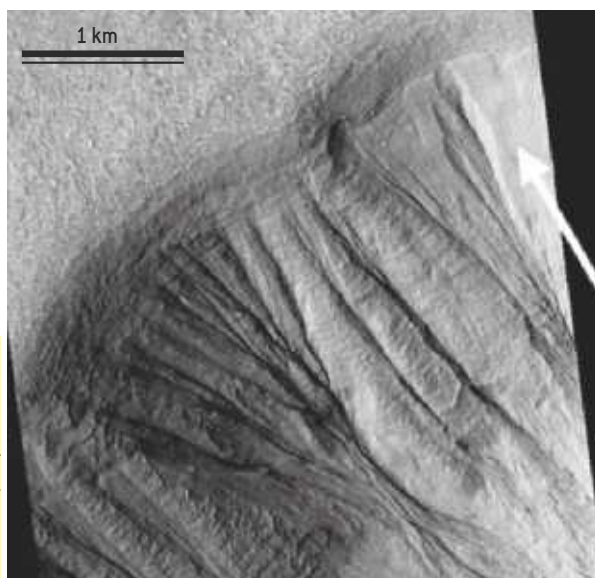
Sable en vrac

2. Burns Cliff est un affleurement rocheux intensivement exploré par le robot *Opportunity*. Cette falaise, haute comme trois étages, forme une partie du bord du cratère *Endurance*, situé à 700 mètres du lieu où s'est posé le robot. Les couches supérieures, comme celles du site d'atterrissage, sont riches en sels de sulfate (en rouge et jaune sur le cartouche en fausses couleurs) et ont probablement été déposées lors des inondations et assèchements successifs de la région. En dessous se trouvent de fines couches rugueuses, composées d'un mélange d'hématite, un minéral lié à l'eau, et de basaltes incompatibles avec l'eau. Il s'agit sans doute d'anciennes dunes de sable restées sèches la plupart du temps, mais situées près d'un grand bassin aqueux. Le fond du cratère est couvert de sable basaltique (en bleu).

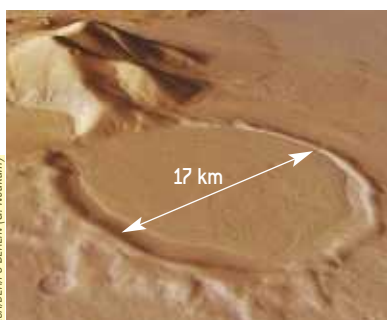
Pour répondre à ces questions, les scientifiques se sont replongés dans les données orbitales de *Mars Global Surveyor*.

Depuis huit ans, le spectromètre TES de cet orbiteur scrute les roches et les sables martiens. Il a révélé qu'ils sont constitués presque exclusivement de minéraux volcaniques tels le feldspath, le pyroxène et l'olivine, à savoir les composants du basalte. Au printemps de 2004, l'orbiteur *Mars Express* de l'Agence spatiale européenne, avec son spectromètre OMEGA fonctionnant dans l'infrarouge proche, s'est joint aux efforts et a confirmé la présence massive de ces minéraux. On trouve de l'olivine jusqu'à 4,5 kilomètres sous la surface dans les parois des canyons de *Valles Marineris*, et elle est présente dans toutes les plaines équatoriales, y compris au fond des canaux. La découverte de basalte, roche qui recouvre en grande partie la surface de la Terre et de la Lune, n'a pas été une grande surprise (sur Terre, la lave basaltique, primitive, s'est formée lors de la première fusion du manteau de la planète et continue de jaillir des failles océaniques, créant les fonds marins).

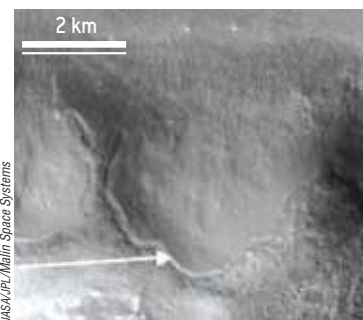
Plus surprenant : alors que les roches des terrains anciens et couverts de cratères sont basaltiques, les roches plus jeunes des plaines du Nord ressemblent à un type de lave plus évolué, l'andésite : elles contiennent davantage de verre et de minéraux riches en silice, mais moins de minéraux ferreux. Sur Terre, l'andésite se forme lorsque les plaques tectoniques mélangent, en plongeant, de l'eau à des roches souterraines fondues. La présence possible d'andésite sur Mars est intrigante. Elle indique peut-être que le manteau martien est plus riche en eau que le manteau terrestre, ou que la lave plus jeune a fondu à des températures, ou pressions, différentes de celles du vieux basalte. Certains scientifiques avancent que les supposées andésites sont en fait du basalte déguisé : un brouillard d'eau ou d'acide aurait réagi avec le minéral pour donner à sa surface une apparence d'andésite. Les planétologues devront attendre des études au sol détaillées de ces roches pour répondre à cette question.



NASA/JPL/Malin Space Systems/P. Christensen



ESA/OLFPU BERRINI (G. Neukum)



NASA/JPL/Malin Space Systems

3. L'orbiteur *Mars Odyssey* a détecté des dépôts de neige sur les versants froids des montagnes (flèche blanche en haut et en bas à droite). Cette neige est peut-être à l'origine de l'eau qui a récemment creusé des ravins (en haut). Si des micro-organismes vivent sur Mars, ces névés sont le lieu idéal pour les chercher. La sonde *Mars Express* a pour sa part observé les traces de glaciers récents qui se sont écoulés dans un cratère (à gauche).

Portrait *Express* de Mars

En 2003 étaient lancées trois missions vers Mars : la mission européenne *Mars-Express* et les deux robots de la NASA *Spirit* et *Opportunity*. Philip Christensen replace les résultats des deux robots américains dans le contexte géologique global dévoilé grâce aux instruments de télédétection placés sur trois satellites en orbite autour de Mars, dont la caméra hyperspectrale infrarouge OMEGA embarquée sur *Mars-Express*. La complémentarité entre les observations effectuées de l'espace et les mesures *in situ* est démontrée dans cet article, mais ne rend que partiellement compte des résultats obtenus par la sonde européenne.

La caméra OMEGA a révolutionné notre connaissance de la minéralogie de surface de la planète Mars, en cartographiant les minéraux silicatés caractéristiques de roches volcaniques (pyroxènes et olivine), en caractérisant les sulfates, témoins d'un environnement aqueux révolu, mais aussi en révélant l'absence de carbonates à la surface de la planète rouge et celle de minéraux hydratés dans les plaines de l'hémisphère Nord. C'est encore grâce à OMEGA que l'on a caractérisé l'étendue des glaces d'eau et de dioxyde de carbone aux pôles et posé des contraintes sur leur cycle de variation en fonction des saisons. La caméra HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) toujours à bord de *Mars-Express* a permis d'affiner l'échelle de temps géologique par comptage de cratères, outil indispensable pour dater les événements géologiques et par exemple noter l'extrême jeunesse (au sens géologique du terme) de coulées volcaniques décrites dans l'article. Cette caméra, grâce à sa vision stéréoscopique, étudie le relief et la morphologie des terrains avec une résolution de deux mètres, ce qui a conduit en particulier à mettre en évidence des coulées de glaciers récentes. Enfin, la deuxième antenne du radar MARSIS devait être déployée durant la troisième semaine du mois de juin 2005. Ses mesures devraient révéler le contenu en glace et en eau du sous-sol martien jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres, complétant ainsi les mesures de neutrons obtenues par la sonde *Mars-Odyssey*, qui ne concernent la présence d'hydrogène (supposé contenu dans l'eau) que dans le premier mètre du sol martien. Le spectromètre SPI-CAM de *Mars-Express*, enfin, vient de détecter pour la première fois sur Mars l'équivalent d'une aurore polaire, ce qui est surprenant, car Mars est dépourvue de champ magnétique global. Cette aurore est localisée à une altitude de 130 kilomètres au-dessus d'une zone de champ magnétique fossile déjà mise en évidence par la sonde américaine *Mars Global Surveyor*. MARSIS étudiera plus en détail ces phénomènes d'ionisation de l'atmosphère martienne.

Philip Christensen insiste avec raison sur la nécessité de comprendre la planète Mars comme un système global où les différentes enveloppes interagissent. On ne peut comprendre le climat martien et le cycle de l'eau sans préciser son évolution orbitale, son activité volcanique et son histoire magnétique. Les récentes découvertes de la mission *Mars-Express* et des robots *Spirit* et *Opportunity* montrent l'importance d'une meilleure connaissance de la structure interne de cette planète, qui reste encore mystérieuse. Les techniques qui permettront de répondre à ces questions sont développées en Europe, où existe un véritable savoir-faire qui n'attend qu'une opportunité de programmation pour se concrétiser.

Christophe SOTIN,

professeur de géophysique à l'Université de Nantes.

Le spectromètre TES a une assez faible résolution : un pixel correspond à une étendue de plusieurs kilomètres. De fait, l'immense variété de la minéralogie martienne n'est devenue apparente qu'en 2001, lorsque THEMIS, une caméra infrarouge portée par une autre sonde de la NASA, *Mars Odyssey*, a commencé à cartographier la planète avec une résolution de 100 mètres. THEMIS et OMEGA ont dévoilé une diversité des roches ignées – provenant du manteau – qui rivalise avec celle de la Terre.

Une faible activité tectonique

Non loin de l'équateur martien se dresse un volcan de 1100 kilomètres de diamètre nommé *Syrtis Major*. Son sommet présente une série de cratères effondrés, ou *caldeiras*. La majeure partie du volcan est basaltique, mais ses flancs sont constellés de cônes et d'écoulements de laves vitreuses riches en silice, nommées dacites. Ce type de roche provient des chambres magmatiques des volcans. Quand le magma refroidit, l'olivine et le pyroxène, riches en fer et en magnésium, cristallisent les premiers et se déposent au fond de la chambre. Le reste du magma, enrichi en silice et en aluminium, fournit les dacites. Les pics centraux de plusieurs cratères situés sur les flancs de *Syrtis Major* sont constitués de roches encore plus riches en silicates, les granites, qui se sont peut-être formées par une refonte à grande échelle de basaltes.

Les planétologues en concluent que ce volcan est passé par de nombreux stades de développement. La lave basaltique a d'abord été éjectée à partir du centre pour former le volcan. À mesure de son évolution chimique, le magma s'est retiré du haut de la chambre, ce qui a entraîné un effondrement du sommet et alimenté des éruptions sur les flancs. Les volcans martiens sont non seulement gigantesques, ils sont aussi étonnamment complexes.

Ce que l'on ne trouve pas sur Mars est aussi intéressant que ce qu'on y trouve. Le quartz, commun sur Terre, est extrêmement rare sur Mars. Cela suggère que le granite, dont il provient, y est rare. Il n'y a pas non plus de traces de minéraux métamorphiques tels l'ardoise ou le marbre, produits quand des roches volcaniques ou sédimentaires subissent des pressions ou des températures élevées. Cela implique que l'activité tectonique martienne est trop faible pour entraîner les roches en profondeur dans le manteau, où elles seraient chauffées et comprimées, puis pour les faire remonter.

La Terre regorge de vastes dépôts de roches carbonées tel le calcaire, qui s'est formé à partir des océans chauds et riches en dioxyde de carbone. Si Mars a été jadis plus chaude et plus humide, elle devrait posséder d'épaisses couches de carbonates. Aucune n'a cependant été découverte. Cela signifie que tout océan passé était froid, éphémère, couvert de glace ou encore hostile aux carbonates. La poussière martienne, omniprésente, contient certes de petites quantités de carbonates, mais ceux-ci se sont sans doute formés par interaction directe avec la vapeur d'eau atmosphérique plutôt qu'au contact de l'eau liquide à la surface. Les argiles, une autre classe de minéraux liés à la présence d'eau, sont également rares sur Mars. Tous ces indices s'accordent avec la présence généralisée de minéraux qui sont dégradés par l'eau, tels l'olivine ou le pyroxène, pour dresser le portrait d'une planète majoritairement sèche.