

## Portrait *Express* de Mars

**E**n 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.

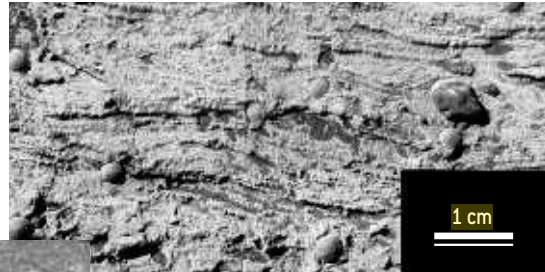
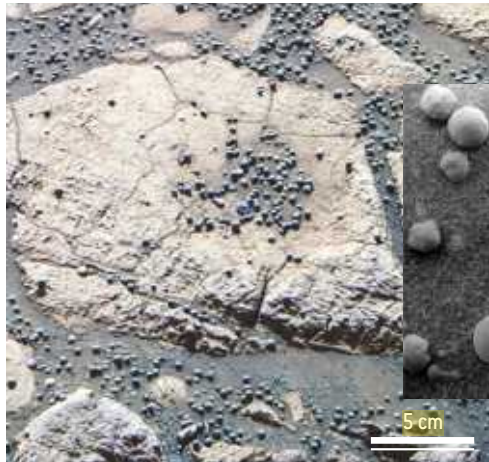
Les planétologues en concluent que ce volcan est passé par de nombreux stades de développement. La lave basaltique a d'abord été éjectée à partir du centre pour former le volcan. À mesure de son évolution chimique, le magma s'est retiré du haut de la chambre, ce qui a entraîné un effondrement du sommet 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.

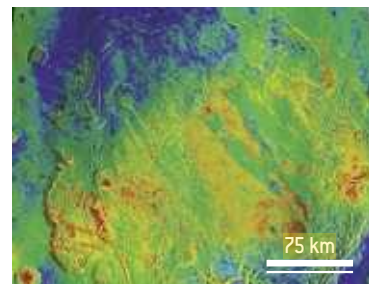
Le site où s'est posé *Opportunity*, le cratère de l'Aigle, présente des concentrations variables d'hématite, un minéral lié à l'eau (ci-dessus, concentration faible en bleu à élevée en rouge). Les marques bleues au premier plan correspondent aux rebonds des coussins d'air protégeant le module à l'atterrissage. Les zones blanches à l'arrière-plan sont des affleurements rocheux, tel *Le Capitaine* (à droite), qui, après examen, se sont révélés être des dépôts de sulfate et d'hématite.

Les « myrtilles » sont des sphérules de la taille d'une baie qui jonchent le site d'atterrissage d'*Opportunity*. L'analyse de celles rassemblées dans ce « bol de myrtilles » (en fausses couleurs) a montré qu'il s'agit d'hématite. Ce minéral s'est probablement déposé par précipitation de l'eau dans les pores des sédiments.



Ces clichés pris par *Opportunity* montrent des globules d'hématite dans le sol (ci-contre) et enchâssés dans une roche composée de couches d'environ un millimètre d'épaisseur (ci-dessus). La courbure des couches atteste probablement de la présence passée d'un écoulement.

*Aram Chaos* est un cratère d'impact également rougi par l'hématite. Les températures nocturnes, mesurées par *Mars Odyssey*, permettent de distinguer la roche, plus chaude (en rouge), du sable et de la poussière plus froids (en bleu). Les roches plates au centre du cratère (en orange) seraient des sédiments lacustres. Le terrain fracturé au Sud trahit un effondrement soudain du sol, peut-être quand l'eau souterraine s'en est échappée.



En ce sens, ce que *Spirit* a observé à Gusev est plus représentatif de Mars que ce qu'*Opportunity* a trouvé sur *Meridiani*. Les plaines de *Meridiani* ne sont cependant pas les seuls endroits où l'on aperçoit des « lacs » sur les clichés pris en orbite. *Aram Chaos*, un cratère de 280 kilomètres de diamètre, présente un canal d'écoulement rempli de roches stratifiées qui contiennent de l'hématite, tandis que de gigantesques blocs de roche jonchent le sol du cratère. Il semble qu'un torrent d'eau souterraine ait été libéré de façon brutale et ait entraîné l'effondrement du terrain sous-jacent. Une partie de l'eau a stagné, ce qui a conduit à la formation de sédiments contenant de l'hématite.

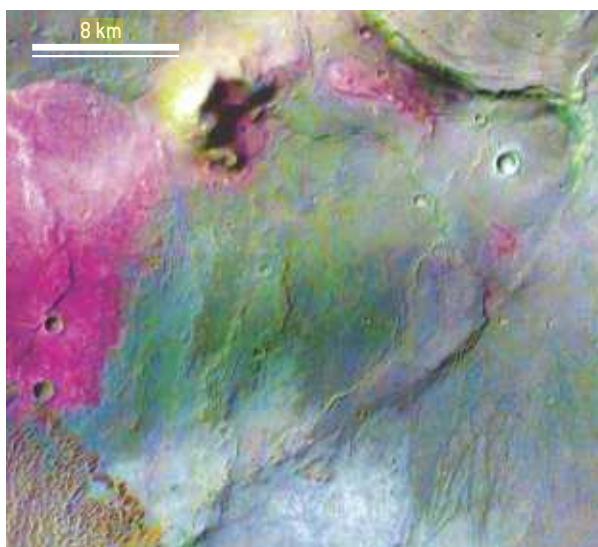
De façon similaire, des dépressions situées dans *Valles Marineris* abritent de fines couches de roches tendres où l'hématite est présente, une configuration compatible avec la présence d'eau stagnante. Ces roches, et d'autres de la région équatoriale, sont riches en sulfates, un indice révé-

lateur de sédiments recouverts d'eau. Ces anciens lacs ont peut-être subi de nombreux épisodes d'inondation, d'évaporation, voire de congélation, et d'assèchement. Outre les anciens fonds de lacs, on a des régions sculptées par des réseaux denses de canaux, apparemment créés par des précipitations ou des écoulements de surface.

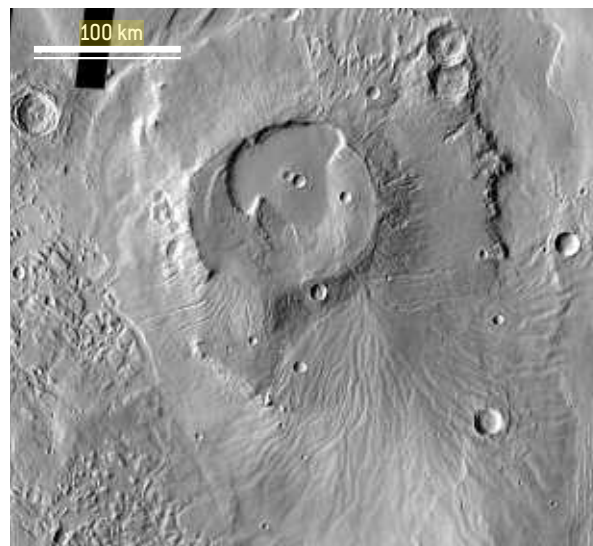
## L'eau a coulé, mais... brièvement et par endroits

Sur la base d'images et de données topographiques qui évoquent des lignes de côte et des fonds océaniques lisses, certains spécialistes affirment même que Mars avait de vastes océans. Mises bout à bout, ces découvertes semblent indiquer que, pendant de brèves périodes, l'eau a été présente de façon stable dans des régions isolées. Pourquoi l'eau





**4. Nili Patera**, au sommet du volcan géant Syrtis Major, est couverte à la fois de laves basaltiques anciennes (en bleu) et de cônes d'éjection de dacite plus récents (en violet). Les dunes de sable (en orange) sont un mélange des deux. La présence de dacite, une lave plus évoluée que le basalte, montre que le volcanisme martien est plus complexe que prévu.



**5. Apollinaris Patera**, un volcan étendu, mais peu actif, a déversé des laves de compositions diverses. Il est peut-être la source des poussières trouvées par le module d'exploration Spirit 350 kilomètres plus au Sud. Les dépôts volcaniques ont été fortement modelés par l'eau. Les sondes spatiales ont repéré plusieurs glissements de terrain dans la région.

s'est-elle accumulée de façon stable dans ces sites ? L'hypothèse la plus répandue fait intervenir une combinaison de chaleur géothermique, de concentrations élevées en sels (qui abaissent le point de congélation) et d'une couche de glace protectrice. Des impacts de grosses météorites ont peut-être sporadiquement réchauffé l'atmosphère.

L'idée d'une planète jadis semblable à la Terre semble néanmoins être derrière nous. L'impression dominante est celle d'une surface ancienne dont les minéraux volcaniques originels ont été préservés de l'eau. Même à *Meridiani*, les sables basaltiques recouvrent les sédiments lacustres, ce qui indique que le site est asséché depuis deux ou trois milliards d'années. Il existe des lacs et des réseaux d'aspect hydrographique, mais il est possible que l'eau n'y ait circulé que brièvement. Elle était peut-être gelée la majeure partie du temps, et occasionnellement libérée avant de regeler rapidement. Cependant, les planétologues restent perplexes à l'idée d'un monde qui puisse être aussi aride en général, mais aussi aqueux à certains endroits et par moments.

Le passé de Mars mobilise l'essentiel de l'attention, mais des avancées récentes ont relancé l'étude de son activité actuelle. Tout d'abord, un consensus émerge sur le fait que Mars a été géologiquement active dans un passé récent. La plupart des grands volcans trônant au milieu des plaines de lave datent des premiers âges de la planète, mais l'absence de cratères d'impact ou d'écoulements de lave dans des régions telles que *Athabasca Vallis* suggère qu'elles sont jeunes et résultent d'éruptions datant de quelques millions d'années. Mais aucun volcan actif ou point chaud géothermique n'a été détecté jusqu'à présent, et Mars semble s'être refroidie au point que le volcanisme y est très rare.

La seconde découverte est qu'un colossal réservoir d'eau gelée migre autour de la planète au gré des changements climatiques. Les deux pôles sont actuellement recouverts de dépôts de glace ou de sédiments riches en glace qui atteint par endroits plusieurs kilomètres d'épaisseur, sur une sur-

face totale équivalente à celle de la France. Des mesures de température datant des années 1970 avaient montré que la calotte du pôle Nord est constituée de glace d'eau, mais la composition de la calotte Sud restait mystérieuse. Sa température de surface est compatible avec l'hypothèse d'une glace de dioxyde de carbone, mais des mesures de température récentes par THEMIS ont mis en évidence des affleurements de glace d'eau, et il est possible qu'il y en ait aussi sous la glace de dioxyde de carbone.

Il convient d'ajouter à cet inventaire la glace souterraine détectée par les instruments de *Mars Odyssey* qui captent les rayons gamma et les neutrons produits lorsque des rayons cosmiques frappent le sol. La répartition en énergie de ces rayons gamma et de ces neutrons nous renseigne sur les éléments chimiques du sol jusqu'à plusieurs mètres de profondeur. Par exemple, l'hydrogène absorbe beaucoup les neutrons, donc un déficit de neutrons indique la présence d'hydrogène sous la surface, le plus vraisemblablement sous forme d'eau (H<sub>2</sub>O).

Dans les hautes latitudes, au-delà du 60° parallèle, l'eau semble par ailleurs constituer plus de 50 pour cent du sol. Une telle abondance de glace ne peut s'expliquer par la simple diffusion de vapeur d'eau atmosphérique dans le sol poreux. La glace doit avoir été déposée sous forme de neige ou de givre.

Aux latitudes intermédiaires, certaines formations trahissent aussi la présence probable de glace. Des sols zébrés sont visibles entre 30 et 50 degrés de latitude dans les deux hémisphères. Cette texture pourrait résulter du réchauffement du sol et de l'évaporation de la glace, processus qui entraînerait un effritement. Dans les dépressions des pentes froides orientées vers les pôles, on trouve un autre type de dépôts : des couches de matériaux atteignant jusqu'à dix mètres d'épaisseur et correspondant peut-être aux résidus de neige d'eau presque pure. Une des découvertes les plus remarquables a été celle de petits ravins fraîchement creusés à des latitudes intermédiaires, résultant peut-être