

La planète Mars : un autre destin

Thérèse Encrenaz (therese.encrenaz@obspm.fr)

LESIA, Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex.

L'exploration de la planète Mars, entreprise par les astronomes dès l'apparition de la lunette de Galilée au début du XVII^e siècle, a vécu un nouvel essor avec l'avènement de l'exploration spatiale au cours des années 1960.

Plus petite et plus froide que la Terre, Mars a sans doute connu au début de son histoire une atmosphère plus dense, plus chaude et plus humide qu'aujourd'hui, susceptible d'abriter l'eau liquide. Puis la planète a vu son activité interne décroître avant la fin du premier milliard d'années, et son atmosphère s'est raréfiée.

Aujourd'hui, Mars est plus que jamais au cœur de l'exploration planétaire ; l'enjeu est de déterminer si la vie a pu apparaître au début de son histoire et si nous pouvons espérer y découvrir un jour des traces de vie fossile.

Mars et la Terre, deux mondes différents

La planète Mars, sœur de la Terre, a depuis toujours, suscité l'intérêt des observateurs. Associée au dieu de la guerre en raison de sa couleur rouge, elle a alimenté, jusqu'au siècle dernier, les rêves des philosophes et des scientifiques autour d'autres mondes habitables. C'est que notre voisine présente de remarquables analogies avec la Terre. Sa surface, couverte de déserts, de volcans, de canyons et de réseaux de vallées desséchées, évoque par endroits à s'y méprendre certains paysages terrestres ; sa période de rotation et son obliquité, proches de celles de la Terre, lui confèrent des effets saisonniers qui rappellent ceux que nous connaissons.

Cependant, les deux planètes présentent aussi deux différences notoires. Tout d'abord, Mars, située à 1,5 unités astronomiques du Soleil, est plus froide que la Terre ; sa température moyenne (fortement modulée par les effets saisonniers) est d'environ 230 K, soit - 43°C. De plus, avec un rayon d'environ la moitié du rayon terrestre, Mars est dix fois moins massive. En conséquence, son champ de gravité et son énergie interne sont bien moindres que sur Terre, limitant à la fois le dégazage interne et l'apport de gaz par les météorites. Ceci explique, mais seulement partiellement, le caractère très ténu de son atmosphère. Composée majoritairement de gaz carbonique, celle-ci affiche une pression moyenne de 6 hectopascals ($\sim 6 \cdot 10^{-3}$ atm) en surface. Du fait de la basse température, une fraction importante (environ 30%) se condense alternativement aux pôles en hiver, en fonction du cycle saisonnier, formant des calottes polaires de neige carbonique (fig. 1). Ces fortes variations de pression induisent à leur tour des vents violents, des tempêtes de poussière et une météorologie très active.

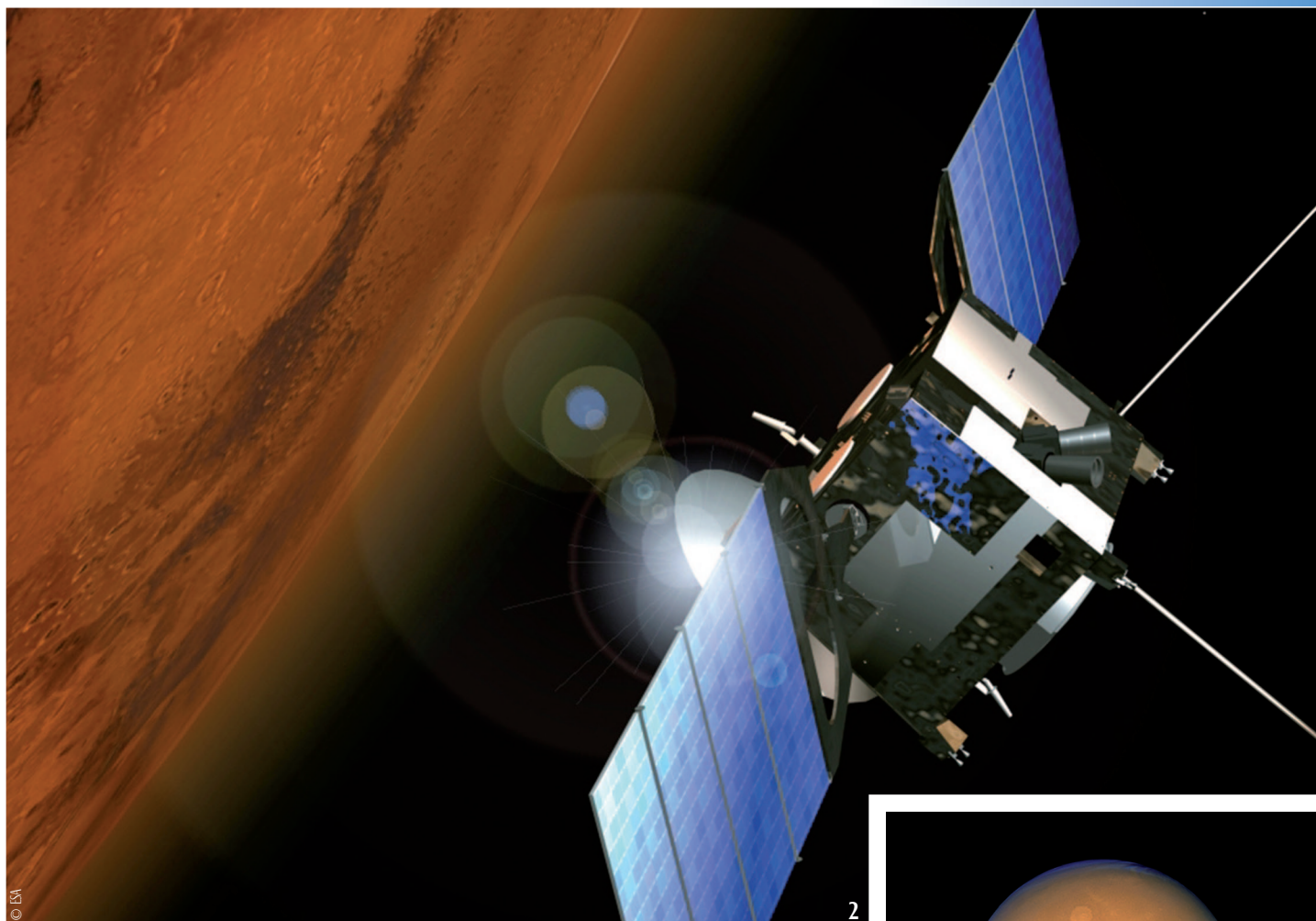
La planète Mars présente, par rapport à la Terre, un intérêt particulier. Sur Terre, la tectonique des plaques a effacé la plupart des indices témoignant des premiers âges de son histoire. Or Mars, du fait de sa plus

faible masse et de son énergie interne réduite, n'a pas connu de tectonique des plaques. Si les plaines du Nord, plus basses, ont été recouvertes de lave suite aux épisodes volcaniques qui ont ponctué son histoire, la planète a conservé, surtout dans l'hémisphère Sud, une surface très ancienne, que l'on peut dater par le comptage des cratères météoritiques qui la recouvrent. Les impacts de météorites ont été particulièrement nombreux, du fait du caractère très ténu de l'atmosphère. On peut ainsi espérer déchiffrer l'histoire de la planète à partir des observations d'aujourd'hui, ce qui s'avère très difficile pour la Terre, dont les fonds marins sont en permanence renouvelés par la tectonique des plaques⁽¹⁾.

L'exploration de Mars : des télescopes aux sondes spatiales

L'observation suivie de Mars date du XVII^e siècle, avec l'apparition de la lunette de Galilée. Huygens et Cassini dessinent les taches du disque martien, mesurent sa période de rotation et découvrent les calottes polaires. Les observations se précisent au siècle suivant, avec l'utilisation des télescopes d'Herschel. En 1877, l'astronome italien Schiaparelli réalise une cartographie des régions martiennes et croit découvrir des traces rectilignes (« canali »), interprétées à tort par certains comme des traces de vie intelligente. Malgré des observations contradictoires, le mythe perdurera jusqu'à l'arrivée des premières sondes spatiales.

L'exploration spatiale de Mars, menée simultanément par les États-Unis et l'Union Soviétique, débute dans les années 1960, en pleine guerre froide. Les échecs sont nombreux de part et d'autre, mais surtout pour l'Union Soviétique qui perd la plupart de ses sondes. La NASA enregistre un premier succès en 1965 avec les premières images du sol martien prises par Mariner 4 ; cette sonde nous apprend aussi que l'atmosphère de Mars, composée essentiellement de gaz carbonique, est



1. La planète Mars, photographiée par la caméra du Télescope Spatial Hubble. L'image a été prise le 27 août 2003, au moment où la planète était la plus proche de la Terre (à 55 757 930 km) en 60 000 ans. Son diamètre apparent était supérieur à 20 secondes d'arc, ce qui correspond à une géométrie particulièrement favorable. Sa surface est principalement recouverte de silicates et d'oxydes de fer. La calotte de neige carbonique est bien visible au pôle Sud.

2. La sonde Mars Express de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Lancée en juin 2003, elle a commencé ses observations en janvier 2004 et reste opérationnelle aujourd'hui. Sa charge instrumentale comporte notamment une caméra à haute résolution, un spectromètre imageur infrarouge (OMEGA) et un spectromètre ultraviolet (SPICAM). Les deux derniers instruments ont été réalisés sous responsabilité française.

extrêmement ténue. À la phase des survols succède celle des mises en orbite, avec les « orbiteurs », puis celle des sondes de descente, d'abord fixes (les «landers»), puis mobiles (les «rovers»). En 1972, nouvelle étape décisive : l'orbiteur Mariner 9 cartographie la planète, dévoile la présence de volcans très élevés et d'un immense canyon, Valles Marineris. En 1976, nouveau succès de la NASA : les deux sondes Viking se mettent en orbite autour de la planète et délivrent deux modules de descente qui analyseront la surface pendant plusieurs années. L'objectif affiché de la mission est la recherche de la vie sur Mars. La réponse est négative, ce qui aura pour effet, pour la NASA, de suspendre l'exploration de Mars pendant une vingtaine d'années... La

mission Viking n'en constitue pas moins un immense succès scientifique et technologique, et la base de données qui en résulte fait encore référence aujourd'hui.

L'exploration, toujours ponctuée d'échecs, prend une nouvelle dimension à la fin des années 1990, avec le succès du premier rover américain Pathfinder et de l'orbiteur Mars Global Surveyor. Celui-ci est suivi de Mars Odyssey puis des rovers Spirit et Opportunity, lancés, toujours par la NASA, en 2003. La même année, l'Europe envoie sa première mission martienne, l'orbiteur Mars Express (fig. 2), qui est toujours en opération autour de Mars. L'exploration se poursuit du côté américain avec Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) et la station Phoenix, déposée au voisinage du pôle.

Il faut mentionner enfin que les observations télescopiques de Mars n'ont pas perdu leur intérêt pour autant, bien au contraire. Grâce aux progrès de l'instrumentation qui équipe des télescopes de plus en plus grands, les observations réalisées, notamment en spectroscopie à haute résolution, apportent un complément précieux aux données spatiales. Bien sûr, il est impossible d'observer depuis le sol et l'orbite terrestre les détails de la surface martienne mis en évidence par les moyens spatiaux. Alors que les images prises par les caméras en orbite martienne atteignent une précision de l'ordre du mètre, celles du télescope Hubble (fig. 1) ou des grands télescopes au sol ont une précision de l'ordre de la vingtaine de kilomètres au mieux.





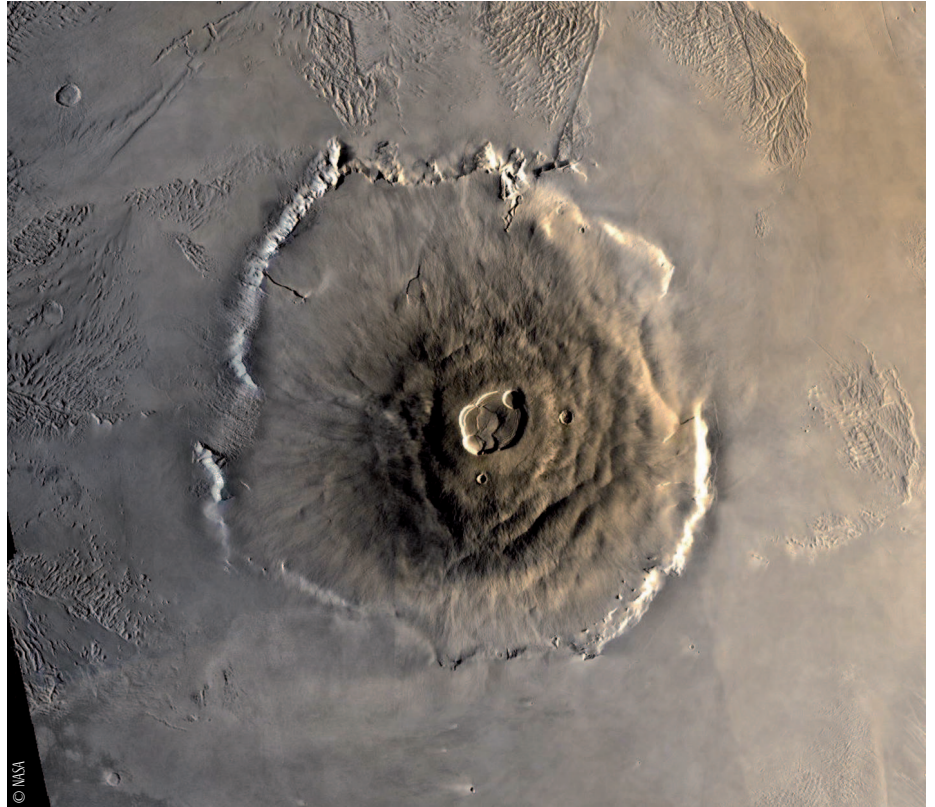
Volcans, canyons et plaines

Grâce aux sondes spatiales, nous avons aujourd'hui une très bonne connaissance de la topographie martienne, de sa géologie, et aussi, depuis Mars Express, de sa minéralogie. La première caractéristique de la surface martienne est ce que l'on appelle la dissymétrie Nord-Sud : l'altitude des plaines du Nord est, en moyenne, inférieure de 5 km à celle des plateaux de l'hémisphère Sud. L'origine de cette dissymétrie est mal comprise : elle pourrait résulter d'une asymétrie des mouvements convectifs du manteau ayant conduit à une différenciation de l'épaisseur de la croûte, dont les mesures indiquent une épaisseur plus grande au sud qu'au nord. Une autre cause possible pourrait être un bombardement météoritique plus violent dans l'hémisphère Nord. Mais dans les deux cas, on ne voit pas l'origine possible de ces différences.

Les volcans de Mars sont spectaculaires. Les plus grands d'entre eux sont situés sur le vaste plateau de Tharsis, de 5000 km de diamètre, à près de 5 km d'altitude à proximité de l'équateur. Le Mont Olympe (fig. 3), qui culmine à près de 27 km, est le plus grand volcan connu dans le système solaire. Cette altitude élevée, par rapport aux volcans terrestres, s'explique par le champ de gravité relativement faible de la planète (soit trois fois plus faible que sur Terre). Comme les autres volcans du plateau de Tharsis, Olympus Mons est un « volcan-bouclier », comparable aux volcans hawaïens. Leur grande superficie, ainsi que leurs pentes très faibles et régulières, témoignent de la nature très fluide de la lave qui les a construits.

Autre surprise du relief martien : l'immense canyon Valles Marineris, long de 3500 km, large de 300 km et profond de 7 km. Cette faille, résultant de l'extension de la croûte lors du bombement du plateau de Tharsis, présente certaines analogies, à bien plus grande échelle, avec le grand rift est-africain.

Enfin, autre découverte majeure des sondes Mariner 9 et Viking : les multiples traces de rivières aujourd'hui asséchées. Certaines, dans les terrains les plus anciens, présentent de véritables réseaux de vallées ramifiées. D'autres, appelées « vallées de débâcle », semblent avoir été formées à la suite d'écoulements violents. Nous verrons que ces reliefs sont des indices précieux qui témoignent, avec d'autres, de la présence d'eau liquide à la surface de Mars dans le passé de la planète.

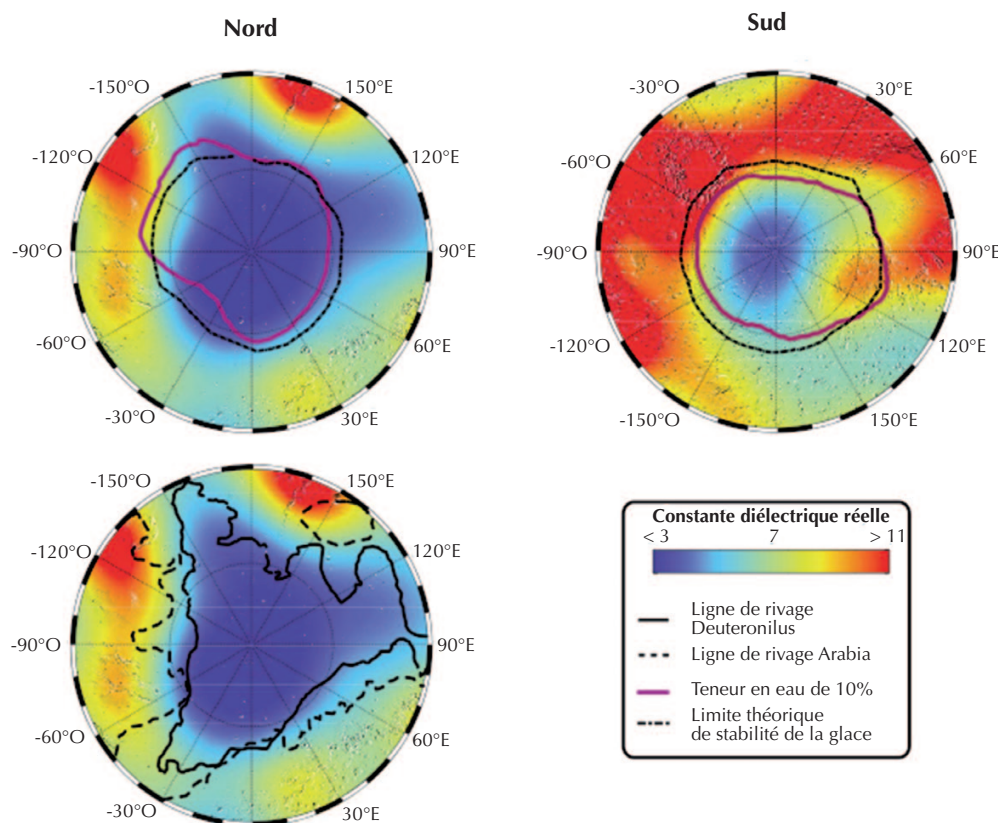


3. Le volcan Olympus Mons (d'un diamètre d'environ 600 km), photographié par la sonde Viking 1.

Grâce aux cartes minéralogiques apportées récemment par les sondes Mars Express puis MRO, nous avons pu préciser l'histoire de l'eau sur la planète Mars. Le spectromètre imageur infrarouge OMEGA embarqué sur Mars Express a en effet détecté par endroits des argiles, mais toujours dans des terrains très anciens ; il a aussi identifié des sulfates à proximité de régions chaotiques et de vallées de débâcle. Ces résultats ont été confirmés par les rovers Spirit et Opportunity. Or, la formation d'argiles nécessite que l'eau ait coulé sur Mars de manière continue et prolongée (sur plusieurs dizaines de milliers d'années, voire plus), tandis que la présence de sulfates pourrait être liée à des écoulements violents, mais plus espacés dans le temps. L'histoire de l'eau liquide sur Mars pourrait donc s'écrire en deux volets : une présence prolongée au tout début de l'histoire de la planète, et plus épisodique ensuite, peut-être liée à des phénomènes volcaniques intermittents.

Revenons à la dissymétrie Nord-Sud de Mars. Les plaines du Nord, aujourd'hui recouvertes de lave, pourraient-elles avoir été dans le passé recouvertes d'un vaste océan boréal ? L'idée a été émise par certains

scientifiques, mais fait encore aujourd'hui l'objet de débats. Un indice fort en faveur de cette hypothèse a été la mise en évidence, par le laser altimètre de l'orbiteur MGS, au niveau de la zone séparant les régions élevées des plaines plus basses, de plateaux d'altitude remarquablement constante sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres, qui pourraient constituer les « lignes de rivage » d'un ancien océan. L'objection majeure à cette hypothèse est l'absence de détection de carbonates dans les plaines du Nord, alors que ceux-ci auraient dû se former par transformation du gaz carbonique, comme sur la Terre. Il est cependant possible que les carbonates soient enfouis sous la lave ou le régolite, fine poussière de silicates apportée par les vents, qui recouvre la surface martienne. Il est possible aussi que l'acidité probable de l'eau, dont semble témoigner la présence de sulfates, ait empêché la formation de carbonates ; le débat reste ouvert. Très récemment, le radar MARSIS de la sonde Mars Express a apporté un nouvel élément au débat, avec la découverte de sédiments riches en glace sous la surface des plaines du Nord. Ces sédiments pourraient être la signature de l'ancien océan boréal longtemps recherché (fig. 4).



4. Carte de la constante diélectrique du sous-sol martien, mesurée par le radar MARSIS de Mars Express dans les régions polaires. L'instrument sonde le sous-sol de Mars à une profondeur de 60 à 80 mètres. Le pôle Nord est au centre des deux figures de la partie gauche, et le pôle Sud est au centre de la figure de droite. Autour du pôle Nord, dans la région centrale en bleu, la constante diélectrique est faible, ce qui indique la présence de glace d'eau ou d'un matériau sédimentaire de faible densité. Cette région coïncide remarquablement avec les tracés des lignes de dichotomie séparant les plaines basses des régions plus élevées, en traits pleins et en pointillés sur la figure du bas. Sur les figures du haut, la ligne rouge correspond à une abondance de H₂O de 10% (mesurée par l'abondance des atomes d'hydrogène présents dans le sous-sol), et la courbe noire correspond à la limite théorique de stabilité de la glace en surface (estimée à partir de l'observation des polygones de surface). La bonne correspondance de ces données est un indice plausible de la signature d'un ancien océan boréal qui aurait recouvert ces plaines il y a trois milliards d'années. (La figure est extraite de J. Mouginot *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012) 102202.)

Nous savons peu de choses de l'intérieur de la planète Mars ; en effet, nous ne disposons pas de réseau de sismomètres à sa surface. Une information nous est cependant fournie par l'analyse de certaines météorites, recueillies sur Terre, qui sont fort probablement d'origine martienne. Cette origine est attestée par la composition des gaz qu'elles contiennent, très similaires à celles mesurées par Viking dans l'atmosphère de Mars. L'analyse de ces météorites, qui proviennent de la croûte martienne, fournit des informations sur l'âge de la formation de la croûte (environ 100 millions d'années après la formation du système solaire), ainsi que sur la taille et la composition du noyau. D'après les spécialistes, ce noyau serait composé majoritairement de fer, avec une forte proportion de soufre et de nickel. La présence de soufre ayant pour effet de baisser la température de solidification de l'alliage Fe-Ni-S, cette mesure pourrait impliquer que le noyau de la planète est encore liquide.

Lancée en 1996, la sonde Mars Odyssey a fait une découverte spectaculaire, alors qu'elle survolait la surface à basse altitude. Alors que la planète est aujourd'hui dénuée de champ magnétique intrinsèque,

la sonde a mis en évidence un champ magnétique rémanent, présent uniquement dans les terrains les plus anciens. Ce champ « fossile » est la preuve que la planète a possédé un champ magnétique propre au tout début de son histoire. Le champ magnétique était alors généré par dynamo au sein d'un milieu fluide en rotation, suffisamment chaud pour être le siège de mouvements convectifs. Compte tenu de la faible masse de la planète, le noyau de Mars a dû se refroidir rapidement (tout en restant peut-être liquide comme nous l'avons vu), avant la fin du premier milliard d'années. Le champ magnétique propre de la planète a disparu, et il ne reste que les vestiges du champ rémanent. Il est intéressant de noter que les champs magnétiques mesurés sur Mars sont environ dix fois plus forts que celui associé à la plus grande anomalie terrestre. Ces valeurs élevées sont sans doute liées au fait que la croûte martienne est relativement proche de la frontière noyau-manteau à l'intérieur de Mars ; elles suggèrent que le champ magnétique propre de Mars, au début de son histoire, a pu être beaucoup plus intense que le champ terrestre.

L'atmosphère de Mars

Comme celle de Vénus, l'atmosphère de Mars est composée à 95% de gaz carbonique, avec quelques pourcents d'azote moléculaire et une petite fraction d'argon. Cette composition, à laquelle s'ajoutait l'eau au début de l'histoire des deux planètes, est sans doute aussi celle que possédait la Terre à son origine. Dans le cas de la Terre, l'eau étant sous forme liquide, le gaz carbonique s'est trouvé piégé au fond des océans sous forme de calcaire, par la réaction $\text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Cette réaction, présente dès le début de l'histoire de la Terre, s'est trouvée ensuite accélérée par la présence d'organismes vivants. Sur Mars et Vénus, l'eau n'est plus présente aujourd'hui qu'en infime quantité ; reconstruire son histoire, sur les deux planètes, est l'un des enjeux de la planétologie d'aujourd'hui. Sur Mars, l'eau condense alternativement en hiver au pôle Nord et au pôle Sud, avec un rapport de la pression partielle à la pression totale qui ne dépasse pas 0,1%. D'autres constituants atmosphériques mineurs sont présents sur Mars. Pour l'oxygène (~ 0,13%) et le monoxyde de carbone (~ 0,07%), tous deux non condensables, ce rapport varie avec les saisons.



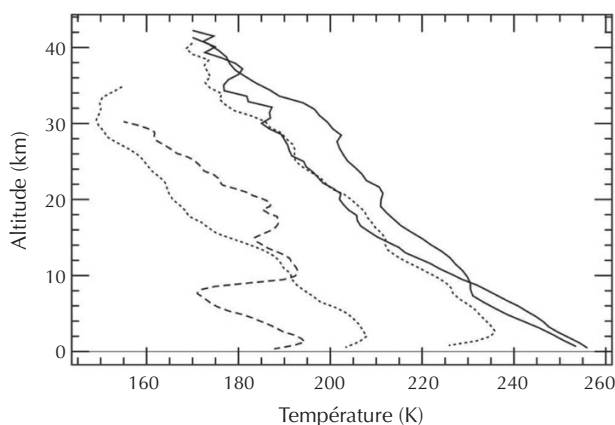


Il en est de même de O_3 et de H_2O_2 dont la présence résulte de la photodissociation de H_2O . La quantité d'ozone présente dans l'atmosphère de Mars (moins de 1 ppm en altitude) est bien moindre que sur la Terre, et pour cause : l'oxygène terrestre provient de l'apparition de la vie. Quant à H_2O_2 , cet oxydant puissant est sans doute à l'origine de l'absence de molécules organiques à la surface de Mars, absence constatée par les modules Viking. C'est aussi lui qui a donné à Mars sa couleur rouge en oxydant les minéraux de sa surface.

Le profil thermique de l'atmosphère martienne, comme ceux de la Terre et de Vénus, est caractérisé par une troposphère convective dans laquelle la température décroît à mesure que l'altitude augmente (fig. 5). Comme dans le cas de Vénus, elle est surmontée d'une mésosphère plus ou moins isotherme ; cette situation est différente de celle de la Terre, où la présence d'ozone induit un réchauffement au niveau de la stratosphère. L'analogie des structures thermiques se retrouve aussi dans la météorologie des trois planètes. La différence de température entre l'équateur et les pôles entraîne la présence de cellules convectives ; à l'équinoxe, l'atmosphère est animée de mouvements ascendants à l'équateur et descendants à haute latitude, tandis qu'une seule cellule apparaît au solstice, avec mouvement ascendant dans l'hémisphère d'été. Du fait de la faible masse de son atmosphère, la planète Mars réagit très rapidement aux variations de l'insolation. Les contrastes de température sont élevés et les vents peuvent atteindre 100 m/s. Ils sont

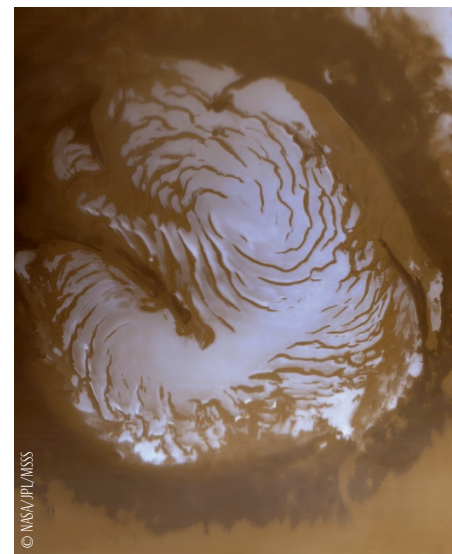
à l'origine des champs de dunes que l'on observe dans les régions de basse altitude, et aussi de spectaculaires tempêtes de poussières qui peuvent recouvrir la planète entière. Celles-ci se produisent principalement lors de l'été austral, lorsque la planète est au plus proche du Soleil ; c'est alors que les contrastes de température sont les plus élevés.

Bien que la vapeur d'eau martienne soit très peu abondante, son étude nous apporte un diagnostic décisif concernant l'histoire de l'eau sur Mars. Ce diagnostic nous est fourni par le rapport d'abondance entre l'eau « lourde » HDO et l'eau « ordinaire » H_2O , dont la valeur mesurée sur Mars est 5 fois supérieure à celle de la Terre. Comment interpréter ce résultat ? Très vraisemblablement, cet enrichissement en deutérium résulte d'un échappement différentiel entre HDO et H_2O (les deux molécules étant sous forme gazeuse), au cours de l'histoire de Mars, HDO (légèrement plus lourde) s'échappant moins facilement que H_2O . Cet enrichissement isotopique ne s'est pas produit dans le cas de la Terre, car l'eau y est toujours restée sous forme liquide⁽²⁾. Dans le cas de Mars, l'enrichissement en deutérium pourrait impliquer, selon les spécialistes, une pression de vapeur d'eau égale à plusieurs centaines d'hectopascals. Voilà encore un indice qui plaide en faveur d'une atmosphère primitive plus dense et plus humide. La présence de vapeur d'eau en abondance aurait favorisé l'effet de serre, augmentant la température, qui aurait alors été compatible avec la présence d'eau liquide à la surface de Mars au début de son histoire.



5. Exemples de profils thermiques de l'atmosphère de Mars dans la troposphère, mesurés par l'expérience de radio-occultation de la sonde Mars Global Surveyor. Traits pleins : deux profils mesurés à moyennes latitudes, été austral, fin d'après-midi. Pointillés : mêmes conditions, profils de nuit. Le profil à forte oscillation (ligne en tirets) a été obtenu au-dessus de Tharsis ; ces ondes de grande amplitude sont sans doute provoquées par la présence de nuages de glace d'eau. La limite entre la troposphère et la mésosphère se situe à une altitude d'environ 50 km ; au-dessus de ce niveau, le profil thermique est plus ou moins isotherme. (Figure extraite du chapitre "Thermal structure and Composition" par M. D. Smith et al., dans *Mars atmosphere*, R. Haberle et al., editors, Cambridge University Press (2012), sous presse.)

Les évolutions du climat martien



6. La calotte polaire Nord de Mars en été, photographiée en 1999 par la caméra à haute résolution MOC de la sonde Mars Global Surveyor. Les sédiments accumulés autour du pôle Nord sont creusés de sillons en spirales. Les structures alternées sont sans doute le résultat de variations climatiques globales liées aux fluctuations périodiques orbitales de la planète. L'étendue de la calotte polaire Nord est d'environ 1100 km.

Revenons au passé récent de Mars. Nous en possédons un nouveau diagnostic, avec la morphologie des sédiments polaires. Ceux-ci présentent en effet, au nord comme au sud, une série de stries, alternativement claires et sombres (fig. 6). Quelle peut en être l'origine ? Selon l'interprétation la plus plausible actuellement en vigueur, ces stries sont la signature de variations périodiques du climat associées à des variations de l'obliquité de la planète. Des simulations numériques récentes, menées en particulier au Bureau des Longitudes à Paris, ont mis en évidence une oscillation périodique de l'obliquité (c'est-à-dire l'angle que fait l'axe de rotation planétaire avec la normale à l'écliptique), celle-ci pouvant atteindre 60° . Dans ces conditions, les modèles climatiques montrent que la glace se déplace vers les basses latitudes pour former des glaciers ; des traces en ont été trouvées au pied des volcans de Tharsis, en particulier. Selon ce modèle, les stries des sédiments polaires traceraient les évolutions de l'obliquité depuis la dernière période d'obliquité maximale, il y a quelque 20 millions d'années. Elles contiendraient ainsi les archives des quelques derniers millions d'années...

L'histoire de Mars : une ébauche de scénario

À partir de ce que nous avons appris de la planète actuelle, essayons de retracer ce qu'a pu être son histoire. Au départ, un scénario de formation analogue à celui de la Terre et de Vénus : une formation à partir de particules relativement denses, au sein du disque protoplanétaire. Une différence notable : Mars est deux fois plus petite et dix fois moins massive que ses deux voisines. Selon une simulation dynamique récemment développée à l'Observatoire de Nice, la croissance de Mars aurait pu être stoppée par la proximité de Jupiter, qui aurait migré vers l'intérieur du système solaire avant de repartir sous l'influence de Saturne. À l'origine, les atmosphères des trois planètes ont dû avoir la même composition globale : du gaz carbonique, un peu d'azote et une certaine quantité d'eau. Cette eau est restée présente sur la Terre, car la température était compatible avec la formation d'océans.

De nombreux indices plaident en faveur d'une atmosphère primitive martienne plus dense et plus humide qu'aujourd'hui. Nous les avons cités plus haut : les reliefs des vallées desséchées, la présence d'argiles, l'enrichissement en deutérium... Comment et pourquoi l'atmosphère primitive a-t-elle disparu ? Une cause possible pourrait être un impact géant ou de multiples chutes météoritiques : on sait que la planète, comme tous les corps du système solaire, a connu un bombarde-

ment intense il y a 3,8 milliards d'années. Une autre cause possible est l'échappement atmosphérique, suite à l'extinction de la dynamo et à la disparition du champ magnétique ; la magnétosphère protège en effet l'atmosphère de l'effet du vent solaire et s'oppose à son échappement. Une troisième cause possible pourrait être le piégeage du gaz carbonique dans la surface au contact de l'eau liquide, selon un processus comparable à celui de la formation des calcaires terrestres. Dans ce cas, la surface devrait posséder une quantité importante de carbonates. De telles quantités, nous l'avons vu, n'ont cependant pas été détectées. Quant à l'eau, elle a pu s'échapper partiellement, mais une fraction est restée piégée dans le sous-sol martien ; on la retrouve sous la forme de pergélisol, particulièrement abondant à haute latitude. Il resterait cependant à évaluer la quantité globale d'eau présente aujourd'hui en sous-sol.

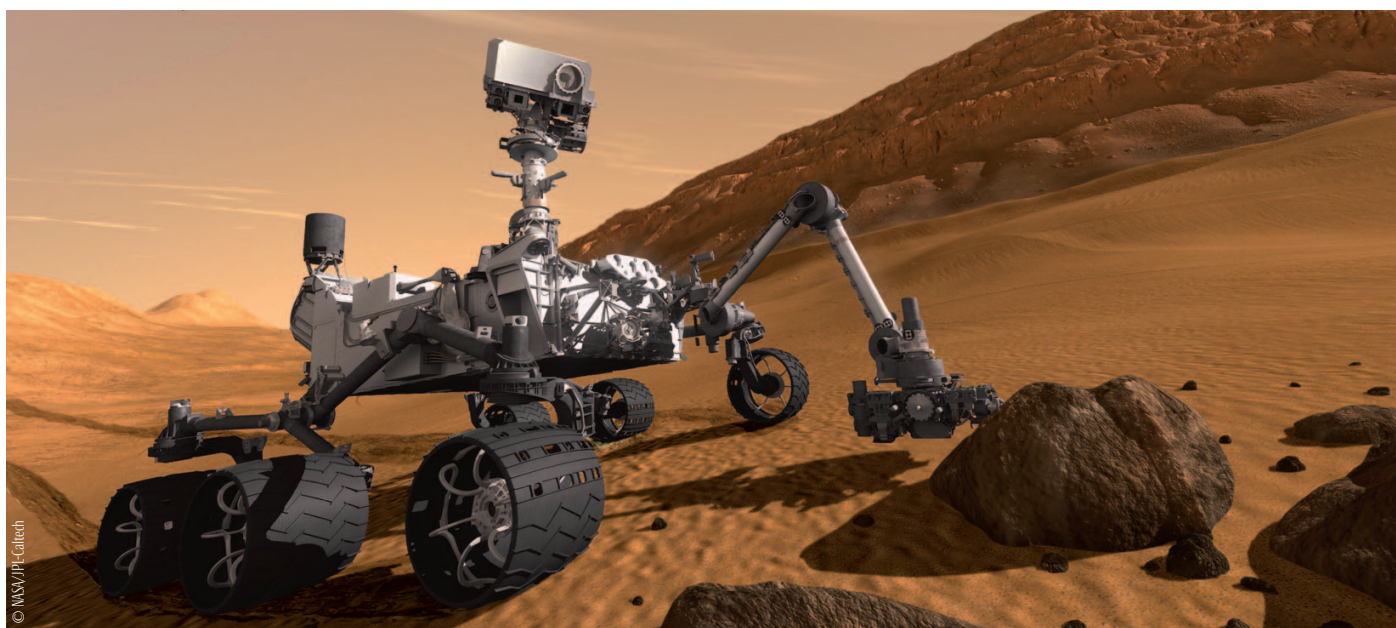
Après la période chaude et humide et le bombardement massif, la planète a connu une période de volcanisme et d'activité tectonique intenses et épisodiques, marquée en particulier par la formation du bouclier de Tharsis, du canyon Valles Marineris, des terrains chaotiques et des vallées de débâcle. Au cours de cette longue période, qui court de - 3,8 milliards d'années à il y a quelque cent millions d'années, l'eau liquide a pu couler épisodiquement à la surface de la planète, à l'occasion de phénomènes volcaniques ou tectoniques violents et intermittents. Dans un passé plus récent, le climat

martien a été modulé au gré de l'évolution périodique de l'obliquité de la planète, faisant migrer la glace d'eau alternativement de l'équateur aux pôles.

Le futur de l'exploration de Mars

Quels sont les grands enjeux de l'exploration future de Mars ? La question qui passionne la communauté scientifique et, bien au-delà, le grand public, est la recherche d'une vie, passée ou présente. C'était déjà l'objectif de la mission Viking dans les années 1970, mais la quête s'est révélée négative, la recherche s'étant limitée à la surface de Mars. Nous savons aujourd'hui que le rayonnement UV solaire, pénétrant jusqu'à la surface de Mars, aurait pour effet de détruire toute molécule organique. Le sol de Mars est, de plus, oxydé en profondeur, du fait de la présence d'oxydants actifs comme H_2O_2 . Nous savons aussi que l'eau a coulé en abondance dans les terrains les plus anciens, surtout situés dans l'hémisphère Sud. C'est donc à ces endroits qu'il faut rechercher des traces éventuelles de vie fossile ; ainsi, la mission Mars Science Laboratory, lancée par la NASA le 26 novembre 2011, ira se poser en août 2012 à proximité du cratère Gale, proche de l'équateur, dans lequel des argiles et des sulfates ont été découverts. Le véhicule, rebaptisé Curiosity (fig. 7), se déplacera à la surface de Mars avec une autonomie et une panoplie d'instruments bien supérieures à celles des véhicules précédents, Spirit et Opportunity.

>>>



7. Le robot mobile Curiosity de la mission Mars Science Laboratory (vue d'artiste).



La configuration relative des orbites de la Terre et de Mars rend possible le lancement d'une mission spatiale environ tous les deux ans. Le lancement de Mars Science Laboratory devrait être suivi, à la fin 2013, par celui de MAVEN, orbiteur de la NASA destiné à l'étude de l'échappement atmosphérique martien, dans la perspective d'une meilleure compréhension de l'histoire de l'atmosphère martienne. À plus long terme, le programme ExoMars est le fruit d'une collaboration, actuellement en discussion entre l'ESA et l'agence spatiale russe Roskosmos. Selon le schéma initial, la mission comporte deux volets : un orbiteur avec lancement prévu en 2016, dédié à l'étude des gaz traces de l'atmosphère martienne, et un *rover* lancé en 2018, à vocation exobiologique, destiné à l'exploration en profondeur du sol martien. Suite à des contraintes budgétaires, le programme est actuellement en phase de rediscussion. Enfin, le but ultime de l'exploration martienne est le retour d'échantillons martiens. On pourra alors effectuer en laboratoire des études chimiques et minéralogiques aussi fines que celles réalisées aujourd'hui sur les météorites et les échantillons lunaires.

Une autre priorité scientifique est la compréhension de la structure interne de la planète Mars. Pour atteindre cet objectif, il faut disposer à la surface de Mars d'un réseau de sismomètres capables de détecter, comme sur la Terre, les différents types d'ondes sismiques. Une mission de ce type est actuellement à l'étude en partenariat entre les États-Unis et la France. ■

(1) Quant à Vénus, c'est l'ensemble de sa surface qui a été renouvelée par volcanisme au cours du dernier milliard d'années.

(2) Un tel effet est aussi observé sur Vénus, dans des proportions bien plus importantes : le facteur d'enrichissement est supérieur à 100 ! Ce résultat implique pour Vénus une atmosphère primitive très riche en eau. Cette eau s'est progressivement échappée par photodissociation, selon un mécanisme encore mal compris aujourd'hui.

Bibliographie

- M. Shapley Matthews *et al.*, *Mars*, University of Arizona Press (1992).
- N. Barlow, *Mars: An introduction to its interior, surface and atmosphere*, Cambridge University Press (2008).
- F. Forget *et al.*, *La planète Mars : Histoire d'un autre monde*, Belin, Paris (2006).

Sites web

- Missions spatiales vers Mars (Mars Exploration Program) : <http://mars.jpl.nasa.gov>
- Images de la planète Mars prises par des sondes spatiales (NSSDC Photo Gallery – Mars) : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery