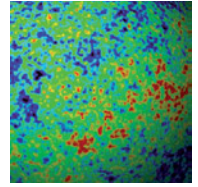


L'histoire de Mars



Mars et la Terre ont vu leur évolution rapidement diverger. Quelles en sont les raisons, et quand cela s'est-il passé ? Mars a-t-elle connu des conditions favorables à l'émergence de la vie ? L'exploration spatiale contemporaine permet d'aborder d'une manière renouvelée l'histoire de Mars, et en particulier le rôle que l'eau a pu y jouer.

Mars dans la planétologie comparative

La profonde unité d'origine des objets du système solaire contraste avec l'observation que l'exploration spatiale nous offre désormais : celle de mondes planétaires présentant une spectaculaire diversité. On est loin de maîtriser ce qui a façonné ces spécificités, dont celle, pour la Terre, d'avoir abrité et préservé les conditions favorables au vivant. Décrypter les processus physiques à l'œuvre dans l'évolution de la Terre et des planètes est complexe, car la trace de l'essentiel des

époques antérieures a été effacée par l'activité géologique elle-même. Seule une planétologie comparative permet une telle reconstruction ; dans ce jeu où chaque objet apporte sa contribution, Mars tient une place toute particulière.

Elle le doit principalement à sa masse : pour des objets de composition initiale semblable, notamment en éléments radioactifs à longue période, le contenu énergétique est essentiellement fonction de la masse globale (voir [encadré 1](#)). Celle de Mars est suffisante (dix fois celle de la Lune) pour avoir engendré un haut niveau d'activité interne, avec des processus magmatiques

Encadré 1

Energies planétaires

Il a fallu des siècles de travaux et de combats pour que la Terre, Mars et quelques autres astres acquièrent leur statut d'objet « planétaire », soumis au champ gravitationnel du Soleil : cela a beaucoup contribué à forger l'idée que leur évolution est dominée par l'existence du Soleil. S'il est vrai que la quantité d'énergie reçue aujourd'hui du Soleil domine de loin l'ensemble des sources énergétiques, le rayonnement solaire n'affecte que les enveloppes externes (surface et atmosphère) mais pas l'intérieur des planètes. En conséquence, alors que l'évolution de l'atmosphère, et *a fortiori* de la biosphère terrestre, est dominée par cet apport d'énergie électromagnétique, l'activité interne repose sur d'autres sources d'énergie. Pour les planètes internes du système solaire, elles proviennent principalement de l'énergie gravitationnelle d'accrétion initiale (surtout dans le noyau) et de la radioactivité des isotopes à longue constante de temps, ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K . Pour des objets supposés de composition globale similaire, la teneur moyenne en éléments radioactifs est identique, ce qui se traduit par une même puissance moyenne libérée par unité de volume. La production énergétique globale est donc proportionnelle au volume, alors que les pertes se font par rayonnement de surface : l'équilibre thermique dépend donc du rayon. Les « petits corps » ont pu rayonner efficacement l'énergie libérée, et ont évité un échauffement important : ils ont préservé les propriétés acquises à leur formation, et sont demeurés « primitifs ». Pour les objets de quelques dizai-

nes de km de dimension, la température atteinte a été suffisante pour entraîner une phase de différenciation globale, caractérisée par une fusion des roches constitutives : les constituants les plus denses ont précipité en un noyau métallique, laissant en surface une croûte rocheuse de faible densité. Pour autant, la nature même de la production énergétique, issue de la transformation radioactive, impose un tarissement progressif de la source, qui résulte en un déclin de l'activité, d'autant plus rapide que l'objet est de petites dimensions : moins chauffé, il atteint plus rapidement un niveau de « mort géologique » qui survient lorsque la croûte atteint une épaisseur qui bloque les manifestations en surface de l'activité convective entretenue dans le manteau. C'est ainsi que la Lune a atteint ce stade il y a quelques 3,3 milliards d'années ; Mars a été active jusqu'à très récemment mais semble aujourd'hui éteinte ; sur Terre, la tectonique de plaques engendre encore montagnes, volcans, et séismes. L'activité interne a un autre effet important : le recyclage de constituants atmosphériques, dont les concentrations résultent d'un équilibre avec les mécanismes de piégeage. C'est le cas en particulier du CO_2 terrestre (hors les productions anthropogéniques récentes), qui joue un rôle majeur malgré sa très faible abondance. Avec la mort géologique, le recyclage s'arrêtera, et les propriétés atmosphériques changeront considérablement, même si par ailleurs le rayonnement solaire demeure constant. La vie sur Terre pourrait bien s'éteindre en plein jour !



intenses qui se traduisent par des édifices de très grandes dimensions, comme le Dôme Tharsis (près de 5 000 km de diamètre) et des volcans géants (plus de 20 000 m d'altitude). En revanche, sa masse est trop faible (dix fois moindre que celle de la Terre) pour avoir produit une « remise à zéro » globale effaçant les structures anciennes. C'est ainsi qu'environ la moitié de la surface de Mars est encore couverte des cratères d'impacts datant de la phase du bombardement primordial : celui-ci a affecté l'ensemble des objets du système solaire, mais ne s'observe qu'à la surface de ceux dont la masse a permis d'en préserver la trace. Ainsi, on peut en principe « lire » à la surface de Mars l'ensemble des étapes ayant jalonné l'histoire des objets telluriques jusqu'à la « mort géologique ». Il existe encore, en particulier sur les hauts plateaux cratérisés à saturation, des terrains datant de l'époque où, sur Terre, la vie apparaissait, il y a près de 4 milliards d'années.

L'eau sur Mars

Qu'il y ait eu des écoulements à la surface de Mars est attesté par une très grande variété de structures, aujourd'hui totalement asséchées, révélées dès les premières observations spatiales : réseaux fluviaux, vallées de débâcle, ravines le long des pentes de certains cratères etc. Aucune mesure ne démontre à elle seule qu'il s'agit d'écoulements aqueux ; on ne peut exclure que certaines des structures aient été produites par d'autres fluides, peut-être même par des laves. Il ne semble pas possible toutefois de rendre compte de l'ensemble des observations sans faire appel à des liquides dont, du point de vue thermodynamique, l'eau est de loin le plus favorable.

Que l'eau ait été responsable des structures observées n'implique cependant pas qu'elle ait été stable à l'état liquide sur de longues périodes : l'écoulement n'exige pas la stabilité thermodynamique, ni ne suppose de processus entretenu. Rien n'indique en particulier que ces écoulements aient jamais alimenté d'océans : ils pourraient résulter, dans certains cas au moins, de phénomènes sporadiques, apportant de l'eau liquide en surface, capables de former par érosion les structures que l'on observe, et disparaissant ensuite, par changement de phase (évaporation ou percolation suivie de gel), sans produire d'étendues pérennes, lacs, mers, ou océans ; or la possibilité qu'une évolution biochimique se développe exige, quant à elle, la durée. Du point de vue exobiologique, la question n'est pas tant de savoir si de l'eau a coulé, mais si elle a perduré. Diagnostiquer l'existence passée d'eau pérenne, à partir de l'identification des réservoirs actuels d'eau, dans la variété des formes potentielles (gaz, givres et glaces, roches hydratées), exige de coupler l'observation morphologique à l'acquisition de données de composition.

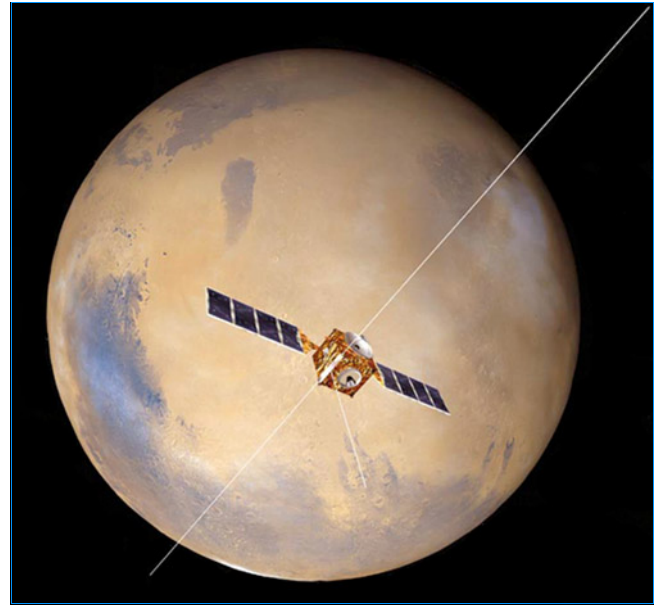


Figure 1 – Vue d'artiste de la sonde Mars Express en orbite martienne, avec ses antennes radar de sondage profond déployées (lignes blanches).

Mars Express et OMEGA

Les missions spatiales les plus récentes, parmi lesquelles Mars Express, de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) (*figure 1*), ont considérablement fait progresser notre compréhension de l'Histoire de Mars, et singulièrement du rôle qu'y a joué l'eau. Avec ses 7 expériences, Mars Express réalise, depuis sa mise en orbite en décembre 2003, une cartographie globale et corrélée de l'ensemble des enveloppes de Mars : l'exosphère, l'atmosphère, la surface et le sous-sol, par sondage radar jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur.

Tout particulièrement, le couplage entre imagerie et spectroscopie, à hautes résolutions spatiale et spectrale, permet de franchir un saut important dans la connaissance de Mars, en permettant de déterminer la composition des structures observées : des zones sont simultanément imagées en stéréoscopie visible par la caméra HRSC (réalisée en Allemagne), et cartographiées par OMEGA. OMEGA (*figure 2*) est le premier imageur spectral capable d'acquérir, pour chaque pixel de quelques centaines de mètres, le spectre entre 0,35 μm et 5,1 μm . Dans ce domaine spectral, la plupart des constituants de surface (minéraux et glaces) et de l'atmosphère (CO_2 , CO et H_2O) ont des signatures spécifiques, permettant leur identification.

L'évolution des constituants atmosphériques (gaz, aérosols, nuages) dans l'espace et le temps donne accès à la variation des propriétés météorologiques, à la circulation atmosphérique, à la physique de nucléation des nuages. Le suivi des calottes polaires, par la condensation/sublimation saisonnière de givres d'eau et de gaz carbonique, permet de construire un modèle climatologique précis à l'échelle annuelle. La caractérisation des glaces permanentes met en évidence des processus s'étendant à des millions d'années. La détection de minéraux de sur-

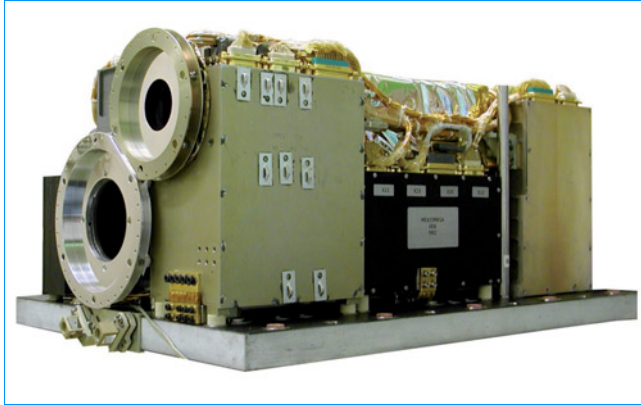


Figure 2 – OMEGA est, avec SPICAM (qui analyse l'atmosphère de Mars par occultation solaire et stellaire), l'un des deux instruments de Mars Express développés sous la responsabilité d'équipes françaises : OMEGA a été développé et opère sous la responsabilité scientifique et technique de l'IAS (Institut d'Astrophysique Spatiale) à Orsay en étroite coopération avec le LESIA de l'Observatoire de Paris-Meudon, ainsi qu'avec l'IKI de Moscou et l'IFSI-INAF de Rome.

face complète la description de l'histoire de Mars sur des durées géologiques (centaines de millions à milliards d'années). Pour un grand nombre d'entre eux, les minéraux reflètent en effet les conditions macroscopiques et environnementales de la planète à l'époque de leur formation : l'identification et la répartition des minéraux de surface donne accès aux grandes périodes qui caractérisent l'histoire de Mars, jusque-là essentiellement décrite par l'interprétation des structures morphologiques. Au total, OMEGA contribue de manière très spécifique à la compréhension de l'évolution de cette planète sur toutes ses échelles de temps.

Ce n'est pas l'eau qui a rendu Mars rouge

La dichotomie principale entre les terrains cratérisés, formant surtout les hauts plateaux de l'hémisphère Sud, et les grandes plaines du Nord, se retrouve dans les cartes minéralogiques : les plateaux cratérisés, globalement sombres (leur albedo, qui mesure la fraction de rayonnement renvoyé dans l'espace, est $< 0,2$), sont constitués

des minéraux de la croûte initiale, avec une forte abondance de pyroxène (silicate contenant en proportion variable du Mg, du Ca et du Fe, constituant important des laves basaltiques). Ils n'ont pas subi d'altération minéralogique majeure et globale depuis plus de quatre milliards d'années.

Tout au contraire, les terrains plus brillants (albedo $> 0,3$) qui recouvrent une grande partie des plaines du Nord et donnent à Mars sa couleur dominante, ne présentent aucune signature de ces minéraux, dont ils sont pourtant issus. Ils ont été altérés chimiquement, et leur spectre montre la présence d'oxydes ferriques. OMEGA a en outre montré qu'ils ne sont pas hydratés (*figure 3*). L'altération qui les a formés ne résulte pas de l'action d'eau liquide ; très probablement, l'oxydation vient des constituants atmosphériques. Les teneurs infimes d'oxydants expliquent que cette altération soit très lente. Au cours des 3,5 derniers milliards d'années, ce sont ces agents atmosphériques, et non l'eau liquide, qui ont donné à Mars sa couleur rouille.

Pour autant, cette altération n'a affecté que les grains les plus superficiels, dans les zones de plus basse altitude. C'est pourquoi le très léger « bêchage » réalisé par les roues des rovers de la NASA a laissé des traces visibles (*figure 4*), en

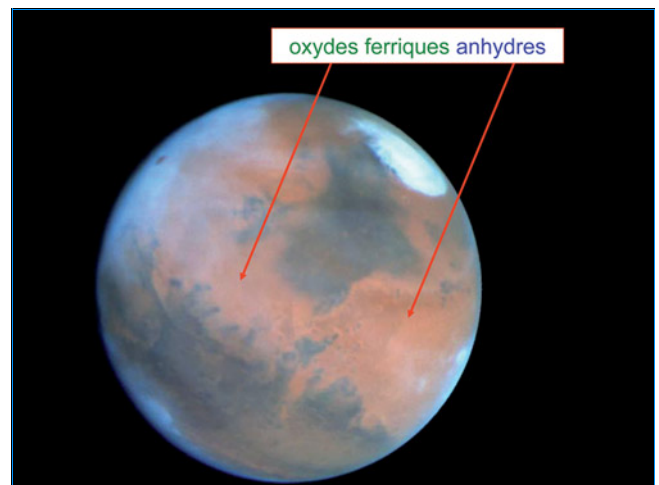


Figure 3 – La couleur rouille de Mars provient bien d'une pellicule d'oxydes ferriques, mais cette oxydation du sol n'est pas le résultat de l'action d'eau liquide.

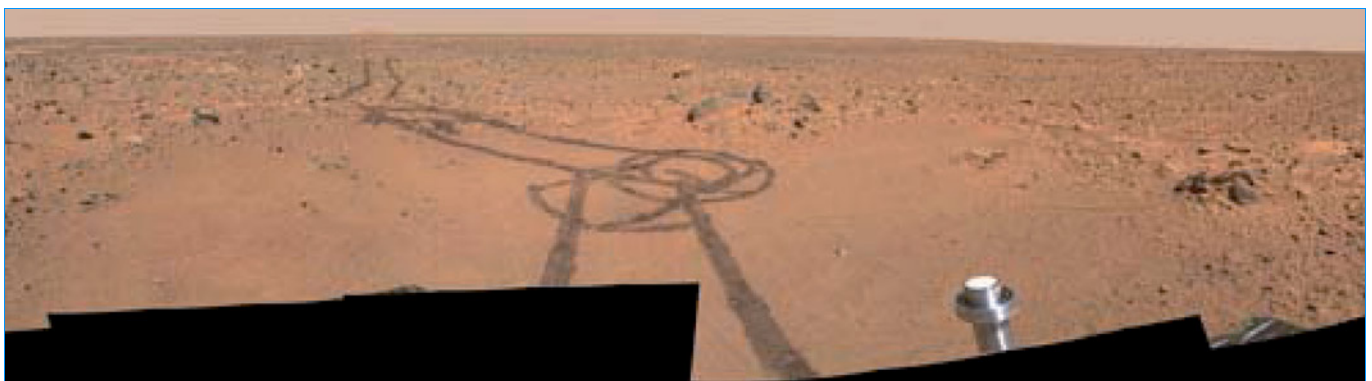


Figure 4 – Ce panorama, pris par le Rover Spirit de la NASA, montre les traces laissées sur son passage : le léger bêchage du sol par les roues suffit à exposer en surface des minéraux sombres, non altérés, montrant la très faible épaisseur de la couche d'altération.



Figure 5 – L'instrument OMEGA de la sonde Mars Express a montré que les terrains clairs bordant Marwth Vallis, dans cette vue en perspective reconstruite d'après les images de la caméra stéréoscopique HRSC, contiennent des argiles hydratées, datant de l'époque où l'eau liquide était stable sur Mars. Il est proposé d'y poser les futures missions exobiologiques de la NASA (MSL) et de l'ESA (ExoMars), comme le suggère le montage photographique hors échelle.

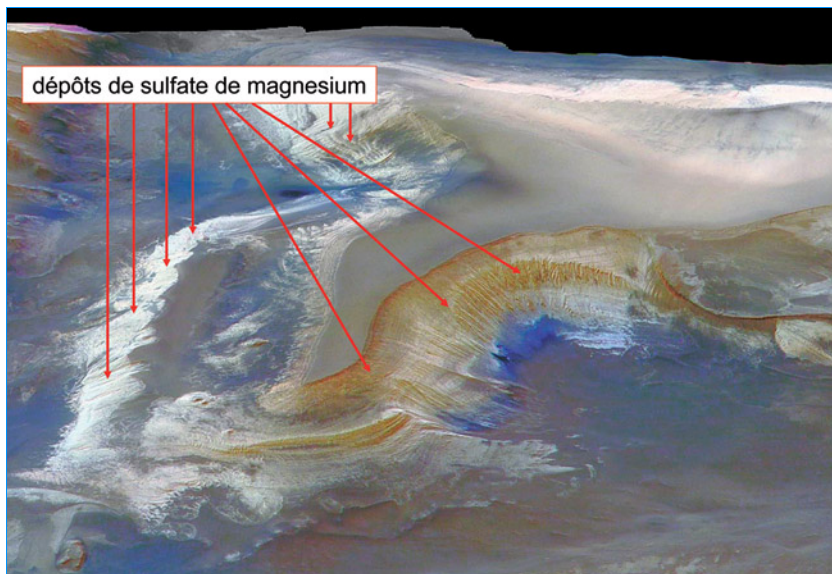


Figure 6 – OMEGA a montré que les dépôts stratifiés de Valles Marineris contiennent des sulfates hydratés, témoins d'une activité aqueuse très ancienne.

faisant apparaître les matériaux sombres sous-jacents, non altérés, dont l'analyse in situ a montré qu'ils contiennent pyroxènes et olivines non altérés (l'olivine est également un silicate constitutif des roches basaltiques, contenant en proportion variable Mg et Fe).

Les minéraux hydratés de Mars

Si l'eau liquide n'a pas joué de rôle majeur global au cours de cette dernière période caractérisée par l'oxydation anhydre superficielle, il n'en fut pas de même

auparavant : OMEGA a détecté, dans des terrains très distincts, deux familles de minéraux hydratés : des phyllosilicates (ou silicates en feuillets, dont les argiles sont l'une des familles) et des sulfates (*figures 5 et 6*).

Cette découverte de phyllosilicates hydratés est importante tant par la nature de ces minéraux que par leur localisation. Il s'agit principalement d'argiles riches en Mg et en Fe (smectites). Elles sont détectées dans les terrains de Mars les plus anciens, soit en relation avec les cratères d'impacts primordiaux, soit dans des sols parvenus en surface par une violente érosion. Pour se former, ces minéraux exigent que d'abondantes quantités d'eau restent en contact avec des silicates primaires pendant d'assez longues périodes ; ils constituent l'indice le plus fort de l'existence d'eau liquide sur des durées géologiques, soit à la surface soit dans la sous-surface proche, au tout début de l'histoire de Mars.

Les sulfates hydratés (telle la kieserite : $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et le gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ont été identifiés dans trois types de terrains : dans des dépôts stratifiés de Valles Marineris, parfois sur des épaisseurs de plusieurs kilomètres, dans de vastes dépôts de Terra Meridiani – non loin du site exploré par le rover « Opportunity » de la NASA qui y a également détecté des sulfates – et dans des dunes proches de la calotte polaire Nord (*figure 7*). Tous ces terrains sont plus récents que ceux dans lesquels les phyllosilicates ont été observés, indiquant que la formation des sulfates est postérieure à celle des phyllosilicates. Les sulfates requièrent également la présence d'eau liquide pour leur formation par précipitation ; en revanche, ils peuvent se former très rapidement, sans qu'il soit nécessaire que l'eau demeure stable : ces sulfates peuvent en effet se déposer lorsque l'eau s'évapore.

Les trois ères martiennes

Sur la base de ces identifications minéralogiques, situées dans leur contexte géomorphologique, l'histoire de Mars peut se décrire en trois ères, que nous avons baptisées à partir du nom (en grec) des minéraux qui les caractérisent.

Le « phyllosien » est la première. Elle correspond à la présence de phyllosilicates hydratés, que l'on observe toujours dans les terrains les plus anciens. Durant cette période, l'eau liquide était abondante. Cette eau peut avoir été présente en surface ou en profondeur. Dans le



Encadré 2

Datation des ères martiennes

La datation absolue des processus ayant jalonné l'histoire planétaire se fait par l'analyse en laboratoire d'échantillons terrestres et extraterrestres. L'existence de noyaux radioactifs permet d'accéder, par la mesure relative de leur concentration et de celle des noyaux radiogéniques produits, à deux « âges » importants : celui de la formation de leur corps parent, et celui de la dernière « fermeture » du système qui les héberge, c'est-à-dire, pour une roche, l'âge de sa dernière cristallisation. L'existence de météorites, dont plusieurs mesures indiquent qu'elles proviennent vraisemblablement de Mars, permet de dater ainsi l'âge de Mars, semblable à celui de la Terre, et l'âge de la cristallisation du magma dans lequel elles se sont formées. On a mis de la sorte en évidence deux époques d'activité du manteau martien, l'une s'étendant de 150 à 500 millions d'années environ, l'autre, plus ancienne, de 1,2 à 1,5 milliard d'années. Une seule météorite a un âge très supérieur (4,5 milliards d'années, proche de celui de la planète) qui, s'il se confirme qu'elle provient bien de Mars, pourrait représenter un échantillon de la croûte primitive. Le très petit nombre de ces météorites (inférieur à 40), notre ignorance de leur site d'origine précis et le fait qu'elle proviennent de couches profondes ne permet pas de reconstruire une chronologie des événements ayant marqué la surface de Mars. Pour cela, le vecteur d'information principal est le comptage des cratères d'impacts, et la mesure de leur distribution en taille sur une zone donnée. En prenant comme référence la distribution des cra-

tères mesurée sur la Lune, calée de manière absolue grâce aux mesures en laboratoire d'échantillons lunaires représentatifs des principales unités, cette méthode permet d'attribuer à une surface un âge d'exposition, défini comme la durée pendant laquelle elle a accumulé une certaine distribution de cratères. Bien entendu, cette méthode est sujette à de nombreuses incertitudes et controverses, car elle suppose valides des hypothèses non encore parfaitement vérifiées. Elle met en évidence l'existence dans le temps de deux sources distinctes de bombardement : le plus ancien – et le plus intense – est responsable de la forte cratérisation des objets tels que la Lune, Mercure et Mars, qui ont gardé, au moins sur une partie de leur surface, la mémoire des premières centaines de millions d'années de leur évolution. Il provient des innombrables objets qui se sont formés dans le disque protoplanétaire initial, et dont les chocs ont dominé l'évolution du Système Solaire primordial pendant plus d'un demi-milliard d'années. Une fois la cavité solaire ainsi nettoyée de ces objets, le système solaire s'est stabilisé dans sa structure actuelle, avec les planètes, satellites et petits corps qu'on y dénombre. Leur bombardement s'est poursuivi jusqu'à aujourd'hui, mais avec une bien moindre intensité, par des objets de toute autre origine : principalement des fragments d'astéroïdes, éjectés par collision de leur « ceinture principale » et constituant les familles de météorites de toutes dimensions qui balayent notre système.

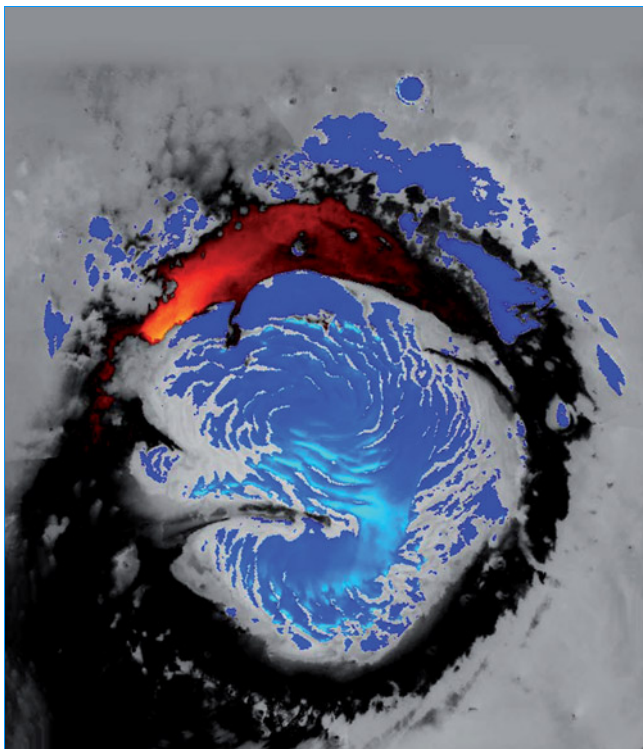


Figure 7 – Cette image en fausses couleurs montre les constituants principaux de la calotte polaire nord de Mars, à la fin de l'été local, tels qu'ils ont été identifiés par OMEGA : glace d'eau, en bleu, et sulfate de calcium (gypse) en rouge.

premier cas, il est nécessaire que l'atmosphère ait entre-tenu un effet de serre important pour maintenir l'eau liquide, malgré la faible luminosité du jeune Soleil. Par analogie avec ce que l'on observe sur Venus aujourd'hui (où l'atmosphère, dont la pression est près de 100 fois plus élevée que sur Terre, contient 96,5 % de CO_2) et sur la Terre, où les calcaires abondants résultent de la présence passée d'une atmosphère dense de CO_2 , on peut supposer que si Mars a également connu une atmosphère dense, elle était constituée principalement de CO_2 . Aujourd'hui, l'atmosphère de Mars (pour 95 % faite de CO_2) est très ténue, avec une pression moyenne de 6 hPa (~ 6 mbar). On pourrait s'attendre à ce qu'une fraction au moins du CO_2 primordial se retrouve – comme sur Terre – piégée sous la forme de carbonates, ce qui attesterait de l'existence d'étendues aqueuses passées et permettrait de les localiser ; OMEGA a recherché ces carbonates, mais n'en a pas détecté au-dessus du seuil de sensibilité, voisin de 1 % en volume. En parallèle, OMEGA a montré que les grands glaciers polaires, au Nord comme au Sud, sont faits de glace d'eau et non de glace carbonique : la mince pellicule brillante de CO_2 qui recouvre la calotte polaire sud, ne fait que quelques mètres d'épaisseur : elle ne correspond qu'à une très faible fraction du CO_2 atmosphérique, et ne contribue que très marginalement au réservoir de CO_2 actuel. Toutes les observations tendent à montrer



que Mars a perdu l'essentiel de ses constituants atmosphériques très tôt dans son histoire. Plusieurs mécanismes d'échappement peuvent être invoqués. L'un est relié à l'histoire magnétique de Mars. Aujourd'hui la planète Mars ne possède pas de champ dipolaire global ; en revanche, la sonde Mars Global Surveyor (NASA) a détecté un magnétisme rémanent dans les terrains cratérisés de la croûte martienne, qui indiquerait que celle-ci s'est solidifiée en présence d'un champ magnétique. Toutefois, elle n'a pas détecté de magnétisme rémanent à la surface des unités volcaniques les plus anciennes, sur le vaste dôme de Tharsis et dans les plaines du Nord. Cela montrerait que la dynamo de Mars s'est arrêtée avant même ces premières manifestations volcaniques, quelques centaines de millions d'années au plus après sa formation. La disparition précoce du bouclier magnétique aurait pu favoriser un très fort taux d'échappement atmosphérique. En effet, comme toute étoile jeune, le Soleil était vraisemblablement un très fort émetteur dans l'extrême UV, ionisant fortement les atmosphères planétaires, les rendant très sensibles à l'effet du vent solaire en l'absence de protection : en particulier, l'irradiation est alors source d'un « sputtering » (érosion par cascades de collisions), similaire au « sablage » par bombardement ionique des surfaces solides. Dans cette hypothèse, Mars n'aurait maintenu des conditions atmosphériques permettant la stabilité de l'eau liquide qu'au travers l'existence, limitée aux premières phases de son histoire, d'une protection magnétique.

La seconde ère, le « theiikien », est marquée par la présence des sulfates (theiikos en grec). Entre phyllosien et theiikien, Mars a subi un changement climatique global, transformant l'environnement humide et alcalin favorable aux argiles ferro-magnésiennes, en un monde sec et acide permettant la synthèse des sulfates observés. Nous attribuons ce changement climatique à l'importante activité volcanique qui a accompagné la construction du Mont Tharsis et le remplissage des plaines du Nord, quelques centaines de millions d'années après sa formation. Ce volcanisme s'est en effet accompagné d'un très fort dégazage, projetant de grandes concentrations de constituants soufrés dans une atmosphère très ténue, conduisant à des conditions fortement acides. L'ouverture tectonique de Valles Marineris et la remontée du front géothermique, qui ont également accompagné cette activité volcanique, ont produit en des endroits spécifiques de la surface des nappes d'eau qui ont formé ces dépôts de sulfates, avant de disparaître, par percolation et évaporation.

La troisième ère a débuté alors, qui perdure jusqu'à aujourd'hui, dominée par la très lente altération atmosphérique en oxydes ferriques anhydres : c'est le « siderikien », du grec siderikos (ferrique). Durant cette période, la variation chaotique de l'obliquité (en l'absence de Lune stabilisatrice) a conduit à la condensation, en des zones spécifiques et repérées, de reliefs glaciaires dont la rapide sublimation a produit certaines

structures sporadiques spectaculaires ; ces événements, même lorsqu'ils se sont répétés, sont toutefois restés localisés, dans l'espace et le temps.

Exobiologie martienne

Les chemins d'évolution de Mars et de la Terre se sont séparés très tôt dans leur histoire. Cela pourrait provenir de ce que Mars, de trop faible masse, n'a pas pu maintenir d'activité convective importante dans son manteau tout au long des premières centaines de millions d'années ; l'affaiblissement de la convection du manteau, principal mode d'évacuation de l'énergie, pourrait avoir bloqué l'activité convective du noyau liquide. La chute de l'activité magnétique globale en présence d'un Soleil jeune aurait favorisé un échappement atmosphérique précoce.

On ne peut exclure pour autant que cette divergence évolutive soit survenue après l'apparition de premières formes de vie sur Mars. Il est remarquable que pour la première fois, des mesures directes de composition minéralogique indiquent que Mars pourrait avoir hébergé l'un des ingrédients clés de l'émergence du vivant : de l'eau liquide stable sur des durées géologiques, au tout début de son histoire. Les régions les plus favorables ont été identifiées : elles ne se trouvent pas où on les recherchait, au voisinage des structures d'écoulement, des lits de rivières et de leurs débouchés, ni au sein d'hypothétiques bassins d'accumulation : elles se situent dans des terrains très anciens, qui se trouvent aujourd'hui exposés à la surface à la suite d'un impact ou d'une forte érosion. Ces terrains sont repérés par la présence de phyllosilicates peu altérés, ayant conservé leur hydratation.

C'est en explorant ces sites argileux et en y analysant des roches à l'échelle des grains individuels que de futures missions in situ auront les meilleures chances de mettre en évidence des phases, minérales et moléculaires, qui pourraient héberger des vestiges fossilisés de structures biologiques éventuelles. C'est en rapportant sur Terre de tels échantillons qu'on offrira aux communautés futures le matériau le plus fécond pour travailler cette question : y a-t-il eu, ailleurs que sur Terre, l'émergence du vivant dans le Système Solaire ?

POUR EN SAVOIR PLUS

Bibring J.-P. et coll., *Global mineralogical and Aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data*, Science 312, 400 (2006).

Forget F., Costard F., Lognonné P., *La planète Mars, Histoire d'un autre monde*, Belin (2006).

Rocard F., *Planète rouge, Mars : mythes et explorations*, Dunod (2006).