

# Mars

## Approche bio-géologique de la planète rouge

Nicolas Defer

Annie Pincaut a apprécié cet article, paru dans le bulletin de l'Association de Géologie Audoise et, à sa demande, l'auteur a gentiment accepté sa publication dans les CC.

Nicolas Defer a fait, en puisant dans différents ouvrages, un travail de synthèse des connaissances actuelles sur la géomorphologie et la géologie de Mars. Il nous présente la composition chimique, l'atmosphère et le climat. Il décrit en détail les reliefs et en donne les interprétations possibles.

Dans le n°84, il nous racontera où en est la recherche d'une vie passée ou présente sur la Planète Rouge et explicitera les problématiques et les arguments scientifiques.

**La** planète Mars est en moyenne à 228 millions de km du Soleil et parcourt son orbite en 687 jours. Son diamètre est à peu près deux fois plus petit que celui de la Terre, sa masse est 1 / 10 de celle de la Terre, la pesanteur y est trois fois moindre que sur Terre. Mars est perçue à l'oeil nu : sa couleur rouge orangé, due aux oxydes de fer présents en surface, lui a valu d'être surnommée la "Planète Rouge". Terre et Mars ont le même âge : à peu près 4,6 milliards d'années et leur distance respective varie de 80 à 400 millions de km.

Mars, une planète inaccessible, d'apparence inhospitalière ? Pas du tout. Après les missions Mariner (1964) et Viking 1 et 2 (1976), après le revers de Mars Observer en 1993, on s'apprêtait à lancer une sonde russe, "Mars 96" dont l'objectif était de photographier la surface planétaire de l'équateur aux pôles

pour en dresser des cartes géologiques et minéralogiques. Mais cette sonde n'a même pas quitté l'orbite de la Terre et s'est abîmée dans le Pacifique. D'où un échec cuisant pour les russes et les français (premiers partenaires) tant du point de vue technologique que scientifique. Or, le 2 décembre 1996, la NASA envoya la sonde Mars Pathfinder, laquelle se posa début juillet 1997 dans un site tropical, à 19° 30' de latitude nord. Cette mission est une incontestable réussite technologique (nouvelles technologies destinées aux futures missions spatiales sur Mars, lancement d'une sonde en un temps record, à moindre coût) mais aussi culturelle. Les images extraordinaires reçues sur Terre complètent celles réalisées par la sonde Viking en 1976 et nous dévoilent ainsi les caractéristiques d'une partie du paysage martien.

Parmi les énigmes que vont tenter de résoudre les scientifiques de cette mission et des missions futures, il y a l'existence d'une vie passée et la présence antérieure d'eau à l'état liquide. Si eau il y a eu, il est donc possible que la vie soit apparue, même si c'était sous une forme éphémère et limitée à des bactéries primitives. Mais pour trouver une forme quelconque de vie, il faut creuser ! On peut se demander en quoi la planète Mars constitue un espoir de recherche d'une "exo-vie", et comment elle peut devenir une source de données, de renseignements que rêvent de mettre à jour les scientifiques afin de mieux comprendre non seulement l'évolution de la Planète Rouge mais aussi celle de notre très chère Planète Bleue.

## **Géologie et géomorphologie de la Planète Rouge**

### **Mars : une planète tellurique**

#### Composition chimique

Elle est analogue à celle de la Terre, sauf que Mars contient trois fois plus de fer : 50% d'oxygène, 20% de silicium, 14% de fer, 4% d'aluminium. Comme toute planète rocheuse, elle est composée d'un petit noyau central de fer (2500 km de diamètre), contenant 25% de la masse, entouré d'un manteau et d'une croûte, riche en olivine et en oxyde de fer, de 40 à 50 km d'épaisseur, atteignant par endroits 80 km (sous les montagnes) et se réduisant parfois à 8 km (sous les bassins d'impact).

#### Évolution de l'atmosphère pour Vénus, Terre et Mars depuis leur formation

Lors de leur formation, il y a environ 4,6 milliards d'années, les trois planètes avaient une atmosphère primitive, un peu comme

celle de Jupiter. Elle a été chassée par le vent solaire, puis remplacée par une atmosphère à dominante de CO<sub>2</sub>, produite par dégazage. Le gaz carbonique engendre un effet de serre qui provoque une augmentation de la température.

- Pour Vénus, l'effet de serre est "divergent" : l'eau chauffée, s'évapore, est dissociée en altitude par les UV du Soleil, et l'hydrogène s'évade dans l'espace. Il y a, en gros, une fuite d'eau sous forme de vapeur qui assèche la planète.

- La Terre est moins chaude. Actuellement sans l'effet de serre, sa température extérieure serait de - 18°C au lieu des 15°C que l'on relève, et toute sa surface serait recouverte de glace, sauf dans la ceinture équatoriale. D'autre part, le CO<sub>2</sub> est piégé sous forme de carbonates et tend à disparaître de l'atmosphère. Or, sur Terre, les carbonates se déposent au fond des océans, où le mouvement des plaques tectoniques les fait repasser dans le magma, puis le CO<sub>2</sub> est recraché par les volcans. C'est donc le CO<sub>2</sub> recyclé qui entretient l'effet de serre. Pendant 4 milliards d'années la Terre a ainsi pu conserver une température propice au maintien de la vie.

- Pour Mars, l'hypothèse est qu'il y fait trop froid pour que le CO<sub>2</sub> soit recyclé, comme sur Terre. L'atmosphère devient de plus en plus ténue et l'effet de serre ne suffit pas à réchauffer la planète. L'eau gèle dans le sol qui devient un "pergélisol". Il y a de nombreux indices de cette présence de glace dans le sol. Par exemple, les éboulis des grandes vallées ne se forment pas à la verticale mais s'étalent, du fait de la présence de grains de glace qui jouent le rôle de lubrifiant. L'idée prévaut que l'atmosphère martienne se serait en partie échappée vers l'espace,

le reste étant piégé dans les calottes glaciaires et dans le sol. Mais on ne comprend toujours pas comment, et surtout en combien de temps, le climat de Mars a basculé. On suppose que le climat de Mars aurait changé il y a environ 3,5 milliards d'années avec la perte de l'essentiel des éléments (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) qui composaient son atmosphère. Tout se serait joué sur une période de 500 millions d'années.

#### Composition de l'atmosphère et caractères climatiques

L'atmosphère est composée de 95,3% de CO<sub>2</sub>, de 2,7% d'azote moléculaire (N<sub>2</sub>) et de 1,6% d'argon. Les autres constituants (notamment l'oxygène) sont observés à l'état de traces. Elle est épaisse de 11 km. De plus, la pression au sol est très faible : de 6,9 à 9 hPa (1015 hPa sur Terre).

La variation diurne des températures à l'équateur est relativement importante (en moyenne - 22 °C le jour et - 73°C la nuit). La température moyenne est de - 60°C. Aux pôles, on note de très basses températures, de l'ordre de -130°C en hiver tandis qu'à l'équateur, elles sont de peu supérieures à 0°C.

Terre et Mars sont comparables en ce qui concerne la durée du jour, ainsi que l'inclinaison du plan de l'orbite sur celui de l'équateur (24°48' contre 23°27'). Il existe donc des saisons, comme sur la Planète Bleue, mais elles sont près de deux fois plus longues.

Enfin, de violents vents (200 km / h) circulent dans l'atmosphère, déclenchant des tempêtes de poussières, projetées jusqu'à 50 km d'altitude, et modelant par endroits la surface de Mars en champs de dunes (le plus important, Hellas Portus, a une superficie de 1600 km<sup>2</sup>).

## Les premiers résultats de Sojourner

L'APXS, le spectromètre à rayons X de Sojourner destiné à l'analyse de la composition chimique des roches martiennes, travaille la nuit, en bombardant une dizaine d'heures d'affilée sa cible de particules alpha ; en retour, la roche émet des rayons X dont le spectre est analysé. L'AXPS a ainsi révélé que le petit rocher d'origine volcanique, Barnacle Bill, situé à quelques pas de Mars Pathfinder, était très riche en quartz comme certaines laves terrestres. C'est une roche magnétique, riche en quartz et en pyroxène. S'il se confirme qu'il y a du quartz sur Mars, il faut trouver le processus par lequel il a été fabriqué ! Sur Terre, le quartz apparaît de diverses façons, mais toutes impliquent la présence d'eau, de hautes températures et de hautes pressions. Par exemple, le quartz peut se former dans des zones de subduction où les plaques océaniques s'enfoncent dans le manteau terrestre, en emportant d'énormes quantités d'eau avec elles. L'eau se mêle alors au magma à plus de 1000°C. Mais sur Mars, il n'y a pas de zones de subduction. Et l'on ne comprend pas comment du quartz a pu se former dans ces conditions.

### **Causes et descriptions des reliefs**

#### Les cratères et le volcanisme

- L'hémisphère sud de Mars comporte beaucoup plus de cratères que le nord, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'une mer martienne au nord (où l'on observe d'énormes "estuaires" qui semblent s'y déverser). L'enfance du système solaire a été dominée par un bombardement météoritique, dont la phase la plus violente se serait achevée il y a 3,8 milliards d'années. En se fondant sur le décompte et sur l'état de dégra-

dation des cratères, les géologues estiment qu'il ne s'est plus passé grand-chose dans la majeure partie de l'hémisphère sud, depuis 3,5 milliards d'années. Or, la plupart des vallées et des chenaux (environ 95 % selon les chercheurs) sont associés à des terrains cratérisés. Leur formation serait donc intervenue au cours du premier demi-milliard d'années qui a suivi l'accrétion de la planète. Au delà, il n'y a plus de traces évidentes d'érosion et il n'y a plus, ou presque plus, d'eau liquide.

L'hémisphère nord est peu cratérisé, occupé par des plaines relativement lisses. Ces dernières correspondent probablement aux terrains les plus récents, postérieurs au bombardement météoritique qui a suivi de peu la naissance de Mars. Il n'est pas exclu qu'elles soient apparues lors d'un comblement de formes, par des dépôts éoliens. Autre hypothèse : les cratères de l'hémisphère nord auraient été comblés par des écoulements de lave, comme ce fut sans doute le cas pour les mers lunaires.

- Il existe une dizaine de grands cratères de nature volcanique. Deux volcans imposants se trouvent sur le bord d'un bombardement appelé le dôme de Tharsis : Alba Patera, le plus étendu et Olympus Mons, large de 500 km et haut de 27 km. Trois autres, l'Ascraeus, la Pavonis et l'Arsia, sont situés sur le dôme de Tharsis lui-même ; tous les trois atteignent 27 km d'altitude mais reposent sur un socle de plus de 9 km. Les plus grands cratères ont un diamètre allant de 80 à 120 km.

Par ailleurs, les petits cratères se comptent par milliers. A diamètre égal, ils sont moins profonds que sur la Lune, sans doute parce que l'érosion, principalement éolienne, s'exerce davantage sur Mars. On parle d'un relief "lissé".

Les cratères s'emboîtent les uns dans les autres et, en particulier, le rempart de caldeiras<sup>1</sup> est souvent indenté de dépressions semi-circulaires, ce qui s'explique mieux si les cratères sont volcaniques que s'ils sont dus à un impact de météorite : on ne comprendrait pas que les météorites plus petites soient tombées juste sur le bord de la cicatrice de la plus grande. Le fond des grandes caldeiras est tantôt très plat, tantôt accidenté de collines (et de cratères mineurs bien entendu). Des formes qui ressemblent à des coulées de lave, mais sont peut-être des glissements apparaissent dans le fond. Des failles transverses cassent parfois le bord des cratères, mais il n'existe pas de "rayures". Une des particularités de beaucoup de cratères de Mars est que leurs pentes extérieures s'accidentent de formes de fluage<sup>2</sup> polylobées, que l'on ne trouve pas sur les autres planètes : ce sont les cratères à "ejecta fluidisés" (R. Battistini).

On peut affirmer que les grands volcans de Mars sont des boucliers de type hawaïen<sup>3</sup> à caldeiras emboîtées. Des épanchements latéraux de lave sont produits, en plus des "ejecta fluidisés".

Malgré l'importance du volcanisme, beaucoup de cratères sont bien dus à des impacts météoritiques, comme le plus grand, Hellas, qui atteint 2000 km de diamètre. Il y a aussi des zones sans cratères.

- Mars a donc connu une intense activité volcanique qui a engendré le surgissement de volcans géants. Pour des raisons mal comprises, ce volcanisme, qui se serait éteint il y a 800 à 600 millions d'années, n'a affecté que la plus grande partie de l'hémisphère nord, où des flots de lave ont façonné d'immenses plaines relativement jeunes.

### La tectonique

Beaucoup de reliefs ont une origine tectonique, qu'il s'agisse de tectonique interne, panamienne<sup>4</sup> ou complexe car beaucoup de formes de glissement ont accidenté des parois de graben<sup>5</sup> dus à la distension. Parmi les mouvements endo-tectoniques, peut-être dus à des courants de convection dans le manteau de la planète, on doit insister sur ceux qui ont produit deux des reliefs les plus spectaculaires, le dôme de Tharsis et Valles Marineris.

- le dôme de Tharsis, situé sur l'équateur martien, est dû à un soulèvement de la croûte d'environ 6 km, localement 9, il y a 3,5 milliards d'années. Il est large de 3000 km et long de 4000. Le plateau d'Elysium, situé dans l'hémisphère nord est plus petit ; il est haut de 4 à 5 km et a un diamètre de 1500 km, supportant des volcans. S'opposant à ces dômes, de grands bassins entourés de bourrelets occupent une grande partie de l'hémisphère sud : ainsi la plaine Hellas, de plus de un million de km<sup>2</sup>.

- Valles Marineris est un grand canyon équatorial, long de 4000 km, large de 120 à 200, profond de 6. Il commence juste sur la remontée orientale du dôme de Tharsis, par Noctis Labyrinthus, réseau de vallées découpant la région en petits plateaux polygonaux, suivant les lignes tectoniques. Ce labyrinthe de vallées s'explique par la formation de grabens, dont les parois ont ensuite été modelées par des affaissements d'ordre kilométrique en forme de cirques elliptiques ; beaucoup de dépressions sont fermées, de sorte que l'ensemble est mal communiquant. On a l'impression que des formes de dégradation du pergélisol fondu ont modifié le relief tectonique primitif. De Noctis Labyrinthus

s'échappe vers l'Est le canyon proprement dit, constitué en fait de plusieurs vallées profondes parallèles, révélant une coupe des couches volcaniques dans lesquelles elles sont ouvertes. Le glissement, le ruissellement peut-être, ont modelé les versants. Troisième secteur de Valles Marineris, l'Est est une vaste dépression chaotique. Sa surface est marquée par un vaste réseau fluvial (canaux de Mars).

### L'oeuvre du vent

Mars est un désert glacial balayé au rythme des saisons par de violentes tempêtes de poussières, livré pratiquement sans aucune protection aux ravages des particules du vent solaire et du rayonnement UV de notre étoile. Le vent est probablement à l'origine de la présence d'importants yardangs<sup>6</sup> et de dunes (transversales ou barkhanes<sup>7</sup>) groupées en vastes ergs<sup>8</sup>. Ces dunes paraissent figées, encroûtées, attaquées par déflation. Des poussières stratifiées couvrent les calottes glaciaires et leurs abords.

### Les écoulements

Une partie de la surface de Mars est sillonnée par des dizaines de chenaux et de vallées de formes, de profondeurs et de longueurs très diverses : les vallées en U de type glaciaire auraient, d'après la topographie des cratères de météorites, entre 3,5 et 3,8 milliards d'années (époque de la glaciation).

Beaucoup de formes de Mars s'expliquent par des écoulements. Certains peuvent remonter à une période fluviale très ancienne. D'autres ont pour cause l'intervention de l'eau contenue dans le sous-sol : l'hydrolithosphère. Il y a là, en effet, une quantité stockée bien supérieure à celle des calottes polaires. Une partie de cette eau souterraine, la plus superficielle,

est gelée et constitue un considérable pergélisol. Une autre, l'hydrolithosphère inférieure, imbibée d'eau liquide les roches sous-jacentes et les rend plus ou moins plastiques. La limite actuelle, ou cryomarge, entre l'hydrolithosphère profonde et l'hydrolithosphère superficielle gelée se situe vers trois kilomètres de profondeur à l'équateur et à huit kilomètres au pôle, mais la couche gelée n'est pas parfaitement continue : elle manque sur une partie de la planète. Le fluage passé est responsable, en particulier, des ejecta, polylobés, franges boueuses des flancs de volcans et ce sont ces ejecta particuliers qui permettent de distinguer les parties de Mars pourvues d'hydrolithosphère et celles où celle-ci est absente ou en tout cas très lacunaire.

S'expliquent probablement aussi par une fusion du pergélisol, des reliefs chaotiques résultant d'un effondrement de la surface lors de la fusion, avec basculement en tous sens des blocs ainsi privés de leur support solide. Sur les versants des vallées, des glissements et des effondrements ont la même origine. Des champs de rides hautes de 50 à 400 m, longues de plusieurs centaines de kilomètres, subparallèles ou en réseau, résultent probablement d'un giclage de matière dégelée le long de fractures par lesquelles est monté un flux de chaleur interne.

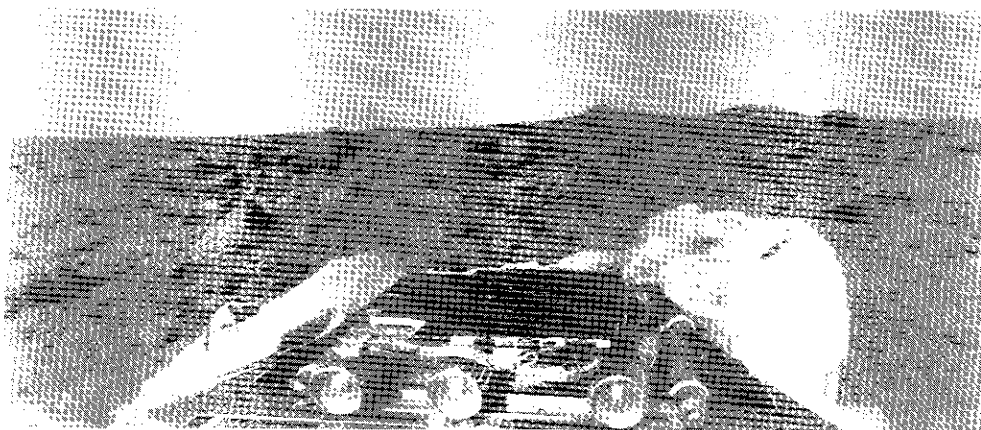
Les fusions de cryolithosphère<sup>9</sup>, parfois sous la forme d'irruptions d'eau artésienne sous pression, ont provoqué des éboulements liquides catastrophiques qui ont creusé des vallées larges de 10 km et plus, profondes de centaines de mètres, longues de plusieurs centaines de kilomètres : on les a appelées "outflow channels".

Mars

Pathfinder

Landing Site  
July 4, 1997

Image JPL  
NASA  
(Photothèque  
Planétaire d'Orsay)



Moins spectaculaires, des "chevelus" hydrographiques n'en ont pas moins laissé des traces étendues.

Il ne semble pas (mais on en discute encore) y avoir eu sur Mars de glaciers de type terrestre ; cependant l'hydrolithosphère a dû, à certaines époques, alimenter des masses superficielles de glace. On s'interroge sur l'origine des formes qui paraissent périglaciaires (polygones géants). Des calottes de glace, probablement composées de glace d'eau et de neige carbonique (dioxyde de carbone solide), recouvrent donc les pôles. Leur progression et récession suivent un cycle saisonnier, induit par la forte inclinaison ( $24^\circ$ ) de l'axe de rotation de la planète sur le plan orbital (très faiblement incliné ( $1^\circ 51'$ ) sur le plan de l'écliptique). Ainsi, la calotte du pôle sud, le plus proche du Soleil, disparaît peu à peu après chaque printemps, tandis que celle du pôle nord ne fond pas complètement.

Arès Vallis est une grande vallée de débâcle, longue de 1500 km, large de 25 km, profonde de plusieurs centaines de mètres. Mars Pathfinder s'est posé à l'embouchure d'Arès Vallis et de Tiu Vallis. Les données de Mars Pathfinder conforteraient ainsi l'hypothèse d'écoulements d'eau liqui-

de dans le passé martien plutôt que celle de la glace (car si Arès Vallis avait été creusée par un glacier, plutôt que par de l'eau liquide, les roches auraient été déposées dans n'importe quelle direction). Les vallées martiennes n'ont pas dû connaître non plus des écoulements prolongés car on ne trouve pas le moindre galet dans le lit d'Arès Vallis. En fait, on a beaucoup de mal à interpréter ce paysage martien, qui a été remodelé, bouleversé par des impacts météoritiques...

L'eau de Mars provient probablement de la condensation de celle de l'atmosphère primitive, lors du refroidissement de la surface ; c'est alors il y a 3,5 milliards d'années qu'ont dû se produire de grands écoulements, en une véritable période pluviale ; le refroidissement continuant, avec peut-être des récurrences tièdes faisant fondre le pergélisol, l'eau s'est fixée au pôle et dans le sol. Mais on ignore ce qu'est devenue l'eau des "outflow channels", et si leur écoulement s'est répété périodiquement. Par contre, il est clairement établi que l'écoulement s'est complètement arrêté depuis un milliard d'années.

Malgré les progrès, il faut se résoudre à plus d'ignorances géologiques que géomorphologiques.

#### Notes de la rédaction

1 - Une caldeira est un grand cratère volcanique, formé par l'effondrement de la partie supérieure du cône volcanique dans le vide laissé par certaines éruptions très intenses et rapides.

2 - Un fluage est une déformation lente que subit un matériau soumis à une contrainte permanente.

3 - Le type hawaïen est celui d'un volcan-bouclier, accumulation de laves basaltiques très fluides, édifiant des cônes à faibles pentes mais de diamètre atteignant plusieurs dizaines de km. Les éruptions et explosions sont minimes.

4 - Une cassure tectonique peut être symbolisée par une fracture ou /et par une faille et doit être distinguée de la fausse faille ou "faille panamienne", déchirure due à un affaissement.

5 - Un graben est un fossé d'effondrement tectonique.

6 - Un yardang est une butte allongée, haute parfois de plusieurs mètres, à profil longitudinal aérodynamique, que le vent creuse dans des roches meubles.

7 - Une barkhane est une dune en forme de croissant.

8 - Un erg est un vaste ensemble de dunes.

9 - La lithosphère est la partie rigide du sous-sol, l'hydrolithosphère contenant de l'eau liquide et la cryolithosphère de la glace.

*suite et fin dans le n°84* ■