

# ARTICLE DE FOND

## Le volcanisme des planètes telluriques (2)

Chloé Michaut, professeur à l'École Normale Supérieure de Lyon

Dans la première partie (CC166), Chloé Michaut nous avait expliqué le volcanisme sur la Terre et sur la Lune. Voici la suite de son article avec Mercure, Vénus et Mars.

### Mars

Mars présente une dichotomie topographique très marquée avec un hémisphère sud en moyenne plus haut de 5 à 6 km par rapport à l'hémisphère nord, couvert par des plaines de lave d'âge plus jeune de l'ordre de 3 Ga<sup>1</sup> contre un âge moyen de la surface supérieur à 3,5 Ga pour le sud. Entre les deux hémisphères, les reliefs géants des immenses volcans boucliers, appelés Mons, proches de l'équateur, se distinguent très nettement. Ils sont particulièrement hauts sur Mars (avec plus de 23 km de haut pour le géant du Système solaire Olympus Mons), car ils se sont construits pendant des milliards d'années sur une lithosphère immobile (au contraire de la Terre où le mouvement des plaques entraîne souvent la formation de chaînes de volcans comme à Hawaii).

1 3 giga-années soit 3 milliards d'années

L'origine de la dichotomie est encore très mystérieuse et plusieurs hypothèses ont été avancées : convection<sup>2</sup> de degré 1, tectonique des plaques dans les premiers temps de l'histoire de la planète ou encore impact géant ou nombreux impacts affectant l'hémisphère nord. Le relief de l'hémisphère sud est a priori compensé par une racine crustale épaisse ou par une densité crustale plus faible qu'au nord (ou un compromis des deux). Jusqu'à très récemment, on pensait la croûte martienne de nature homogène et de composition basaltique avec une masse volumique de l'ordre de 2 900 à 3 000 kg.m<sup>-3</sup>.

2 La convection dans le manteau martien serait telle qu'elle privilégierait un seul panache ascendant et un panache froid descendant (diamétralement opposé, dans l'autre hémisphère), générant une croûte plus importante au niveau du panache ascendant chaud où plus de fusion partielle peut avoir lieu.

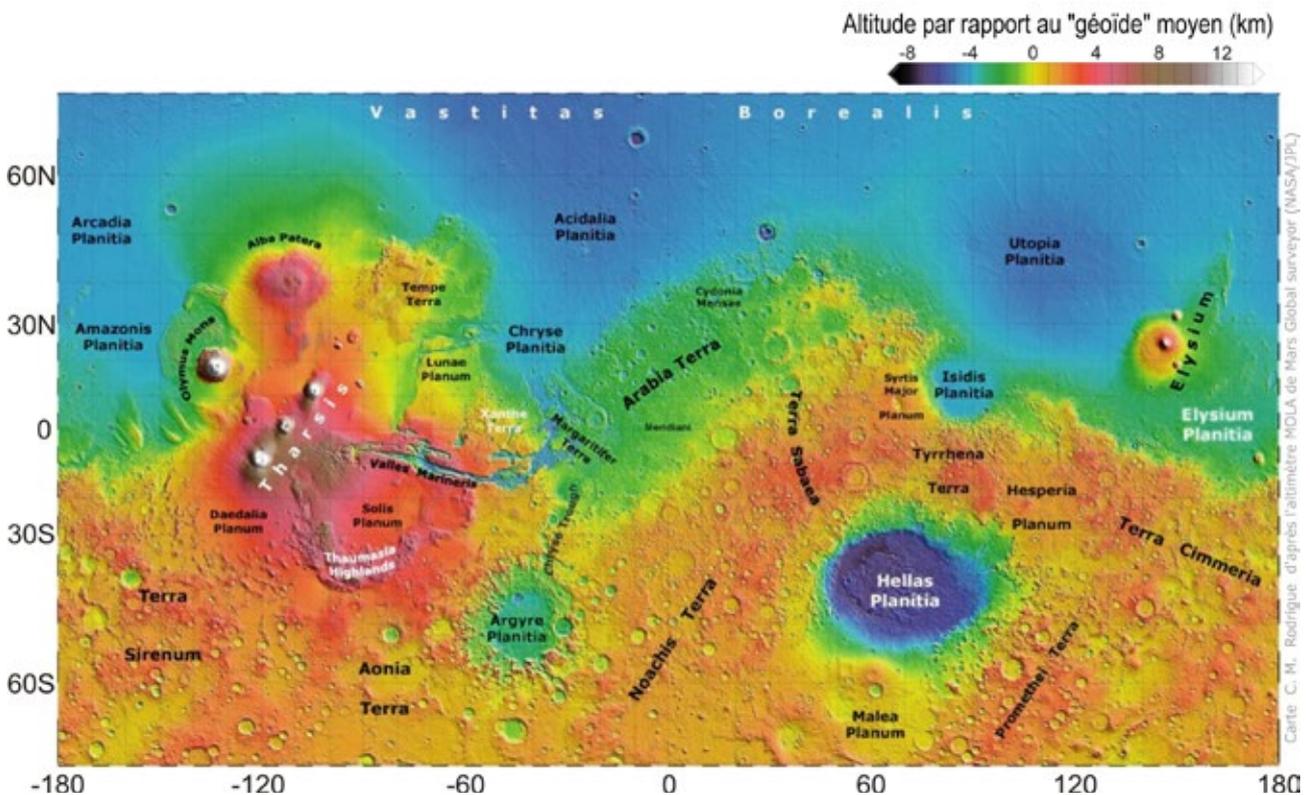


Fig.1. Dichotomie topographique et volcans géants sur Mars.

L'analyse par télédétection des compositions chimiques des laves permet de retracer leurs conditions de formation. Il apparaît que les compositions chimiques des laves formant les principales provinces magmatiques récentes, d'âge Amazonien (moins de 3 Ga), sont en bon accord avec une remontée directe depuis la zone de fusion mantellique jusqu'à la surface, sans phase de stockage au sein de la croûte. Le lent refroidissement du manteau au cours du temps et le progressif épaissement conjoint de la lithosphère immobile et stagnante en surface de Mars auraient conduit à des taux de fusion partielle de plus en plus faibles, et se produisant à des pressions de plus en plus importantes au cours du temps.

Les analyses récentes de densité à l'aide des données de topographie et de gravité ou encore les analyses de compositions en élément majeur des météorites martiennes recueillies sur Terre et des laves en surface pointent cependant vers des densités très importantes ( $3\,200 - 3\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) avec une densité potentiellement plus faible au sud, expliquant partiellement son plus haut relief. De plus, très récemment, ont été mises en évidence des roches de composition différenciée à la surface de Mars, en particulier au sein de cratères suggérant un caractère intrusif pour ces roches. Des anorthosites ont été identifiées par télédétection à l'aide du spectromètre CRISM et des granodiorites par spectrométrie in situ par le spectromètre laser ChemCam au sein du cratère Gale, toutes dans des zones très anciennes, d'âge Noachien (plus de 3,7 Ga). Ainsi, les anciens terrains de l'hémisphère sud pourraient contenir une part différenciée non négligeable.

L'épaisseur probablement importante de la croûte sud martienne a pu générer, durant le premier milliard d'années de l'histoire de Mars, de forts gradients thermiques qui ont pu conduire à la fusion

partielle de la partie profonde de cette croûte ou contribuer à la formation et la différenciation de réservoirs magmatiques. En effet, la croûte, produite par fusion partielle du manteau, concentre les éléments radioactifs car ce sont des éléments dits « incompatibles », c'est-à-dire qu'ils ont tendance à se concentrer dans les liquides lors d'une phase de fusion partielle.

La région des hauts plateaux correspondant aux anciennes structures noachiennes antérieures à la formation de Tharsis et d'Elysium présente un grand nombre de volcans centraux de 50 à 100 km de diamètre. De plus, en Arabia Terra, des cratères de forme irrégulière représentant un nouveau type d'édifice volcanique martien, semblent très similaires aux supervolcans terrestres. Ces anciennes structures éruptives sont associées à des dépôts faiblement consolidés à grains fins potentiellement issus d'éruptions pyroclastiques. La croûte martienne apparaît ainsi avec une nature duale : les dépôts volcaniques récents, formant l'essentiel de l'hémisphère nord, étant constitués de coulées de lave rigides et massives, alors que les hauts terrains anciens du Sud seraient au contraire constitués de matériaux volcaniques peu consolidés, potentiellement d'origine explosive. L'atmosphère de Mars étant ténue, sa pression de surface est faible et la teneur en volatils nécessaire à la fragmentation, i.e. à une éruption explosive, est là aussi plus faible que sur la Terre.

Finalement, comme sur la Lune, les cratères de quelques dizaines de km de diamètre semblent aussi, sur Mars, concentrer une certaine activité magmatique. On observe aussi sur Mars des cratères à sols fracturés, potentiellement dus à des intrusions magmatiques peu profondes, mais aussi des cratères remplis de lave (figure 2).

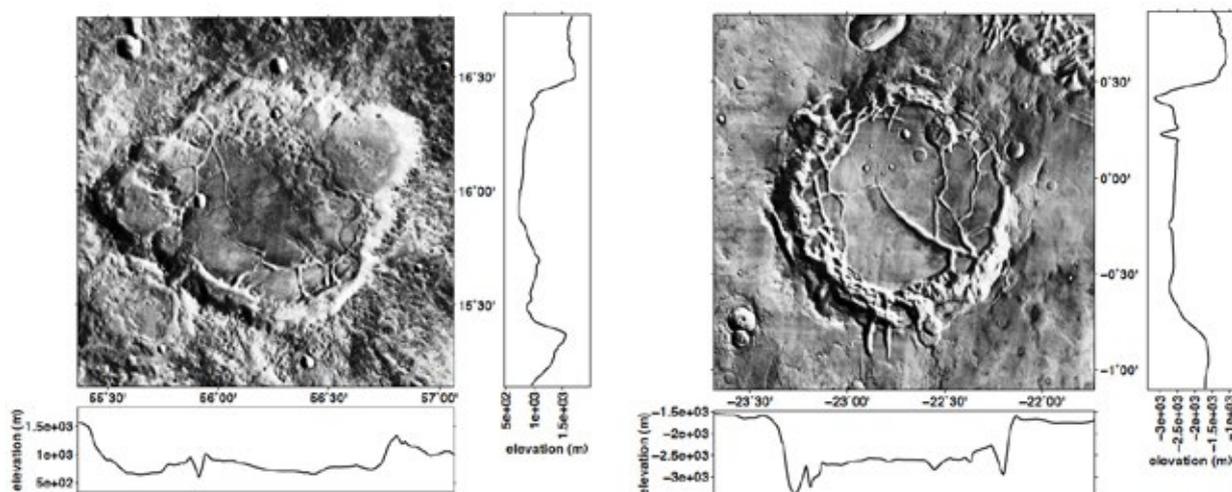


Fig.2. Un cratère à sol fracturé sur Mars (à gauche) et sur la Lune (à droite). (crédit D. Walwer).

## Vénus

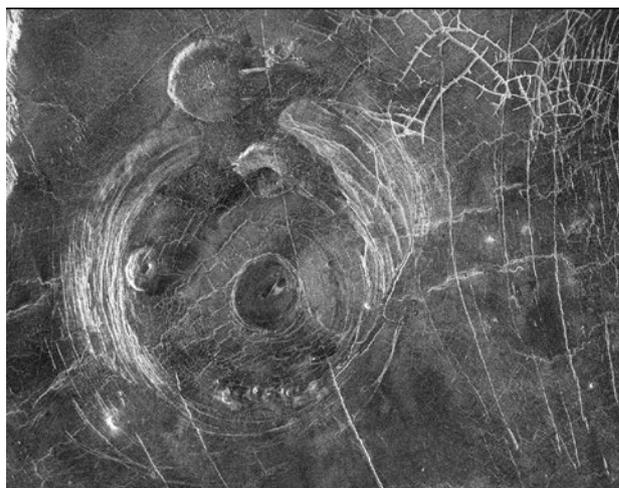
Vénus, parfois nommée sœur jumelle de la Terre, car de taille et de gravité comparables, reste une planète très mystérieuse. L'atmosphère très dense de Vénus, contenant 95 % de dioxyde de carbone, et ses nuages opaques d'acide sulfurique nous empêchent d'étudier avec précision la topographie et la composition de sa surface. Les conditions extrêmes qui règnent à la surface de Vénus, avec une pression moyenne de 9 MPa (près de 90 fois la pression sur Terre) et une température de 450 °C rendent toute mission spatiale fortement compliquée.

Les images de la surface de Vénus, obtenues par radar, font apparaître de grandes et basses plaines de lave, sans doute basaltique, et des plateaux plus déformés, de grands volcans boucliers et de nombreux volcans de tailles intermédiaires. Cependant, ces volcans ne sont pas alignés le long de limites de plaques tectoniques comme sur la Terre, et l'âge de la surface de Vénus semble plutôt homogène. Ceci suggère un événement de resurfaçage global il y a plusieurs centaines de millions d'années.

On observe aussi sur Vénus des coulées de lave très fluides mais surtout des objets volcano-tectoniques très curieux dont on cherche les équivalents terrestres, s'ils existent. On notera par exemple les « pancakes », ces dômes très plats et à pentes abruptes, qui semblent être des coulées de lave visqueuses (figure 3). Ils montrent cependant des dimensions bien plus grandes que les dômes de lave terrestres : leurs diamètres sont de plusieurs dizaines de kilomètres et leurs épaisseurs de plusieurs centaines de mètres, contre quelques kilomètres de diamètre et une centaine de mètres sur Terre.

Les coronae sont des objets volcano-tectoniques n'ayant apparemment pas d'équivalent direct sur Terre. Ces coronae sont des objets circulaires de tailles variables (allant de plusieurs dizaines à plus de mille kilomètres de diamètre) présentant des failles concentriques. Elles sont le plus souvent associées à un relief positif mais présentent parfois aussi des dépressions centrales. Elles sont souvent associées à des pancakes et des coulées de lave.

On les interprète comme le résultat de l'étalement, sous la lithosphère, et du refroidissement de « thermiques » mantelliques (blobs de matière chaude remontant par convection au sein du manteau). Ce modèle convient bien aux larges coronae mais peut être moins bien aux plus petites.



*Fig.3. Corona Aine, dans Aphrodite Terra, mesure environ 300 km de diamètre. On y trouve des dômes dits « pancakes » (au nord d'Aine Corona par exemple). Image radar de la sonde Magellan (Crédit NASA/JPL).*

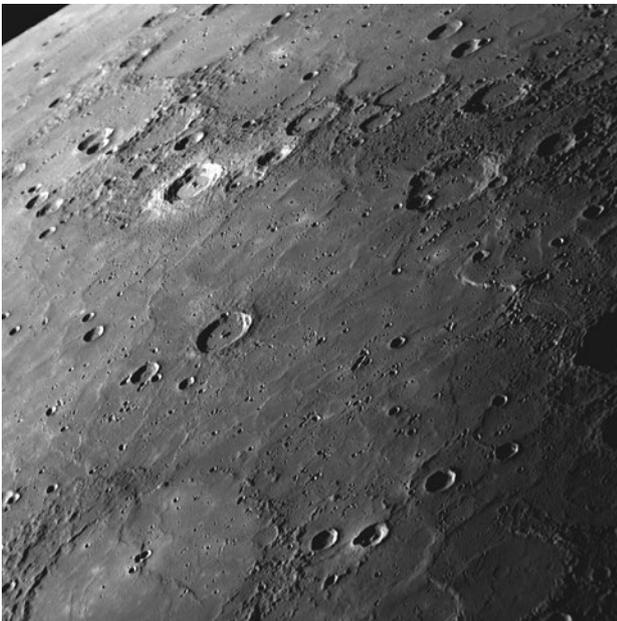
Les fortes températures et pressions de surface sur Vénus modifient probablement fortement le comportement des roches sous l'effet de contraintes (leur rhéologie), leur nature cassante et la profondeur de la limite entre les régions ductiles, se déformant lentement de manière fluide, et les régions cassantes. Or la rhéologie des roches et les conditions environnementales influent fortement sur le transport du magma au sein de la croûte et donc sur la forme des édifices et structures volcaniques. Par exemple, la forte pression de surface ne permet pas une décompression efficace de la phase gazeuse éventuellement présente au sein du magma, empêchant ainsi la fragmentation du magma. Il est très peu probable que des explosions volcaniques aient eu lieu dans de telles conditions, d'autant plus qu'il est probable que Vénus ait perdu toute son eau.

Des preuves indirectes d'une activité volcanique actuelle ont été obtenues. Les sondes Pioneer puis Vénus Express ont ainsi détecté des émissions transitoires de dioxyde de soufre dans l'atmosphère de Vénus (le SO<sub>2</sub> étant instable dans l'atmosphère) dont l'origine est probablement volcanique. Des zones transitoirement très chaudes ont aussi été identifiées grâce aux observations d'émissivité thermique de la caméra de Vénus Express, ce dans des régions en extension, qui sont attribuées à des coulées de lave. Il serait très étonnant que Vénus, étant donné sa taille importante et donc sa forte teneur en éléments producteurs de chaleur, ne présente pas d'activité volcanique actuelle, mais aucune de ces preuves n'apparaît complètement irréfutable et les prochaines missions sur Vénus tendront à chercher les traces de cette activité.

## Mercure

Mercure reste elle aussi une planète très peu étudiée. La mission Messenger (2011-2015) de la NASA a fait suite à presque 40 ans d'absence d'études de Mercure après la mission Mariner 10 (1973-1975). Cette mission a permis de révéler l'étonnante richesse en termes de volcanisme de Mercure, ce malgré sa petite taille et donc sa faible teneur en éléments radioactifs.

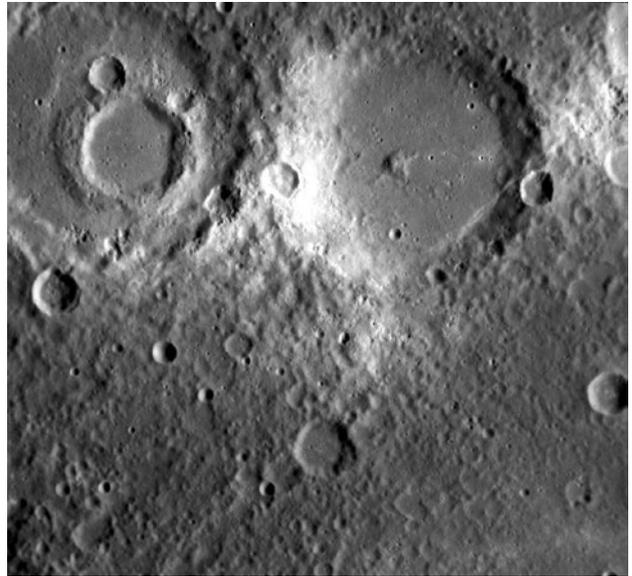
Tout comme les autres planètes, Mercure présente de grandes plaines de lave qui couvrent les hautes latitudes nord et occupent plus de 6 % de sa surface. Elles recouvrent et enterrent de nombreux cratères d'impact dont les tailles indiquent que ces plaines font plus d'un kilomètre d'épaisseur. Ces plaines de lave se sont sans doute déposées autour de 3,7 Ga et ce type de volcanisme effusif couvrant de vastes surfaces semble avoir cessé il y a 3,5 Ga.



*Fig.4. Cratère rempli de lave (en bas à gauche).  
(crédit NASA/Johns Hopkins University Applied Physics  
Laboratory/Carnegie Institution of Washington).*

Une surprenante découverte a été la présence de dépôts brillants à marges diffuses caractérisés par un spectre de réflectance dominé par la couleur rouge (figure 4). Ces dépôts, interprétés comme des dépôts pyroclastiques, sont associés à des dépressions irrégulières que l'on attribue aux événements ayant donné lieu à ces éruptions. 90 % de ces dépôts se situent au sein de cratères d'impact, ce qui montre une fois encore le lien entre cratérisation et ascension du magma. Ces dépôts sont beaucoup plus étendus que les dépôts pyroclastiques lunaires ce qui montrerait une richesse en volatils plus importante des magmas sur Mercure et donc de l'intérieur de la planète elle-

même. Ces dépôts pyroclastiques semblent aussi tardifs avec des âges estimés très récents allant jusqu'à 1 Ga, ce qui semble aller à l'encontre des modèles d'évolution thermique de Mercure qui prédisent un refroidissement très rapide et un volcanisme concentré durant le premier milliard d'années de la planète.



*Fig.5. Dépôts brillants à marge diffuse probablement d'origine  
pyroclastique sur Mercure. Image de la sonde Messenger.  
(crédit NASA Johns Hopkins University Applied Physics  
Laboratory/ Carnegie Institution of Washington).*

## Conclusion

L'étude du volcanisme des planètes permet d'apporter des contraintes sur la composition globale et l'évolution thermique des planètes telluriques. Les observations des dernières décennies réalisées par les différentes missions spatiales sur les planètes telluriques du Système solaire ont révélé des particularités inhérentes à chacune d'elles et qui posent autant de questions quant à ces spécificités. L'étude de ces planètes nous permet aussi de nous représenter les caractéristiques possibles du volcanisme précoce de notre Terre et de sa dynamique interne et d'imaginer les scénarios ayant pu conduire à la tectonique des plaques, trait si particulier à notre planète.

■