

ARTICLE DE FOND

Le cycle actuel de l'eau sur Mars

Thomas Appéré, enseignant de physique-chimie au lycée St Paul (Vannes), docteur en planétologie et chercheur affilié à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

Mars a beaucoup de points communs avec la Terre : des saisons, des calottes polaires, de l'eau... Thomas Appéré, qui a soutenu sa thèse sur ce sujet nous présente l'état actuel de l'eau sur Mars.

Lorsque pour la première fois des astronautes ont contemplé la Terre depuis l'espace, ils l'ont surnommée la « planète bleue » : 70 % de sa surface est recouverte par des océans. L'hydrosphère terrestre comprend également les glaciers et calottes polaires, les fleuves et étendues d'eau continentales et souterraines ainsi que les nuages et la vapeur d'eau atmosphérique. Le parcours de l'eau entre ces réservoirs gazeux, liquide et solide se nomme le cycle de l'eau. L'énergie solaire est le moteur principal de ce cycle car il permet l'évaporation de l'eau liquide en vapeur d'eau, entraînant tous les autres échanges.

Mars, au contraire, est une planète désertique et très aride, où il règne une température de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en moyenne. L'eau en surface n'est stable qu'à l'état solide et uniquement dans les régions polaires ; on y trouve des calottes, réservoirs de glace d'eau de 3 kilomètres d'épaisseur et de 1 000 kilomètres de diamètre. Pourtant, les terrains les plus anciens de Mars portent les traces de la présence d'eau liquide dans un lointain passé : vallées fluviales asséchées, sédiments lacustres, deltas, minéraux issus de l'altération du sol par de l'eau liquide. L'intérieur des calottes polaires est un millefeuille de glace et de poussière, témoin de variations climatiques importantes dans un passé plus récent.

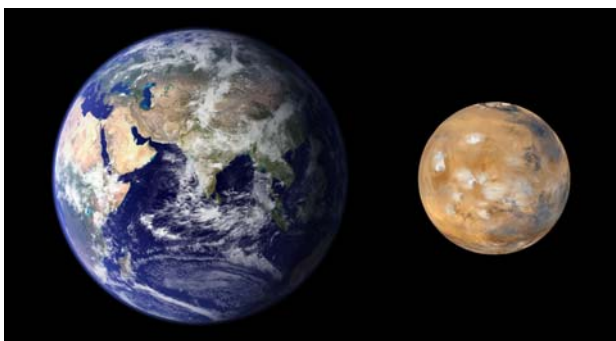


Fig.1. La Terre et Mars représentées à la même échelle. (Crédits : gauche : NASA; droite : NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Comprendre comment l'hydrosphère martienne a évolué pour aboutir à son état actuel est au centre des problématiques scientifiques concernant la

planète rouge. Cette question oriente très largement les programmes d'exploration des différentes agences spatiales. L'étude du climat actuel de Mars a pour objectif une meilleure compréhension de ses climats passés.

Le climat actuel de Mars

Un astronaute arrivant sur Mars ne serait pas trop dépaysé : le paysage ressemble à s'y méprendre au désert du Colorado, à l'exception de la couleur orangée du ciel due à la présence permanente de poussière en suspension. Certes, il ne devra pas quitter sa combinaison : l'atmosphère martienne est essentiellement composée de dioxyde de carbone CO_2 et la pression de l'air est 100 fois plus faible que sur Terre. Mais la durée du jour est quasiment la même (24 heures et 40 minutes) et l'année martienne, longue de 669 jours martiens (sols), est découpée en quatre saisons. Si l'après-midi aux tropiques, la température peut monter à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle chute dès la nuit suivante jusqu'à $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. En fait, le sol martien, sec et granuleux, ne retient pas efficacement la chaleur. Son inertie thermique est très faible comparée à la Terre et à ses océans. Les variations thermiques entre le jour et la nuit sont amplifiées par la finesse de l'atmosphère. Ainsi, le climat martien est qualifié d'« hypercontinental ».

Le cycle saisonnier du CO_2

Alors que sur Terre seule la vapeur d'eau peut se transformer en glace, les conditions martiennes de pression et de température permettent à la fois au dioxyde de carbone CO_2 et à l'eau H_2O de passer de l'état gazeux à l'état solide. Ainsi, lorsque la température baisse en automne et en hiver, le CO_2 atmosphérique se condense à la surface en un manteau de neige et de glace carbonique allant du pôle jusqu'à environ 50° de latitude (voir figure 2). Au printemps, l'augmentation de l'ensoleillement permet la sublimation de la glace carbonique, c'est-à-dire son passage direct de l'état solide à l'état gazeux : le CO_2 solide retourne dans l'atmosphère.

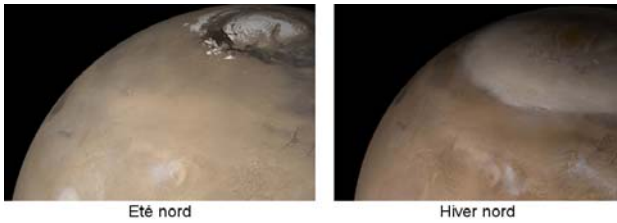


Fig.2. La calotte polaire nord de Mars, composée de glace d'eau, se recouvre en automne et en hiver d'un manteau brillant de glace carbonique. Sur l'image de droite, on parvient à distinguer la calotte polaire nord à travers la glace saisonnière (Crédits : NASA/JPL-Caltech /MSSS).

L'extension puis le retrait de cette couverture de glace carbonique, alternativement dans les hémisphères nord et sud, constitue l'aspect le plus visible du cycle saisonnier martien. De fait, il a été observé dès 1784 par l'astronome d'origine allemande William Herschel. Il décrit minutieusement les variations saisonnières de ces dépôts brillants et supposa qu'ils étaient composés de neige et de glace d'eau. Il fallut attendre les années 1960 pour comprendre la nature exacte des glaces saisonnières martiennes, à savoir de la glace de CO₂ et non de la glace d'eau. Les mesures effectuées en 1965 par la sonde Mariner 4 permirent d'abord d'identifier le dioxyde de carbone comme le principal composant de l'atmosphère martienne.

Puis la sonde Mariner 7 mesura la température des glaces saisonnières, -125 °C, la température de la glace de CO₂ en équilibre avec son gaz à la pression atmosphérique martienne.

Dans les années 1970, les atterrisseurs Viking 1 et 2 révélèrent que la pression de l'air varie périodiquement en fonction des saisons, ces variations atteignant 30 % (contre 5 % sur Terre). Elles témoignent du cycle de condensation/sublimation de l'atmosphère de CO₂ alternativement dans l'hémisphère nord puis l'hémisphère sud. Ce phénomène engendre un flux de CO₂ entre les deux hémisphères, qui contribue significativement à la circulation atmosphérique martienne. C'est un processus sans équivalent sur Terre mais on le retrouve sur Triton, le plus gros satellite de Neptune, où l'atmosphère de diazote N₂ se condense à la surface puis se sublime en fonction des saisons. Le même processus se déroule probablement sur Pluton ; nous en aurons confirmation le 14 juillet prochain, lorsque la sonde New Horizons survolera la planète naine.

Le cycle saisonnier de H₂O

Bien que la vapeur d'eau ne soit présente qu'à l'état de traces dans l'atmosphère martienne, elle est au cœur d'un véritable cycle saisonnier. La figure 3 montre le contenu en vapeur d'eau dans

l'atmosphère de Mars en fonction de la latitude et de la date. On constate de fortes variations selon le lieu et la saison.

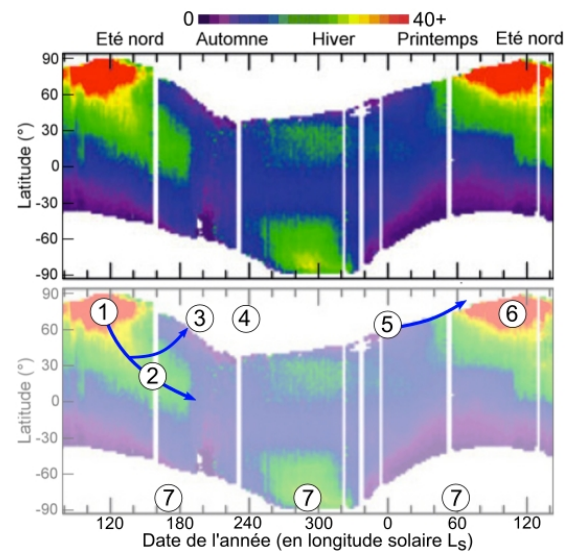


Fig.3. Quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars mesurée par le spectromètre TES à bord de la sonde Mars Global Surveyor. La quantité de vapeur d'eau est représentée en fonction de la latitude et de la date et exprimée en micromètres précipitables (épaisseur de la couche d'eau formée si toute l'eau de l'atmosphère précipitait à la surface). Chaque bande verticale de mesures correspond à une moyenne sur toutes les longitudes à un instant donné. Les zones blanches indiquent l'absence de mesures, généralement lorsque la surface est recouverte par les dépôts saisonniers de glace carbonique (d'après Smith, 2008).

Tout commence en été au pôle Nord (fig. 3 point 1). La calotte polaire nord, immense glacier composé d'eau et de poussières, est chauffée par les rayons du Soleil. Cela entraîne la sublimation de la surface glacée en vapeur d'eau. Ainsi, chaque été, la région polaire nord devient pour quelques mois une source de vapeur d'eau que la circulation atmosphérique entraîne vers les basses latitudes (fig. 3 point 2). La quantité d'eau impliquée est faible : si on précipitait à la surface toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère martienne, on obtiendrait une couche d'eau de 75 micromètres tout au plus. Malgré la faible teneur en eau dans l'atmosphère, la saturation est vite atteinte du fait des basses températures : il se forme des nuages. On en observe toute une variété : une ceinture de nuages à l'équateur, près des grands volcans martiens, des brumes nocturnes et matinales au fond des canyons et d'épais nuages troposphériques aux hautes latitudes.

En automne, lorsque la température de la surface diminue progressivement, du givre d'eau se condense sur la calotte polaire nord et se sublime pendant la journée. Puis lorsque le Soleil est suffisamment bas sur l'horizon, le givre d'eau persiste toute la journée et s'étend aux plaines alentours (fig. 3 point 3). Les atterrisseurs Viking 2

et Phoenix, posés respectivement par 48° et 68° de latitude nord, ont été les témoins privilégiés de la formation de ce givre (voir fig. 4 a). Son épaisseur a été estimée entre 10 micromètres au Soleil et 200 micromètres à l'ombre des rochers. Une partie de ce givre se diffuse dans les premières couches de la surface : une fine couche de sol gelé pourrait alors se former, la glace liant les grains du sol entre eux.

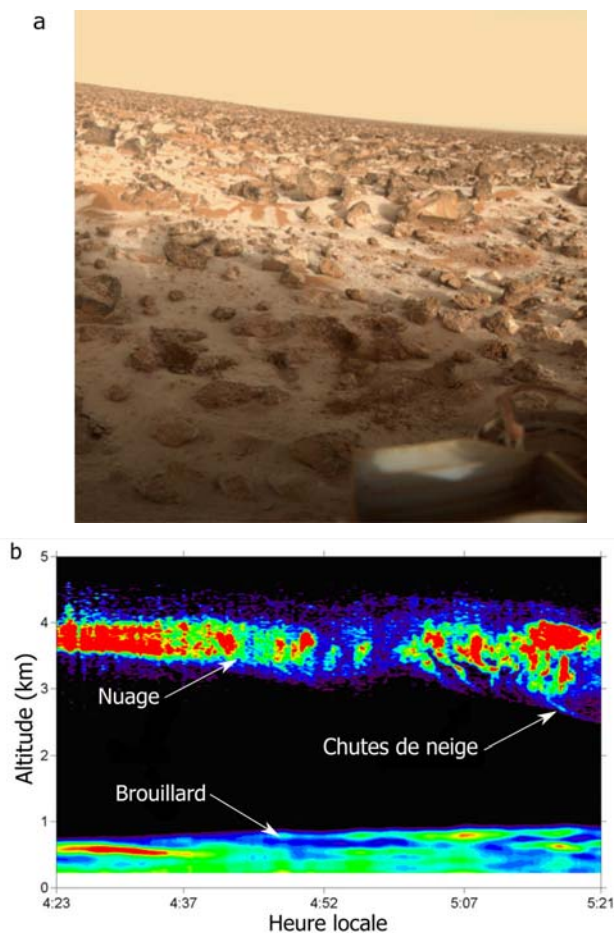


Fig.4. a. Le site d'atterrissage de Viking 2 recouvert d'une fine couche de givre d'eau en hiver (crédit : NASA/JPL).
b. Mesures effectuées par le lidar de l'atterrisseur Phoenix : un rayon laser est émis vers le ciel, se réfléchit sur les particules de glace d'eau en suspension et est capté à son retour par la sonde. Les couleurs indiquent la densité de particules, du violet au rouge. Ces mesures montrent la présence de nuages, de brouillard près du sol et de chutes de neige (d'après Daerden et al., 2010).

La condensation de ce givre d'eau s'accompagne de la formation de brouillard dans les premières centaines de mètres au-dessus de la surface. Une couche de nuages surplombe ce brouillard et donne lieu à la précipitation de cristaux de glace d'eau de quelques dizaines de micromètres de diamètre, similaires aux cristaux composant les cirrus terrestres (voir figure 4 b).

Lorsque l'hiver arrive, la température de la surface descend sous le point de condensation du CO₂, aux

alentours de -125 °C¹. La glace de CO₂ se condense alors à la surface selon un cycle journalier de condensation et de sublimation (figure 3 point 4), piégeant de la glace d'eau et des poussières en faibles proportions (quelques dix-millièmes de fraction massique). Dans les régions plongées dans la nuit polaire, la condensation du CO₂ est continue et produit une couche de glace carbonique atteignant 1 mètre d'épaisseur au pôle, voire 2 mètres localement. L'épaisseur de ce manteau glacé décroît avec la latitude jusqu'à la limite de condensation du CO₂ vers 50° de latitude nord. C'est la condensation de cette énorme masse de glace de CO₂ (jusqu'à 6 000 milliards de tonnes !) qui conduit à l'effondrement périodique de la pression atmosphérique martienne.

Puisque sur Mars, la température de condensation de la glace de H₂O est supérieure à celle de la glace de CO₂, la glace d'eau peut s'étendre à plus basse latitude que la glace carbonique. Ainsi, un anneau composé d'une fine couche de givre d'eau entoure les dépôts saisonniers riches en CO₂, jusqu'à 44° de latitude nord². Le site d'atterrissage de Viking 2 est compris dans cet anneau car la sonde n'a pas pu observer la formation de glace carbonique à la surface.

Lorsque le Soleil refait son apparition au printemps, les glaces saisonnières de CO₂ et de H₂O se subliment (figure 3 point 5). L'anneau de glace d'eau suit la limite des condensats de glace carbonique lors de leur recul. La sublimation de la glace d'eau contenue dans cet anneau est la principale source de vapeur d'eau dans l'atmosphère au printemps. Une partie de cette vapeur d'eau est entraînée vers le nord par la circulation atmosphérique et se recondense sur le manteau de glace carbonique. Par étapes successives de sublimation, transport atmosphérique et recondensation, la glace d'eau saisonnière rejoint ainsi la calotte permanente nord. Lorsqu'à la fin du printemps, toute la glace saisonnière de CO₂ s'est sublimée de la calotte, celle-ci se réchauffe, se sublime et injecte à nouveau une importante quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère (figure 3 point 6). Le cycle de l'eau est bouclé... ou presque ! Car la question

¹ Sur Mars, la glace de H₂O se forme lorsque la température atteint environ -70 °C alors qu'il faut que la température descende à -125 °C pour que la glace de CO₂ se condense.

² Les glaces de CO₂ et H₂O sont toutes les deux blanches dans le domaine visible du spectre électromagnétique : il n'est pas possible de les distinguer à ces longueurs d'onde. Ce sont les mesures effectuées dans l'infrarouge proche par le spectromètre imageur OMEGA (Mars Express) qui ont permis de faire la distinction et de confirmer la présence de cet anneau de glace d'eau.

essentielle pour comprendre l'impact climatique de ce cycle est de quantifier les échanges nets entre les différents réservoirs d'eau : calottes polaires, glaces saisonnières, vapeur d'eau atmosphérique, nuages, sous-sol gelé et poussières minérales hydratées en surface. En particulier, le bilan annuel des calottes polaires nord et sud est-il positif ou non, c'est-à-dire ces calottes sont en accumulation ou en ablation ? La réponse tient à une fraction de millimètres d'épaisseur par an, extrêmement difficile à mesurer directement à l'échelle des missions spatiales. Cependant, ce bilan est primordial pour comprendre comment les calottes polaires de Mars se sont formées au cours de cycles climatiques de centaines de milliers à plusieurs millions d'années.

Les calottes polaires de Mars

À l'image de l'Antarctique et du Groenland, les calottes polaires martiennes sont le résultat de l'accumulation de glace d'eau déposée chaque année au cours des temps géologiques (voir figure 5). Ces calottes sont dites permanentes, par opposition aux dépôts saisonniers décrits précédemment. Les sondages radar effectués par l'instrument MARSIS à bord de Mars Express ont permis d'estimer l'épaisseur et l'étendue de ces édifices glaciaires. La calotte permanente nord a une épaisseur maximale de 3 kilomètres, un diamètre de l'ordre de 1 000 kilomètres et est âgée de quelques centaines de milliers d'années. La calotte permanente sud est beaucoup plus âgée, environ 10 millions d'années. Son épaisseur et sa superficie sont comparables à celles de son homologue nord. L'intérieur des calottes polaires est une succession de couches de glace d'eau plus ou moins riches en poussières, ce qui en fait de précieuses archives climatiques. Ces couches peuvent être observées directement le long des vallées qui entaillent les calottes mais aussi grâce aux ondes radar.

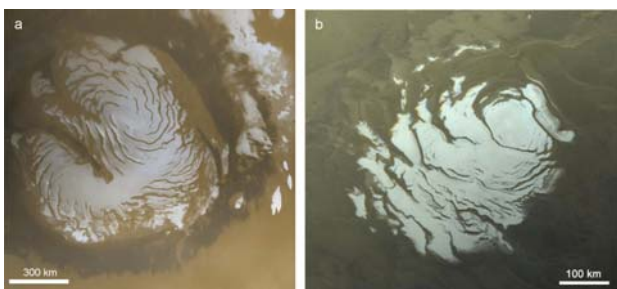


Fig.5.a. La calotte permanente nord de Mars, d'un diamètre d'environ 1000 kilomètres. **b.** : La calotte permanente sud a un diamètre équivalent mais la moitié est recouverte par de la poussière (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Si les calottes permanentes nord et sud sont finalement assez similaires, la calotte sud a toutefois une

particularité : sa surface est recouverte d'une couche résiduelle de glace de CO₂ pure d'une dizaine de mètres d'épaisseur, présente tout au long de l'année martienne. Cette couche est percée par une multitude de dépressions circulaires dont le fond laisse apparaître la calotte résiduelle de glace d'eau (voir figure 6). On a donné le nom de « fromage suisse » à cette texture si particulière. Chaque année, les trous s'agrandissent comme un bon fromage affiné en cave !



Fig.6. La texture en « fromage suisse » de la calotte permanente sud photographiée par la caméra HiRISE à bord de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. La couche résiduelle de glace carbonique correspond au terrain relativement lisse. La glace d'eau affleure au fond des dépressions (Crédits : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona).

Pourquoi cette couche résiduelle de glace de CO₂ n'est-elle présente qu'au sud ? Parce que l'excentricité actuelle de l'orbite martienne induit un hiver plus long dans l'hémisphère sud, permettant à une quantité plus grande de glace carbonique de s'y déposer. L'été austral est plus chaud que l'été boréal mais également plus court, si bien que la glace de CO₂ parvient à persister toute l'année.

Cette couche résiduelle de glace carbonique joue un rôle particulièrement important dans le cycle actuel de l'eau sur Mars. En effet, sa température y est constamment maintenue à -125 °C, été comme hiver. Elle constitue donc un piège glacé pour la vapeur d'eau et assèche l'hémisphère sud, deux fois plus sec que l'hémisphère nord (voir fig. 3 point 7). Sur le long terme, le cycle de l'eau sur Mars semble donc se résumer à un transport unidirectionnel d'eau de la calotte polaire nord à la calotte polaire sud. Une telle dynamique n'a pu exister tout au long de l'histoire martienne, car la réserve d'eau du pôle Nord serait déjà épuisée. Il est donc fort probable que, par le passé, le cycle a fonctionné en sens inverse. D'ailleurs, des calculs prévoient que l'excentricité de l'orbite martienne fluctue périodiquement tous les 25 000 ans environ. On peut donc envisager qu'il y a quelques dizaines de milliers d'années, la situation était inverse : une calotte polaire boréale recouverte d'une couche résiduelle de glace carbonique et une calotte australe source de vapeur d'eau.

De l'eau en surface et en sous-sol

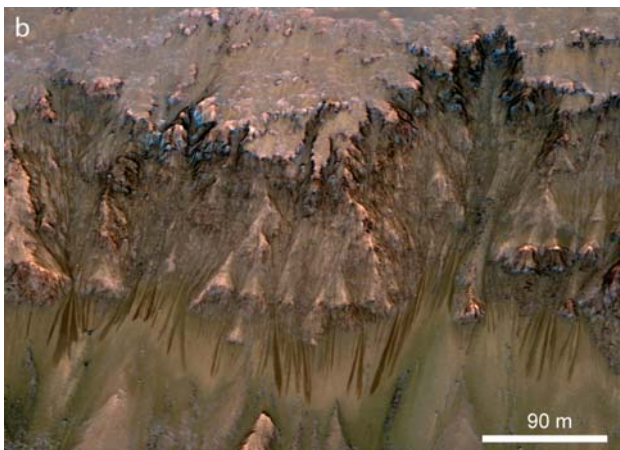
Il existe d'autres réservoirs d'eau sur Mars. L'eau peut être adsorbée sur certains minéraux, c'est-à-dire que des molécules d'eau sont collées à leur surface. Ces molécules participent au cycle de l'eau par des échanges entre la surface et l'atmosphère.

De plus, de la glace d'eau est présente en abondance dans le sous-sol de Mars aux hautes et moyennes latitudes. L'atterrisseur Phœnix a confirmé la présence de ce pergélisol en découvrant de la glace d'eau quasiment pure sous quelques centimètres de sable (figure 7 a). Les instruments radar ont montré que le pergélisol s'étend sur au moins 60 mètres sous la surface et descend jusqu'à 45° de latitude dans l'hémisphère nord. Ce réservoir pourrait contribuer de façon secondaire au cycle de l'eau.



Fig.7. a Une tranchée creusée par Phœnix a révélé la présence de glace d'eau quasiment pure sous environ 7 cm de sable.

b Ces intrigantes traînées sombres sur le rempart du cratère Newton seraient dues à l'écoulement d'eau liquide très salée (Crédits : NASA/JPL-Caltech /University of Arizona).



On a également observé récemment des écoulements sombres sur des pentes chauffées par le Soleil en été, où la température peut atteindre 27 °C (figure 7 b). A l'heure actuelle, le meilleur candidat pour expliquer ce phénomène est un écoulement d'eau très salée : une saumure de sulfate de fer ou de perchlorate de calcium. Une telle solution peut rester liquide jusqu'aux alentours de -68 °C avant de s'évaporer. Mars n'a pas fini de nous surprendre !

Variations climatiques

Le cycle de l'eau et plus généralement le climat martien ont été très différents dans le passé. En effet, les géologues ont découvert les empreintes laissées par d'immenses glaciers jusque sous les tropiques, sur les flancs ouest des grands volcans martiens tel Olympus Mons. Parfois la glace paraît avoir disparu, mais des traces de raclage comparables à celles observées au fond des anciennes vallées glaciaires terrestres suggèrent que la surface a été érodée par le fluage d'une couche de glace d'environ un kilomètre d'épaisseur. Dans d'autres régions, la glace est encore présente sous une épaisse couche isolante de sédiments qui stopperait sa sublimation. Mars a donc connu des ères glaciaires il y a quelques dizaines de millions d'années.

Comment des glaciers ont-ils pu se former dans des régions aussi arides ? Les cycles astronomiques, et notamment celui de l'obliquité, semblent être responsables de ces changements drastiques du climat martien. L'obliquité est l'inclinaison de l'axe de rotation d'une planète avec le plan de son orbite. Les oscillations de l'obliquité terrestre sont minimes car notre planète est stabilisée par la Lune. Pourtant, elles ont joué un rôle important dans l'apparition des périodes glaciaires. Concernant Mars, des calculs ont montré que son obliquité oscille de manière chaotique, atteignant jusqu'à 60° ! Lorsque l'obliquité est supérieure à 40°, l'insolation dans les régions polaires est plus forte aux pôles qu'à l'équateur et les glaces sont plus stables dans les zones froides équatoriales. Le chauffage de la calotte polaire nord libère de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère, induisant un cycle de l'eau plus actif que celui qu'on observe aujourd'hui. La couverture nuageuse augmente considérablement tandis que la neige et la glace s'accumulent à l'équateur, formant des glaciers. Ces édifices glaciaires, recouverts d'une importante couche de poussière protectrice, ont pu persister jusqu'à aujourd'hui.

Dans un passé plus lointain, il y a plus de trois milliards d'années, l'eau liquide était abondante à la surface de Mars. Comme l'a révélé récemment le rover Curiosity, la planète Mars était habitable à cette époque reculée, c'est-à-dire qu'elle réunissait les conditions environnementales pour permettre à une activité biologique de se développer. Ces conditions étaient-elles intermittentes ou bien stables ? Ont-elles permis à la vie d'apparaître ? Si oui, la vie a-t-elle pu se maintenir jusqu'à aujourd'hui ? Autant de questions qui restent en suspens et n'en rendent Mars que plus passionnante.