

MARS UNE PLANÈTE AUX MULTIPLES CLIMATS

François Forget

Planétologue au CNRS, Institut Pierre Simon Laplace (LMD), forget@lmd.ipsl.fr

L'évolution du climat sur Mars constitue une profonde énigme actuellement non résolue malgré les nombreux scénarios envisagés. La planète jeune renfermait de vastes quantités d'eau, qu'est-elle devenue ? Mars est une planète extrêmement riche d'enseignements pour comprendre les variations climatiques.

Mars aujourd'hui : un monde froid et aride

La planète Mars que nous explorons de nos jours ressemble à une petite Terre désertique. Certes l'atmosphère est essentiellement composée de dioxyde de carbone et la pression de l'air cent fois moindre. Mais à ces « détails » près, nous ne sommes pas trop dépaysés : la durée du jour est quasiment la même (24 heures et 40 minutes) et même si l'année dure presque 669 jours martiens, on retrouve un cycle de quatre saisons comparable à celui de la Terre. La circulation atmosphérique est ainsi régie par les mêmes processus que sur Terre : des alizés et des vents de mousson sous les tropiques, des dépressions et des anticyclones aux moyennes latitudes, etc.

Par un bel après-midi d'été, on trouve généralement à la surface des conditions clémentes : 20 °C, une douce brise. Cependant, l'illusion est de courte durée. Dès la nuit suivante, dans le désert martien, la température chute par dizaines de degrés. Des conditions glaciales, jusqu'à -100 °C, règnent jusqu'au lendemain matin. Sur ce monde froid, climat et météorologie sont avant tout marqués par les tempêtes de poussières soulevées par les vents et qui colorent le ciel en orange. Au-delà de 50° de latitude (l'équivalent du nord de la France), l'année est rythmée par l'accumulation d'une couche de glace de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur en automne et en hiver et qui se retire au cours du printemps. Il s'agit de glace carbonique, formée par la condensation de l'atmosphère elle-même lorsque la température devient inférieure à environ -130 °C dans la nuit polaire.

Certaines années, lors du printemps ou de l'été austral, Mars prend parfois un visage étonnant à l'occasion d'un événement météorologique unique dans tout le Système solaire : une tempête de poussière à l'échelle planétaire. En quelques jours, et durant plusieurs mois, la poussière masque quasiment la totalité de la surface. La première tempête globale de ce type a été observée en 1956. Cette année-là, Mars était exceptionnellement près de la Terre. Les astronomes furent surpris et déçus car la poussière

voilait presque tout. « Mars était aussi intéressante qu'une balle de base-ball, sans les coutures », écrira plus tard le gourou de l'astronomie américaine, Carl Sagan. Depuis, l'événement a été rarement observé. Les trois dernières tempêtes « globales » remontent à 2001, 2007, et 2018.

Les météorologues martiens ont une théorie pour expliquer pourquoi la météorologie martienne peut exploser de la sorte. Lorsque le vent soulève les poussières, celles-ci chauffent l'atmosphère en absorbant les rayons du Soleil. Cela renforce les contrastes de température et donc les vents et le soulèvement des poussières. Ainsi le système s'emballé parfois. Cependant, nul ne comprend vraiment pourquoi les tempêtes globales ont lieu certaines années mais pas d'autres...

Et l'eau dans tout cela ? Elle est présente en grande quantité sous forme solide. L'eau est surtout visible au pôle Nord, où de la glace relativement pure et blanche est directement exposée à la surface sur une région de plus de 1 000 km de diamètre. En été, le Soleil chauffe la surface glacée. La glace se sublime directement dans l'atmosphère où la circulation atmosphérique la transporte vers d'autres latitudes. La quantité d'eau impliquée est faible : si l'on précipitait entièrement le contenu en eau de l'atmosphère martienne sur la surface, on obtiendrait tout au plus une couche de glace de quelques dizaines de micromètres dans les régions les plus « humides ». Néanmoins la saturation est vite atteinte du fait des basses températures. Dans de nombreuses régions il se forme des nuages, des brumes et, en surface, du givre. Ce givre ne dépasse jamais un millimètre d'épaisseur et ne perdure au plus que quelques semaines avant de se sublimer et disparaître en été : à la surface de Mars, la glace n'est stable qu'aux pôles.

Dans ce contexte, l'eau ne peut exister à l'état liquide à la surface de Mars. Certes la température peut être positive et la pression localement compatible avec l'eau liquide (pression supérieure à celle du « point triple » de l'eau à 6.1 mbar). Cependant, lorsque l'on atteint ces conditions toute eau présente sera déjà passée sous forme vapeur. Si



Fig.1. La planète Mars, un monde aride au sol parfois couvert de glace de CO_2 et de givre d'eau, mais où l'eau liquide n'est jamais présente en surface (première image de la sonde Hope des Émirats Arabes Unis, acquise en février 2021) Crédits : MBRSC.

on crée artificiellement une flaque d'eau liquide, elle ne pourra que s'évaporer rapidement. Est-ce que cela a toujours été le cas ? Les archives géologiques acquises et analysées au cours de nombreuses missions spatiales montrent que non, que Mars a pu être autrefois couverte de glace, et même propice à l'eau liquide et à la vie.

Des ères glaciaires martiennes

Alors que Mars est aujourd'hui aride et désertique, les géologues ont découvert dans de nombreuses régions des traces indiscutables de glaciers : des moraines, des stries et des marques de fluages apparemment formées il y a seulement quelques dizaines de millions d'années, parfois quelques centaines de milliers d'années. Des sondages radar et l'utilisation de « spectromètre à neutron » (sensible à la présence de glace dans le proche sous-sol) ont confirmé qu'une bonne part de la planète est couverte de restes de glaciers, témoins d'ères glaciaires aussi spectaculaires que récentes aux échelles géologiques. Comment cela a-t-il été possible ?

Sur la Terre, les oscillations de l'obliquité, pourtant minimes ($\pm 1,3^\circ$), ont joué un rôle important dans l'apparition des périodes glaciaires. Pour Mars, des calculs réalisés par le français Jacques Laskar ont montré que l'obliquité oscillait de $\pm 10^\circ$ tous les 10 000 ans, et surtout que sa valeur moyenne subissait une lente évolution erratique sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années. Au total, l'obliquité a pu varier entre zéro et plus de soixante degrés ! Qu'a-t-il alors pu se passer sur Mars ? La modélisation numérique des climats, éclairés par l'analyse de la géologie, apporte des réponses. Si on fait l'expérience informatique d'incliner Mars au-delà de 25° (la valeur actuelle de l'obliquité), les régions polaires

sont tournées vers le Soleil en été et chauffent fortement. Cela entraîne la sublimation la glace carbonique présente sous le pôle Sud où un réservoir équivalent à toute l'atmosphère actuelle a été découvert par radar en 2011. Ainsi la pression atmosphérique a pu doubler dans un passé récent. Au pôle Nord le chauffage de la glace d'eau libère de grandes quantités de vapeur dans l'atmosphère et la couverture nuageuse augmente considérablement, contribuant probablement à un effet de serre. Au-delà de 30° à 40° d'obliquité, la glace et la neige s'accablent pour former un manteau de glace aux moyennes latitudes et des glaciers sur les flancs des montagnes sous les tropiques. Des traces de glaciers ont d'ailleurs été retrouvées à ces endroits sous formes de moraines et de dépôts de glace enterrés. Tout indique donc que Mars à haute obliquité se présente comme une planète blanche, en partie couverte d'un épais manteau de glace d'eau, et entourée de nuages denses.

À l'inverse, lorsque l'axe de rotation de Mars est redressé et que l'obliquité approche de 0° , l'atmosphère de CO_2 se condense dans les régions polaires. Sur les faces à l'ombre des montagnes de l'arctique martien, on trouve d'ailleurs d'étranges moraines formées par d'anciens glaciers très fluides, probablement composés de glace carbonique. Lorsque tout le CO_2 était piégé sous forme de glace, l'atmosphère de Mars devait être vingt fois plus fine qu'aujourd'hui et essentiellement composée d'azote et d'argon. La surface de Mars était alors pétrifiée et immobile, sous un ciel noir même en plein jour.



Fig.2. Le printemps dans la région polaire nord. Les hautes latitudes sont couvertes de neige carbonique condensée pendant la nuit polaire qui a précédé. Comme sur Terre, les contrastes de températures entre le pôle et les tropiques sont à l'origine de dépression et de tempêtes qui soulèvent la poussière minérale à la surface dans des fronts venteux en forme de spirale. Des brumes de glace d'eau apparaissent autour. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems).

La jeunesse de Mars : le temps des lacs et des rivières

Nous avons vu que pendant la majorité de son existence, et au moins durant les deux derniers milliards d'années, l'environnement martien n'a fait qu'osciller entre les périodes « glaciaires » et « interglaciaires » racontées ci-dessus. L'atmosphère était relativement fine, les températures basses et l'eau n'était presque jamais présente sous forme liquide à la surface. Cependant, l'étude de Mars a montré qu'il en était autrement lorsque la planète était jeune, il y a plus de 3,5 milliards d'années (Mars s'est formé comme toutes les planètes il y a environ 4,5 milliards d'années). Contrairement à la Terre – soumise à une érosion intense et à la tectonique des plaques –, Mars a conservé à sa surface de nombreux terrains qui remontent à cette époque. Partout sur ces terrains, entre les cratères d'impact accumulés dans la durée comme sur la Lune, on observe des vallées fluviales asséchées d'aspect analogue aux réseaux hydrographiques terrestres ainsi que des restes de lacs souvent remplis de sédiment et d'alluvions, parfois déposés sous forme de delta à l'embouchure d'une rivière. En utilisant la spectroscopie, on a pu y détecter des minéraux produits par l'altération de l'eau liquide (par exemple, des argiles) ou par son évaporation (par exemple des sels de sulfates).

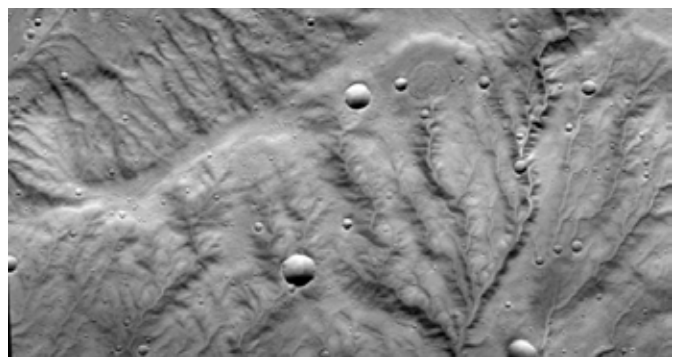


Fig.3. Des réseaux de vallées de rivières aujourd'hui asséchées observées sur les terrains anciens de Mars, formés il y a 3,8 milliards d'années (crédits : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems).

C'est donc une tout autre planète Mars, aujourd'hui disparue, que nous racontent ces vestiges géologiques. Cet ancien monde est particulièrement fascinant car il correspond à une époque où la vie est apparue sur Terre. Pourquoi pas aussi dans les rivières et lacs martiens ? Mener l'enquête sur ces questions constitue un projet irrésistible. Ainsi la plupart des robots que nous envoyons à la surface (Opportunity, Spirit, Curiosity, Perseverance et bientôt Exomars) ainsi que de nombreux instruments d'observations en orbite ont pour objectif premier d'explorer cette ancienne planète Mars plutôt que l'environnement actuel. Leurs enquêtes ont confirmé que Mars a réellement été propice à l'eau liquide et à la vie.

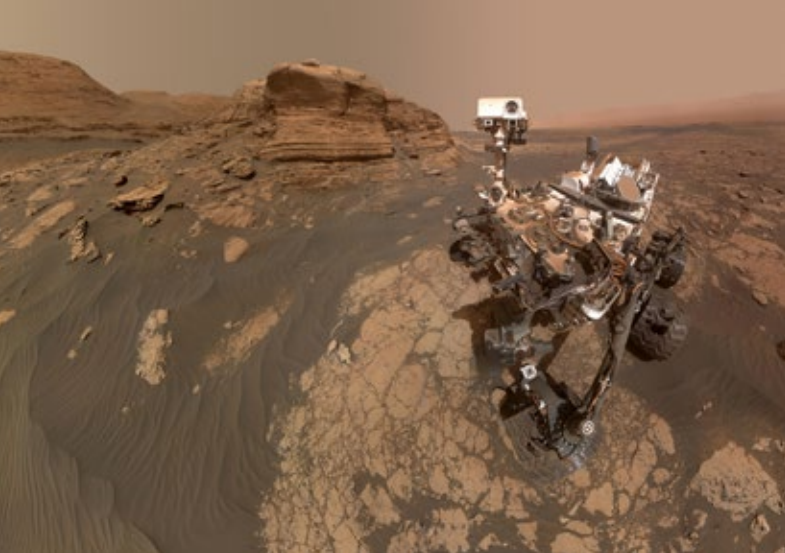


Fig.4. Autoportrait du rover Curiosity de la NASA devant des dépôts lacustres déposés dans le cratère Gale il y a plus de 3,3 milliards d'années. (Crédit NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Cependant, des questions demeurent. Mars a-t-elle connu un climat clément et humide pendant des dizaines de millions d'années, ou de façon intermittente ? Un océan s'est-il formé ? Certains lits de rivières pourraient-ils avoir été façonnés sous des glaciers ? Les minéraux signatures de l'eau liquide ont-ils été formés dans des lacs comme sur Terre ou sont-ils plus souvent le produit de processus hydrothermaux souterrains ? Et enfin : quel processus climatique a-t-il permis la présence d'eau liquide en surface à une époque où le Soleil jeune était 25 % moins lumineux qu'aujourd'hui ? Ce dernier point demeure une énigme pour les climatologues. En effet, ils ont pu démontrer que l'effet de serre d'une atmosphère composée de dioxyde de carbone (CO_2) et de diazote (N_2) (telle que prévue par la théorie) n'aurait pas pu suffisamment réchauffer la planète, quelle que soit son épaisseur. Toutes sortes de scénarios plus complexes ont donc été envisagés.

Par exemple, il a été proposé que les grands impacts d'astéroïdes, relativement nombreux à l'époque, ont pu générer épisodiquement des réchauffements accompagnés d'intenses précipitations. Cependant, l'estimation de leur effet cumulé semble ridicule comparé à ce qui est requis pour l'érosion les grands réseaux fluviaux et la formation des épais sédiments lacustres observés. Un effet de serre atmosphérique supplémentaire est requis, mais lequel ? Les recherches actuelles spéculent sur la présence d'une importante quantité de dihydrogène (H_2) qui aurait pu être relâchée par volcanisme. Mélangé avec du CO_2 , le dihydrogène H_2 peut en effet agir comme un puissant gaz à effet de serre en absorbant le rayonnement infrarouge thermique lorsque les molécules de CO_2 et H_2 rentrent en collision. Cependant, H_2 tend à s'échapper rapidement. Il reste à comprendre comment les volcans martiens ont pu en produire suffisamment à cette époque...

Après les rivières : eau intermittente et... un océan ?

Entre -3,5 et -3 milliards d'années et dans une moindre mesure jusqu'à -2 milliards d'années, les archives géologiques indiquent que Mars a continué à être marquée par des écoulements d'eau liquide capable de créer des vallées fluviales, mais de manière plus locale et épisodique. Un autre type de morphologie liée à l'eau liquide typique de cette ère géologique sont les immenses vallées de débâcles (« outflow channels » en anglais) dont la largeur peut dépasser 100 km pour 1 000 km de long et 100 m de profondeur.

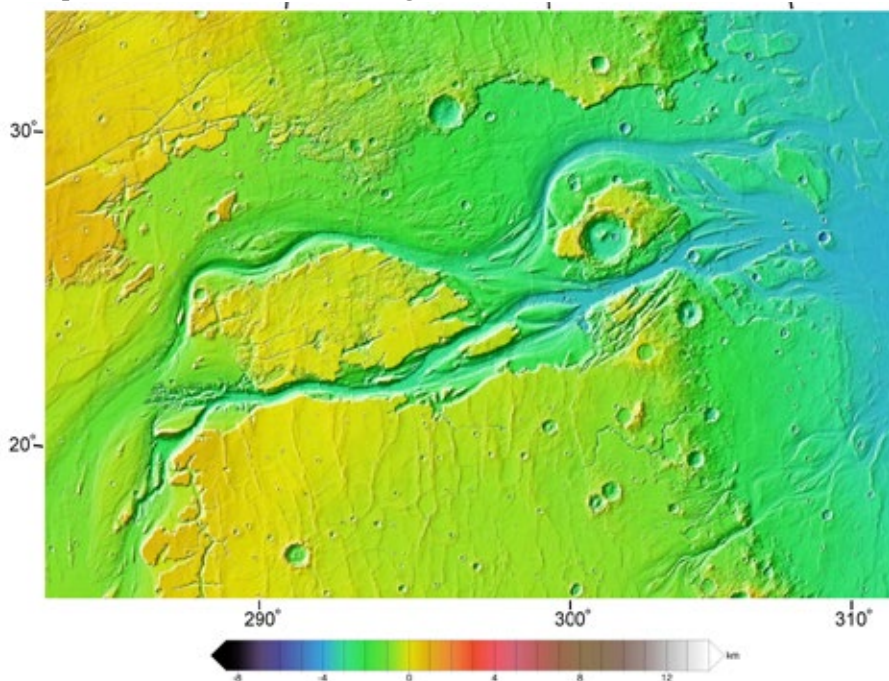


Fig.5. Carte topographique de Kasei Vallis, une des grandes vallées de débâcle martienne (« outflow channel ») formée entre -3,6 et -2 milliards d'années, probablement par une combinaison de volcanisme et de processus glaciaires. L'image fait 1 600 km de large. (Crédit Wikipedia / Areong).

Ces vallées de débâcle ne possèdent pas d'affluents et leur origine géographique est localisée. Sur leur fond, des chenaux multiples ont contourné des obstacles topographiques, comme les cratères d'impact, et donné naissance à des structures en forme de larme dans le sens de l'écoulement. D'après les géomorphologues, seuls des écoulements brutaux et brefs, mettant en jeu des volumes d'eau

extraordinaires, peuvent expliquer les caractéristiques des vallées de débâcle. L'eau proviendrait par exemple de l'interaction entre un volcanisme actif et un sol chargé en glace, à l'origine de la vidange brutale d'immenses nappes phréatiques, sans que le climat n'ait eu besoin d'être beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui.

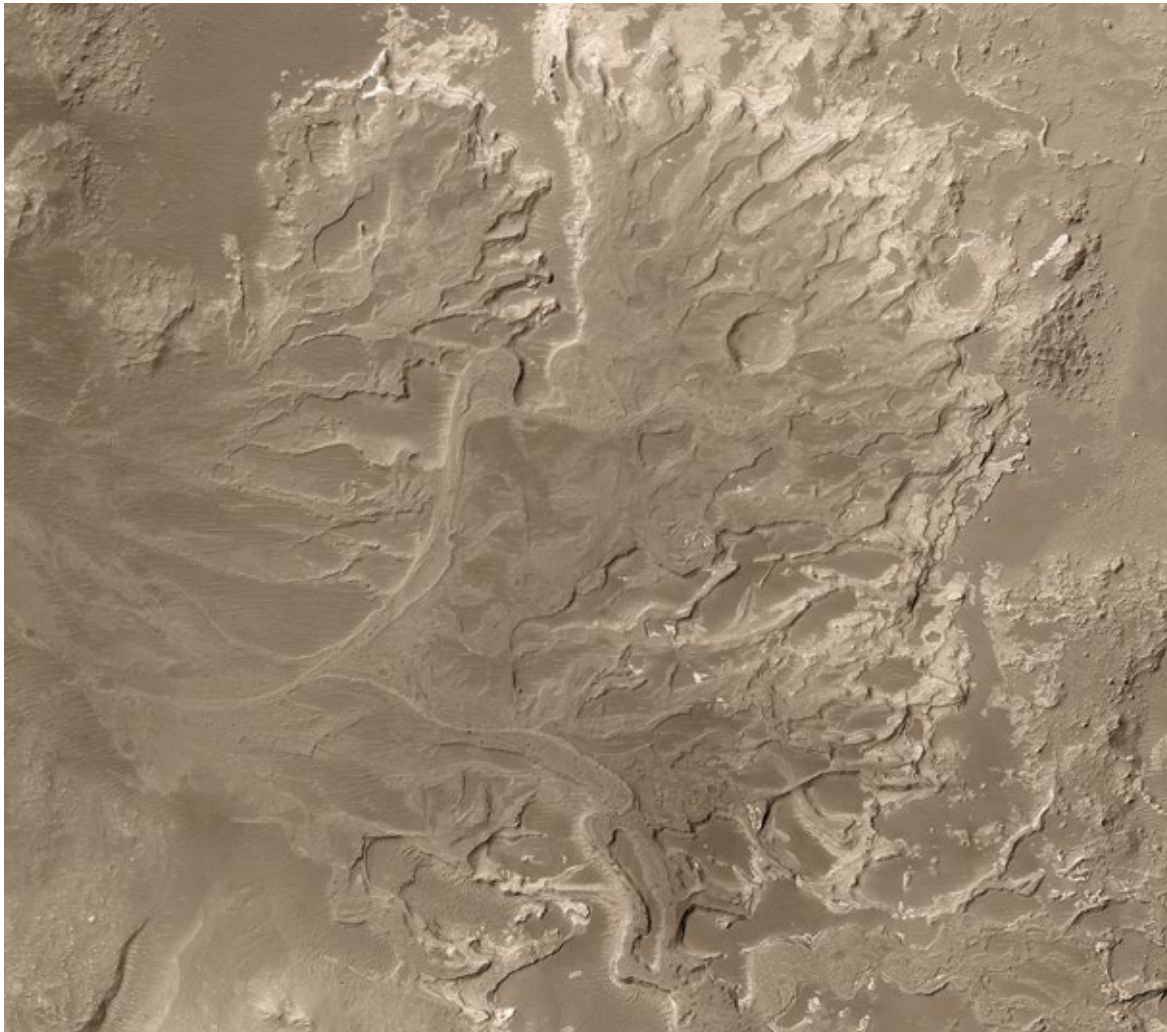


Fig.6. Un delta d'alluvions déposés au fond du cratère Eberswalde à l'embouchure d'une ancienne rivière datant de l'ère Noachienne, il y a environ 3,8 milliards d'années. (Crédit: NASA/JPL/Malin Space Science Systems).

Qu'est devenue toute cette eau ? Elle a dû s'accumuler dans les basses plaines de l'hémisphère nord. Elle pourrait être à l'origine des grandes quantités de glace souterraine observée là, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par radar ou via l'analyse des éjectas de cratères. Qu'en était-il à l'époque des grandes inondations ? Une hypothèse fascinante suggère qu'elle aurait pu parfois former un vaste océan autour du pôle Nord, jusqu'à environ 45° de latitude. Cette idée a longtemps semblé spéculative, mais elle a repris force à partir de 2016 lorsque de curieuses structures géologiques ont été attribuées aux conséquences d'un, voire deux tsunamis océaniques. Ils auraient eu lieu il y a environ 3,4 milliards d'années conséquemment à des impacts d'astéroïdes à l'origine de deux cratères de 30 km observés plus au nord. Un paradoxe demeure cependant : comment un océan a-t-il pu être présent aussi longtemps sans être associé à des pré-

cipitations sur ses rives et donc à la formation de lits de rivières ? On ne n'en observe pas clairement. L'enquête, passionnante, suit son cours.

Pourquoi Mars n'est-elle pas restée propice à l'eau liquide et à la vie ?

Le destin aride et froid de la planète rouge ne résulte pas de la perte de son eau. Il reste beaucoup de glace aux pôles et dans le sous-sol martien. Le problème est plutôt que l'essentiel de l'atmosphère de CO₂ a disparu. Elle était nécessaire pour la présence d'eau liquide afin de maintenir une pression et un effet de serre suffisants. Trois types d'hypothèses ont été envisagés pour expliquer la disparition de l'ancienne atmosphère martienne :

L'atmosphère de CO₂ s'est-elle condensée aux pôles de Mars ?

Après les premières missions Mariner et Viking, dans les années 1970, il a été proposé que de grandes quantités de dioxyde de carbone pourraient tout simplement être enfouies dans les régions les plus froides, condensées sous forme de glace carbonique ou adsorbées¹ dans les pores du sol aux hautes latitudes. Cette spéculation est à la base des nombreux projets de « terraformation » de Mars, qui visent à rendre Mars propice à la vie voire à la vie humaine en la dotant d'une épaisse atmosphère. Dans ces projets, il suffirait de réchauffer les pôles (avec des miroirs ou des bombes thermonucléaires, comme le propose Elon Musk) pour libérer de grandes quantités de gaz et augmenter l'effet de serre. En réalité, les missions spatiales suivantes ont démontré que ces réservoirs sont limités à quelques millibars disponibles sous forme de glace de CO₂ (sondage par radar) et que le permafrost martien est saturé en eau plutôt qu'en CO₂. Ce n'est pas ainsi que l'ancienne atmosphère a disparu, et que l'on pourrait la reconstituer.

Réaction avec la surface.

En présence d'eau liquide, le dioxyde de carbone de l'atmosphère réagit chimiquement avec les roches de la surface pour former des carbonates (des roches calcaires), ce qui a pour effet de réduire le volume atmosphérique. Sur Terre, ce processus est contrebalancé par le constant « recyclage » des roches, grâce à la tectonique des plaques. Les carbonates reforment en profondeur du gaz carbonique qui est réinjecté dans l'atmosphère par les volcans. Sur Mars, en l'absence de tectonique des plaques, une grande partie de l'atmosphère aurait pu être définitivement transformée en carbonates à la surface. Une question se pose alors : où sont ces carbonates ? Après des années de recherche par spectro-imagerie depuis l'orbite et in situ, très peu de carbonates ont été découverts affleurant à la surface. L'environnement martien a-t-il pu détruire les carbonates en surface tout en les accumulant en profondeur ? On peut aussi imaginer qu'ils ne se soient jamais formés, par exemple si les lacs martiens étaient relativement acides (ce qui inhibe la formation des carbonates) ou qu'un autre composé masque leur signature spectroscopique.

Échappement vers l'espace.

La capacité d'une planète ou d'une lune à conserver son atmosphère dépend avant tout de sa masse et de sa gravité. Sur notre Lune, le simple mouvement thermique des molécules de gaz suffit à les éjecter dans l'espace. Sur la Terre, au contraire, la perte par échappement est négligeable (sauf pour l'hydrogène et l'hélium qui sont très légers). Qu'en était-il sur Mars à la gravité intermédiaire

entre la Lune et la Terre ? (3,72 m.s⁻² contre 1,62 m.s⁻² et 9,81 m.s⁻²). La planète était assez massive pour que l'échappement thermique du CO₂ devienne négligeable. Cependant d'autres processus complexes ont été identifiés comme pouvant conduire à l'éjection d'atomes et de molécules, comme certaines réactions chimiques énergétiques induites par les rayons ultraviolets du Soleil, ou l'interaction du vent solaire avec les ions. L'étude de ces processus a été l'objectif de plusieurs missions spatiales comme MAVEN (NASA), Mars Express (ESA) ou la mission Hope des Émirats Arabes Unis. La conclusion de ces études est que plusieurs centaines de millibars de CO₂ ont bien pu s'échapper via ces processus, mais qu'il reste très difficile d'évaluer quantitativement la quantité intégrée perdue depuis la fin de l'ère des lacs et des rivières. Dans ce contexte il a longtemps été suggéré que la perte de l'atmosphère martienne aurait été la conséquence de la disparition du champ magnétique de Mars il y a environ 4 milliards d'années. Cette disparition a pu être démontrée en découvrant que les roches martiennes les plus anciennes – et seulement elles – ont gardé une aimantation rémanente due au champ magnétique présent à leur formation. La présence d'un champ magnétique a pour conséquence de dévier le vent solaire et donc de modifier les processus d'érosion de l'atmosphère associés à l'entraînement des ions chargés par ce vent de particules chargées issues du Soleil. Est-ce que cela limite vraiment l'échappement ? Des études récentes montrent que cela n'a rien d'évident. Certaines suggèrent même que sur un monde comme Mars l'échappement pourrait être favorisé par la présence d'un champ magnétique interne...

Conclusions

Le système climatique de la planète Mars est aujourd'hui extrêmement actif et riche d'enseignements pour comprendre la météorologie et le climat sur notre planète, dans un esprit de « climatologie comparée ». De plus, Mars a connu au cours de son existence des visages très divers. Grâce à ses riches archives géologiques, nous avons la chance de pouvoir explorer en un lieu une extraordinaire variété de mondes. En particulier, il est incontestable que dans sa jeunesse, il y a plus de trois milliards d'années, Mars a été longuement couverte de lacs et de rivières, peut-être d'un océan, avec une forte activité hydrothermale. Ces multiples visages de la planète Mars sont la raison pour laquelle, parmi les splendeurs du Système solaire, la petite planète désertique qu'est devenue Mars reste la première cible des agences spatiales. ■

¹ L'adsorption repose sur la propriété qu'ont les gaz de se fixer sur les parois solides, et ce d'autant plus qu'elles sont froides.