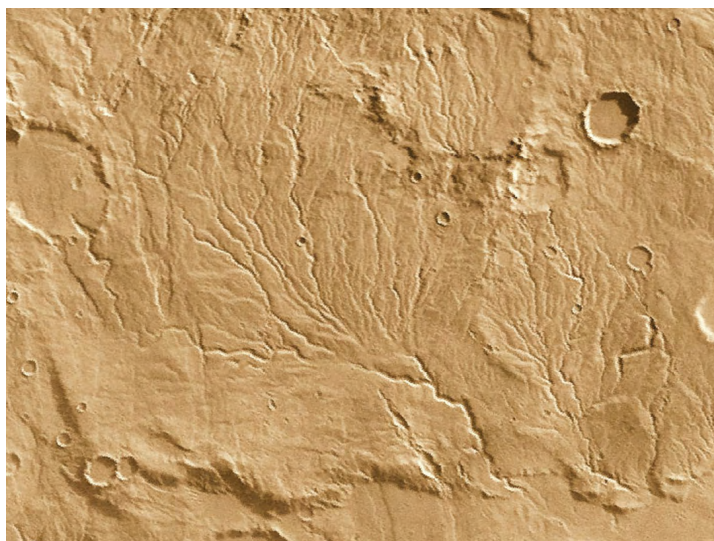


L'exploration de Mars : état des lieux et nouveaux enjeux

Thérèse Encrenaz (therese.encrenaz@obspm.fr)

LESIA (Observatoire de Paris-PSL)

Observatoire de Paris, Section de Meudon, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex.



© ESA

Un exemple de réseau de vallées ramifiées à la surface de Mars (ici *Warrego Valles*, située dans l'hémisphère sud). Ces réseaux, très semblables à ce que l'on observe sur la Terre dans certaines régions désertiques, sont fréquents dans les terrains les plus anciens de Mars et semblent indiquer la présence d'une quantité abondante d'eau dans le passé de la planète. L'image a été prise par la sonde *Viking 1*.

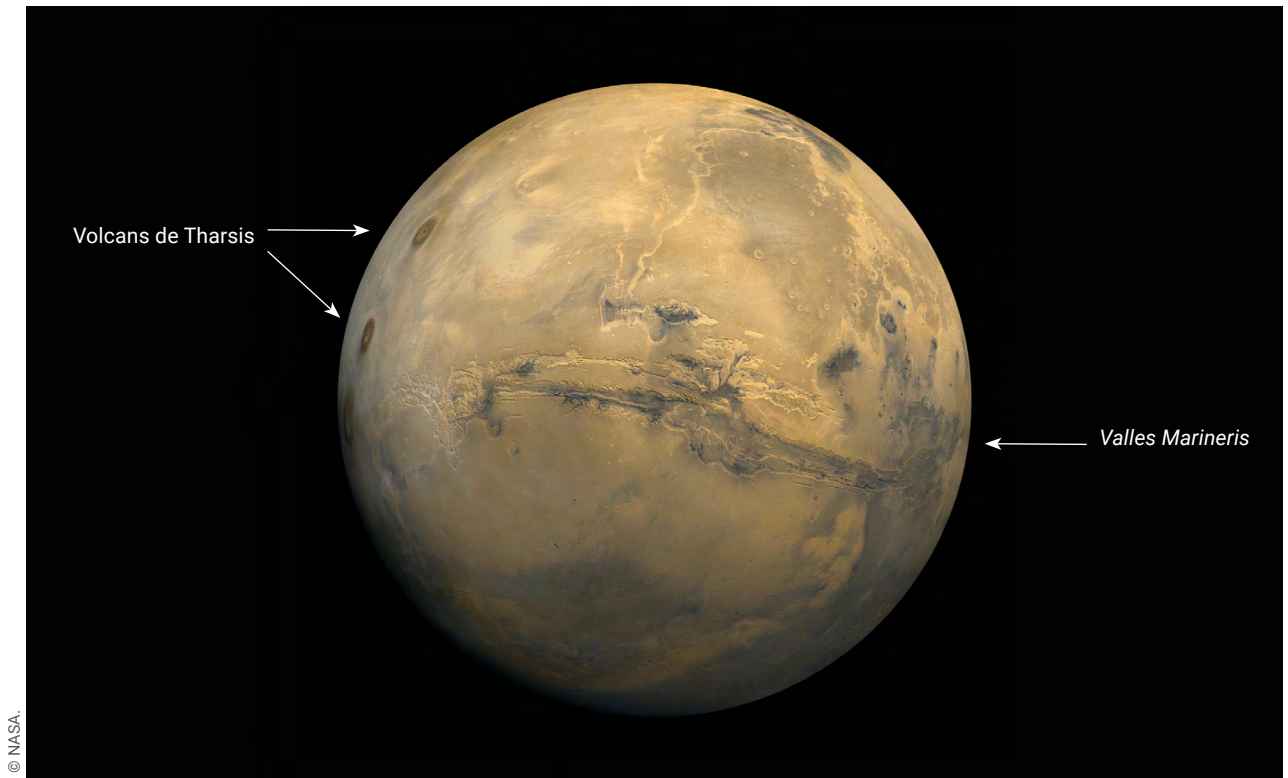
Depuis un demi-siècle, la planète Mars a été étudiée par de nombreuses missions spatiales : aux missions de survol ont succédé les orbiteurs, puis les modules de descente et les véhicules robotiques.

Le lancement quasi simultané de trois nouvelles missions vers Mars, en juillet 2020, atteste de l'intérêt que porte à la planète la communauté scientifique, mais aussi le grand public.

Le but ultime est la recherche de formes de vie, passée ou présente. Mais, au-delà de cet objectif, certains rêvent d'une exploration habitée de la planète, voire d'une « colonisation » humaine.

Est-ce possible, et est-ce souhaitable ?

Plus petite et plus éloignée du Soleil que la Terre, la planète Mars présente certaines analogies avec notre planète, comme la nature de son sol qui rappelle les déserts terrestres, l'existence de volcans (fig. 1) et la présence périodique de calottes saisonnières, couvrant alternativement les pôles nord et sud en hiver, due à une obliquité très proche de celle de la Terre. L'atmosphère de Mars, composée essentiellement de dioxyde de carbone, est en revanche très différente de la nôtre, avec une pression de surface inférieure au centième de bar, et une température moyenne autour de -50°C , très variable en fonction des saisons.



1. La planète Mars photographiée par l'orbiteur *Viking 1* le 22 février 1980. Cette mosaïque, composée à partir d'images individuelles, reste, quarante ans plus tard, l'un des plus beaux portraits de la planète. On voit tout à gauche les volcans du plateau de Tharsis et, au centre, l'immense canyon *Valles Marineris*.

Pourquoi cet intérêt pour Mars de la part de la communauté scientifique, comme du grand public ? La première raison, qui n'est pas nouvelle, tient à la recherche d'éventuelles traces de vie sur la planète rouge. Depuis le mythe des canaux martiens il y a plus d'un siècle, elle a alimenté de multiples controverses ; nous verrons que ces débats sont toujours d'actualité. La seconde raison de s'intéresser à la planète Mars — comme d'ailleurs à notre autre voisine Vénus — est de tenter de comprendre l'évolution comparée de ces trois planètes telluriques. Vénus, dont la composition atmosphérique est proche de celle de Mars, présente en effet des conditions de surface très inattendues, avec une pression proche de la centaine de bars et une température d'environ 460°C ; entre ces deux extrêmes, la Terre a vu son atmosphère se transformer sous l'effet de l'apparition de la vie. Comprendre par quels mécanismes les trois planètes telluriques dotées d'une atmosphère ont vu leur destin diverger de façon si radicale est un enjeu majeur de la planétologie.

Les premières recherches

La recherche de la vie sur Mars a été le moteur de l'exploration spatiale de la planète. Une étape majeure a été l'envoi par la NASA, en 1975, de la mission *Viking*, constituée de deux orbiteurs et de deux modules de descente. Ces deux derniers étaient équipés de véritables laboratoires de biologie destinés à détecter la présence d'éventuels micro-organismes. Après de longs débats, il a été admis que le résultat de la recherche était négatif ; l'élément déterminant a été l'absence totale de molécules organiques à la surface de Mars. La déception a été telle que le programme d'exploration martienne de la NASA a été interrompu pendant vingt ans.

C'est en 1996 que la question d'une vie sur Mars revient sur le devant de la scène. Il s'agit cette fois de l'analyse d'une météorite, trouvée en Antarctique douze ans plus tôt. De tels objets ont été découverts depuis le XIX^e siècle ; on en dénombre à ce jour plus de 250. On connaît leur origine, car leur composition isotopique est identique à celle

des échantillons martiens analysés par les sondes *Viking*. Celle qui nous intéresse — ALH84001 — est particulièrement ancienne : datée de 4,1 milliards d'années, elle a dû être éjectée de Mars il y a quelque 15 millions d'années pour atterrir en Antarctique il y a environ 13 000 ans. En 1996, une équipe de chercheurs [1] annonce la découverte, dans des globules de carbonate inclus dans cette météorite, de plusieurs indices en faveur de la présence de traces de vie : structures tubulaires rappelant des micro-organismes terrestres (mais d'une taille 100 fois inférieure), cristaux de magnétite, hydrocarbures polycycliques aromatiques... De l'aveu même des auteurs, aucun de ces éléments, pris individuellement, ne constitue une preuve définitive de vie, mais la conjonction des indices enflamme les esprits. La controverse durera toute une décennie. Finalement, l'hypothèse d'une contamination terrestre apparaît possible voire probable, et la communauté scientifique dans sa large majorité ne reconnaît pas l'existence de traces de vie martienne dans la météorite.

Toujours est-il qu'à la fin des années 1990, la quête d'une vie martienne est à nouveau d'actualité. Un autre nouvel élément vient s'ajouter au débat : on a découvert sur les images de *Mariner 9* et de *Viking* des réseaux de vallées ramifiées (voir la photo, p. 4) qui suggèrent fortement que de l'eau liquide a coulé dans le passé [2], ce qui impliquerait une atmosphère primitive plus dense, plus chaude et plus humide qu'aujourd'hui. La NASA repart à la conquête de Mars avec une nouvelle stratégie incluant l'envoi d'orbiteurs, puis de véhicules robotisés qui seront lancés tous les deux ans, en fonction des opportunités offertes par les fenêtres de tir. En 2003, l'ESA se joint à la campagne avec le lancement de l'orbiteur *Mars Express*, toujours en opération aujourd'hui. Ces missions récoltent de nouveaux indices en faveur de la présence d'eau liquide dans le passé de la planète : présence d'eau (glace ou pergélisol) sous les pôles, présence possible d'un océan boréal il y a trois milliards d'années, mise en évidence d'argiles dans les terrains les plus anciens (voir *Reflets de la Physique*, 30 (2012) 4-10).

Les découvertes du robot *Curiosity*

Une nouvelle étape technologique est franchie par la NASA avec le lancement en 2011 de la mission *Mars Science Laboratory*, qui dépose sur le sol de Mars le robot *Curiosity* dans le cratère Gale, à proximité de l'équateur. Depuis 2012, le robot se déplace à la surface de Mars à la vitesse d'environ trois kilomètres par an. Il prélève des échantillons de gaz et de roches dont il analyse la composition élémentaire et isotopique par spectrométrie de masse, après avoir pulvérisé les roches. L'objectif principal annoncé est de découvrir des traces de vie passée ou, à défaut, des environnements « habitables », c'est-à-dire remplissant une série de critères nécessaires à l'apparition de la vie : présence d'eau liquide et d'éléments nutritifs (carbone, hydrogène, azote, oxygène, phosphore, soufre — ce qu'on appelle les « CHNOPS »), milieu neutre et de faible salinité, présence de fer et de soufre dans différents états d'oxydation. Un tel site a été identifié par *Curiosity* : il s'agit d'un site fluvio-lacustre baptisé *Yellowknife Bay* (fig. 2),



2. Le site de *Yellowknife Bay* dans le cratère de Gale, identifié par le robot *Curiosity* comme un site « habitable », car satisfaisant les critères suivants : présence passée d'eau liquide, milieu neutre et peu salé, présence d'éléments nutritifs (C, H, N, O, P, S), et présence de fer et de soufre dans différents états d'oxydation. L'existence du lac remonterait à quelque 3 ou 4 milliards d'années.

un ensemble de strates sédimentaires témoignant de la présence d'eau liquide il y a quelques 3,5 milliards d'années [3].

Si *Curiosity* n'a pas découvert de traces de vie passée, le robot a apporté la surprise en annonçant, en 2015, la détection de « bouffées » transitoires de méthane pouvant atteindre 20 ppbv^(a), ainsi que d'un niveau continu environ dix fois plus faible, entre 0,2 et 0,6 ppbv, présentant des variations saisonnières [4]. Cette découverte a réactualisé une polémique vieille de plus de dix ans. En effet, en 2004, plusieurs équipes avaient simultanément annoncé la découverte de faibles quantités de méthane (de l'ordre de 10 ppbv) dans l'atmosphère martienne. Or, selon les modèles photochimiques, la présence de méthane est totalement inattendue dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone comme celle de Mars, et certains chercheurs ont suggéré que ce méthane pourrait avoir une origine biogénique ; l'affaire a donc fait grand bruit. Cependant, les premières observations n'étaient pas vraiment convaincantes, soit à cause d'une précision insuffisante des mesures, soit (pour les mesures réalisées depuis la Terre) à cause de l'opacité de l'atmosphère terrestre ; après de longs débats, l'hypothèse du méthane martien n'avait pas été validée par l'ensemble de la communauté. Les nouvelles mesures de *Curiosity* ont donc relancé le débat. Celui-ci s'est alors complexifié avec, en 2016, l'entrée en opération de l'orbiteur *ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)*, lancé conjointement par l'ESA et la Russie.

Celui-ci dispose d'instruments capables d'observer l'atmosphère martienne par occultation devant le Soleil, ce qui leur donne une sensibilité très grande, en particulier dans la haute atmosphère. Le verdict de *TGO* ne s'est pas fait attendre : il n'y a pas de méthane dans l'atmosphère martienne ; la limite supérieure de *TGO* est d'environ cent fois inférieure aux valeurs annoncées par *Curiosity* [5].

Comment résoudre cette contradiction ? Il a été suggéré que le méthane vu par *Curiosity* provenait de l'instrument lui-même, hypothèse qui a été réfutée par ses responsables. Mais une autre hypothèse, émise par une équipe de l'Université de Toronto, présente une piste intéressante [6]. Les instruments de *TGO* sondent l'atmosphère martienne par occultation solaire, donc au lever et au coucher du Soleil, à heure locale fixe (6 h ou 18 h), au-dessus d'une altitude de quelques kilomètres. L'instrument qui mesure le méthane sur *Curiosity*, en revanche, opère de nuit au niveau du sol. Or, la couche limite atmosphérique (qui décrit la partie de la basse atmosphère en interaction directe avec la surface) s'élève, dans le cas de Mars, jusqu'à quelques kilomètres pendant le jour, mais se réduit à quelques mètres pendant la nuit. Le méthane dégazé pendant la nuit pourrait donc s'accumuler en quantité suffisante pour être détecté par *Curiosity*, mais être dilué rapidement pendant le jour, devenant indétectable par *TGO* [7]. L'idée est séduisante, mais il reste à

comprendre par quel mécanisme le méthane dégazé de la surface est immédiatement détruit. L'agent oxydant pourrait être du peroxyde d'hydrogène (déjà détecté en faibles quantités dans l'atmosphère) qui se trouverait piégé dans le sol, ou bien des perchlorates, déjà identifiés à la surface de Mars. Seules de nouvelles mesures de surface nous permettront d'avancer sur cette question. Insistons sur le fait que la présence de méthane, si jamais elle s'avère confirmée, n'implique en rien une origine biogénique. En particulier, la réaction de serpentisation^(b), réalisée en sous-sol à partir de roches du manteau (olivine, pyroxènes) et d'eau liquide, permet la formation d'hydrogène qui, au contact du dioxyde de carbone, peut produire du méthane de manière abiotique.

Un climat primitif froid et sec ?

Parallèlement à la poursuite de l'exploration spatiale de Mars, notre compréhension des débuts de l'histoire martienne s'est considérablement améliorée au cours de la dernière décennie, grâce au développement des modèles climatiques globaux. Ces GCMs (*Global Climatic Models*), initialement développés pour modéliser le climat terrestre, ont été appliqués avec succès à Mars depuis une vingtaine d'années [7], et le sont progressivement aussi aux autres planètes du système solaire, voire aux exoplanètes. Dans un GCM, un réseau tridimensionnel représente la planète (latitude, longitude, altitude) ; dans chaque maille de ce réseau, le bilan énergétique, calculé par une série d'équations décrivant les lois fondamentales de la physique, permet de déterminer les paramètres atmosphériques (pression, température, pressions partielles) et leur évolution avec le temps.

L'utilisation des GCMs a permis aux chercheurs de mieux cerner un problème identifié comme « le paradoxe du Soleil jeune ». De quoi s'agit-il ? Les modèles d'évolution stellaire nous apprennent qu'il y a quatre milliards d'années, le Soleil était moins brillant qu'aujourd'hui ; sa luminosité n'était que 70% de sa valeur actuelle. Dans ces conditions, même dans le cas d'une atmosphère primitive plus

dense, la température à la surface de Mars ne pouvait être supérieure à -60°C , et donc incompatible avec la présence d'eau liquide. Voilà qui est en contradiction avec l'hypothèse d'une atmosphère primitive plus humide et chaude qu'aujourd'hui, hypothèse développée il y a une à deux décennies suite à la découverte de traces d'eau liquide passée. Comment résoudre cette contradiction ? Compte tenu du flux solaire reçu, plus faible qu'aujourd'hui, la température de l'atmosphère primitive n'a pas pu être compatible en permanence avec la présence d'eau liquide ; mais elle a pu s'élever localement pendant des épisodes temporaires.

Aujourd'hui, les chercheurs penchent plutôt en faveur d'un climat initial froid et sec, interrompu par des épisodes « chauds » suscités par une activité volcanique épisodique ou des impacts météoritiques majeurs [8]. Si ce modèle est confirmé dans l'avenir, les chances de trouver des traces de vie dans le passé de la planète pourraient s'en trouver réduites : dans le cas de la Terre, la lente complexification des formes de vie a nécessité plusieurs milliards d'années.

Du nouveau sur l'intérieur de Mars

La structure interne de Mars a longtemps été mal connue, en raison de la sensibilité insuffisante des sismomètres des modules *Viking*. Les informations dont nous disposions en 2018 étaient limitées aux données de gravimétrie des orbiteurs successifs. Selon ces informations, le noyau de

Mars, majoritairement liquide, serait constitué de fer et de nickel, avec un rayon compris entre le tiers et la moitié du rayon de la planète (3390 km). Le manteau, riche en silicates, aurait une composition proche de celle du manteau terrestre, et la croûte, plus épaisse dans l'hémisphère sud (dont l'altitude est supérieure de 5 km à celle de l'hémisphère nord), aurait une épaisseur moyenne d'une cinquantaine de kilomètres.

La mission *InSight*, lancée en 2018 par la NASA, nous a apporté une nouvelle vision de la structure interne de Mars. Son sismomètre ultra-performant *SEIS*, développé par l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) et le CNES, a montré que les séismes martiens étaient moins intenses mais plus nombreux que les prédictions des modèles théoriques. Le noyau, dont le rayon est égal à 1830 ± 40 km, légèrement supérieur aux estimations antérieures (de 1100 à 1700 km), doit contenir une fraction notable d'éléments légers, comme le soufre ou l'oxygène [9]. En nous donnant accès pour la première fois à la structure interne de Mars, les résultats de la mission *InSight* ouvrent une nouvelle perspective dans notre compréhension de la planète Mars et de son évolution depuis son origine.

En juillet 2020, trois nouvelles missions spatiales ont décollé en direction de Mars ; deux d'entre elles marquent l'entrée de deux nouvelles agences spatiales dans l'exploration de la planète rouge. La première, *EMM/HOPE*, développée par les Émirats arabes unis, consiste en un orbiteur destiné à

“Aujourd'hui, les chercheurs penchent plutôt en faveur d'un climat initial froid et sec [sur Mars], interrompu par des épisodes « chauds » suscités par une activité volcanique épisodique ou des impacts météoritiques majeurs.”



© NASA

3. Le robot Perseverance de la mission Mars 2020, en opération à la surface de Mars depuis février 2021. Le robot a déjà réalisé plusieurs collectes d'échantillons. On voit sur ce "selfie" le robot lui-même et le petit hélicoptère Ingenuity qui l'accompagne. Ce dernier est à la fois un démonstrateur technologique et un outil de communication (prise d'images).

mieux comprendre la météorologie martienne et l'évolution de son climat, en particulier par la mesure de l'échappement atmosphérique. La seconde, *Mars 2020*, développée par la NASA, se situe dans la lignée de *Curiosity*. L'objectif principal de son robot *Perseverance* (fig. 3) reste la recherche de traces de vie, avec une mission supplémentaire : effectuer la première collecte d'échantillons dans la perspective d'un possible retour des prélèvements. Enfin, la troisième mission est lancée par la Chine. Nommée *Tianwen-1*, elle consiste en un orbiteur, un module d'atterrissage et un véhicule robotisé nommé *Zhurong*. Ses objectifs scientifiques sont variés, ils concernent en particulier l'étude de la surface et du sous-sol martiens, ainsi que le repérage d'un site en vue d'un futur retour d'échantillons. Les deux véhicules se sont posés avec succès sur le sol martien en février 2021 et les trois missions sont en opération depuis cette date, la première en orbite et les deux autres au sol.

Enfin, la mission *ExoMars 2022*, développée par l'ESA et la Russie, dont le lancement était prévu à l'automne 2022^(c), devrait à son tour déposer à la surface martienne un autre robot mobile, doté d'une capacité de sondage du sous-sol plus performante que précédemment, allant jusqu'à deux mètres de profondeur au lieu de quelques centimètres dans le cas de *Curiosity*.

La prochaine étape : le retour d'échantillons martiens

Quel sera l'avenir de l'exploration martienne ? Depuis le succès des missions de retour d'échantillons lunaires — habitées dans le cas du programme *Apollo* et robotiques dans le cas de *Luna* et du tout récent programme chinois *Change 5* — les scientifiques ont compris leur importance. En effet, la caractérisation des échantillons lunaires par les moyens les plus sophistiqués — microscopes électroniques, sondes ioniques, diffraction de rayons X — a permis l'analyse approfondie de la composition élémentaire et isotopique du sol lunaire, et la détermination précise de l'âge des échantillons. Dans le cas de Mars, nous disposons, nous l'avons vu, grâce aux météorites martiennes, d'une autre sorte d'échantillons que nous pouvons analyser à loisir. Cependant, ces météorites ont été éjectées de la planète Mars à l'occasion d'impacts majeurs, et les roches sédimentaires qu'elles pourraient contenir n'ont pas résisté au choc thermique engendré par ces impacts. L'objectif d'une mission de retour d'échantillons martiens est donc de sélectionner différents types de matériaux, en particulier ceux qui pourraient porter des traces de sédimentation ou d'altération aqueuse, voire même contenir des fossiles ou des traces de matériau biogénique.

En 2018, un groupe de travail international a proposé un scénario basé sur trois lancements successifs. Le premier, réalisé avec succès en 2020, est celui du robot *Perseverance* (voir ci-dessus) qui a pour mission de choisir et collecter les échantillons les plus intéressants (environ 500 grammes au total).

Les étapes suivantes du programme, en phase d'étude à l'ESA et à la NASA, restent non seulement à préciser, mais à financer. Un autre véhicule robotisé (*Sample Retrieval Lander*, sous la responsabilité de la NASA) sera nécessaire pour récupérer les échantillons de *Perseverance* et les déposer en orbite martienne au moyen d'une petite fusée. Ensuite, la capsule en orbite martienne devra être récupérée par un orbiteur martien (*Earth Return Orbiter*, sous la maîtrise d'œuvre de l'ESA) qui la ramènera sur Terre au début de la prochaine décennie. On le voit, il s'agit d'un programme très ambitieux. Son coût a été estimé par la NASA à plus de 7 milliards de dollars, dont environ le quart sera à la charge de l'ESA.

Vers une exploration habitée de Mars ?

Dans tout ce qui précède, nous avons considéré l'exploration de Mars sous l'angle des missions robotiques : c'est à elles que l'on doit l'avancée des connaissances astronomiques accumulées depuis un demi-siècle. L'idée d'envoyer des hommes sur Mars est apparue dès le début des années 1970, suite au succès du programme *Apollo* d'envoi d'hommes sur la Lune, mais n'a pas résisté à l'évolution du contexte politique — dominé d'abord par l'affrontement de deux grandes puissances, les États-Unis et l'Union soviétique — qui lui servait de moteur. Les décennies suivantes ont vu le triomphe des missions spatiales robotiques, qu'il s'agisse de l'exploration de la Lune, du système solaire ou de l'Univers, et la science en a tiré le plus grand profit.

Nous assistons aujourd'hui à un nouveau bouleversement de cet équilibre sociopolitique. Avec la Chine et les Émirats arabes unis, de nouvelles puissances économiques se sont invitées sur la scène de l'exploration spatiale ; c'est aussi le cas du Japon, de l'Inde, du Brésil...

Une autre révolution est celle du *New Space*, qui voit l'émergence de nouveaux acteurs privés dans la réalisation de lanceurs et de véhicules spatiaux, dans la perspective de permettre, par un accès à bas coût à l'espace, le développement du tourisme spatial. En particulier, le directeur de la société de lanceurs *Space X*, Elon Musk, jouant sur l'engouement suscité par la « conquête spatiale », voire la « colonisation de l'espace », a pour objectif affiché de transporter des colons vers la planète Mars...

Quel serait l'intérêt de l'envoi d'astronautes sur Mars ? Il est clair que la science ne peut pas à elle seule justifier cette démarche. L'exemple des échantillons lunaires est là pour le rappeler : leur analyse a constitué l'essentiel du retour scientifique du programme *Apollo* ; or leur collecte aurait pu se faire à l'aide de robots, comme l'ont fait les sondes soviétiques *Luna*. Le succès de ces missions robotiques s'explique en grande partie par la miniaturisation des instruments de mesure. Le corps humain, lui, ne peut pas être miniaturisé...

Quant aux difficultés techniques d'une telle entreprise, elles sont évidemment immenses. Elles sont présentées en détail dans un livre très clair et instructif de Sylvia Ekström et Javier G. Nombela : *Nous ne vivrons pas sur Mars, ni ailleurs* [10]. Les auteurs décrivent en particulier les difficultés du voyage (d'une durée minimale de cinq mois) et son problème majeur, actuellement non résolu, l'exposition des passagers aux radiations solaires et au rayonnement cosmique.

Par ailleurs, le risque d'une collision avec l'une des micrométéorites qui peuplent l'espace interplanétaire est réel. Elle pourrait endommager voire détruire le véhicule de transport, même si la taille de la météorite ne dépasse pas quelques millimètres... Supposons notre équipage débarqué sans dommage sur Mars et capable de s'y mouvoir, après s'être adapté à la gravité martienne (ce qui demande plusieurs semaines pour les astronautes revenant sur Terre de la Station spatiale internationale). Il lui faudra rejoindre la base-vie (qu'il aura fallu installer au préalable avec des engins robotisés) et à nouveau se protéger en permanence des radiations... De plus,

nos astronautes devront constamment vivre en combinaison pressurisée avec une réserve d'oxygène. Où trouver l'oxygène ? Le succès de l'expérience de *Perseverance* ayant réussi à fabriquer 5 grammes d'oxygène est certes encourageant, mais il reste du chemin à faire avant d'alimenter plusieurs personnes pendant plusieurs mois... Enfin, en l'absence de production locale de nourriture (rendue impossible compte tenu de la nature rocheuse du sol et du manque d'eau), le problème de l'alimentation de l'équipage sera, lui aussi, extrêmement critique. On le voit, les difficultés techniques autour d'un voyage habité vers Mars sont immenses et, si des solutions ont été proposées sur le papier, aucune expérience de simulation n'a été encore menée de manière concluante.

Enfin, quel serait le coût d'une telle aventure ? Il est difficile d'avancer un chiffre, en l'absence de projet défini, mais on peut déjà se rappeler le coût du programme *Apollo* (170 milliards de dollars), infiniment moins complexe. On peut anticiper que les développements, la qualification et les tests de nombreux sous-systèmes coûteront à eux seuls des centaines de milliards d'euros. Selon certaines estimations de la NASA, le simple lancement des 12 000 tonnes nécessaires pour déposer 80 kg de charge utile (considérés comme le strict minimum) s'élèverait déjà à plusieurs dizaines de milliards de dollars... L'addition se comptera en milliers de milliards d'euros.

Peut-être que, d'ici quelques décennies, l'exploration habitée de Mars sera tentée sur la base de raisons politiques ou économiques ; elle sera néanmoins inévitablement un gouffre financier vertigineux, à une époque où les tous les moyens devraient être tournés vers la conservation de la vie sur la Terre dans les meilleures conditions possibles pour tous. ■

(a) ppbv : parties par milliard en volume.

(b) Réaction de serpentinisation : processus de transformation de certaines roches (péridotites, principalement constituées d'olivine et de pyroxènes) qui, par hydratation, produit de la serpentine (silicate de magnésium hydraté).

(c) Le 17 mars 2022, l'ESA a suspendu la mission *ExoMars* 2022 en raison de l'invasion de l'Ukraine par la Russie.



- 1• D. McCay *et al.*, "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001", *Science* **273** (1996) 924-930, doi: 10.1126/science.273.5277.924
- 2• D.J. Milton, "Water and processes of degradation in the Martian landscape", *J. Geophys. Res.* **78** (1973) 4037-4047 ; V. Ansan et N. Mangold, "New observations of Warrego Valles on Mars: evidence for precipitation and surface runoff", *Plan. Space Sci.* **54** (2006) 219-242.
- 3• J.P. Grotzinger and the MSL team, "A Habitable Fluvio-Lacustrine Environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars", *Science* **343** (2014), issue 6169, doi: 10.1126/science.1242777.
- 4• C.R. Webster *et al.*, "Mars methane detection and variability at Gale crater", *Science* **347** (2015) 415-417.
- 5• O. Korabiev *et al.*, "No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations", *Nature* **568** (2019) 517-520, doi: 10.1038/s41586-019-1096-4 ; F. Montmessin *et al.*, "A stringent upper limit of 20 pptv for methane on Mars and constraints on its dispersion outside Gale Crater", *Astron. Astrophys.* **650** (2021) A140, doi: 10.1051/0004-6361/202140389
- 6• J. Moores *et al.*, "The Methane Diurnal Variation and Microseepage Flux at Gale Crater, Mars as Constrained by the ExoMars Trace Gas Orbiter and Curiosity Observations", *Geophys. Res. Letters* **46** (2019) 9430-9438 ; C.R. Webster *et al.*, "Day-night differences in Mars methane suggest nighttime containment at Gale crater", *Astron. Astrophys.* **650** (2021) A166, doi: 10.1051/0004-6361/202040030
- 7• F. Forget *et al.*, "Improved general circulation models of the martian atmosphere from the surface to above 80 km", *J. Geophys. Res.-Planet* **104** (1999) 24155-24176, doi: 10.1029/1999/JE001025.
- 8• D.C. Catling et J.F. Kasting, *Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds*, Cambridge University Press (2017).
- 9• S. Stähler *et al.*, "Seismic detection of the martian core", *Science* **373** (2021) 443-448, doi: 10.1126/science.abi7730.
- 10• S. Ekström et J. G. Nombela, *Nous ne vivrons pas sur Mars, ni ailleurs*, Préface de Michel Mayor, prix Nobel de physique 2019. Favre, Lausanne (2020).