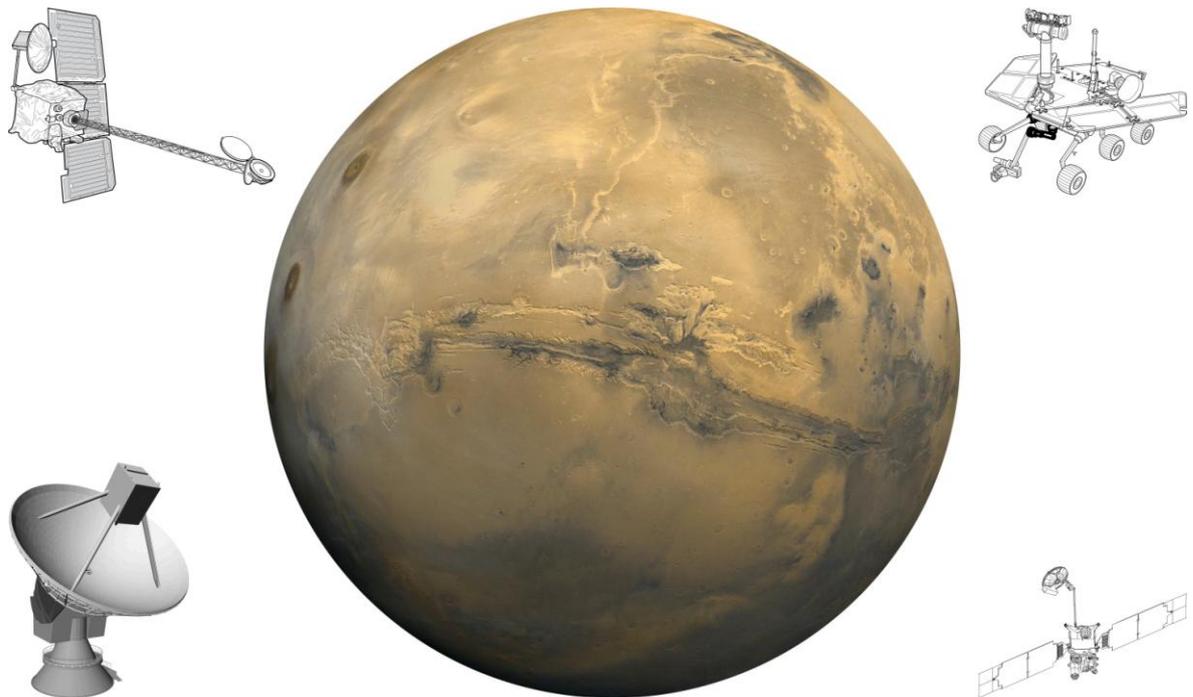


Explorez Mars (3/4)

Document à destination des enseignants de collège



Département éducation – formation

Palais de la découverte
Avenue Franklin Roosevelt
750008 Paris
www.palais-decouverte.fr

2016

Sommaire

L'eau sur Mars, l'histoire de Mars et son exploration

1	L'eau sur Mars	3	
	1.1	La vapeur d'eau	3
	1.2	La glace d'eau	4
	1.3	De l'eau liquide aujourd'hui ?	11
	1.4	Il y a bien longtemps...	14
2	Une histoire de Mars	21	
3	L'exploration de Mars	27	
	3.1	Avant l'ère spatiale	28
	3.2	Des années 1960 à aujourd'hui	32
	3.3	Le futur	49
	3.4	Petit mot concernant l'Homme sur Mars	52

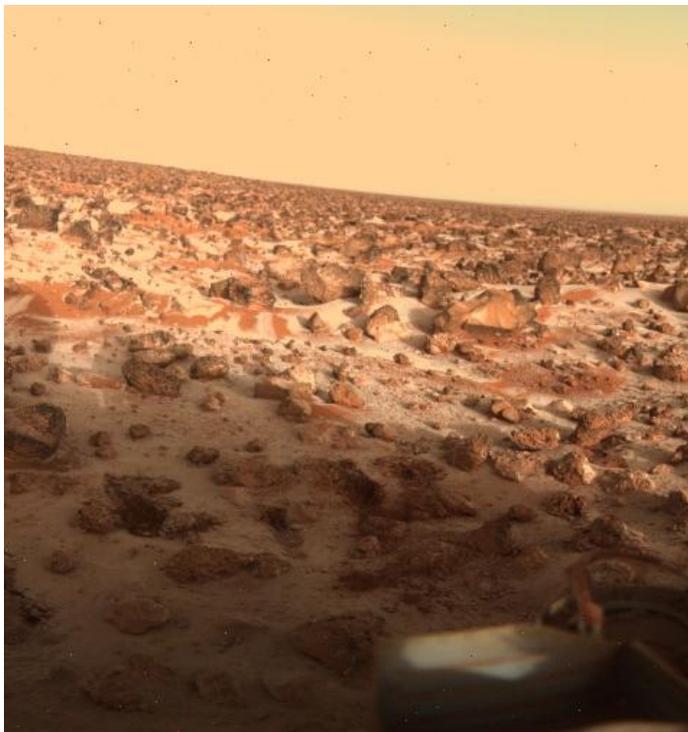
L'eau sur Mars, l'histoire de Mars et son exploration

1 L'eau sur Mars

1.1 La vapeur d'eau

Les durées du jour sur Mars et sur Terre sont pratiquement identiques et les variations saisonnières de l'ensoleillement comparables. La différence fondamentale entre les deux systèmes climatiques réside dans le fait que Mars ne possède pas d'océan. En effet, en raison des conditions de pression et de température, l'eau ne peut exister sur Mars de manière pérenne que sous forme de vapeur ou de glace. Ainsi, son climat est très froid, très sec et caractérisé par de grandes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit, l'hiver et l'été. La vapeur d'eau est présente à l'état de traces, à hauteur de 0,03 %. Si l'on précipitait toute cette eau sur la surface, on pourrait à peine former une couche de glace de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Sa variabilité est grande. Elle est liée à la complexité du système climatique, dans lequel la circulation atmosphérique est couplée avec trois cycles saisonniers :

- le cycle du dioxyde de carbone. En automne, une partie de l'atmosphère condense dans des calottes de glace carbonique et se sublime au printemps ;
- le cycle de la poussière. Les vents soulèvent, transportent et déposent des poussières qui obscurcissent l'atmosphère et contrôlent sa structure thermique ;
- le cycle de l'eau. L'atmosphère transporte la vapeur d'eau entre les réservoirs polaires. Malgré la faible abondance de l'eau, la saturation est vite atteinte car les températures sont très basses. Il se forme des nuages, des brumes et du givre.



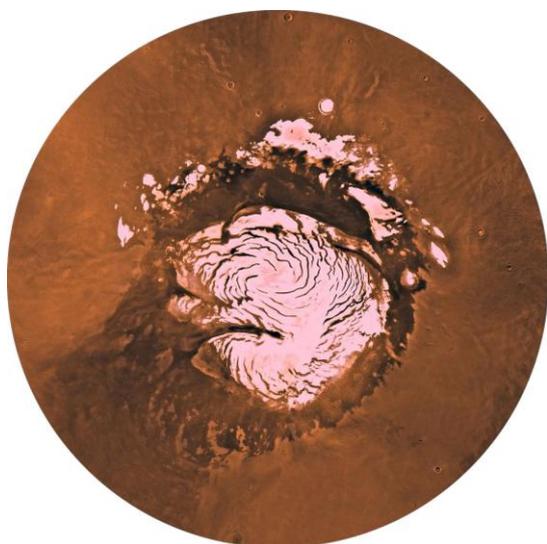
Dépôt de givre de glace d'eau durant l'hiver martien, photographié par l'atterrisseur de la mission *Viking 2* en mai 1979. Crédit : NASA / JPL.

1.2 La glace d'eau

Les calottes polaires

Les régions polaires sont recouvertes d'un dépôt de glace, de poussières et de sédiments, creusé de spirales sculptées par les vents et d'une épaisseur maximale de trois kilomètres. La **calotte polaire boréale permanente** s'étend sur plus de 1 000 km et contient environ 1,6 million de km³ de glace d'eau, soit plus de la moitié de la glace contenue dans l'inlandsis du Groenland. La **calotte polaire australe permanente** est apparemment plus petite (400 km) car recouverte de poussières mais elle contiendrait autant de glace que sa consœur boréale.

En fin d'automne, en hiver et au début du printemps, il fait si froid aux latitudes élevées que **les régions polaires s'enveloppent d'une couche saisonnière de glace carbonique** souvent transparente de un à deux mètres d'épaisseur, qui se retire progressivement vers les pôles au cours du printemps. Elle laisse alors autour du pôle Nord une couche de glace d'eau presque pure tandis qu'au pôle Sud, il subsiste une petite calotte permanente de glace carbonique, très brillante, reposant sur un socle de glace d'eau. Cette calotte résiduelle constitue un réservoir permanent d'atmosphère solide.



Les régions polaires boréales de Mars et la calotte permanente de glace d'eau, photographiées par l'orbiteur de la mission *Viking 1*.
Crédit : NASA / JPL / USGS.

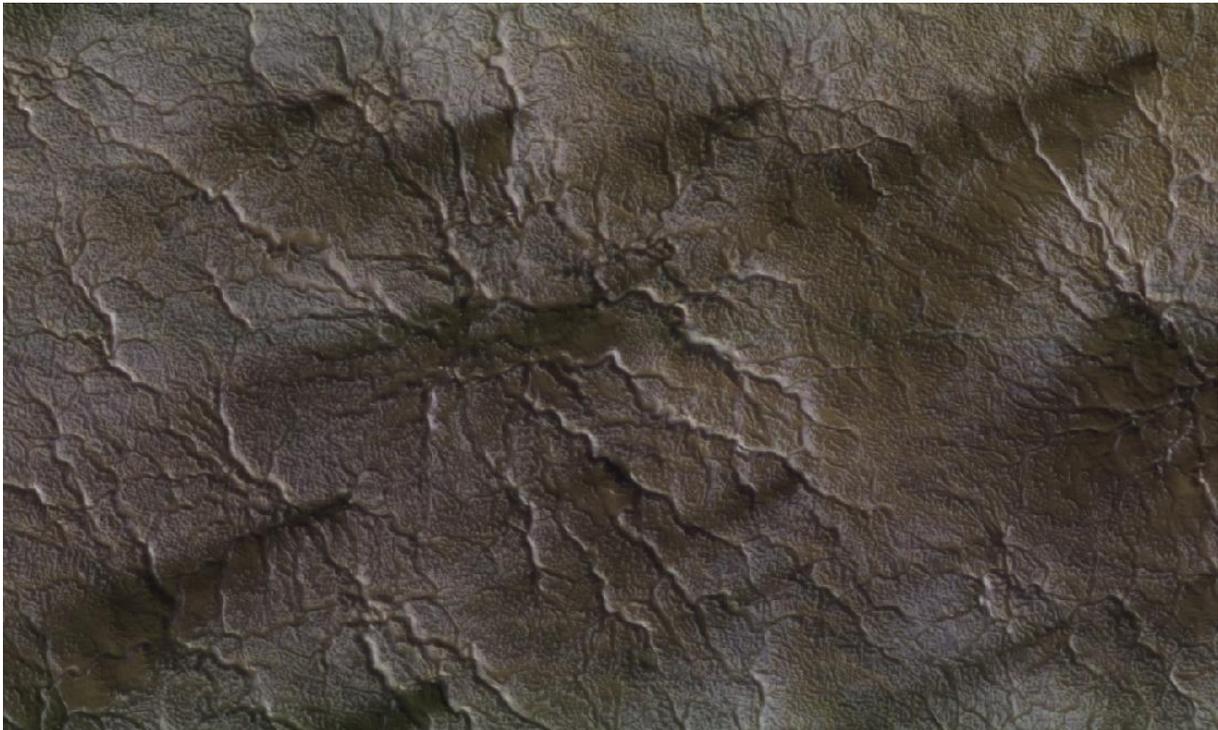


La calotte permanente de glace d'eau et de dioxyde de carbone de l'hémisphère sud, photographiée en avril 2000 par l'instrument *Mars Orbiter Camera* embarqué à bord de la sonde *Mars Global Surveyor*.
Crédit : NASA / JPL / Malin Space Science.

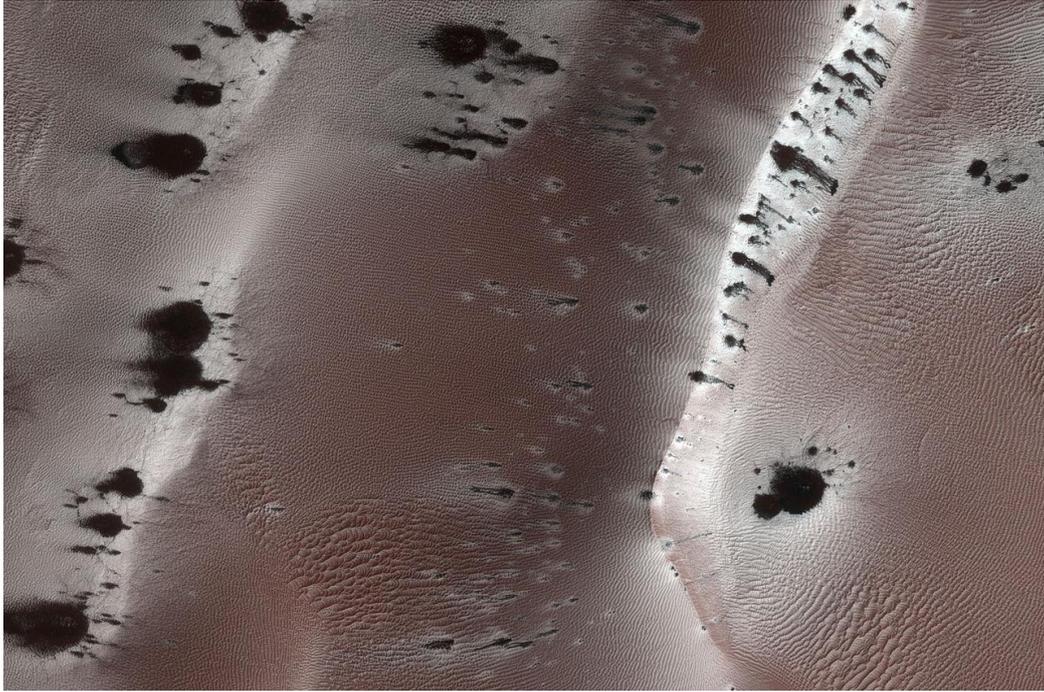
Le retrait printanier de la glace carbonique dans les régions polaires de l'hémisphère sud est à l'origine d'un phénomène spectaculaire et totalement inconnu sur Terre impliquant, semble-t-il, des geysers expulsant du dioxyde de carbone gazeux et des poussières.

Imaginez-vous en plein cœur de l'hiver...

Une couche de glace carbonique recouvre la surface à perte de vue, sur près de un mètre. Chaque jour pourtant, le Soleil monte un peu plus haut dans votre ciel. Lorsque le printemps arrive, ses rayons, passant sans encombre à travers la couche quasiment transparente de CO₂, ont acquis un angle d'incidence suffisant pour réchauffer avec efficacité le sol. La couche est donc chauffée par sa base. C'est à ce niveau que des poches de gaz de dioxyde de carbone se forment par sublimation, c'est-à-dire par passage direct de l'état solide à l'état gazeux. Encore emprisonné sous la glace mais produit continuellement, le gaz monte en pression... jusqu'à ce qu'il parvienne à soulever la plaque et à la fracturer en de nombreux sillons convergents, conférant ainsi au sol un aspect arachnéen. Le CO₂ est enfin libre de s'échapper. Il entraîne avec lui des poussières et le sable basaltique sombre sous-jacent : un geyser est né. Portés par les vents ou descendant les lignes de plus grande pente si le geyser se trouve sur une dune, ces matériaux dessinent en retombant les taches sombres et les traînées qui sont photographiées depuis 1998 par les sondes en orbite autour de Mars.

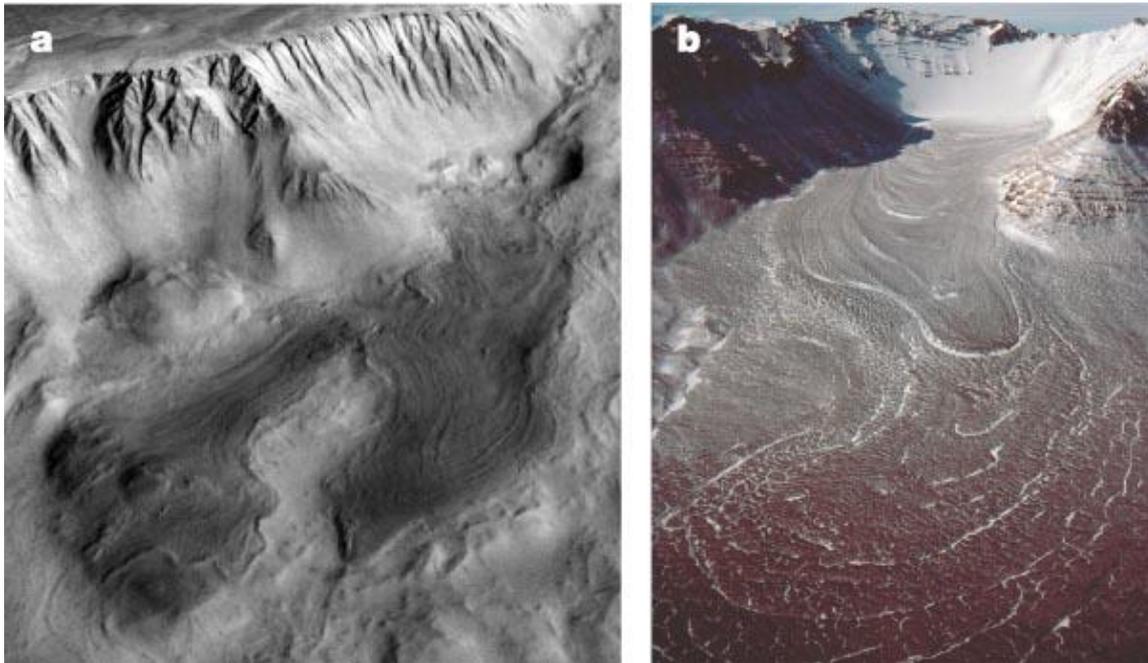


Détail de la calotte polaire australe au printemps. Une structure en araignée se dévoile au centre de l'image, prise par l'instrument HiRISE embarqué à bord de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* en février 2007. De telles structures ont typiquement entre 200 m et 600 m de diamètre. Des traînées noires sont également visibles. Crédit : NASA / JPL / University of Arizona.



Trainées noires ayant dévalé le flanc de plusieurs dunes parallèles. Image prise par l'instrument HiRISE embarqué à bord de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* en mai 2007.
Crédit : NASA / JPL / University of Arizona.

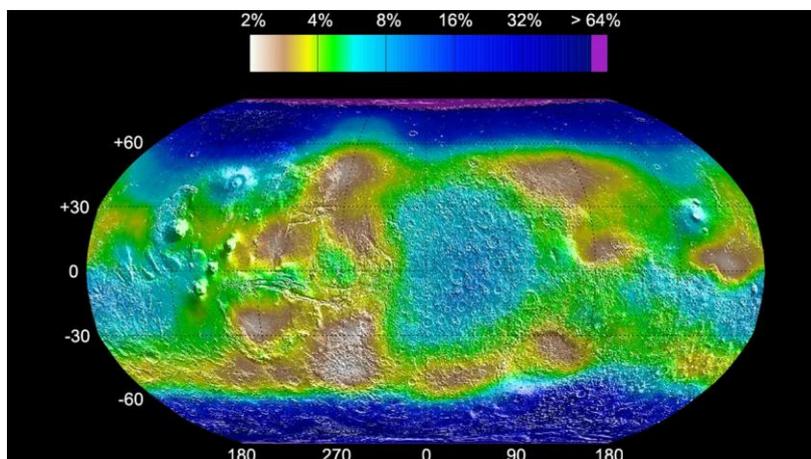
Le transport de l'eau sur Mars est actuellement unidirectionnel : la glace se sublime au pôle Nord pendant quelques mois et la circulation atmosphérique la transporte vers des latitudes plus australes, où elle condense sur la glace carbonique recouvrant en permanence la calotte polaire australe. Si ce mécanisme avait existé depuis l'origine, la réserve d'eau du pôle Nord serait épuisée depuis longtemps. Le cycle a sans doute existé en sens inverse par le passé, probablement à cause de la variation des paramètres orbitaux de la planète que sont l'excentricité de son orbite, l'inclinaison de son axe de rotation, la précession de cet axe et l'avance du périhélie de l'orbite. Les changements climatiques correspondant semblent avoir été découverts sous la forme de structures semblables aux vallées glaciaires terrestres, à des latitudes équatoriales.



L'instrument HRSC (pour High Resolving Stereo Camera) embarqué à bord de la sonde européenne *Mars Express* permet de créer des vues tridimensionnelles de la surface martienne, comme celle présentée sur l'image de gauche. On y découvre, sur le flanc occidental d'Olympus Mons, au pied de la falaise de 6 km qui le borde, ce qui ressemble à un glacier avec en vis-à-vis un équivalent terrestre. Crédit : J. Head et al., *Tropical to mid-latitude snow and ice accumulation, flow and glaciation on Mars*, Nature, Vol. 434, Issue 7031, pp. 346-351 (2005).

Sous la surface

L'instrument HEND (pour High Energy Neutron Detector), fourni par la Russie et embarqué à bord de la sonde américaine *2001 Mars Odyssey*, a permis de montrer que le **premier mètre sous la surface regorge de glace au-delà de 60° de latitude**. Il est possible que la glace soit présente à des latitudes plus équatoriales en grande quantité, mais elle est peut-être enfouie à plus d'un mètre sous la surface, donc indétectable par l'instrument.



Carte de la fraction massique de l'eau dans le premier mètre du sol martien, réalisée par l'instrument HEND de la sonde *Mars Odyssey*. La glace d'eau y constitue l'essentiel de la masse dans les régions polaires. Crédit : NASA / JPL-Caltech / Los Alamos National Laboratory.

Comment détecter l'eau sous la surface ?

Des rayons cosmiques entrent constamment en collision avec les noyaux atomiques du sol des corps célestes dénués d'atmosphère ou à l'atmosphère ténue. Ceux-ci émettent en réponse des neutrons rapides, qui, ralentis par les noyaux des atomes de la surface lors de collisions inélastiques, perdent progressivement leur énergie. L'hydrogène incorporé dans les molécules d'eau, qu'elle soit liquide ou solide, se révèle particulièrement efficace dans ce processus de ralentissement. Si certains neutrons sont absorbés par le sol, beaucoup arrivent à s'échapper. Ils donnent naissance à un flux quantifiable à l'aide d'un détecteur embarqué à bord d'une sonde spatiale. La mesure de la distribution des vitesses des neutrons permet, le cas échéant, de calculer la quantité d'eau à l'origine d'une éventuelle augmentation significative du flux de neutrons de basse énergie aux dépens du flux de neutrons de moyenne énergie. Grâce à cette technique, on sonde à distance la teneur en eau d'une planète dans le premier mètre sous sa surface. Elle a été appliquée avec succès lors des missions américaines *2001 Mars Odyssey* pour Mars, *Lunar Prospector* pour la Lune et *Dawn* pour les astéroïdes Vesta et Cérès.

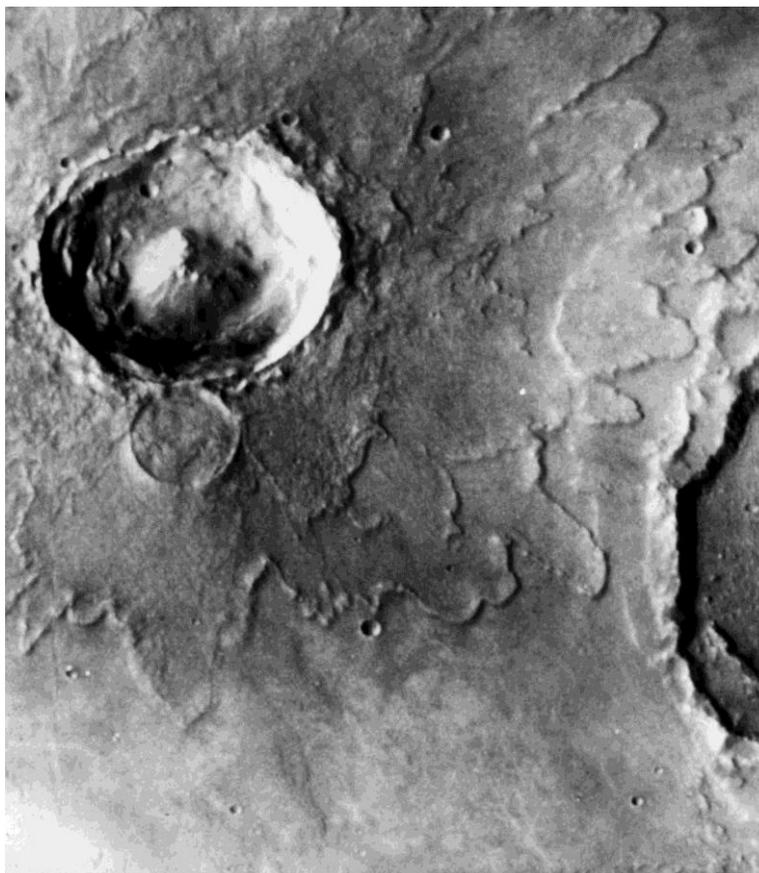
La découverte de *Mars Odyssey* fut brillamment confirmée par la sonde américaine *Phoenix*, qui se posa non loin du 68^{ème} parallèle nord en 2008. À perte de vue, un sol craquelé, empli de figures géométriques polygonales... Ce type de paysage se rencontre sur Terre dans les régions périglaciaires dont le sous-sol est soumis à un gel permanent, comme la Sibérie, l'Alaska ou le Canada. La rétraction thermique liée à une succession de gels sévères et de dégels en surface conduirait à l'apparition de réseaux de fissuration plus ou moins hexagonaux. L'atterrisseur *Phoenix*, rendu silencieux par la rigueur du terrible hiver martien depuis novembre 2008, était muni d'un bras robotisé avec lequel il a creusé des tranchées et prélevé des échantillons. Leur analyse à l'aide d'un spectromètre de masse, après un chauffage progressif à 1 000 °C dans un four miniature, dévoila sans ambiguïté la signature de la vapeur d'eau, signe que de la glace d'eau s'était sublimée. De plus, des photographies réalisées à quatre jours d'intervalle ont montré la disparition d'un matériau blanc dans une tranchée. Là aussi, la NASA a conclu quant à la nature de ce matériau : de la glace d'eau, s'étant progressivement sublimée suite à son exposition au Soleil. Enfin, on utilisa la caméra du bras robotisé pour capturer des images sous les jupes de l'atterrisseur. Des plaques lisses, comme nettoyées de leurs poussières par les rétrofusées de *Phoenix*, se dessinèrent. Leur apparence semble confirmer l'hypothèse que le matériau sous-jacent est bien de la glace d'eau.

Prise en 2008, cette photographie dévoile le sol situé sous l'atterrisseur *Phoenix*, dont les rétrofusées ont permis de dégager de larges plaques de glace d'eau.

Crédit : NASA / JPL-Caltech / University of Arizona / Max Planck Institute.

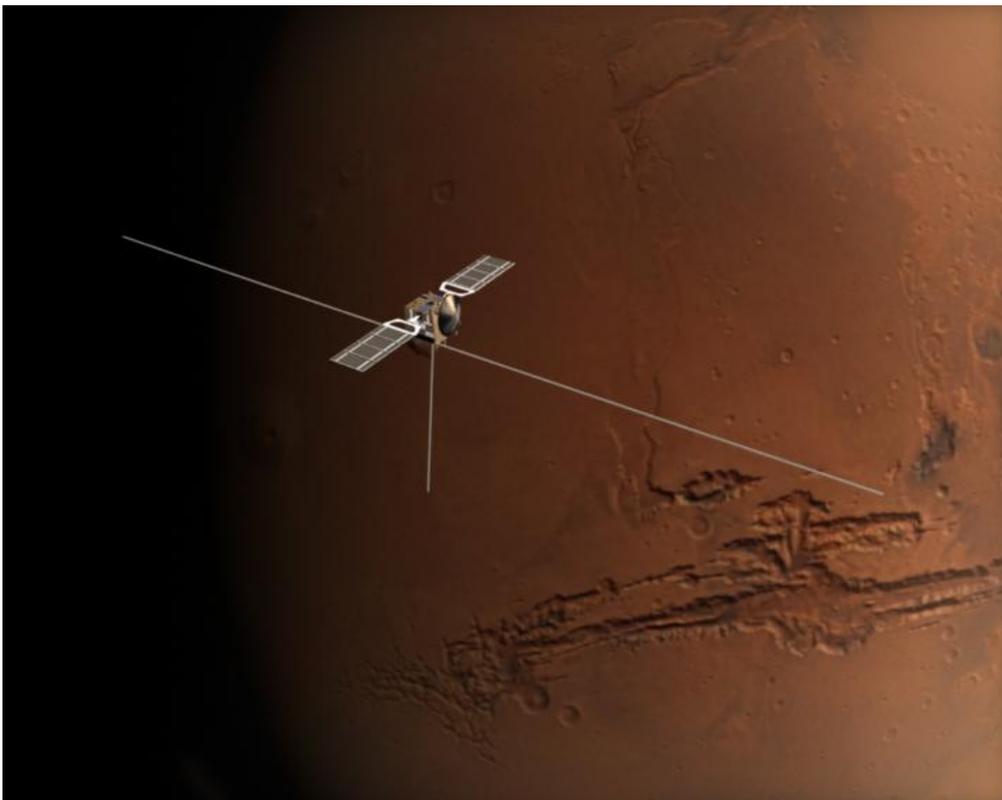


La nature offre également un coup de pouce à celui qui a des yeux pour voir... et quels yeux : La caméra HiRISE embarquée à bord de la sonde américaine *Mars Reconnaissance Orbiter*, utilise un télescope de 50 cm de diamètre pour prendre des images dévoilant des détails de 30 cm au sol ! En 2009, elle prit une série de photographies de cinq cratères d'impact très récents situés à des latitudes comprises entre 43° et 56°. Le matériau excavé, provenant de quelques décimètres sous la surface, avait l'aspect de la glace d'eau pure se sublimant au fil du temps, ce qui fut confirmé par le spectromètre CRISM (pour **C**ompact **R**econnnaissance **I**maging **S**pectrometer for **M**ars) dans le proche infrarouge. Si les planétologues savent que la glace est présente en subsurface aux hautes latitudes, ils n'imaginaient en découvrir aux latitudes « tempérées ». Pour les auteurs de l'étude, cette glace pourrait être une relique millénaire d'un climat martien plus humide qu'aujourd'hui. On trouve également un peu partout des **cratères à éjectas lobés**. Ils indiquent que le terrain sous-jacent contient une quantité importante de glace d'eau. Sous la chaleur de l'impact, la glace a fondu et le sous-sol s'est fluidifié. Souvent, les petits cratères – qui ne creusent que superficiellement – n'ont pas d'éjectas lobés, alors que les grands, qui creusent profondément, en ont. Des cas présentés, en particulier de la répartition des cratères à éjectas lobés, on est tenté de conclure que la glace est presque affleurante aux hautes latitudes, mais qu'il faut la chercher de plus en plus profondément à mesure que l'on s'approche de l'équateur, où elle ne serait présente qu'à partir de 300-400 m sous la surface.



Ce cratère, d'un diamètre proche de 20 km, est entouré d'éjectas. C'est certainement le signe d'un impact dans un matériau riche en eau. Crédit : NASA.

Est-il possible de sonder le sous-sol plus profondément ? En 2007, le radar MARSIS (pour **Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding**) embarqué sur l'orbiteur européen *Mars Express* a mis en évidence de grandes quantités de glace d'eau enfouies dans les terrains qui bordent la calotte résiduelle australe de CO₂ et n'affleurant qu'à ses frontières. MARSIS a également sondé les dépôts stratifiés entourant le pôle Nord de la planète. Le radar reçut deux échos distincts et puissants correspondant à une réflexion sur la surface et sur une interface entre deux matériaux. De l'analyse des échos et du temps séparant leur réception, les scientifiques ont déduit que, sur un socle basaltique profond reposait une couche de glace d'eau presque pure d'un kilomètre d'épaisseur. La quantité de glace d'eau contenue dans les calottes polaires se monterait à quelques millions de milliards de tonnes. De quoi recouvrir la planète d'un océan global d'une dizaine de mètres de profondeur.



Vue d'artiste de l'expérience MARSIS avec ses trois antennes complètement déployées sur *Mars Express*. Les deux plus longues forment une antenne dipolaire de 40 m. L'antenne monopole mesure 7 m. Les fréquences de travail du radar sont comprises entre 1,8 et 5 MHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde comprises entre 60 m et 166 m. Crédit : ESA.

1.3 De l'eau liquide aujourd'hui ?

Sur Terre, l'eau existe sous forme solide, liquide et gazeuse. Sa phase est uniquement définie par les conditions de pression et de température. Sous une pression de un bar, l'eau bout à 100 °C, mais au sommet de l'Everest, où la pression mesurée n'est plus en moyenne que de 0,336 bar soit 336 hPa, l'eau bout déjà théoriquement à 71 °C. À l'inverse, le point d'ébullition se déplace vers les hautes températures lorsque la pression augmente, jusqu'à atteindre le *point critique* où la transition de phase entre l'eau liquide et la vapeur d'eau est impossible, la masse volumique des deux phases étant la même. Pour l'eau, le point critique a pour coordonnées ($t = 373,95$ °C et $P = 220,6$ bar). Le choix du mot « coordonnées » n'est pas dû au hasard, puisqu'en thermodynamique, il est courant de représenter dans un diagramme bi- ou tridimensionnel les domaines de l'état physique d'un composé en fonction de variables choisies pour faciliter la compréhension du phénomène étudié. Le diagramme suivant indique les phases stables de l'eau pure, la température étant en abscisse et la pression en ordonnée.

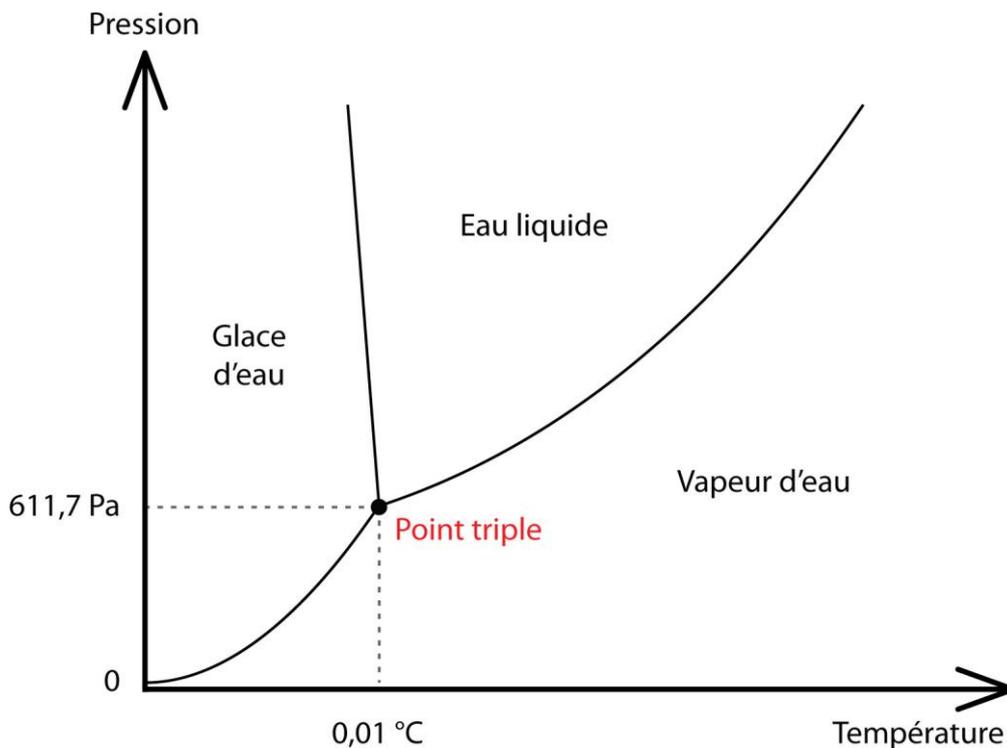


Diagramme de phases de l'eau.

Le point triple correspond à la coexistence des trois phases et lui aussi est défini de manière unique : 0,01 °C et 611,73 Pa, soit à peine 6 mbar. Quelle que soit la température, l'eau n'est pas stable à l'état liquide en dessous de cette pression. **Dans le milieu interstellaire, extrêmement ténu, et à la surface de la plupart des objets du système solaire, l'eau liquide n'existe donc pas. Les conditions moyennes que l'on trouve sur Mars (-60 °C et 6 mbar) font que l'eau pure liquide ne peut subsister que de façon très marginale à la surface de la planète rouge.** Cependant, rien n'interdit son existence temporaire dans des conditions bien particulières, comme par exemple durant l'été ($t > 0$ °C) au fond du bassin d'impact Hellas Planitia ($P > 6$ mbar).

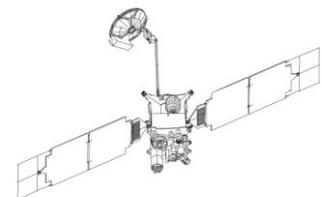
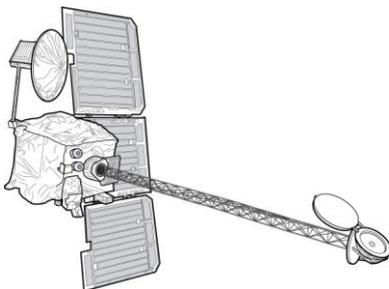
Ce que nous venons d'écrire n'est vrai que pour de l'eau pure. De l'eau salée peut parfaitement demeurer liquide malgré une température bien inférieure à 0 °C, comme en témoigne sur Terre le lac Don Juan. Ce petit lac d'Antarctique découvert en 1961 ne gèle pas même lorsque la température du site descend sous les -50 °C ; il consiste en une solution presque saturée de chlorure de calcium (CaCl₂).

En effet, la présence d'un soluté abaisse, parfois significativement, la température de solidification de l'eau, qui demeure liquide à des températures inférieures à 0 °C. Ainsi, l'eau de mer, dont la salinité moyenne s'élève à 35 g/L, ne se solidifie qu'à -1,8 °C. L'eutectique eau – chlorure de sodium peut rester liquide jusqu'à -21,1 °C lorsque la fraction massique de NaCl vaut 0,233. Avec le chlorure de calcium (CaCl₂), on descend à -51,6 °C.

Eutectique, vous avez dit eutectique ?

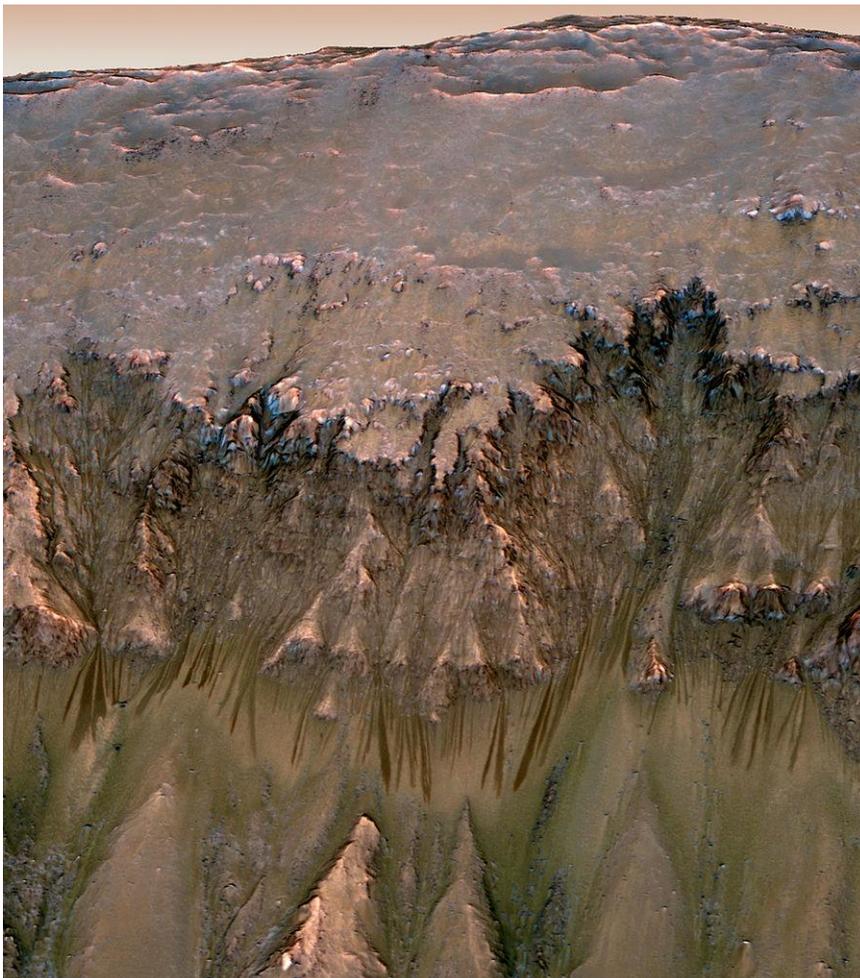
Un eutectique est un mélange de deux corps purs qui se solidifie et fond à température constante, à la différence des mélanges habituels. Ce mélange se comporte comme un corps pur vis-à-vis de la fusion. Dans un diagramme de phases, l'eutectique est également le point pour lequel le mélange atteint son minimum de température tout en restant liquide.

Il est possible d'atteindre des eutectiques se solidifiant à des températures encore plus basses. On sait, par exemple, que l'ion perchlorate ClO₄⁻ abonde à la surface de Mars, sans doute associé aux ions sodium, magnésium et calcium sous des formes plus ou moins hydratées de NaClO₄·nH₂O (0 ≤ n ≤ 2), Mg(ClO₄)₂·nH₂O (0 ≤ n ≤ 6) et Ca(ClO₄)₂·nH₂O (0 ≤ n ≤ 8). L'origine du perchlorate est encore sujette à débat. Quoiqu'il en soit, les sels de perchlorate sont extrêmement hygroscopiques (ils absorbent l'humidité de l'air), très solubles et, en solution aqueuse, ils peuvent former des eutectiques liquides jusqu'à -37 °C, -67 °C et -77 °C respectivement. Des telles **saumures** à basse température pourraient donc exister sur Mars aujourd'hui, d'autant plus qu'elles se montrent plus stables que l'eau pure en s'évaporant dix fois plus lentement. Des solutions aqueuses de sulfates (MgSO₄ et FeSO₄) et de chlorures (FeCl₃, MgCl₂ et CaCl₂) présentent un comportement tout à fait similaire à celui des solutions de sels de perchlorates. D'ailleurs, des dépôts de sulfates de magnésium monohydratés (kiesérite MgSO₄·H₂O), polyhydratés (epsomite MgSO₄·7H₂O), de sulfates de fer hydratés (szomolnokite Fe²⁺SO₄·H₂O, rozénite Fe²⁺SO₄·4(H₂O)) et de sulfates de fer et de potassium hydroxylés (jarosite KFe³⁺(OH)₆(SO₄)₂) ont été identifiés par spectroscopie sur des sites emblématiques comme Meridiani Planum, Valles Marineris et Margaritifer Sinus par les sondes européenne *Mars Express* et américaine *Mars Reconnaissance Orbiter*.



Des saumures pourraient être à l'origine des lignes de pente récurrentes, ces mystérieuses zébrures sombres, larges de 50 cm à 5 m, que l'on décèle sur les pentes abruptes de quelques cratères de l'hémisphère austral. Apparaissant dès la fin du printemps sur les versants exposés au Soleil et s'écoulant vers le centre des cratères en été, les lignes de pente récurrentes s'évanouissent à la saison froide. L'hypothèse a été confirmée en septembre 2015 lorsqu'une équipe de chercheurs essentiellement américaine a dévoilé des résultats obtenus par le spectromètre CRISM embarqué à bord de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* : CRISM a détecté des sels hydratés sur quatre lignes de pente récurrentes, au plus fort de leur extension. Le signal acquis est compatible avec la présence de perchlorate de magnésium $Mg(ClO_4)_2$, de chlorate de magnésium $Mg(ClO_3)_2$ et de perchlorate de sodium ($NaClO_4$). Voilà donc qui appuie fortement l'hypothèse selon laquelle les lignes de pente récurrentes seraient la conséquence d'une activité contemporaine de l'eau liquide sur Mars. Notez bien que, **contrairement à ce que l'on a pu lire ou entendre dans les médias, on n'a pas vu directement de l'eau couler sur Mars !**

Si l'eau liquide est bien impliquée, quelle pourrait en être l'origine ? Plusieurs hypothèses s'affrontent. L'une d'elles prétend que sa source n'est autre que la vapeur d'eau atmosphérique, absorbée par les sels présents en surface, que l'on sait hautement hygroscopiques. Une autre affirme qu'elle proviendrait de réservoirs aquifères souterrains sous pression. De nouvelles observations pourront nous en apprendre plus.



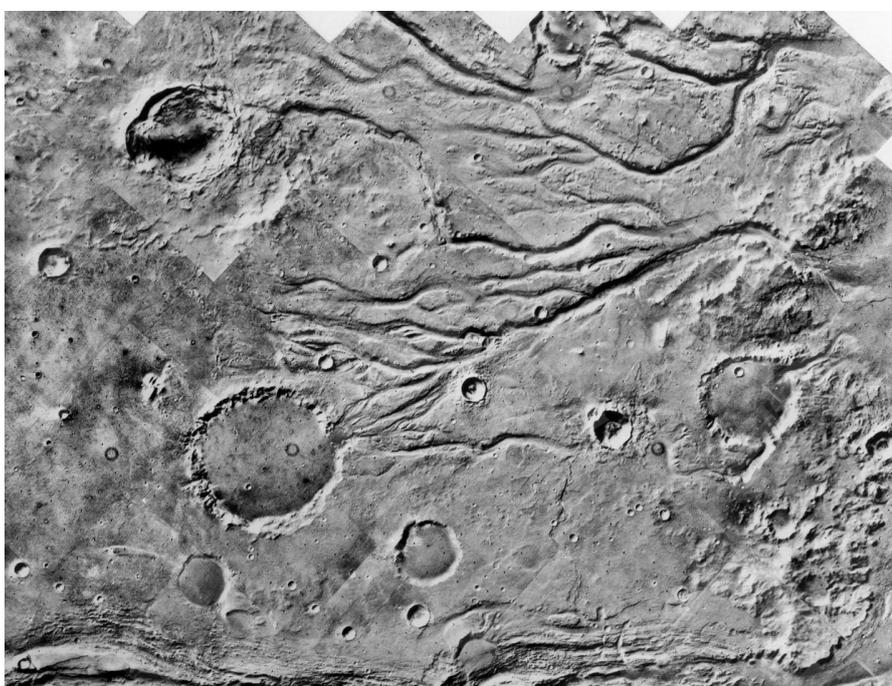
La moitié inférieure de cette photographie réalisée l'instrument HiRISE embarqué à bord de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* en mai 2011 montre des lignes de pente récurrentes à l'intérieur du cratère d'impact Newton. Crédit : NASA / JPL-Caltech / University of Arizona.

1.4 Il y a bien longtemps...

Alors que les planétologues commencent à retracer l'histoire géologique de la planète Rouge, de nombreux indices minéralogiques et géologiques ne laissent quasiment plus de place au doute : de l'eau liquide a bien coulé en abondance sur Mars. Quels sont ces indices ? Pourquoi l'eau a-t-elle disparu ? Qu'est-elle devenue ? La chronologie que nous proposons maintenant est, bien évidemment, susceptible d'être révisée. Pour la définir précisément, il faudra attendre un retour d'échantillons de roches martiennes, récoltées en de nombreux endroits de la planète, afin de calibrer les datations de manière absolue.

Il y a plus de 4,2 milliards d'années : de l'eau en abondance

Sur les hauts plateaux cratérisés de l'hémisphère austral, dans des terrains très âgés, existent des structures ressemblant à des **réseaux de vallées aujourd'hui asséchées**. À ce jour, pas moins de 40 000 ont été découvertes.

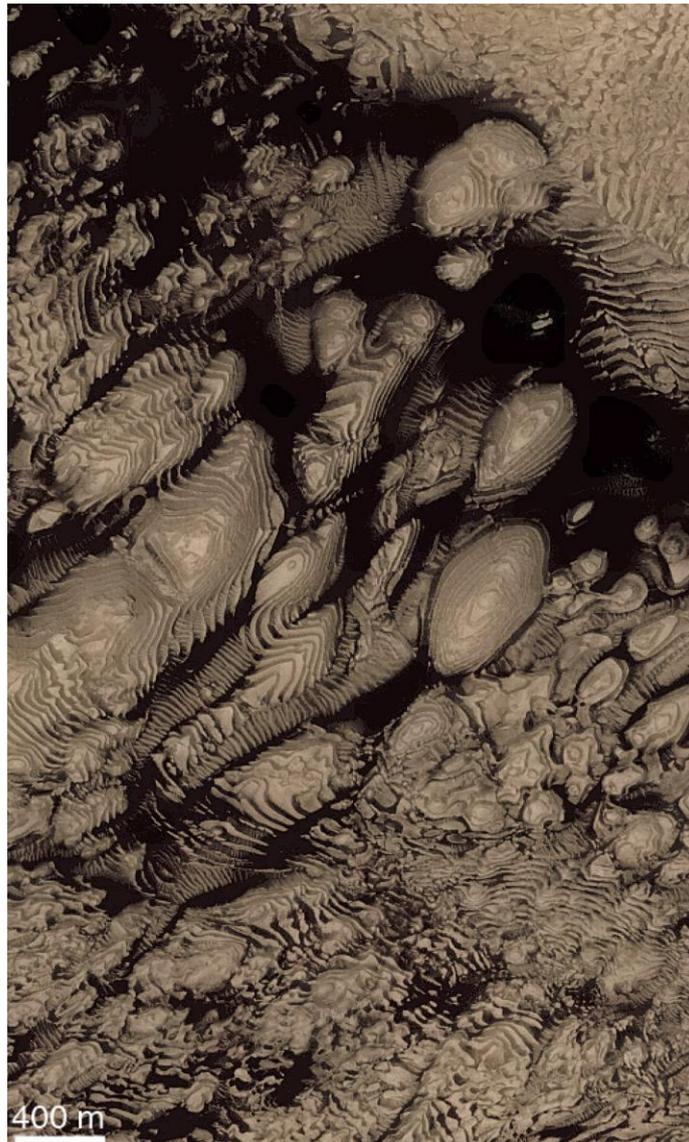


D'anciens lits de rivières asséchées hantent les hauts plateaux martiens.
Crédit : NASA.

Beaucoup de ces vallées ramifiées naissent sur les flancs de volcans et de cratères d'impacts. On peut donc penser que les remontées de magma – ou la chaleur libérée lors d'impacts météoritiques – ont chauffé la glace du sous-sol, l'ont liquéfiée voire vaporisée, et l'ont faite remonter à la surface pour donner naissance à des geysers et à des sources alimentant des rivières. La pluie pourrait avoir joué un rôle non négligeable, que ce soit par son action érosive constatée sur les terrains les plus anciens ou par son ruissellement entretenant d'hypothétiques nappes phréatiques.



On trouve aussi des **dizaines de cratères d'impact ayant pu momentanément être occupés par des lacs**. Le plancher de certains cratères est en effet recouvert de matériaux finement stratifiés, typiques de dépôts sédimentaires en milieu lacustre sur Terre. Toutefois, il convient de rester prudent et de ne pas tirer de conclusions trop hâtives à partir de la comparaison avec ce que l'on trouve sur Terre. A l'échelle géologique, cette dernière est en perpétuelle évolution (tectonique des plaques, érosion etc.). Depuis trois milliards d'années, Mars n'a sans doute connu que l'érosion éolienne. Aussi les structures présentées ici pourraient n'avoir rien à voir avec l'eau et trouver leur origine dans des dépôts de poussières rythmés par les changements climatiques.

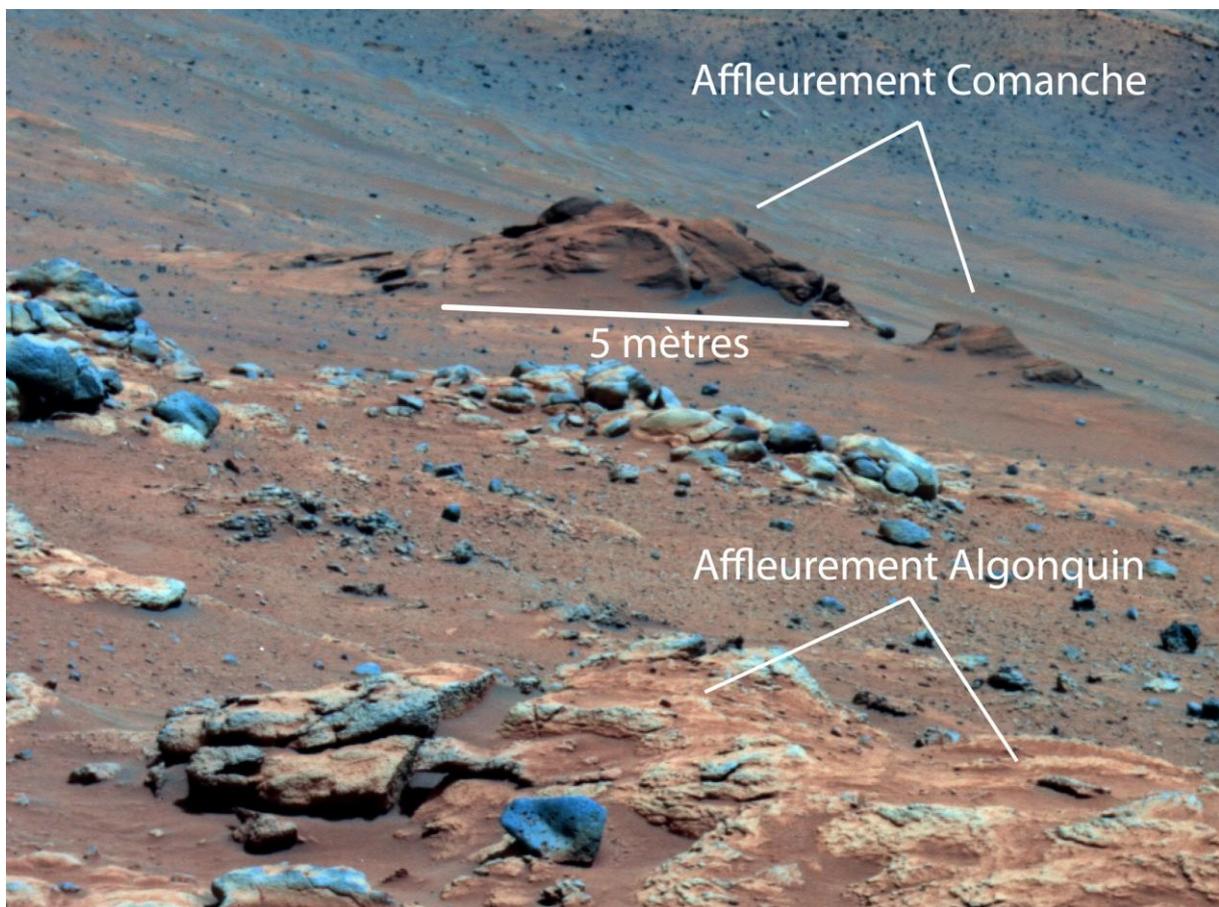


Arabia Terra est une vaste région de terrains anciens située dans l'hémisphère nord de Mars. Dans sa partie occidentale, on trouve un cratère de 64 km de diamètre où des sédiments se sont déposés avec une grande régularité. Un lac a-t-il autrefois occupé les lieux ? Rien n'est moins sûr... Des dépôts de cendres volcaniques ou de poussières pourraient avoir conduit à une stratification semblable. Photographie réalisée par l'instrument Mars Orbiter Camera embarqué à bord de la sonde *Mars Global Surveyor* en décembre 2000.

Crédit : NASA / JPL / Malin Space Science Systems.

Une des découvertes majeures de cette dernière décennie est la détection de silicates en feuillets appelés **phyllosilicates** dans les terrains les plus anciens. Réalisée à l'aide de l'instrument OMEGA (pour **O**bservatoire pour la **M**inéralogie, l'**E**au, les **G**laces et l'**A**ctivité) embarqué à bord de la sonde *Mars Express*, la découverte fut confirmée un peu plus tard et les phyllosilicates caractérisés par l'instrument CRISM à bord de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter*. Ces minéraux se forment lors de l'interaction prolongée de roches magmatiques comme le basalte avec de l'eau liquide neutre à basique.

Enfin, en analysant de nouveau des données obtenues en 2005 par le rover *Spirit* dont nous reparlerons plus avant, on s'aperçut en 2010 que des **carbonates** de magnésium ($MgCO_3$) et de fer ($FeCO_3$) avait été découverts dans un affleurement rocheux très ancien nommé Comanche. Leur production nécessite impérativement l'existence pérenne d'une eau liquide au pH neutre, en tout cas non acide.

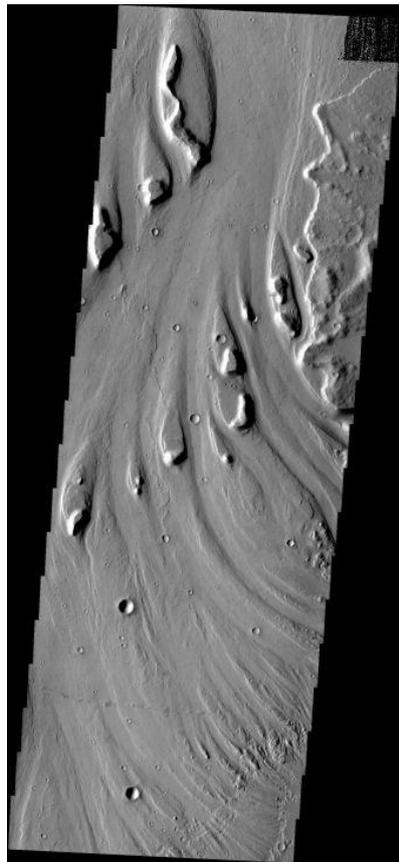


Vue en fausses couleurs d'un affleurement rocheux surnommé Comanche. La présence de carbonates suggère que Mars a pu constituer un environnement favorable à la vie... il y a très longtemps.

Crédit : NASA / JPL-Caltech / Cornell University.

Entre 4,2 et 3,8 milliards d'années avant nos jours : derniers témoignages d'une époque humide... mais acide

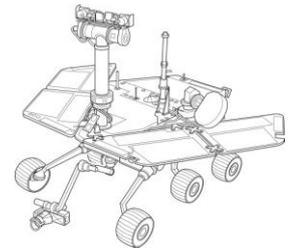
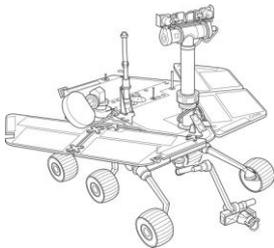
De part et d'autre de Valles Marineris, dans des terrains plus jeunes que ceux portant les réseaux ramifiés évoqués plus haut, de grandes vallées semblent avoir été façonnées par des **inondations catastrophiques**, d'une puissance extraordinaire. Au sein de ces vallées, on aperçoit des îlots en forme de larme. Ce sont des obstacles topographiques contournés par les chenaux d'inondation et orientés par le sens de l'écoulement. Les débits correspondant sont sans commune mesure avec leurs équivalents terrestres. Si le débit moyen de l'Amazone, de loin le plus puissant des fleuves, s'élève à 200 000 m³/s, celui des vallées de débâcle martiennes se serait monté à plusieurs millions, voire plusieurs dizaines de millions de mètres cubes par seconde !



Dans *Mangala Valles*, des écoulements torrentiels ont raboté la surface martienne et créé des îlots en forme de larme. Crédit : NASA / JPL / University of Arizona.

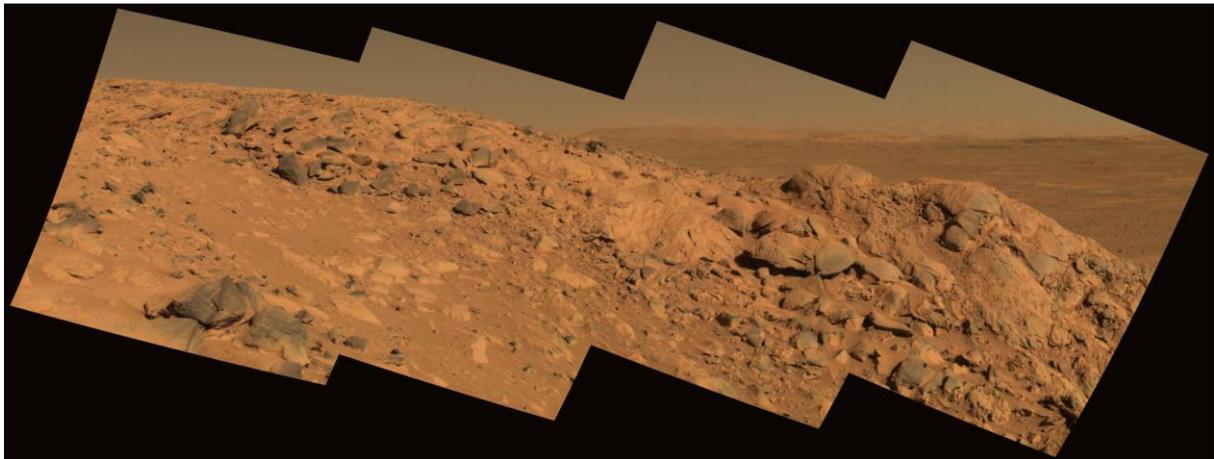
Deux mécanismes sont susceptibles d'avoir engendré les vallées de débâcle : la vidange brutale d'une nappe phréatique sous pression contenue dans le pergélisol martien ou la fonte de ce dernier causée par une remontée de magma le long de fractures dans la croûte. La NASA a choisi une de ces vallées (*Ares Vallis*) pour y faire atterrir la mission *Pathfinder* le 4 juillet 1997, jour de la fête nationale américaine, marquant ainsi le retour des États-Unis sur la planète Rouge plus de vingt ans après les missions *Viking*.

L'étude de la forme des roches en surface dans Ares Vallis n'a pas permis de contraindre leur origine. Certaines semblent avoir été charriées par des flux de liquides, d'autres ressemblent à des retombées d'éjectas de cratères proches, d'autres enfin présentent l'aspect de roches volcaniques ayant subi une longue érosion éolienne. L'analyse chimique a révélé que le sol était enrichi en sulfate de magnésium. Le processus le plus vraisemblable ayant mené à la création de ce minéral est l'**altération hydrique de roches volcaniques en milieu acide**. Les sulfates se forment en effet par évaporation d'eau liquide contenant des sels dissous. Ares Vallis n'est pas le seul endroit où l'on ait détecté des sulfates. *Mars Express* a, par exemple, contribué à la découverte de kiesérite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dans une plaine équatoriale nommée Meridiani Planum, de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) en bordure de la calotte polaire boréale, mais également de gypse reposant sur de la kiesérite au fond de ce qui serait un lac asséché. Ces minéraux pourraient constituer les résidus de l'évaporation d'étendues d'eau liquide contenant des sulfates de magnésium et de calcium dissous. La détection de chlorures sur les hautes terres de l'hémisphère austral par l'instrument THEMIS embarqué sur la sonde *Mars Odyssey* en 2007 va également dans le sens de l'évaporation d'un réservoir d'eau salée en surface. Enfin, en 2003, l'instrument TES (pour **T**hermal **E**mission **S**pectrometer) embarqué à bord de la sonde *Mars Global Surveyor* a repéré 30 000 km² de terrains riches en olivine dans un vaste système de failles appelé Nili Fossae. Ce silicate est instable en présence d'eau et se transforme facilement en d'autres minéraux. Sa détection implique que les terrains où il apparaît n'ont pas été exposés à l'eau liquide depuis sa formation il y a trois milliards d'années. Elle fournit donc une contrainte forte sur le déroulement de l'histoire géologique de la planète Rouge.



Il serait injuste de limiter notre connaissance de Mars aux apports des sondes en orbite. Rien ne remplace l'œil du géologue sur le terrain. Ou plus exactement... l'œil du robot géologue. La mission *Mars Pathfinder* dont nous venons de parler comprenait un atterrisseur qui, une fois à la surface, a libéré un rover nommé *Sojourner*. Ce dernier a parcouru une centaine de mètres et a analysé la composition chimique de quelques rochers. Si *Sojourner* a toujours davantage constitué aux yeux de ses concepteurs et de ses financeurs un démonstrateur technologique plutôt qu'un laboratoire scientifique, on ne peut pas en dire autant de *Spirit* et *Opportunity*. D'une masse de 180 kg, les deux robots ont atterri sans encombre à la surface de Mars en janvier 2004 à quelques jours d'intervalle, sur des sites susceptibles d'avoir conservé des traces de l'action de l'eau. *Spirit* s'est posé dans un cratère de 166 km de diamètre ayant peut-être accueilli un lac, Gusev. Son jumeau *Opportunity* a touché le sol dans Meridiani Planum, une région ancienne riche en hématite cristalline, comme a permis de le montrer le spectromètre TES embarqué sur *Mars Global Surveyor*. Sur Terre, ces cristaux à l'éclat métallique se forment par exemple dans les systèmes hydrothermaux. Toutefois, le processus de leur genèse n'implique pas toujours l'eau. Il convenait donc d'aller voir sur place. Conçus pour mener à terme leur mission scientifique en trois mois, les deux petits robots ont dépassé les espérances les plus folles en matière de longévité. Le dernier contact avec *Spirit* fut établi en mars 2010, plus de six ans après son arrivée sur Mars. Il avait alors couvert une distance supérieure à 7 km. À l'heure où nous écrivons ces lignes, *Opportunity* continue ses investigations à la surface de la planète rouge et affiche près de 43 km au compteur – ou devrait-on dire, à l'odomètre. Faisons le point sur les découvertes réalisées par ces deux missions.

- Les premiers mois d'exploration de *Spirit* se sont avérés décevants : après avoir parcouru plus de trois kilomètres, le rover n'avait trouvé que des blocs de roche volcanique. Le cratère Gusev semble avoir été recouvert par une coulée de lave postérieure à l'existence supposée du lac. Le moral des chercheurs d'eau a grimpé en flèche en même temps que *Spirit* partait à l'assaut des collines Columbia, nommées ainsi en mémoire de la désintégration de la navette spatiale *Columbia* le 1^{er} février 2003 durant laquelle sept astronautes ont perdu la vie. Des affleurements rocheux révélés par l'érosion lui ont permis de découvrir de l'hématite cristalline, des minéraux hydratés et des roches stratifiées.



Spirit au sommet de sa forme et des collines Columbia, dominant la plaine du cratère Gusev. La mosaïque met en valeur un affleurement rocheux baptisé *Longhorn*. Crédit : NASA / JPL / Cornell University.

Trois autres découvertes majeures sont à mettre à l'actif de *Spirit*. Deux d'entre elles furent accidentelles :

- en mars 2006, le moteur commandant la roue avant droite du rover cessa de fonctionner. *Spirit* poursuivit donc sa mission avec cinq roues valides, traînant sa roue inopérante comme un poids mort. Bien lui en prit ! En effet, en décembre 2007, la patte folle du robot racla si bien le sol qu'elle mit à jour un matériau blanchâtre sous-jacent. Son analyse montra qu'il était très riche en **silice** amorphe (SiO_2), à hauteur de 90 %. Sur Terre, c'est dans les systèmes hydrothermaux que se forme la silice, lorsque de l'eau liquide ou de la vapeur entrent en contact avec des roches volcaniques. Voilà donc un élément supplémentaire à mettre au crédit de la présence passée de sources chaudes ou de geysers martiens ;



Le sol creusé par la roue inopérante de *Spirit* est si riche en silice que seule l'eau liquide semble avoir été capable de créer une telle concentration. Crédit : NASA / JPL / Cornell University.

- en avril 2009, *Spirit* se retrouva enlisé dans une zone surnommée Troy et il ne fut jamais en mesure de s'extraire de ce sol meuble à faible cohésion. Dans une tentative désespérée pour se libérer de l'étreinte minérale, le robot mit à nu des sulfates. Et nous avons déjà vu combien la formation de ces derniers est intimement liée à l'action de l'eau ;
 - Enfin, *last but not least*, comme nous l'avons signalé plus haut, *Spirit* a découvert une quantité importante de carbonates dans l'affleurement Comanche. Leur abondance est semblable à celle mesurée dans la météorite martienne ALH 84001, météorite qui avait défié la chronique en 1996 quand, à grand renfort de publicité, la NASA avait annoncé (à tort semble-t-il) qu'elle contenait des bactéries extraterrestres fossilisées. Si la formation des sulfates et des chlorures détectés jusqu'ici nécessitait l'action de l'eau, certes, elle impliquait aussi un milieu acide. La découverte des carbonates constitue une avancée fondamentale car leur production exige l'existence pérenne d'une eau liquide au pH neutre. Pour la première fois, il semble que l'on puisse affirmer, sur la foi de résultats scientifiques probants, que Mars a connu il y a très longtemps des conditions de surface *non hostiles* à la vie. Quelle belle revanche pour *Spirit*, à qui les chercheurs ont souvent préféré son jumeau *Opportunity* !
- Par un hasard extraordinaire, ce dernier s'est posé au fond d'un petit cratère de 22 m de diamètre nommé Eagle, dont les flancs exhibaient un affleurement de roches claires à l'aspect stratifié. Leur analyse prouva rapidement qu'elles étaient composées de sels de sulfate hydraté. Le lecteur est désormais familier avec leur mode de formation impliquant l'eau. *Opportunity* photographia également des sphérules de quelques millimètres incluses dans la roche, de composition très différente, certaines d'entre elles tapissant la surface au fur et à mesure que la roche se désagrège sous l'effet de l'érosion éolienne. Ces sphérules sont faites d'hématite cristalline, celle-là même que *Mars Global Surveyor* avait détecté depuis son orbite. Peu après son arrivée à la surface de la planète rouge, *Opportunity* porta son attention sur un affleurement rocheux présentant une fine stratification, El Capitan.

Le mini-spectromètre MIMOS II (pour **M**iniaturized **M**OSsbauer **S**pectrometer) que le robot embarque a permis de montrer qu'El Capitan contenait de la **jarosite**, un sulfate ferrique hydraté de formule $x\text{Fe}^{3+}(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$, x pouvant être l'atome de sodium (Na) ou de potassium (K). Dans l'environnement terrestre, ce minéral se forme par altération hydrique de roches volcanique en milieu acide. Toutefois, l'eau ayant permis la genèse de la jarosite la dégrade assez rapidement en oxyhydroxydes ferriques comme la goethite $\text{FeO}(\text{OH})$. Sa formation en climat humide a donc dû être rapidement suivie jusqu'à aujourd'hui d'un climat aride, nécessaire à la préservation de ce minéral. Voilà qui permet de préciser encore davantage l'enchaînement des épisodes climatiques sur Mars, ce que nous allons tenter de faire maintenant.



Photographie en fausses couleurs de l'affleurement rocheux El Capitan, nommée ainsi d'après une montagne texane. Réalisée en février 2004 par le rover *Opportunity*, elle dévoile de nombreuses sphérules de taille millimétrique, composés d'hématite, sous la forme de petites billes bleutées.
Crédit : NASA / JPL / Cornell University.

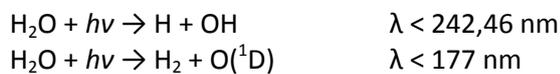
2 Une histoire de Mars

Nous venons de recenser un faisceau d'indices appuyant l'hypothèse de la présence passée d'eau liquide à la surface de Mars. Il y a plus de 4,2 milliards d'années, la planète Rouge aurait hébergé des rivières, des lacs voire un océan. Cette eau s'est ensuite raréfiée, la planète connaissant de brefs épisodes d'écoulements catastrophiques mais surtout une disparition progressive de ses réservoirs en milieu acide. Depuis trois milliards d'années, la surface oxydée de Mars semble être aussi aride qu'elle l'est aujourd'hui. Qu'est devenue l'eau ? Pourquoi a-t-elle disparue ?

Le noyau et le manteau martiens se sont formés lors d'une première phase d'accrétion, complétée par l'apport ultérieur de planétésimaux riches en eau. Comme Vénus et la Terre, Mars a vu le jour en piégeant de grandes quantités d'eau dans ses roches constitutives. Une partie de cette eau a été relâchée dans l'atmosphère pendant l'accrétion puis lors de poussées volcaniques, comme celle ayant mené au soulèvement du gigantesque dôme de Tharsis. Aujourd'hui, le rapport HDO/H₂O est environ six fois plus élevé que sur Terre. Cet enrichissement en deutérium est compatible avec l'échappement d'une atmosphère primordiale plus dense que l'atmosphère actuelle.

Le rapport D/H, preuve de l'échappement atmosphérique

L'eau de nos océans s'évapore. Malgré le piège froid constitué par la tropopause, une faible quantité de vapeur d'eau parvient dans la haute atmosphère. Les molécules d'eau peuvent alors subir une photodissociation sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet, maximale entre 70 et 95 km d'altitude, selon les deux canaux suivants :

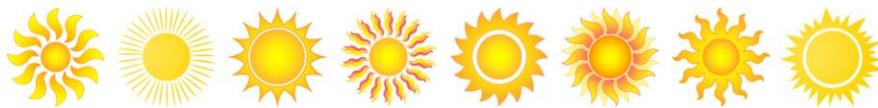


Ici, O(¹D) est un état excité très réactif de l'atome d'oxygène, qui se stabilise rapidement en O(³P) par collision avec N₂ ou O₂.

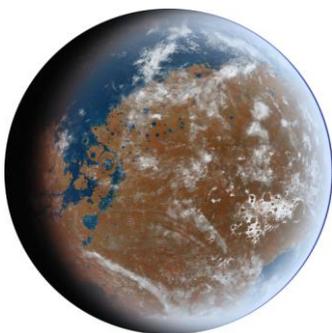
La formation de H et OH est le processus dominant à toutes fréquences, bien que le second canal fournisse une contribution non négligeable (25 %) à 121,6 nm, longueur d'onde de la raie Lyman-α qui correspond à la transition électronique du niveau d'énergie n=2 de l'atome d'hydrogène vers son niveau fondamental n=1. Il s'ensuit une perte d'hydrogène vers l'espace, alors que l'oxygène et le radical hydroxyle s'associent à d'autres atomes ou molécules. Cette destruction de l'eau est limitée par la température faible de la tropopause. Inutile de s'alarmer : la disparition des océans n'est pas pour demain car la masse d'eau impliquée est très faible comparée à la leur. En effet, au rythme où l'hydrogène s'échappe aujourd'hui, nos océans auront perdu moins de 0,001 % de leur masse dans cent millions d'années. Toutefois, l'astrophysique stellaire nous enseigne que le Soleil devient progressivement plus brillant, gagnant environ 10 % en luminosité chaque milliard d'années. Inévitablement, l'atmosphère terrestre se réchauffera et ses couches supérieures s'enrichiront en vapeur d'eau. Le mécanisme de photolyse et d'échappement présenté plus haut, aujourd'hui marginal, entraînera une telle perte que toute trace d'eau devrait avoir disparu de la surface de notre planète dans deux à trois milliards d'années. Vénus a sans doute perdu son eau ainsi. En effet, les astronomes ont mesuré un enrichissement très important en deutérium dans l'atmosphère de l'étoile du Berger, qui ne peut se comprendre que par un processus d'échappement sélectif. **Deux fois plus massif que l'hydrogène, le deutérium s'échappe moins facilement que ce dernier et finit par se retrouver concentré durant le processus dont la photodissociation de l'eau est à l'origine.** Avec des rapports D/H respectivement six fois et plus de cent fois supérieurs au cas terrestre, Mars et surtout Vénus semblent donc avoir possédé, il y a bien longtemps, de grandes réserves d'eau liquide aujourd'hui disparues.

De toute façon, il s'avère impératif de postuler l'existence d'une atmosphère dense passée pour expliquer la présence d'eau liquide, qui n'est stable que sous une pression suffisante. Deux difficultés singulières et imbriquées se dressent alors devant nous :

- 1) Les modèles stellaires montrent qu'il y a quatre milliards d'années, le Soleil possédait une luminosité inférieure d'environ 25 % à sa luminosité actuelle. Même si l'on suppose que Mars possédait alors une atmosphère dense de CO₂ (500 mbar) et de vapeur d'eau, la température en surface ne pouvait atteindre 0 °C. Afin de maintenir l'eau à l'état liquide, doit-on faire appel arbitrairement à d'autres gaz à effet de serre comme l'ammoniac (NH₃), le dioxyde de soufre (SO₂) ou le méthane (CH₄) ? Pas nécessairement, puisqu'il semble que des nuages de glace de CO₂, dont on sait qu'ils renvoient efficacement le rayonnement infrarouge de la planète vers la surface, aient pu jouer ce rôle en augmentant la température de surface de près de 15 °C. La première difficulté semble franchie...



- 2) L'hydratation laisse des traces sur l'environnement en altérant les minéraux. La présence conjointe de dioxyde de carbone et d'eau liquide s'accompagne ainsi généralement de la formation de roches carbonatées. En effet, le CO₂ atmosphérique se dissout facilement dans l'eau liquide. Il échange des protons avec l'eau, selon l'acidité, pour donner des ions bicarbonate HCO₃⁻ et carbonate CO₃²⁻. Si des cations sont présents en solution (Fe²⁺, Mg²⁺...), il se forme des carbonates comme la sidérite FeCO₃ et la magnésite MgCO₃. Une première analyse mène donc à la conclusion suivante : si nos hypothèses sont correctes, on devrait découvrir de grandes quantités de carbonates sur Mars. Et c'est là que le bât blesse. Car le spectromètre imageur OMEGA embarqué sur la sonde *Mars Express*, pourtant taillé pour les détecter... n'a rien vu. C'est le paradoxe des « carbonates manquants ». Trois hypothèses ont été proposées pour le résoudre. Tout d'abord, des carbonates auraient pu être produits en grande quantité mais ils auraient été détruits depuis par exemple, par photodissociation sous l'action du rayonnement ultraviolet solaire. Deuxième hypothèse : ils n'ont jamais pu se former. L'environnement chimique n'était pas favorable à leur production car trop acide. Enfin, dernière hypothèse, ils seraient aujourd'hui enfouis sous de la poussière ou sous des coulées volcaniques postérieures à leur formation. La découverte de *Spirit* et la détection de carbonates par *Mars Reconnaissance Orbiter* en 2008 dans Nili fossae et en 2009 dans des terrains exhumés par l'impact ayant donné naissance au bassin Huygens nous autorisent-elles à privilégier la dernière hypothèse ? La question reste ouverte et nécessite d'autres confirmations...



Un hypothétique océan martien (Oceanus Borealis) aurait recouvert la plus grande partie de l'hémisphère nord de Mars il y a 4 milliards d'années.

Quoi qu'il en soit, la présence des phyllosilicates indique que Mars a connu une ère lointaine où l'eau liquide à pH neutre était abondante. Responsable de l'instrument OMEGA sur *Mars Express*, Jean-Pierre Bibring, de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Université Paris-Sud) a proposé de nommer cette ère antérieure à 4,2 milliards d'années le **phyllosien**. S'en est suivie, semble-t-il, une période de transition d'environ 200 millions d'années, coïncidant plus ou moins avec le **grand bombardement tardif**. Par cette expression, on désigne la période durant laquelle les planètes telluriques auraient connu une augmentation importante des impacts météoritiques et cométaires, entre 4,1 et 3,8 milliards avant nos jours. La migration des planètes géantes et des résonances orbitales entre Jupiter et Saturne auraient déstabilisé les ceintures d'astéroïdes existantes à cette époque et auraient précipité de nombreux corps vers le système solaire interne.

Le grand bombardement tardif aurait eu plusieurs conséquences pour Mars :

- la naissance des grands bassins d'impact comme Hellas Planitia (2300 km) et Argyre Planitia (1800 km) ;
- la disparition d'une partie de son atmosphère, soufflée par les impacts ;
- la disparition du champ magnétique consécutive à la suppression des mouvements de convection mantelliques. En effet, l'énergie dégagée par les impacts a pu modifier le gradient thermique du manteau, gradient qui permet l'existence et l'entretien de la convection ;
- la haute teneur du manteau martien en oxyde de fer, pour des raisons chimiques où l'oxydoréduction à hautes températures joue un rôle primordial.



Vue d'artiste de la Lune soumise au grand bombardement tardif.
Crédit : Tim Wetherell / Australian National University.

Énergie interne, convection mantellique et champ magnétique

D'où l'énergie interne d'une planète provient-elle ? De la libération de la **chaleur emmagasinée lors de sa formation**, de la **désintégration radioactive** des éléments uranium (U), thorium (Th) et potassium (K) présents dans son manteau et sa croûte et, **au moins dans le cas de la Terre, de la solidification progressive de son noyau externe liquide**.

La production d'énergie se fait dans le volume de la planète alors que l'évacuation de la chaleur due au flux géothermique se fait par la surface. **Les petites planètes** ayant un rapport surface sur volume plus élevé, elles **se refroidissent vite et ne peuvent soutenir très longtemps de mouvements de convection mantelliques**. Ainsi, Mercure semble n'avoir pas connu d'activité géologique depuis trois milliards d'années alors que la Terre montre une tectonique des plaques, facilitée par la présence d'eau. Nous n'avons pas d'indice de l'existence d'une telle tectonique sur Vénus, mais il ne faut pas oublier qu'elle ne se manifeste que si les matériaux ont la capacité de se déformer et de s'écouler. L'absence d'eau sur Vénus fait que la lithosphère forme un couvercle rigide, que seuls des panaches arrivent à percer. Mars est un cas intermédiaire entre Mercure et la Terre. Les témoignages d'un lointain passé laissent penser que la planète a redoublé d'énergie dans son enfance, avec la mise en place d'une convection mantellique vigoureuse : volcans boucliers géants, édifices volcaniques en tout genre, vestige d'un champ magnétique primitif aujourd'hui gelé dans les minéraux ferromagnétiques des terrains les plus anciens.

Le champ magnétique d'une planète est provoqué par la convection de fluides conducteurs qui composent la partie liquide du noyau. Ces mouvements de convection impliquent l'existence d'un gradient thermique suffisant du noyau vers le manteau. Sur Mars, les impacts dû au grand bombardement tardif auraient injecté assez d'énergie dans le manteau de la planète et ainsi annulé le gradient thermique nécessaire au maintien de la convection. Voici comment Mars aurait perdu son champ magnétique global il y a plus de quatre milliards d'années.

Le grand bombardement tardif a initié un épisode majeur de volcanisme il y a 4 milliards d'années, qui a culminé avec le soulèvement de Tharsis et les volcans d'Elysium Planitia cinq cents millions d'années plus tard. De grandes quantités de dioxyde de soufre ont alors été relâchées, réagissant avec l'eau des nuages pour former de l'acide sulfurique. L'eau martienne aurait donc été acide à ce stade, ce qui aurait mené à la formation des sulfates hydratés que l'on trouve en abondance aujourd'hui. Celle des carbonates aurait été inhibée par l'acidité du milieu. Mieux encore : les carbonates qui se seraient éventuellement formés précédemment se seraient dissous et auraient été remplacés par des sulfates. Voilà, peut-être, la raison pour laquelle on détecte si peu de carbonates sur Mars. Cette ère, dominée par les sulfates, a été nommée **Theiikien** (littéralement « âge sulfurique ») par J.-P. Bibring. Elle couvre une période comprise entre 4,2 et 3,8 milliards d'années avant nos jours.

L'ère suivante, qui se poursuit encore aujourd'hui, est caractérisée par un lent déclin de l'activité volcanique, par la disparition progressive de l'atmosphère et des conditions favorables à l'existence de l'eau liquide ainsi que par l'oxydation de la surface. C'est en conséquence de cette lente oxydation du fer de la surface en oxydes de fer anhydres comme l'hématite (Fe_2O_3) amorphe que J.-P. Bibring nomme l'ère correspondante le **sidérikien** ou « âge ferrique ».

Pourquoi l'atmosphère dense de Mars a-t-elle disparu ? Là aussi, nous en sommes réduits à des hypothèses. Nous avons vu que le grand bombardement tardif a pu en éjecter une partie, mais à lui seul, on pense qu'il ne peut expliquer sa ténuité actuelle. Nous avons également vu que **le champ magnétique de la planète avait disparu rapidement, peut-être dès la fin du phyllosien. En l'absence de ce bouclier protecteur, l'atmosphère primordiale de Mars fut sujette à divers processus d'échappement, d'autant plus efficaces que le jeune Soleil constituait un émetteur de particules chargées et de rayonnements X et UV beaucoup plus intense qu'aujourd'hui** : son pouvoir d'ionisation de l'atmosphère était alors bien plus important. On regroupe les mécanismes d'échappement en deux grandes familles : les processus thermiques, où l'on traite de l'agitation des atomes et molécules due à leur température, et les processus non thermiques. Ces derniers se produisent lors d'interactions entre les ions créés dans la haute atmosphère de Mars (entre 100 et 250 km d'altitude) et le vent solaire magnétisé. Afin d'assurer la quantification délicate de chacun de ces mécanismes et de tenter une reconstruction de l'histoire de l'atmosphère martienne, la NASA a envoyé en novembre 2013 la mission *MAVEN* (pour **Mars Atmosphere and Volatile Evolution**), qui s'est satellisée autour de la planète Rouge en septembre 2014. Les premiers résultats ont été présentés très récemment, en novembre 2015. Ils montrent que le vent solaire est responsable de l'érosion de l'atmosphère martienne et lui retire environ 100 g à chaque seconde. Ce vent solaire, un flux composé principalement de protons et d'électrons éjectés en permanence par la haute atmosphère de l'astre du jour à des vitesses supérieures au million de kilomètres par heure, emporte avec lui son champ magnétique. À son passage près de Mars, il génère, dans l'ionosphère de la planète, des champs électriques qui accélèrent les particules chargées qui la constituent... jusqu'à ce qu'elles quittent leur hôte. La perte atmosphérique actuelle est faible, certes, mais ce n'est plus le cas sur des échelles de temps géologiques, d'autant plus qu'elle s'amplifie significativement lors des éruptions solaires. En outre, le taux d'échappement atmosphérique devait être bien plus élevée il y a des milliards d'années, lorsque le Soleil était jeune et beaucoup plus actif qu'aujourd'hui.

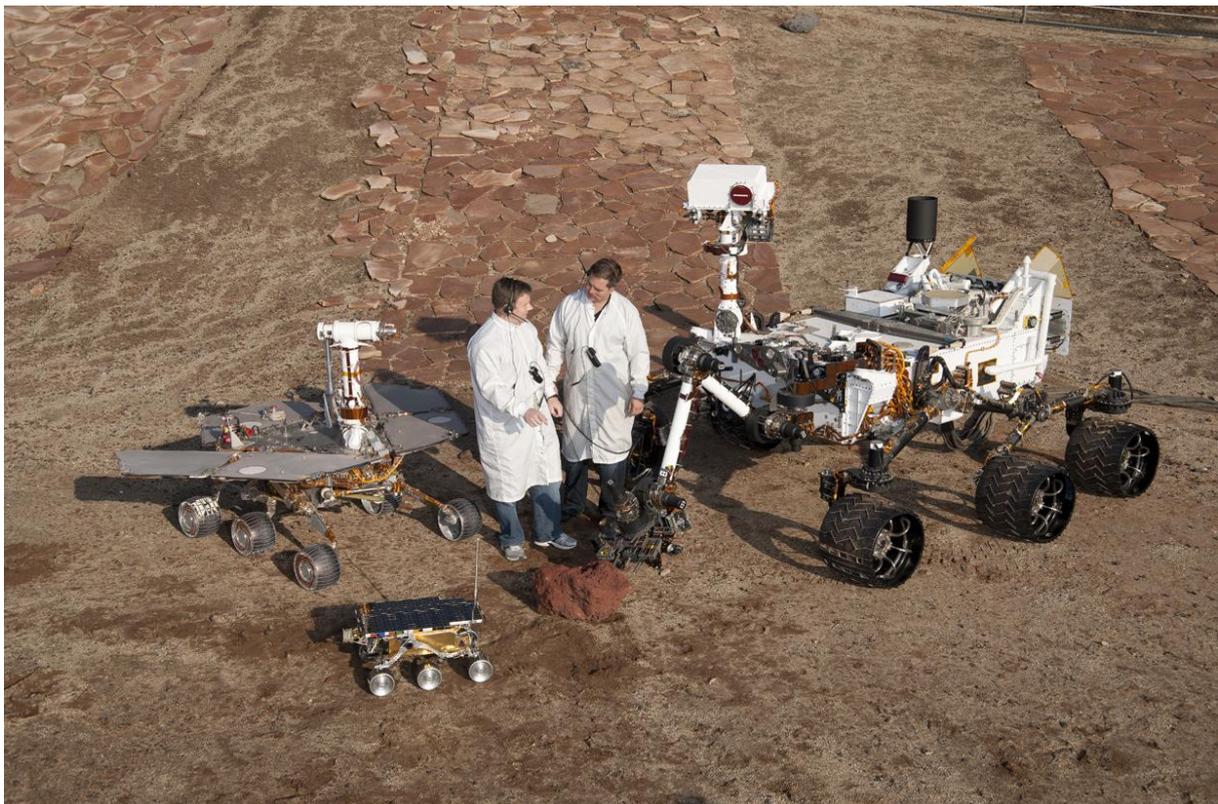


Vue d'artiste de la sonde *Maven*.
Crédit : NASA / Goddard Space Flight Center.

Bref, quels que soient les mécanismes mis en jeu, toutes les simulations numériques montrent que Mars semble avoir perdu 95 à 99 % de son atmosphère dense de dioxyde de carbone moins d'un milliard d'années après sa formation. L'effet de serre diminua en conséquence, jusqu'à faire de la planète Rouge le désert aride et froid que nous connaissons maintenant. Qu'est devenue l'eau ? Une partie importante s'est sans doute dissociée sous l'action du rayonnement ultraviolet solaire puis échappée dans l'espace. Une autre a dû s'infiltrer puis se figer dans la croûte pour constituer un pergélisol, ressurgissant très épisodiquement sous forme de saumure quand les conditions le permettent. Une autre, enfin, a dû s'adsorber sur la surface, altérer les minéraux présents et se lier à eux. Mais nul ne sait vraiment ce que l'eau martienne, jadis si abondante, est devenue...

3 L'exploration de Mars

Au moment où sont écrites ces lignes, pas moins de sept robots tournent ou gambadent autour de Mars. Il s'agit des sondes américaines *2001 Mars Odyssey*, *Mars Reconnaissance Orbiter*, *MAVEN*, de la sonde européenne *Mars Express*, de la sonde indienne *Mars Orbiter Mission* et des deux rovers américains *Mars Exploration Rover Opportunity* et *Mars Science Laboratory Curiosity*. Mars est donc, plus que jamais, sous les feux de la rampe. Comment en est-on arrivé là ?



Deux ingénieurs, Matt Robinson et Wesley Kuykendall, se tiennent aux côtés de maquettes en état de fonctionnement représentant trois générations de rovers martiens à l'échelle 1:1. Au premier plan, le petit *Sojourner* libéré lors de la mission *Mars Pathfinder* en juillet 1997, derrière lui un jumeau de *Spirit* et de *Curiosity* (mission *Mars Exploration Rover*, 2004) et à droite, le double de *Curiosity* (mission *Mars Science Laboratory*, 2012). Crédit : NASA / JPL-Caltech.

3.1 Avant l'ère spatiale

Au début du XVII^e siècle, Kepler énonça les lois gouvernant le mouvement des planètes dans le cadre d'un système héliocentrique et héliodynamique. Avec l'invention de la lunette astronomique par Galilée en 1609, un nouvel univers se dessina : de nouvelles étoiles, trop faibles pour être visibles à l'œil nu, se dévoilèrent par milliers ; les planètes n'étaient plus de simples points mais apparaissaient sous la forme de petits disques, dont on pouvait espérer découvrir quelque détail en surface à l'aide d'instrument toujours plus grands. Malheureusement, on ne connaissait toujours pas la véritable distance nous séparant de ces astres errants et, depuis près de 2 000 ans, on ne plaçait le Soleil qu'à 20 fois la distance Terre – Lune, alors qu'il est en réalité 400 fois plus éloigné que notre satellite ! Copernic ayant montré que, dans le système héliocentrique, les distances entre le Soleil et les planètes pouvaient s'exprimer en fonction de la distance Terre – Soleil, il était d'une importance fondamentale d'avoir une bonne estimation de cette dernière.

Vers 1670, les astronomes disposaient enfin d'instruments suffisamment précis pour tenter la détermination des véritables distances dans le système solaire. De part et d'autre de la Manche, quasiment au même moment, deux hommes s'attelèrent à la tâche avec le même succès. En septembre 1672, l'Astronome royal John Flamsteed mit en pratique à Derby une expérience imaginée par Tycho Brahe que Kepler décrivit dans son *Astronomia nova*. Son principe est assez complexe ; il implique la mesure de la distance angulaire entre Mars et le Soleil, de jour, et entre Mars et les étoiles environnantes, de nuit. Le résultat obtenu par Flamsteed est une estimation de la parallaxe solaire, c'est-à-dire l'angle sous lequel on verrait le rayon de notre planète depuis le centre du Soleil. C'est une mesure indirecte de la distance Terre – Soleil, une fois connu le rayon terrestre. La valeur de la parallaxe ainsi déduite s'éleva à près de dix secondes d'arc (10''), ce qui correspond à une distance d'environ 130 millions de kilomètres. Flamsteed réitéra ses observations à trois reprises à Greenwich entre 1676 et 1681 et trouva une parallaxe comprise entre 10'' et 12''. Il conclut prudemment qu'elle ne pouvait être supérieure à 15'', ce qui fixait la distance minimale Terre – Soleil à environ 90 millions de kilomètres.



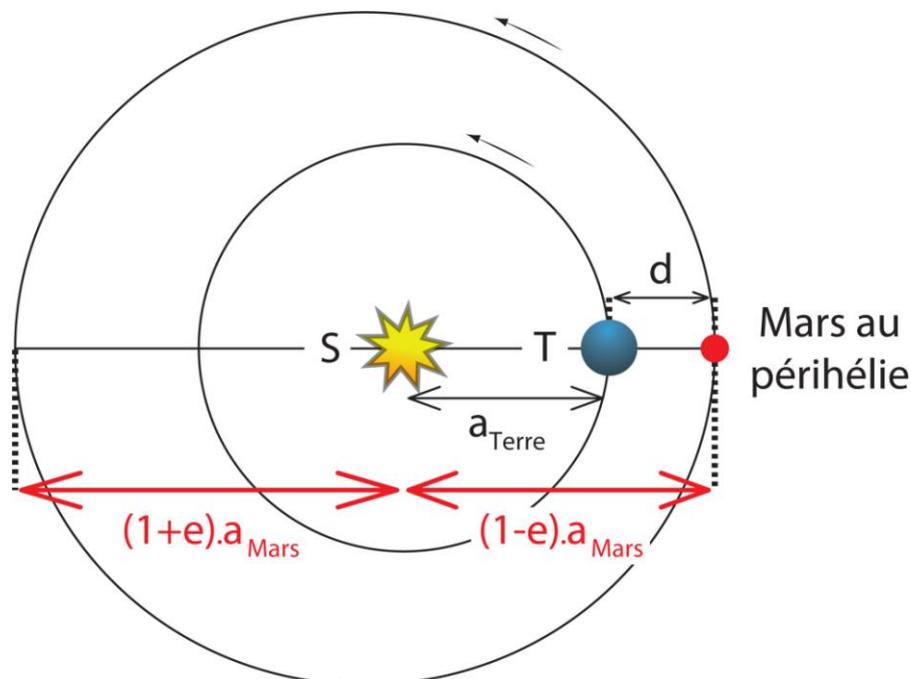
John Flamsteed



Jean-Dominique Cassini

En 1672 toujours, la France adopta une autre voie. Elle reposait sur la mesure simultanée de la position d'une planète sur la voûte étoilée depuis deux lieux éloignés le plus possible l'un de l'autre. En ces deux lieux, sa position serait très légèrement différente par rapport aux étoiles, puisque le point de vue n'était pas le même. Le choix se porta sur Mars, qui présentait une opposition périhélique en septembre dans la constellation du Verseau. Jean-Dominique Cassini (1625 – 1712), premier directeur officiel de l'Observatoire de Paris, envoya donc son collaborateur Jean Richer (1630 – 1696) à Cayenne, en Guyane, tandis que le géodésien et astronome Jean Picard (1620 – 1682) et lui restèrent à Paris. Les mesures montrèrent que l'angle dont semblait avoir bougé Mars était petit, environ $17''$. Cela signifie qu'observée depuis Mars, la distance Paris-Cayenne représente un angle de $17''$. Connaissant la distance entre les deux villes, Cassini en déduisit celle qui nous sépare de Mars. On ne sait comment il mena ses calculs ni fit ses choix parmi toutes ses mesures, toujours est-il qu'il aboutit à la valeur très correcte de 55 millions de kilomètres. La troisième loi de Kepler lui permit alors de calculer la distance Terre – Soleil, qui s'avéra un peu supérieure à 140 millions de kilomètres (voir l'encadré ci-dessous). Les méthodes mises en place par les Français et les Anglais concordèrent donc. **Le Soleil est vingt fois plus éloigné que ce que l'on imaginait encore un siècle plus tôt et les planètes sont repoussées à des distances prodigieuses !** Bien que moins connu que la révolution copernicienne, le bouleversement induit par la prise de conscience des tailles et des distances dans le système solaire fut tout aussi important. Et voilà donc Mars rejeté à plus de 200 millions de kilomètres du Soleil...

Calcul de la distance Terre – Soleil à partir de la 3^e loi de Kepler



Plaçons-nous dans les conditions de septembre 1672, où Mars est à l'opposition. Le Soleil, la Terre et Mars sont alors alignés, dans cet ordre.

1. On sait que l'excentricité de l'orbite terrestre est assez faible. En première approximation, on peut écrire que la distance Soleil – Terre vaut a_{Terre} . Cela revient à dire que la Terre décrit un cercle centré sur le Soleil.

2. L'excentricité e de l'orbite martienne, elle, n'est pas négligeable et vaut près de six fois celle de l'orbite terrestre (0,0934 contre 0,0167). L'opposition martienne de 1672 est périhélique ; elle prend place alors que Mars est au plus près du Soleil. Les propriétés de l'ellipse sont telles que la distance Soleil – Mars vaut $(1 - e) \cdot a_{Mars}$.

3. d est la distance mesurée par Cassini, environ 55 millions de kilomètres.

4. Le Soleil, la Terre et Mars étant alignés, la distance Soleil – Mars SM n'est autre que la distance Soleil – Terre ST à laquelle on ajoute d . Autrement dit, $(1 - e) \cdot a_{Mars} = a_{Terre} + d$.

La troisième loi de Kepler s'exprime selon l'équation $\frac{a_{Terre}^3}{T_{Terre}^2} = \frac{a_{Mars}^3}{T_{Mars}^2}$.

Or, nous venons de montrer que $a_{Mars} = \frac{a_{Terre} + d}{(1 - e)}$.

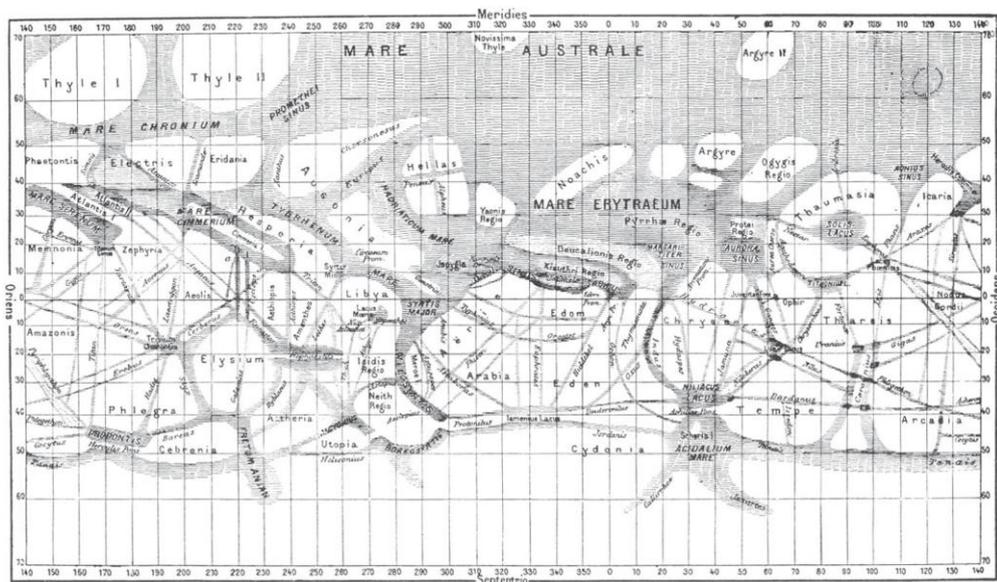
Il suffit donc de remplacer a_{Mars} par $\frac{a_{Terre} + d}{(1 - e)}$ dans la troisième loi de Kepler pour aboutir à

l'expression $a_{Terre} = \frac{d}{(1 - e) \cdot \left(\frac{T_{Mars}}{T_{Terre}}\right)^{\frac{2}{3}} - 1}$. Tous les termes du membre de droite sont connus.

Avec $T_{Mars} = 1,88$ an et $T_{Terre} = 1$ an, il vient $a_{Terre} = 144$ millions de kilomètres.

Pour améliorer la précision de l'estimation à l'aide cette méthode, l'idéal est de porter son choix sur un corps céleste s'approchant plus de la Terre que ne le fait Mars, les incertitudes sur la parallaxe étant alors plus faibles, et de privilégier un corps d'aspect ponctuel, ce qui augmente la précision du pointage des instruments. Les deux conditions furent réunies en 1930 lorsque le petit astéroïde (433) Éros passa à 26 millions de kilomètres de notre planète fin janvier. L'astronome anglais Harold Spencer Jones put alors évaluer a_{Terre} à 149,5 millions de kilomètres.

La première carte de Mars date de 1659. Œuvre du grand scientifique hollandais Christian Huygens (1629 – 1695), elle révélait une zone sombre que l’on connaît aujourd’hui sous le nom de Syrtis Major Planum, une formation volcanique peu élevée possédant une base de plus de 1 000 km. **En 1666, Cassini découvrit les calottes polaires de Mars et mesura sa période de rotation,** étonnamment proche de celle de la Terre (24 h 40 min). L’expansion saisonnière de ces calottes fut étudiée par le Franco-Italien Giacomo Filippo Maraldi (1665 – 1729) et par l’Anglais né Allemand William Herschel (1738 – 1822) à l’aide de son télescope de 47 cm de diamètre. **Le XIX^e siècle marqua l’apogée de la cartographie de la surface martienne.** S’illustrèrent dans cet exercice les Allemands Johann Heinrich Mädler (1794 – 1874) et Wilhelm Beer (1797 – 1850) à partir des années 1830, ainsi que le prêtre jésuite italien Angelo Secchi (1818 – 1878), les Anglais William Rutter Dawes (1799 – 1868), Richard Proctor (1837 – 1888) et Nathan Green (1823 – 1899) à partir des années 1860. L’opposition périhélique très favorable de septembre 1877 permit à Asaph Hall (1829 – 1907) de découvrir les deux satellites de Mars, Phobos et Déimos. Elle fut également à l’origine d’une controverse fondée sur l’observation par l’Italien Giovanni Schiaparelli (1835 – 1910) de chenaux longs et étroits (*canali* en italien), dont on sait maintenant qu’ils n’étaient qu’une illusion d’optique, et qui furent maladroitement traduits en anglais par *canals*, c’est-à-dire canaux. Si « chenal » est un mot sans connotation particulière, « canal » n’est l’est pas ; il suppose l’intervention d’êtres intelligents et bâtisseurs. De la fin du XIX^e siècle au début du XX^e, la vision romantique d’une civilisation martienne utilisant des canaux pour convoyer l’eau des pôles vers les zones arides fut très populaire, même parmi les astronomes. Ses plus fervents défenseurs furent le Français Camille Flammarion (1842 – 1925) et, à sa suite, l’Américain Percival Lowell (1855 – 1916). En 1894, Lowell fonda l’observatoire qui porte désormais son nom à Flagstaff (Arizona) dans le but de mieux percevoir ces évanescents « canaux ». C’est d’ailleurs à l’observatoire Lowell que Clyde Tombaugh (1906 – 1997) découvrit en 1930 celle qui fut considérée comme la neuvième planète du système solaire pendant 76 ans, Pluton. Il fallut attendre le tout début du XX^e siècle et les observations minutieuses de l’Italien Vincenzo Cerulli (1859 – 1927) et surtout celle du Grec Eugène Antoniadi (1870 – 1944) à l’observatoire de Meudon pendant l’opposition périhélique de 1909 pour que les canaux ne sombrent dans les oubliettes de l’Histoire...



Carte de Mars dessinée par Giovanni Schiaparelli à partir d’observations réalisées entre 1877 et 1886. Les traits fins plus ou moins rectilignes représentent les célèbres *canaux* qu’il popularisa.

Les décennies suivantes virent l'entrée en scène des outils de l'astrophysique. Dès les années 1920, les astronomes réussirent à mesurer les températures en différents points du disque martien et conclurent, à juste raison, que **l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est très grand**. Ils parvinrent également à montrer que **l'atmosphère de la planète est ténue**, la pression au sol s'élevant à quelques dizaines de millibars tout au plus, avec une fraction en dioxygène et en vapeur d'eau très faible. Enfin, en 1947, l'astronome néerlandais puis américain Gerard Kuiper (1905 – 1973) détecta par spectroscopie infrarouge **la présence de dioxyde de carbone**. Voilà quelle était la situation juste avant l'avènement de l'ère spatial. Certes, Mars s'était éloignée de l'image de la planète verdoyante et peuplée d'êtres intelligents qu'elle possédait au XIX^e siècle, mais beaucoup soutenaient encore la possibilité d'une vie végétale en surface, croissant et déclinant au gré des saisons. Des siècles de spéculation furent battus en brèche lorsque la sonde américaine *Mariner 4* survola la planète en 1965 et envoya les premières photos de la planète Rouge vers la Terre.

3.2 Des années 1960 à aujourd'hui

En février 1959, la sonde soviétique *Luna 1* est la première à survoler notre satellite, la Lune. En octobre de la même année, la sonde *Luna 3* transmet les premiers clichés de sa face cachée. Pour parer à la suprématie naissante de l'Union soviétique dans le domaine spatial, le président américain John F. Kennedy décide en 1961 d'envoyer un astronaute sur la Lune. S'ensuivra une véritable course entre les deux superpuissances. Elle fut gagnée après de nombreux revers par les Américains le 20 juillet 1969, lorsque Neil Armstrong, commandant la mission *Apollo 11*, devint le premier homme à marcher sur la Lune.

Mars et Vénus furent également au cœur de la compétition entre les États-Unis et l'Union soviétique. Possédant déjà des lanceurs puissants indispensables aux voyages interplanétaires, celle-ci fut la première à se lancer dans l'exploration de la planète Rouge. Malheureusement, l'échec fut cuisant et aucune des six sondes lancées entre 1960 et 1964 n'atteignit son but. En voici la liste.

Marsnik 1, lancée le 10 octobre 1960, détruite au lancement

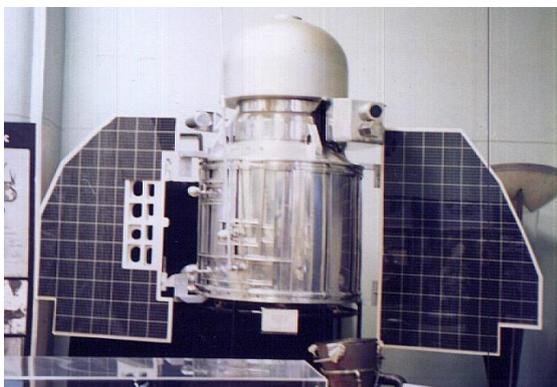
Marsnik 2, lancée le 14 octobre 1960, détruite peu après le lancement

Sputnik 22, lancée le 24 octobre 1962, détruite peu après le lancement

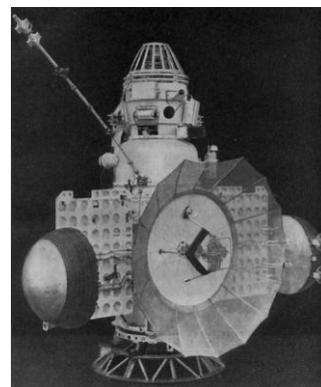
Mars 1, lancée le 1^{er} novembre 1962, contact perdu sur le trajet entre la Terre et Mars

Sputnik 24, lancée le 4 novembre 1962, détruite peu après le lancement

Zond 2, lancée le 30 novembre 1964, contact perdu sur le trajet entre la Terre et Mars



La sonde *Marsnik*



La sonde *Zond 2*

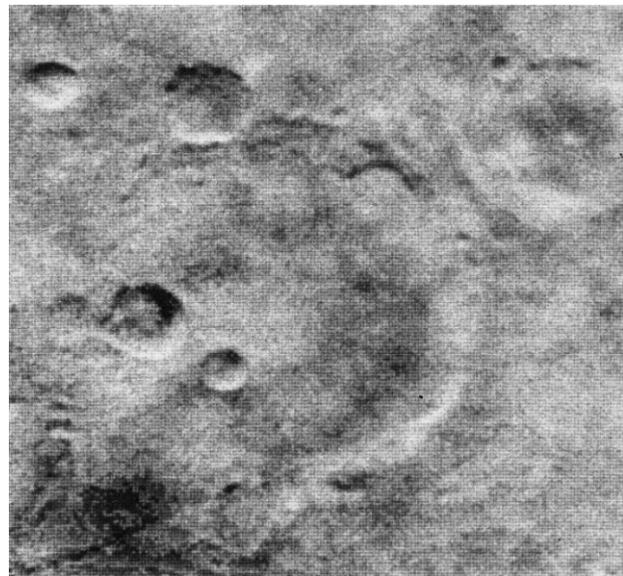
Après s'être intéressé à Vénus, cible plus facile à atteindre, le célèbre centre américain Jet Propulsion Laboratory (JPL) obtint le feu vert pour développer des missions vers Mars en 1962. La sonde *Mariner 3* fut lancée le 5 novembre 1964 mais elle ne put se séparer du dernier étage de son lanceur. Le lancement de *Mariner 4* le 28 novembre 1964 fut un succès et la sonde survola sans encombre la planète Rouge le 14 juillet 1965. 21 photographies de faible qualité immortalisèrent l'événement. **On découvrait enfin Mars telle qu'elle était réellement** : des paysages désertiques couverts de cratères, une pression au sol de quelques millibars, des températures glaciales (jusqu'à - 100 °C) et pas de champ magnétique global. L'image d'une planète regorgeant de vie tombait dans les oubliettes de l'Histoire.



1^{er} novembre 1963 : la sonde Mariner 4 sous les yeux des ingénieurs. Crédit : NASA.



Décollage du lanceur Atlas-Agena D qui emporte *Mariner 4* le 28/11/1964. Crédit : NASA.

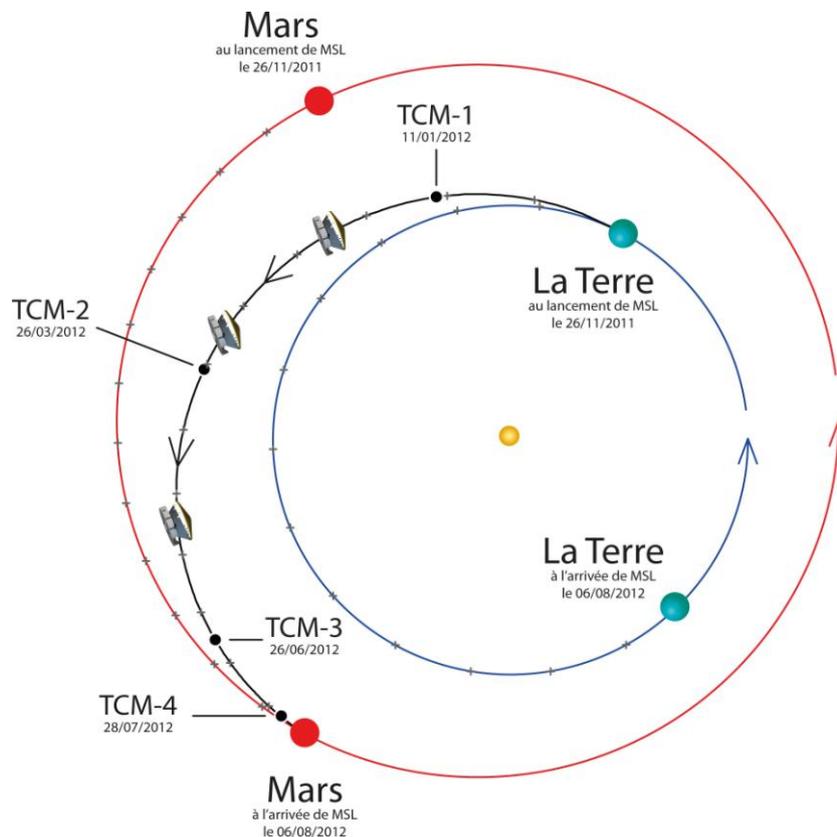


Une des premières photographies détaillées de la surface martienne. Crédit : NASA.

Lancées le 24 février et le 27 mars 1969, les sondes *Mariner 6* et *Mariner 7* survolèrent respectivement Mars le 31 juillet et le 5 août de la même année. Embarquant des caméras de meilleure qualité, elles envoyèrent 75 et 126 photographies vers la Terre, confirmant le caractère désolé de la planète. Voilà qui marqua la fin de la première phase de l'exploration spatiale de Mars, celle des survols. Il fallait être plus ambitieux L'heure était maintenant aux tentatives de mises en orbite et de déposes d'atterrisseurs au sol.

Aller sur Mars

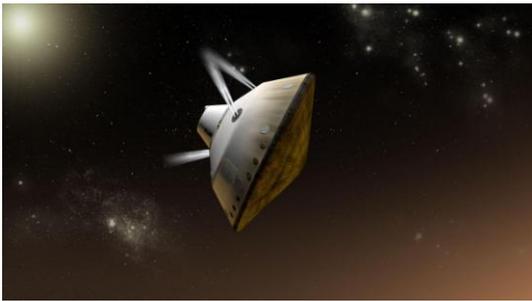
Pour rejoindre Mars, il faut tenir compte du fait que cette planète gravite sur une orbite située à l'extérieur de celle de la Terre et qu'elle se déplace moins vite que celle-ci (24 km/s contre 30 km/s). On montre que la trajectoire la plus économe en énergie consiste à lancer la sonde selon une trajectoire elliptique qui tangente l'orbite terrestre au départ et l'orbite martienne à l'arrivée. La configuration optimale – la moins gourmande en carburant – se produit **tous les 26 mois** environ (c'est la période synodique de Mars) avec une fenêtre de lancement de quelques mois au maximum.



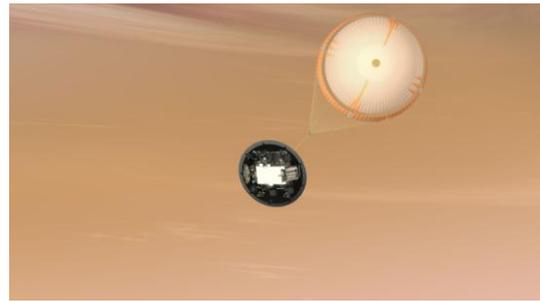
254 jours se sont écoulés entre le décollage de la mission *Mars Science Laboratory* (MSL) embarquant le rover *Curiosity* et l'atterrissage de celui-ci sur Mars. Les points marqués TCM indiquent les quatre corrections de trajectoire minimales qui ont permis d'amener le rover à bon port. Une croix est placée tous les 20 jours sur les orbites de la Terre, de Mars et de MSL. Schéma conçu d'après les données de la NASA.

Se mettre en orbite autour de Mars impose une réduction sensible de la vitesse de la sonde, qui, sinon, ne ferait que survoler la planète avant de poursuivre son chemin. La décélération peut être obtenue à l'aide des moteurs équipant la sonde ou à l'aide d'une technique utilisée pour la première fois par la NASA en 1996 lors de la mission *Mars Global Surveyor*, le freinage atmosphérique. Présentant l'avantage d'être peu consommatrice en carburant, elle consiste à placer la sonde sur une orbite très elliptique autour de la planète, puis à resserrer celle-ci par des passages successifs dans la haute atmosphère martienne, les frottements qu'ils engendrent diminuant peu à peu le demi-grand axe de l'ellipse décrite par la sonde. Technique délicate à mettre en œuvre s'il en est une ! À la moindre erreur de calcul susceptible de faire descendre la sonde dans des couches où elle se désintégrera s'ajoute la difficulté de prévoir les énormes variations de la densité de l'atmosphère de Mars causées par les éruptions solaires.

Pour qu'un atterrisseur ou un rover se pose en un seul morceau sur Mars, il convient d'annuler la vitesse qu'il acquiert naturellement à l'approche de la planète. On ne passe généralement pas par la phase de mise en orbite ; on préfère, pour économiser le carburant, le faire directement plonger vers la planète Rouge et le ralentir par différents procédés successifs. La séquence graphique qui suit montre les cinq phases qui ont mené à la dépose du rover *Curiosity* sur le sol de Mars le 6 août 2012. Il ne s'est écoulé que sept petites minutes entre la première et la cinquième vue d'artiste !



A



B



C



D



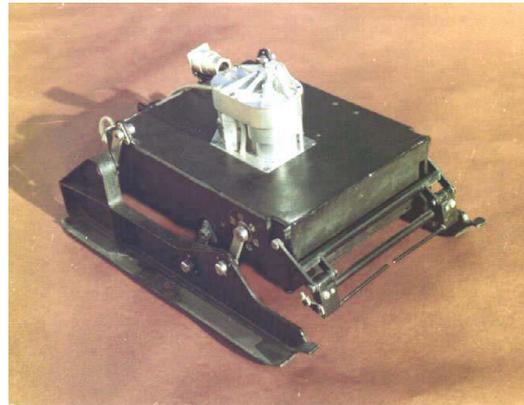
E

- Phase A** À l'entrée dans l'atmosphère, vers 125 km d'altitude, le véhicule d'entrée possède une vitesse de 5,9 km/s. Le freinage dû à l'atmosphère porte son bouclier avant à des températures parfois supérieures à 2 000 °C. Sur le bouclier arrière, quatre petits moteurs-fusées permettent à la capsule d'ajuster continuellement son angle d'incidence autour de 18°.
- Phase B** Lorsque la vitesse du véhicule d'entrée passe sous les 450 m/s, vers 11 km d'altitude, un parachute de 16 mètres de diamètre se déploie. Trois kilomètres plus bas, le bouclier avant se sépare du véhicule d'entrée, laissant apparaître le rover encore replié. Cinq secondes plus tard, un radar embarqué, tourné vers le sol, est mis en marche pour calculer en permanence l'altitude et la vitesse du véhicule. Si la descente propulsée se déclenche trop tôt, le carburant viendra à manquer. Si elle se déclenche trop tard, le rover ne disposera pas d'assez de temps pour ralentir. Dans les deux cas, il s'écrasera au sol...
- Phase C** 80 secondes après la séparation du bouclier avant, à 1,6 km au-dessus de la surface, le bouclier arrière et le parachute qui lui est solidaire sont largués, laissant l'étage de descente en chute libre. Rapidement, ses huit rétrofusées en dévient la trajectoire pour éviter qu'il n'entre en contact avec le bouclier arrière et son parachute, puis assurent une décélération jusqu'à une vingtaine de mètres au-dessus du sol, hauteur à partir de laquelle la descente s'effectue à moins d'un mètre par seconde.
- Phase D** Descendu au moyen de trois filins en nylon et d'un câble électrique longs de 7,6 mètres, le rover déploie ses roues...
- Phase E** ... et touche le sol en douceur. Informé de la réussite de l'opération par la diminution de la tension des filins, l'étage de descente active leur découpe et pousse ses rétrofusées à pleine puissance pour aller s'écraser à 650 mètres de là. *Curiosity* est sain et sauf et s'est posé à moins de 2,4 km du centre de la zone d'atterrissage qu'on lui avait assignée (une ellipse de 20 km sur 8 km), après un voyage de 563 millions de kilomètres. Quelle performance !

Le premier pays à tenter la mise en orbite d'une sonde autour de Mars fut l'Union soviétique. Les lancements de *Mars 1969A* et *Mars 1969B* les 27 mars et 2 avril 1969 furent des échecs. Bien décidés à profiter de la fenêtre de tir suivante, qui voyait la planète Rouge au plus près de la Terre depuis 1956, les Américains et les Soviétiques procédèrent à l'envoi de plusieurs sondes en 1971. *Mariner 8* (USA) et *Kosmos 419* (URSS), lancés le 8 et le 10 mai, ne parvinrent pas à quitter l'orbite terrestre. Les missions soviétiques *Mars 2* et *Mars 3*, lancées les 19 mai et 28 mai, consistaient chacune en un orbiteur et un atterrisseur relié à un petit rover pouvant se déplacer sur une quinzaine de mètres sur ce que l'on pourrait qualifier de « skis ».



Réplique de l'atterrisseur des missions *Mars 2* et *Mars 3* présenté au Musée de l'aéronautique de Moscou.



Le petit rover sur « skis ».

Les résultats obtenus par les orbiteurs de *Mars 2* et *Mars 3* entre décembre 1971 et mars 1972 furent décevants car, par une coïncidence malheureuse, ils arrivèrent alors que la surface de la planète était entièrement masquée par une tempête de poussière globale. Ne pouvant être reprogrammés, ils gaspillèrent une grande partie de leur mémoire en stockant des photographies des nuages de poussière sans grand intérêt. L'atterrisseur de *Mars 2* connut un dysfonctionnement lors de sa descente et s'écrasa au sol le 27 novembre 1971. Convenablement ralenti par le freinage atmosphérique, puis par deux parachutes et enfin par des rétrofusées, celui de *Mars 3* réussit un atterrissage en douceur le 2 décembre... et cessa toute transmission 15 secondes plus tard, pour des raisons peut-être liées à la tempête de poussière. Il n'eut que le temps de transmettre une image partielle de la surface, totalement inexploitable.

La sonde américaine *Mariner 9*, lancée le 30 mai, fut un grand succès. Elle se plaça en orbite autour de Mars le 13 novembre 1971 et fut désactivée le 27 octobre 1972. Les ingénieurs la reprogrammèrent depuis la Terre quand ils s'aperçurent qu'une tempête de poussière globale sévissait sur la planète. Ils retardèrent les prises de vue en conséquence, ce que ne pouvaient faire leurs homologues soviétiques sur *Mars 2* et *Mars 3*. ***Mariner 9* permit la découverte de l'immense canyon Valles Marineris, du volcan géant Olympus Mons, de lits de rivières asséchés et prit des images des satellites Phobos et Déimos.** 85 % de la surface de Mars furent ainsi dévoilés par l'intermédiaire de 7 329 photographies. La planète s'avérait finalement plus intéressante et plus variée que ce que l'on croyait depuis la mission *Mariner 4*.



Lits de rivières asséchées photographiés par *Mariner 9*. Crédit : JPL-Caltech.

Le créneau de lancement suivant, en 1973, ne fut exploité que par les Soviétiques. Quatre sondes furent expédiées vers Mars, le 21 juillet (*Mars 4*, orbiteur), le 25 juillet (*Mars 5*, orbiteur), le 5 août (*Mars 6*, atterrisseur) et le 9 août (*Mars 7*, atterrisseur). Leur succès fut, dans le meilleur des cas... très partiel.

Les États-Unis mirent au point un programme extrêmement ambitieux pour la fenêtre de tir de 1975. Pour un coût total avoisinant le milliard de dollars, la NASA développa les missions *Viking 1* et *Viking 2*, chacune étant constituée d'un satellite en orbite et d'un atterrisseur. La tâche assignée aux orbiteurs était de dresser une cartographie précise de la surface martienne et de servir de relais de communication aux atterrisseurs, dont la mission consistait à détecter d'éventuelles traces d'activité biologique sur le sol et dans les premiers centimètres sous la surface. Rien de moins ! Même si la quête de cette vie extraterrestre ne fut pas couronnée de succès, **les résultats obtenus grâce aux robots *Viking* constituèrent le socle de nos connaissances relatives à la planète Rouge jusqu'au début des années 2000.**

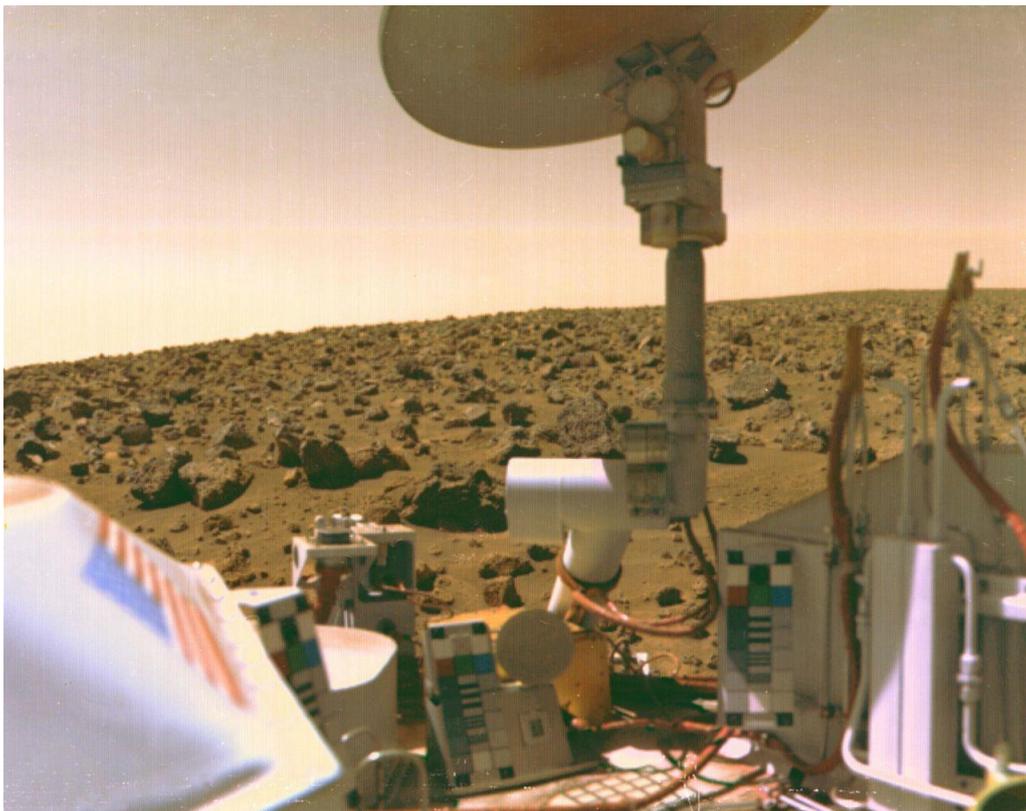
Viking 1 et *Viking 2* furent lancés les 20 août et 9 septembre 1975 par une fusée Titan IIIE. La mise en orbite des satellites d'observation autour de Mars prit place un peu moins d'un an plus tard. De leur côté, freinés par l'atmosphère et ralentis par un système de parachute et de rétrofusées, les atterrisseurs se posèrent en douceur à la surface les 20 juillet et 3 septembre 1976.



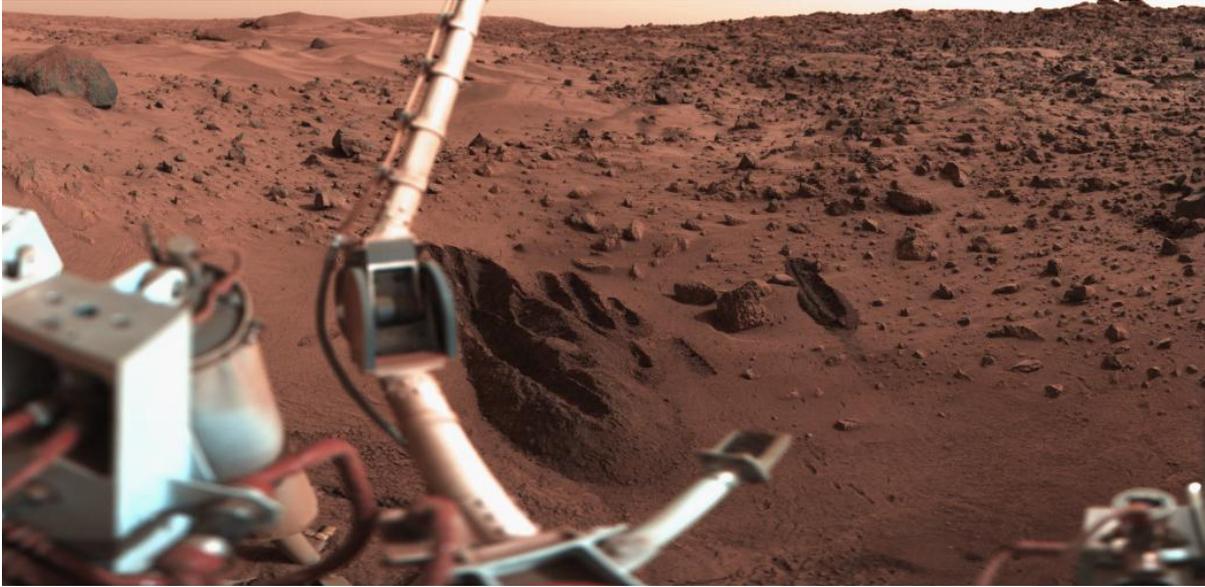
Décollage de la fusée Titan IIIE emportant la mission *Viking 1*.
Crédit : NASA.



Le grand astronome et vulgarisateur Carl Sagan (1934 – 1996) pose à côté d'une réplique de l'atterrisseur des missions *Viking*. Crédit : NASA.



L'atterrisseur de la mission *Viking 2* s'est posé dans Utopia Planitia, une vaste plaine de l'hémisphère nord.
Crédit : NASA.



Le bras de l'atterrisseur de la mission *Viking 1* a creusé de nombreuses tranchées dans le sol martien pour en déterminer la composition et rechercher des traces de vie. L'atterrisseur s'est posé dans Chryse Planitia, une vaste plaine de l'hémisphère nord. Crédit : NASA / Roel van der Hoorn (traitement d'image).

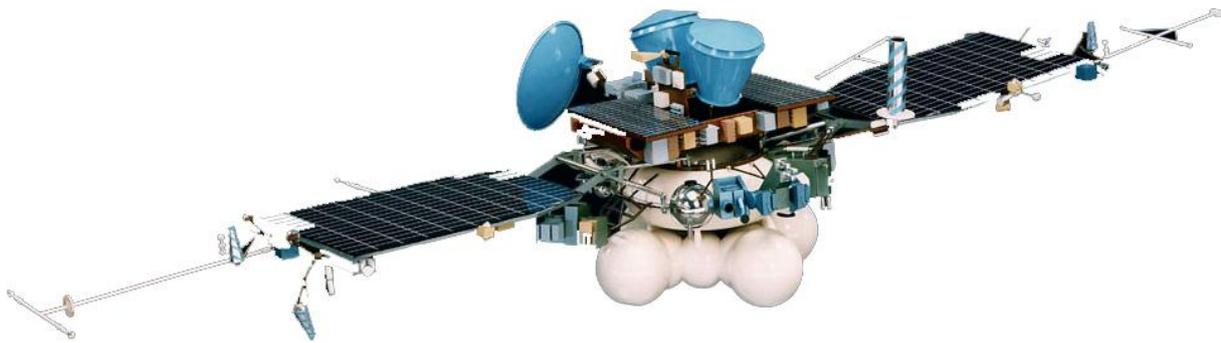
Les orbiteurs permirent de découvrir de nombreuses structures géologiques se formant habituellement en présence de grandes quantités d'eau liquide : profondes vallées érodées, réseaux de rivières asséchées, cratères à éjectas lobés, etc. Les atterrisseurs déterminèrent la composition chimique de l'atmosphère et du sol. Ils servirent de stations météorologiques et mesurèrent les grandes variations de la pression liées à la condensation et à la sublimation du dioxyde de carbone dans les calottes polaires. Véritables laboratoires, ils menèrent enfin une série d'expériences pour tenter de trouver des traces de vie. L'une d'elles consista à injecter dans le sol une solution très diluée de nutriments marqués au carbone 14 radioactif. Peu après, on mesura un dégagement de dioxyde de carbone gazeux contenant justement du carbone 14 ($^{14}\text{CO}_2$). Était-ce la preuve que des organismes l'avaient métabolisé ? L'espoir fut de courte durée, puisque deux autres expériences montrèrent l'absence totale de molécules organiques dans le sol martien. Il est probable que le résultat positif de la première expérience citée fut causé par des réactions chimiques purement abiotiques, conséquences des propriétés hautement oxydantes du sol. Aujourd'hui encore, la controverse demeure.

Le 25 juillet 1978, le satellite d'observation de la mission *Viking 2* cessa de fonctionner, à la suite d'une fuite dans son système de propulsion. L'atterrisseur de la même mission s'éteignit le 11 avril 1980 à cause d'une panne de batterie. Le 17 août de la même année, c'était au tour du satellite d'observation de *Viking 1* de rendre l'âme, le carburant permettant d'alimenter le moteur contrôlant son orientation dans l'espace étant épuisé. Enfin, une commande erronée envoyée depuis la Terre eut raison de son atterrisseur le 13 novembre 1982.

Malgré le succès indéniable du programme *Viking*, Mars dut attendre la seconde moitié de la décennie 1990 pour recevoir de nouveaux visiteurs. Aux États-Unis en effet, le développement de la navette spatiale américaine dans les années 1970 commençait à engloutir l'essentiel du budget de la NASA et les décideurs politiques ne voulaient plus investir dans une planète qui, semblait-il, n'hébergeait aucune vie.

Les Soviétiques lancèrent leur toute dernière mission en 1988. Le programme *Phobos* consistait en deux sondes jumelles devant étudier l'atmosphère de Mars. Elles emportaient chacune un atterrisseur ayant pour but de se poser sur son plus gros satellite, Phobos. Lancée le 7 juillet, *Phobos 1* reçut malencontreusement une instruction informatique erronée à la fin du mois d'août. Début septembre, elle perdit la faculté d'orienter ses panneaux solaires vers l'astre du jour. La mission prit fin... faute d'énergie. Lancée le 12 juillet, *Phobos 2* parvint à se mettre en orbite autour de Mars le 29 janvier 1989. Elle eut le temps de réaliser près de 45 000 spectres infrarouge des régions équatoriales de la planète et 400 spectres de Phobos. Au moment où elle entamait sa descente vers le satellite, l'ordinateur de bord de la sonde connut un dysfonctionnement. Le contact fut définitivement perdu.

La Russie décida de reprendre l'architecture des missions soviétiques *Phobos* quelques années plus tard. Lancée le 16 janvier 1996, *Mars 96* était une mission très (trop ?) ambitieuse : un satellite d'observation de plus de six tonnes, deux stations au sol, deux pénétrateurs, une vingtaine de pays engagés pour un total de 44 instruments scientifiques conçus pour étudier la surface, l'atmosphère et la structure interne de la planète. Les progrès attendus dans la compréhension du système martien étaient énormes !... à la hauteur du désespoir ressenti par les astronomes lorsque le dernier étage du lanceur Proton – qui devait arracher la sonde à l'attraction terrestre – connut une défaillance. *Mars 96* ne quitta jamais l'orbite terrestre. Elle retomba, se désintégra en partie dans notre atmosphère et ce qui subsistait d'elle s'écrasa dans l'océan Pacifique ou dans le désert de l'Atacama...



Vue d'artiste du satellite d'observation de la mission russe *Mars 96*.

Quinze années s'écoulèrent, durant lesquelles la Russie avait radicalement changé de visage. Souhaitant renouer avec son glorieux passé et revenir sur le devant de la scène spatiale, elle lança la mission *Phobos-Grunt* le 8 novembre 2011, accompagnée d'un petit satellite d'observation chinois, *Yinghuo 1*. Son but ? Rien moins qu'un retour d'échantillons de la lune martienne ! On ne sut jamais si *Phobos-Grunt* aurait surmonté un tel défi technologique. Comme son prédécesseur *Mars 96*, elle ne parvint pas à quitter l'orbite terrestre et s'abîma dans l'océan Pacifique le 15 janvier 2012.

A l'heure où nous écrivons ces lignes, il n'existe aucune mission 100 % russe vers Mars ayant reçu ne serait-ce que le début d'un financement. Les projets ne manquent pourtant pas dans les cartons des astronomes et des ingénieurs ! **Espérons que ce pays, qui fut le premier à envoyer un satellite dans l'espace, reprendra un jour la place qu'il mérite parmi les puissances spatiales de premier plan.**

Il ne faut pas croire que les échecs soient l'apanage des seuls Russes. **Les Américains connurent aussi de cruelles désillusions dans leur conquête de la planète Rouge.** Dix ans après la fin du programme *Viking*, la NASA lança *Mars Observer* le 25 septembre 1992 avec pour objectif l'étude de la surface, de l'atmosphère, du climat et du champ magnétique martiens. Cette mission au budget conséquent (813 millions de dollars) cessa tout contact avec la Terre le 21 août 1993, trois jours à peine avant son insertion sur son orbite martienne. L'échec cuisant de *Mars Observer* conduisit la NASA à modifier sa politique d'exploration du système solaire en appliquant le credo de son Administrateur Daniel Goldin : « faster, better, cheaper » soit « plus vite, mieux, meilleur marché ». L'idée était de réduire la phase de développement des missions, de resserrer leur coût mais d'en envoyer plus fréquemment. Dans le cas de Mars, cela revenait idéalement à expédier vers la planète Rouge un orbiteur et un atterrisseur tous les 26 mois environ. **Pour réduire les coûts, les sondes *Mars Global Surveyor* (lancée le 7 novembre 1996), *Mars Climate Orbiter* (lancée le 11 décembre 1998) et **2001 Mars Odyssey** (lancée le 7 avril 2001) embarquèrent ainsi des copies d'instruments développés pour *Mars Observer*.** Comme nous l'avons déjà vu, *Mars Global Surveyor* fut un très grand succès. À titre d'exemple, son altimètre laser MOLA permit de dresser une carte topographique très précise de la planète. Le spectromètre infrarouge TES découvrit une région riche en hématite cristalline qui pourrait signaler la présence d'eau dans un passé très reculé. Le magnétomètre MAG/ER détecta de nombreux champs magnétiques locaux et intenses au-dessus de certaines zones anciennes de l'hémisphère austral. **Quinze ans après son lancement, la sonde *2001 Mars Odyssey* est toujours en activité** sur une orbite polaire. Un record ! Grâce à elle, les astronomes ont montré, entre autres, que les régions au-delà de 60° de latitude regorgeaient de glace d'eau.



Logo du programme
Mars Surveyor '98.
Crédit : NASA.

Mars Climate Orbiter ne connut le même destin. Cette sonde et l'atterrisseur *Mars Polar Lander* (lancé le 3 janvier 1999) constituaient les deux éléments du programme *Mars Surveyor '98*, qui avait pour but l'étude de la météorologie martienne, du cycle de l'eau et du cycle du dioxyde de carbone. Les deux robots connurent une fin aussi lamentable que tragique... L'orbiteur fut perdu le 23 septembre 1999 lors de son insertion orbitale autour de Mars. La raison ? Le programme informatique supervisant la manœuvre depuis la Terre, fourni par la société Lockheed Martin, calculait et communiquait la poussée imposée par les propulseurs de la sonde en unités de mesure anglo-saxonnes. Un second logiciel, développé par la NASA, utilisait ces données en entrée pour établir la nouvelle position de la sonde et ordonner les corrections de trajectoire adéquates. Le quiproquo réside dans le fait que le logiciel de la NASA effectuait ses calculs à partir de données qu'il pensait être exprimées... dans le Système international d'unités ! Ainsi, les petites corrections de trajectoire furent effectuées sur la base de calculs erronés. Lors de l'insertion orbitale, la trajectoire de la sonde était trop basse d'environ 170 kilomètres. Elle l'amena dans des régions où l'atmosphère était bien plus dense qu'elle ne pouvait le supporter. *Mars Climate Orbiter* se désintégra.

L'atterrisseur *Mars Polar Lander*, lui, atteignit Mars le 3 décembre 1999. Embarquant les deux pénétrateurs de la mission *Deep Space 2*, il devait se poser par 76° de latitude sud. La phase de descente (freinage atmosphérique, parachute, rétrofusées) se déroula parfaitement. Les pieds de la sonde se déployèrent vers 40 mètres d'altitude. Malheureusement, l'ordinateur de bord confondit les vibrations entraînées par ce déploiement avec le choc dû à l'arrivée sur le sol ! Il coupa les moteurs et... *Mars Polar Lander* s'écrasa quarante mètres plus bas. La perte des deux robots du programme *Mars Surveyor '98* ébranla la NASA et entraîna une remise en cause de sa politique d'exploration du système solaire. Les missions à bas coût avaient peut-être atteint leurs limites.

Lancé le 4 août 2007, l'atterrisseur *Phoenix* embarqua plusieurs instruments conçus pour *Mars Polar Lander* et se posa sans encombre par 68° de latitude nord le 25 mai 2008. Il confirma la présence de glace d'eau, avant d'être réduit au silence par la rigueur extrême de l'hiver polaire martien en novembre 2008.



Tranchée creusée par le bras robotisé de *Phoenix*. La substance claire n'est autre que de la glace d'eau, que l'on vit se sublimer en l'espace de quelques jours. Crédit : NASA / JPL.

Trois satellites d'observation américains sont actuellement en activité. Le premier est *2001 Mars Odyssey*, que nous avons déjà présenté. Le deuxième, *Mars Reconnaissance Orbiter*, fut lancé le 12 août 2005. D'une masse de deux tonnes, il débuta sa mise en orbite en mars 2006 et acheva sa phase d'aérofreinage six mois plus tard. Équipé d'un télescope lui permettant de photographier la surface martienne avec des détails de 30 centimètres, il est doté en outre d'un spectromètre imageur produisant des cartes détaillées de la minéralogie de la surface ainsi que d'un radar pour sonder la structure du terrain jusqu'à un kilomètre de profondeur. Le troisième satellite américain en activité est *MAVEN*. Lancé le 18 novembre 2013, il s'inséra sur une orbite très elliptique autour de Mars le 22 septembre 2014. Il travaille actuellement sur les mécanismes à l'origine de la disparition de l'atmosphère de la planète, supposée dense dans un passé extrêmement reculé.

Chacune des missions couronnée de succès que nous venons de présenter eut un impact scientifique indéniable. Toutefois, auprès du public, aucune ne suscita autant d'engouement que les quatre rovers qui arpenterent la planète entre 1997 et aujourd'hui. Pour maintenir le public en haleine, la NASA leur assura une campagne de promotion et de communication tout à fait remarquable, permettant de suivre, quasiment en direct sur internet, leur avancée sur le sol de la planète Rouge. La mission *Mars Pathfinder* fut lancée le 4 décembre 1996 et marqua le retour des Américains sur Mars vingt ans après le programme *Viking*. La mission consista en une station fixe qui libéra un petit robot mobile, *Sojourner*, chargé d'explorer la surface environnante. Elle se posa le 4 juillet 1997, jour de la fête nationale américaine, après avoir rebondi sur le sol une vingtaine de fois, protégée par 24 ballons gonflables.



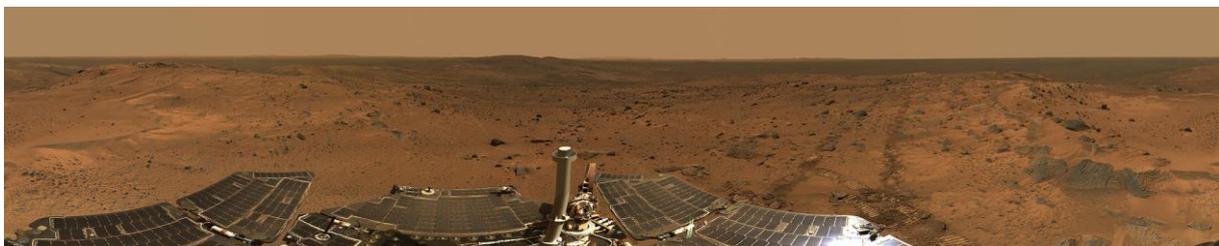
Test en grandeur réelle des ballons gonflables destinés à protéger *Mars Pathfinder*. Crédit : NASA.

Sojourner parcourut une centaine de mètres à la surface et détermina la composition chimique d'une grosse dizaine de roches. La station fixe, elle, fit des millions de mesures d'intérêt météorologique et transmet à la Terre plus de 17 000 images.



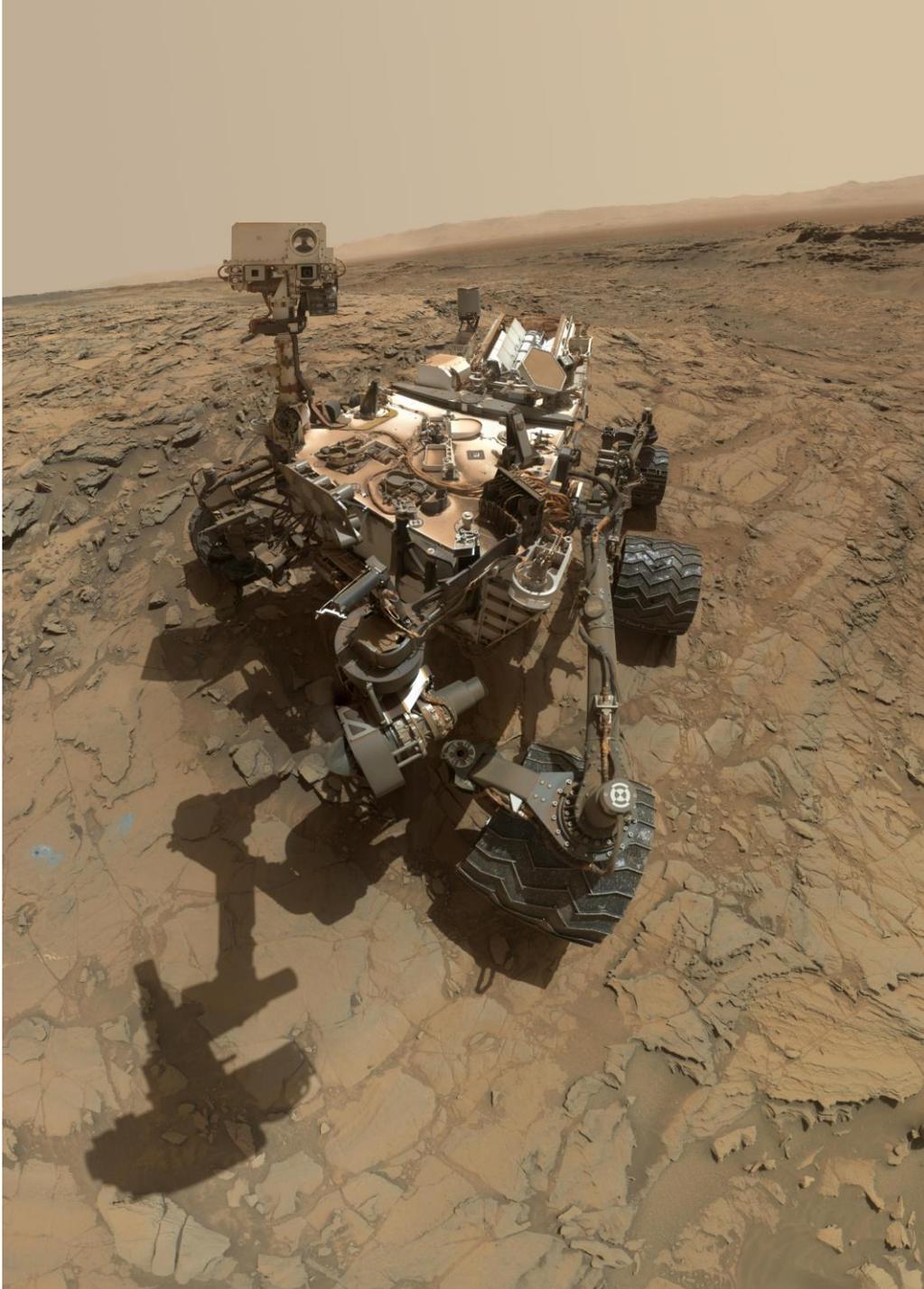
Sojourner analyse un rocher auquel on donna le nom de Yogi, une référence au personnage facétieux du dessin animé Yogi l'ours. Crédit : NASA.

Si *Mars Pathfinder* – au passage, le premier succès du virage « faster, better, cheaper » en compagnie de *Mars Global Surveyor* – fut plus un démonstrateur technologique qu'un véritable laboratoire scientifique, il n'en fut pas de même pour ses successeurs, les célèbres jumeaux *Spirit* et *Opportunity* du programme *Mars Exploration Rover*. Lancés respectivement le 10 juin et le 7 juillet 2003, ils atterrirent les 4 et 25 janvier 2004 selon une procédure assez semblable à celle qu'avait expérimentée *Mars Pathfinder* six ans et demi plus tôt. Construits pour durer au moins 90 jours martiens (soit 92,5 jours terrestres), nos rovers géologues fonctionnèrent plusieurs années. *Spirit* explora l'intérieur du cratère Gusev, un cratère très érodé de 150 km de diamètre dont il montra qu'il avait certainement hébergé un lac il y a plusieurs milliards d'années. Après avoir franchi 7,7 km, *Spirit* se retrouva enlisé dans des sables le 10 mai 2009 et ne put jamais s'en extraire. Sa dernière communication avec la Terre date du 22 mars 2010. L'année suivante, la NASA mit un terme définitif à ses tentatives pour rétablir le contact. À 9 700 km de là, dans une plaine nommée Meridiani Planum, *Opportunity* s'est révélé encore plus résistant que son jumeau. À l'heure où nous écrivons ces lignes, le robot travaille toujours, douze années après son atterrissage. À son compteur, près de 43 km. Plus qu'un marathon !... et plus qu'aucun autre véhicule martien ou lunaire n'a jamais roulé.



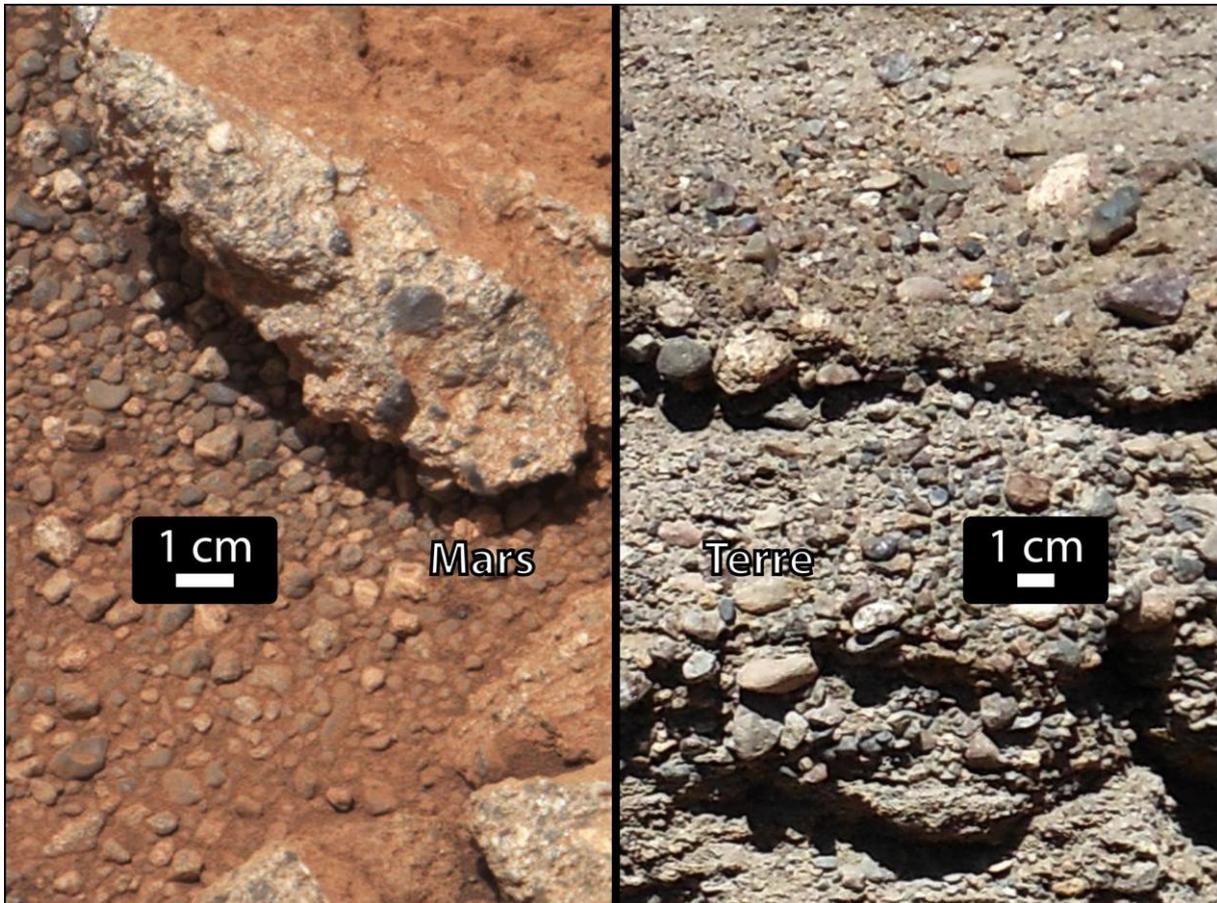
Panorama réalisé par le rover Spirit. Crédit : NASA.

Lorsqu'on le compare à *Spirit* et *Opportunity* et encore plus à *Sojourner*, le dernier rover en date envoyé sur Mars fait figure de géant. Avec une masse de 899 kg, une longueur proche de 3 mètres et des roues de 50 cm de diamètre, *Curiosity* a tout d'une petite voiture.



Autoportrait du rover *Curiosity* réalisé à partir de plusieurs d'images prises le 6 octobre 2015.
Crédit : NASA.

Élément central de la mission *Mars Science Laboratory*, *Curiosity* fut lancé le 26 novembre 2011 et atterrit dans le cratère Gale le 6 août 2012, selon une procédure complexe décrite en page 36. L'objectif que les scientifiques ont assigné au rover est d'enquêter sur l'habitabilité passée de Mars, d'étudier son climat ainsi que sa géologie et de mesurer le taux de radiation durant le trajet vers la planète Rouge et à sa surface, pour préparer de d'éventuelles futures missions habitées. En ce début d'année 2016, le rover a déjà parcouru plus de 13 km.

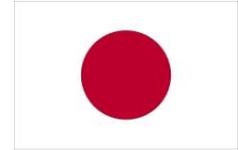


Exemple de découverte à mettre à l'actif de *Curiosity*. Un affleurement rocheux martien (à gauche), comparé à un conglomérat terrestre composé de galets aux formes arrondies. Dans les deux cas, les cailloux semblent avoir été transportés par l'eau d'un ruisseau. Crédit : NASA / JPL-Caltech / Malin Space Science Systems / PSI.

Les Américains, les Soviétiques puis les Russes ne sont pas les seuls à avoir tenté l'aventure martienne.



Le 3 juillet 1998, **l'agence spatiale japonaise** lança la sonde *Nozomi* pour étudier la haute atmosphère de la planète. Un problème de valve lui fit malheureusement consommer plus de carburant que prévu lors d'une manœuvre et une éruption solaire endommageant son ordinateur lui donna le coup de grâce. Bien que les ingénieurs nippons eussent réussi à amener la sonde abimée à proximité de Mars en décembre 2003, ils ne furent pas en mesure d'assurer son insertion orbitale. *Nozomi* fut déclarée perdue.



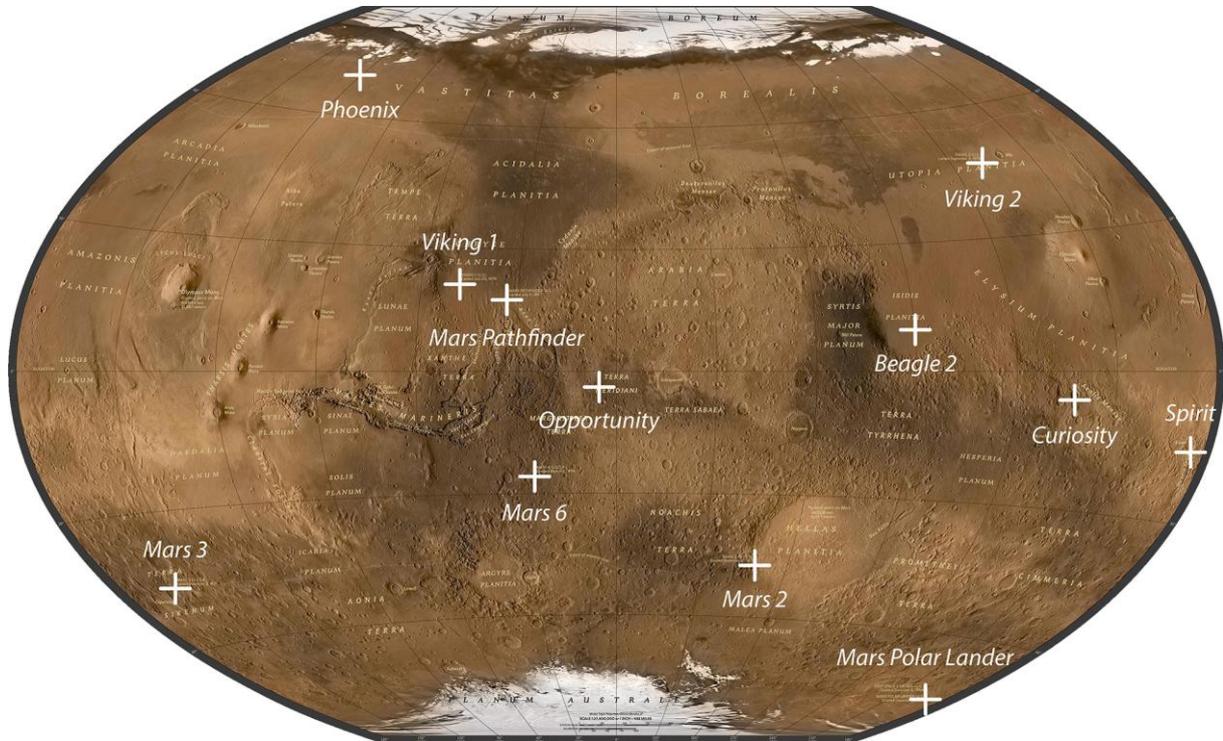
L'Europe s'était fortement impliquée dans la mission russe *Mars 96* en réalisant cinq de ses nombreux instruments scientifiques. Comme nous l'avons vu, elle fut détruite au lancement. La Russie, qui allait bientôt devoir faire face à une grave crise financière, n'avait pas les moyens d'en construire un nouvel exemplaire. Cette situation conduisit **l'Agence spatiale européenne** à concevoir, dans des délais serrés, une mission à bas coût reprenant les instruments développés pour *Mars 96*, auxquels s'ajouteraient un radar et un atterrisseur. *Mars Express* était née. Elle fut lancée le 2 juin 2003 et se mit en orbite autour de Mars le jour de Noël 2003. Elle largua alors le petit atterrisseur britannique *Beagle 2*... dont on ne reçut jamais le moindre signal. Sa mission était la recherche de la vie martienne, présente ou passée. Grâce au télescope embarqué sur *Mars Reconnaissance Orbiter*, on retrouva la trace de *Beagle 2* en janvier 2015. Les images suggèrent que deux des quatre panneaux solaires de l'atterrisseur ne s'étaient pas déployés, empêchant son antenne de se déployer à son tour. L'échec de *Beagle 2* ne doit pas ternir les succès obtenus par l'orbiteur de la mission *Mars Express* depuis le début de l'année 2004 : photographies à haute résolution et cartographie minéralogique de la surface, sondages radar des dépôts stratifiés dans les régions polaires jusqu'à une profondeur de 4 km, détermination de la circulation atmosphérique, etc.



Le dernier pays à s'être lancé dans l'exploration martienne est **l'Inde**. La sonde *Mars Orbiter Mission* (aussi appelée Mangalyaan, ce qui signifie « véhicule martien » en sanskrit) fut expédiée vers Mars le 5 novembre 2013 et se mit en orbite le 24 septembre 2014. Comme le rover *Sojourner* l'avait été en son temps, *Mars Orbiter Mission* est avant tout un démonstrateur technologique. Mais on peut déjà parier que des résultats scientifiques non dénués d'intérêt se présenteront !



La liste exhaustive des missions lancées vers Mars que nous venons d'exposer montre bien une chose : la planète Rouge n'est pas facile à dompter ! Sur la bonne cinquantaine de missions qui lui furent dédiées, seule une petite moitié parvint à remplir sa mission. Il n'est pas rare, encore aujourd'hui, d'entendre parler de la « malédiction martienne » !



Position des sondes ayant touché la surface de Mars. Document conçu d'après une image NASA.

3.3 Le futur

L'exploration de Mars va continuer et plusieurs missions ont déjà été planifiées. **Le programme le plus ambitieux est sans nul doute *ExoMars***, qui consistera en trois missions développées par l'Agence spatiale européenne avec une participation importante de l'Agence spatiale fédérale russe :

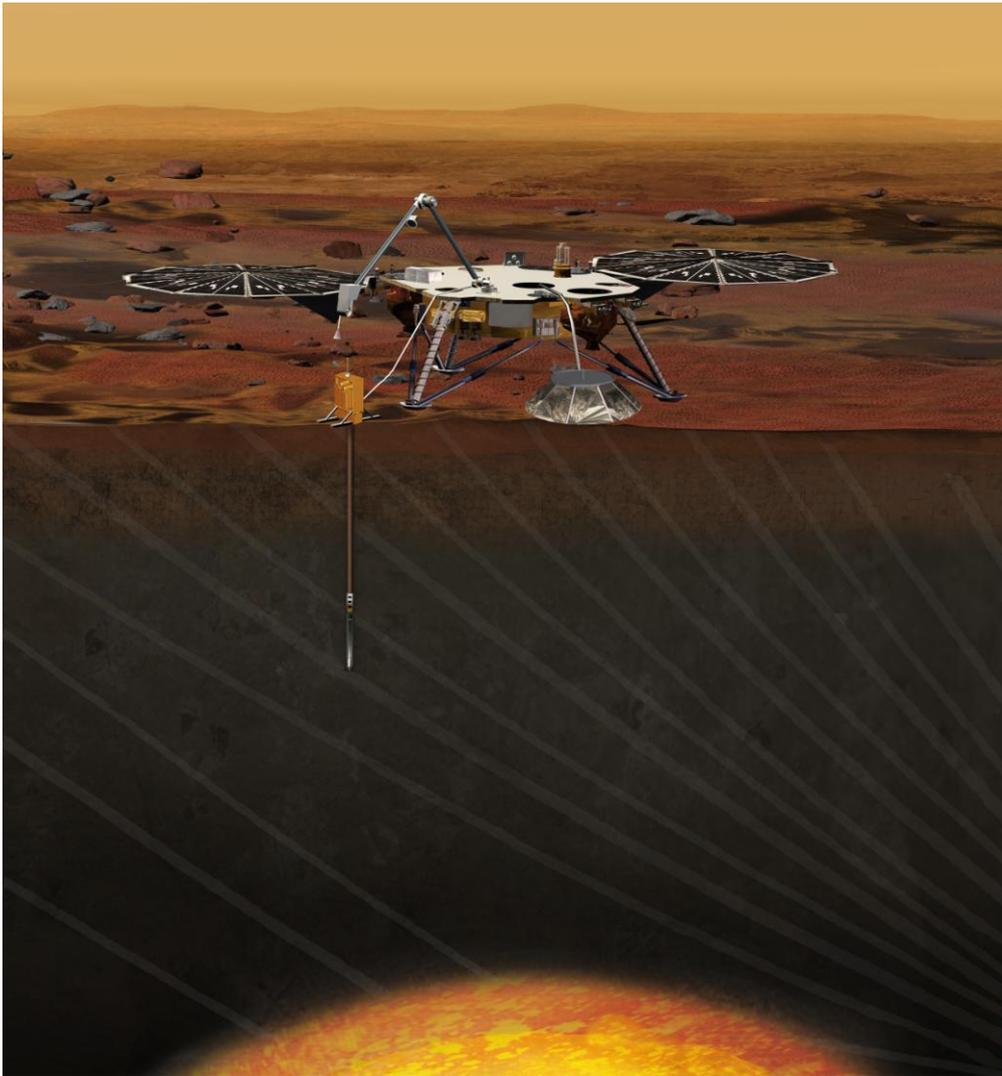
- *ExoMars Trace Gas Orbiter*, un satellite d'observation dont l'objectif est d'identifier l'origine du méthane et d'autres gaz rares présents dans l'atmosphère martienne. Il servira également de relais de communication entre les robots du programme évoluant en surface et la Terre ;
- *Schiaparelli EDM Lander*, un module démonstrateur de 600 kg qui doit permettre de valider les techniques de rentrée atmosphérique, de descente et d'atterrissage qui seront utilisées par de futures missions martiennes européennes. L'orbiteur *Trace Gas Orbiter* et le module *Schiaparelli* ont été lancés ensemble le 14 mars 2016 depuis Baïkonour ;
- le rover *ExoMars*. Sa plate-forme d'atterrissage sera essentiellement construite par les Russes. Le rover pourra prélever des échantillons du sol jusqu'à deux mètres de profondeur pour chercher d'éventuelles traces de vie passée, là où les molécules organiques sont protégées des rayonnements et des oxydants présents en surface. Lancement de la plate-forme et du rover prévu pour 2018... ou 2020.



Le 25 décembre 2015, le personnel du cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan a déballé *Schiaparelli*, le module démonstrateur du programme *ExoMars*. Il avait quitté Cannes huit jours auparavant, où il a été assemblé et testé dans l'usine de Thales Alenia Space. Crédit : TsENKI.

Plus d'information ici : <https://cnes.fr/fr/media/theexomars2016schiaparellimoduleinbaikonurjpp>.

Les Américains ne resteront bien évidemment pas inactifs en cette seconde partie de la décennie 2010. L'atterrisseur *InSight* devrait être lancé en 2018 en compagnie de deux nanosatellites, *Mars Cube One A* et *B*, qui assureront en temps réel un relais de communication avec la Terre. Pour approfondir notre connaissance de la structure interne de la planète Rouge, encore bien parcellaire, *InSight* sera équipé d'un sismomètre et d'un capteur de flux de chaleur s'enfonçant jusqu'à 5 m sous la surface.



Vue d'artiste de l'atterrisseur *InSight*. Crédit : NASA / JPL.

Le rover du projet *Mars 2020* reprendra l'architecture de *Mars Science Laboratory / Curiosity*. Il procédera à la collecte d'échantillons du sol, qu'il prélèvera sous la forme d'une trentaine de carottes. Toutefois, la mission qui effectuera le retour de ces échantillons sur Terre, à des fins d'analyse en laboratoire, n'est ni financée ni même planifiée à ce jour...

Notez enfin que les Émirats arabes unis ont programmé pour juillet 2020 l'envoi d'un orbiteur qui étudierait l'atmosphère martienne à partir de mars 2021. La sonde *Hope* (espoir) serait la première mission arabe vers Mars.



Et ensuite ? Bien des projets sont actuellement à l'étude. Les Américains réfléchissent à un orbiteur observant les satellites Phobos et Déimos (mission *PADME* pour **Phobos And Deimos & Mars Environment**) et à des atterrisseurs pouvant s'approcher d'un geyser de CO₂ par bonds (mission *Mars Geyser Hopper*), creusant la glace des régions polaires à la recherche de la vie (mission *Icebreaker Life*) ou s'attachant à réitérer plus finement les expériences d'intérêt biologique des missions *Viking* (mission *BOLD* pour **Biological Oxidant and Life Detection**). Comme la Chine et le Canada, l'Inde a pour objectif l'envoi d'orbiteurs et de rovers (mission *Mangalyaan 2*), et la Russie, celui de procéder à des retours d'échantillons de Mars et de Phobos. L'Europe envisage d'installer un véritable réseau météorologique quadrillant la planète Rouge et de ramener sur Terre des échantillons de Phobos (mission *Phootprint*), imité en cela par le Japon (mission *Mars Moon Sample Return*). **Il est à noter que, de plus en plus, des sociétés privées ne cachent plus leur intention d'explorer Mars.**



Crédit : NASA / JPL / Disney Enterprises Inc. / Pixar.

3.4 Petit mot concernant l'Homme sur Mars

L'arrivée de l'Homme sur Mars et la colonisation de la planète sont de vieux rêves. Ils ont donné et donnent encore naissance à une abondante littérature et à des œuvres cinématographiques plus ou moins inspirées. Aller sur Mars, n'est-ce pas la prochaine étape logique de l'exploration spatiale ? Le 20 juillet 1989, à l'occasion du 20^e anniversaire du premier pas d'Armstrong sur la Lune, le président des États-Unis George H. W. Bush annonça, sur les marches du Musée national de l'air et de l'espace de la Smithsonian Institution à Washington, son intention d'engager son pays dans un grand projet de retour vers la Lune (base permanente habitée) et d'exploration humaine de Mars. L'année 2019 fut évoquée. Pouvait-on imaginer symbole plus fort, 50 ans après le programme *Apollo* ?

Un quart de siècle a passé. Le projet du président Bush a été remanié... et repoussé. Tel un mirage, l'envoi d'une équipe d'astronautes sur Mars semble s'éloigner au fur et à mesure que l'on s'approche de la date du lancement. La NASA évoque désormais très prudemment les années 2030. L'Agence spatiale européenne fait de même.

Il faut bien avouer que **les défis à relever, qu'ils soient technologiques, financiers ou humains sont immenses**. Nous nous contentons ici d'en citer quelques-uns :

- **la durée de la mission**, bien plus longue que les missions lunaires. Entre le jour du lancement et le retour des astronautes sur la planète Bleue, ces dernières ont toutes duré moins de deux semaines. L'aller-retour vers Mars prendrait entre deux et trois ans. Comment gérer les consommables, comme l'eau, le dioxygène et la nourriture ? Comment protéger efficacement les astronautes contre les rayonnements ionisants d'origine solaire et galactique tout au long de leur voyage ? Comment gérer leur confinement et l'absence éventuelle de pesanteur ?
- **l'éloignement à la Terre**. Outre la sensation d'isolement, toute urgence, qu'elle soit matérielle ou médicale, devra impérativement être traitée par l'équipage. En raison de la finitude de la vitesse de la lumière, l'assistance depuis la Terre ne pourra même pas se faire en temps réel. En effet, les astronautes martiens ne recevront une réponse à leur question qu'entre 6 et 45 minutes après l'avoir posée, en fonction des positions relatives des deux planètes ;
- **la complexité de la mission**. Avec notre technologie, qui n'a finalement pas beaucoup évolué depuis le programme *Apollo* – si ce n'est l'électronique – il est strictement impossible d'envoyer des hommes sur Mars en une seule étape. Les lanceurs actuels ne sont tout simplement pas assez grands pour embarquer tout le matériel nécessaire, ni assez puissants pour lui faire quitter l'orbite terrestre. Il faudra donc des lancements multiples : les deux premiers emporteraient l'espace habitable et la fusée chargée de ramener les astronautes sur Terre, le troisième enfin les astronautes ;
- **le budget**. Celui du programme *Apollo*, qui a permis l'envoi d'astronautes sur la Lune, s'est élevé à environ 160 milliards de dollars actuels. Amener des hommes sur Mars pourrait coûter encore plus cher et rendre impérative une coopération internationale.



Quel sera le premier mot du premier homme sur Mars ? Crédit : NASA.