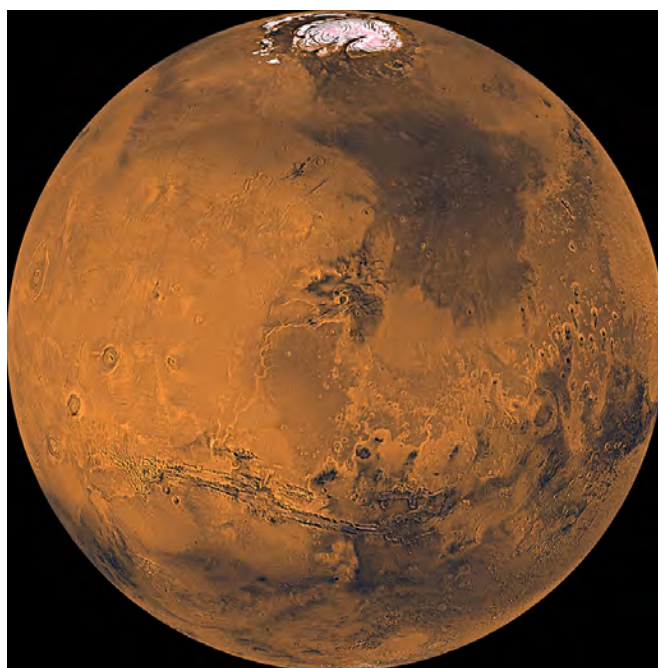




MARS

Histoire des observations
Caractéristiques physiques et orbitales
Atmosphère et climats
Géologie de Mars
Satellites de Mars
Les sondes envoyées vers Mars
Iconographie, photos



Mars

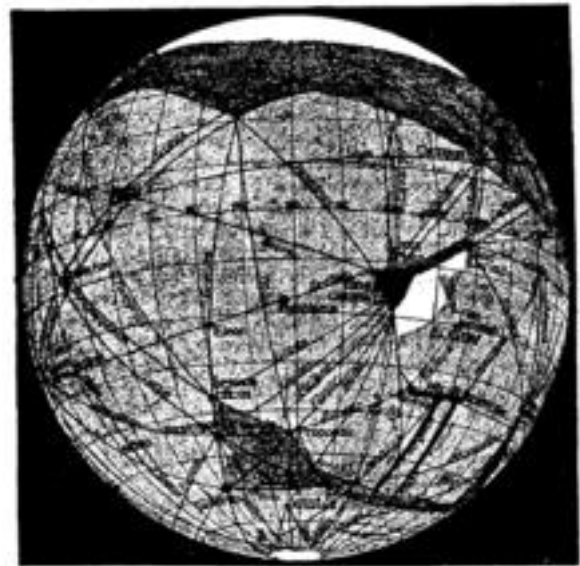
I Généralités

Mars est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil et la deuxième par masse et par taille croissantes sur les huit planètes que compte le Système solaire. Son éloignement au Soleil est compris entre 1,381 et 1,666 UA (206,6 à 249,2 millions de km), avec une période orbitale de 686,71 jours terrestres. C'est une planète tellurique, comme le sont Mercure, Vénus et la Terre, environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune. Sa topographie présente des analogies aussi bien avec la Lune, à travers ses cratères et ses bassins d'impact, qu'avec la Terre, avec des formations d'origine tectonique et climatique telles que des volcans, des rifts, des vallées, des mesas, des champs de dunes et des calottes polaires. La plus grande montagne du Système solaire, Olympus Mons (qui est aussi un volcan bouclier), et le plus grand canyon, Valles Marineris, se trouvent sur Mars. Mars a aujourd'hui perdu la presque totalité de son activité géologique interne, et seuls des événements mineurs surviendraient encore épisodiquement à sa surface, tels que des glissements de terrain, sans doute des geysers de CO₂ dans les régions polaires, peut-être des séismes, voire de rares éruptions volcaniques sous forme de petites coulées de lave. La période de rotation de Mars est du même ordre que celle de la Terre et son obliquité lui confère un cycle des saisons similaire à celui que nous connaissons; ces saisons sont toutefois marquées par une excentricité orbitale cinq fois et demie plus élevée que celle de la Terre, d'où une asymétrie saisonnière sensiblement plus prononcée entre les deux hémisphères. Mars peut être observée à l'œil nu, avec un éclat bien plus faible que celui de Vénus mais qui peut, lors d'oppositions rapprochées, dépasser l'éclat maximum de Jupiter, atteignant une magnitude apparente de -2,91, tandis que son diamètre apparent varie de 25,1 à 3,5 secondes d'arc selon que sa distance à la Terre varie de 55,7 à 401,3 millions de kilomètres. Mars a toujours été caractérisée visuellement par sa couleur rouge, due à l'abondance de l'hématite amorphe (oxyde de fer [Fe₂O₃]) à sa surface. C'est ce qui l'a fait associer à la guerre depuis l'Antiquité, d'où son nom en Occident d'après le dieu Mars de la guerre dans la mythologie romaine, assimilé au dieu Arès de la mythologie grecque. En français, Mars est souvent surnommée « la planète rouge » en raison de cette couleur particulière. Avant le survol de Mars par Mariner 4 en 1965, on pensait qu'il s'y trouvait de l'eau liquide en surface et que des formes de vie similaires à celles existant sur Terre pouvaient s'y être développées, thème très fécond en science-fiction. Les variations saisonnières d'albédo à la surface de la planète étaient attribuées à de la végétation, tandis que des formations rectilignes perçues dans les lunettes astronomiques et les télescopes de l'époque étaient interprétées, notamment par l'astronome amateur américain Percival Lowell, comme des canaux d'irrigation traversant des étendues désertiques avec de l'eau issue des calottes polaires. Toutes ces spéculations ont été balayées par les sondes spatiales qui ont étudié Mars : dès 1965, Mariner 4 permit de découvrir une planète dépourvue de champ magnétique global, avec une surface cratérisée rappelant celle de la Lune, et une atmosphère ténue. Depuis lors, Mars fait l'objet de programmes d'exploration plus ambitieux que pour aucun autre objet du Système solaire : de tous les astres que nous connaissons, c'est en effet celui qui présente l'environnement ayant le plus de similitudes avec celui de notre planète. Cette exploration intensive nous a apporté une bien meilleure compréhension de l'histoire géologique martienne, révélant notamment l'existence d'une époque reculée — le Noachien — où les conditions en surface devaient être assez similaires à celles de la Terre à la même époque, avec la présence de grandes quantités d'eau liquide; la sonde Phoenix a ainsi découvert à l'été 2008 de la glace d'eau à une faible profondeur dans le sol de Vastitas Borealis. Enfin, Mars possède deux petits satellites naturels, Phobos et Déimos.

Histoire de l'observation de Mars



Dessin en couleur de la planète Mars réalisé en 1877 par l'astronome français Étienne Léopold Trouvelot



Dessin de Percival Lowell datant de 1911 illustrant les canaux martiens qu'il a découvert

Mars faisant partie des cinq planètes visibles à l'œil nu (avec Mercure, Vénus, Jupiter, et Saturne), elle est observée depuis que les hommes regardent le ciel nocturne. Mars, lors de ses oppositions, est la planète la plus brillante après Vénus (sa magnitude apparente peut alors atteindre -2,9, le reste du temps, la deuxième planète la plus brillante est Jupiter). La couleur rouge sang caractéristique de Mars lui valut dans l'Antiquité le rapprochement avec le dieu grec de la guerre *Arès* puis avec son équivalent romain *Mars*, le rouge évoquant le sang des champs de bataille. Les Babyloniens la nommaient *Nirgal* ou *Nergal*, le dieu de la mort, des destructions et du feu. Les Égyptiens la nommaient « Horus rouge » (*ḥr Dšr*, *Hor-desher*) et connaissaient son « déplacement à reculons » (actuellement connu sous le nom de mouvement rétrograde).

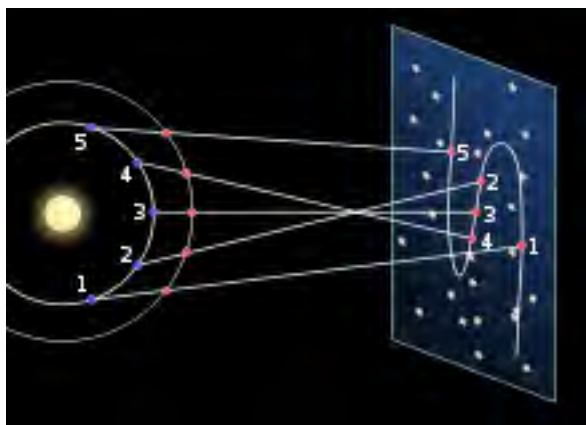
Dans la mythologie hindoue, Mars est nommée *Mangala* (मंगल) du nom du dieu de la guerre. Mangala Vallis est nommé en son honneur. En hébreu, elle est nommée *Ma'adim* (מַאֲדִים) : *Celui qui rougit*. Ma'adim Vallis reprend ce vocable. En Asie de l'Est (Chine, Japon, Corée et Viêt Nam) Mars est 火星, littéralement l'astre (星) feu (火). En mandarin et cantonais, elle est couramment nommée huoxing (火星, huǒxīng en pinyin) et traditionnellement Yinghuo (荧惑, yíng huò en pinyin, litt. « flamboyant confus »). En japonais, 火星 en kanji, かせい en hiragana, ou kasei en rōmaji (qui a donné son nom à Kasei Vallis). En coréen, 火星 en hanja et 화성 en hangeul, transcrit en *hwaseong*. Mars est encore connue de nos jours sous le nom de « Planète rouge ». Des observations de l'astronomie pré-télescopique, il reste peu de documents, et ceux-ci sont teintés de religion ou d'astrologie (comme le zodiaque de Dendérah en Haute-Égypte). De plus, les observations à l'œil nu ne permettent pas d'observer la planète elle-même mais plutôt sa trajectoire dans le ciel.

Les premières traces de l'**histoire de l'observation de Mars**, c'est-à-dire l'observation de la planète Mars depuis la Terre, remontent à l'époque des astronomes de l'Égypte antique, au II^e millénaire av. J.-C. Les premiers écrits chinois à propos des mouvements de la planète rouge datent d'avant la fondation de la dynastie Zhou (1045 av. J.-C.). Des observations détaillées des positions de Mars furent faites par les astronomes babyloniens qui perfectionnèrent des techniques d'arithmétique afin de prévoir les futures positions de la planète. Les philosophes de la Grèce antique et les astronomes de l'époque hellénistique développèrent des modèles géocentriques pour expliquer ces mouvements. Les astronomes indiens et arabes, quant à eux, estimèrent la taille de Mars et sa distance par rapport à la Terre. Au XVI^e siècle, Nicolas Copernic proposa un modèle héliocentrique pour le Système solaire dans lequel les planètes suivaient des orbites circulaires autour du Soleil. Ce modèle fut corrigé par Johannes Kepler, donnant à Mars une orbite elliptique, en adéquation avec les données astronomiques de l'époque.

La première observation de Mars au télescope fut réalisée en 1610 par Galilée. En un siècle, les astronomes découvrirent les principales formations d'albédo de la planète comme la tâche sombre de Syrtis Major Planum ou les étendues de glace situées au pôles (Planum Australe et Planum Boreum). Et lorsque Mars se rapprochait le plus possible de la Terre (durant son opposition avec le Soleil), ils furent capables de donner l'inclinaison et la période de rotation de la planète. Le perfectionnement des télescopes au début du XIX^e siècle permit de cartographier en détail les formations d'albédo martiennes permanentes. La première carte de Mars, grossière, fut publiée en 1840, suivie par d'autres cartes plus détaillées en 1877. Quand les astronomes pensèrent, à tort, qu'ils avaient détecté la signature spectroscopique de l'eau dans l'atmosphère martienne, l'hypothèse d'une vie martienne devint populaire auprès du grand public. Cette idée fut alimentée par la découverte des canaux martiens par Percival Lowell, supposés être des canaux artificiels d'irrigation. Mais ces canaux se révélèrent être en réalité des illusions d'optique et l'atmosphère se révéla trop mince pour abriter un environnement similaire à celui de la Terre.

Les nuages jaunes de Mars furent observés depuis les années 1870, l'astronome Eugène Antoniadi suggérant qu'il s'agissait de poussière ou de sable soufflé par le vent. Durant les années 1920, la température de Mars fut mesurée entre -85 et 7 °C et l'atmosphère fut jugée trop aride, composée seulement de traces d'oxygène et d'eau. En 1947, Gerard Kuiper montra que la fine atmosphère martienne contenait beaucoup de dioxyde de carbone, près du double de la quantité trouvée dans l'atmosphère terrestre. La première nomenclature standardisée pour les formations d'albédo martiennes fut adoptée en 1960 par l'Union astronomique internationale. Depuis les années 1960, Mars fait l'objet de multiples missions robotisées, explorant la planète depuis son orbite et sa surface. La planète reste cependant sous l'observation d'appareils basés au sol ou en orbite autour de la Terre, utilisant une large gamme du spectre électromagnétique. La découverte sur Terre de météorites provenant de Mars a permis d'étudier en laboratoire l'environnement chimique de la planète.

1) Premières traces de l'observation de Mars (-2000)



Lecture du mouvement rétrograde de Mars

L'existence de Mars comme un objet errant dans le ciel nocturne a été observée par les astronomes de l'Égypte antique, au II^e millénaire av. J.-C. Les astronomes égyptiens étaient familiers du mouvement rétrograde de la planète Mars, qui lui fait décrire dans le ciel une trajectoire opposée à sa direction réelle. Mars était représentée sur le plafond de la tombe de Séthi I^{er}, sur le plafond du Ramesséum ainsi que sur la carte stellaire de Sénènmut. Cette dernière, datant de 1534 av. J.-C., est la plus ancienne carte stellaire fondée sur la position des planètes connues. Durant la période de l'empire néo-babylonien, les astronomes babyloniens procédaient à des observations systématiques des positions et des comportements des planètes. Pour Mars, ils savaient qu'elle effectuait 37 périodes synodiques, soit 42 circuits du zodiaque, tous les 79 ans. Ils inventèrent à cet effet des méthodes arithmétiques pour effectuer des corrections mineures à la prédiction de la position des planètes. Ces techniques étaient essentiellement dérivées des mesures du temps, quand Mars passe au-dessus de l'horizon, plutôt que des positions de la planète sur la sphère céleste, qui étaient alors connues avec moins de précision. Les premières archives chinoises des apparitions et des mouvements de Mars datent d'avant la fondation de la dynastie Zhou (1045 av. J.-C.) et sous la dynastie Qin (221 av. J.-C.), les astronomes maintenaient un registre précis des conjonctions planétaires, incluant

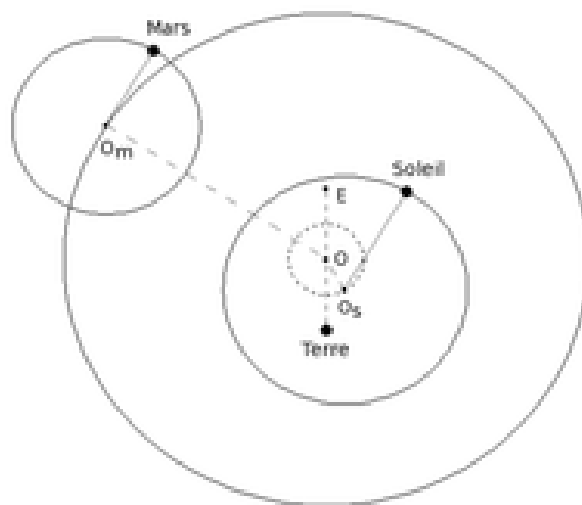
celles de Mars. Des occultations de Mars par Vénus furent observées en 368, 375 et 405. La période et le mouvement orbital de la planète furent calculés sous la dynastie Tang (618). Les débuts de l'astronomie de la Grèce antique furent influencés par les connaissances reçues de la culture mésopotamienne. Les Babyloniens associant Mars à Nergal, leur divinité infernale responsable de la guerre et de la peste, les Grecs associèrent donc Mars à Arès, leur dieu de la guerre. Durant cette période, les Grecs ne portaient pas grande attention au mouvement des planètes. Le poème grec d'Hésiode, *Les Travaux et les Jours* (650 av. J.-C.) n'en faisant à aucun moment mention.

2) Modèles orbitaux (-400 - 1600)

Les Grecs utilisaient le mot *planēton* pour désigner les 7 corps célestes qui se déplaçaient par rapport aux étoiles en arrière-plan et avaient une conception géocentrique du déplacement de ces corps autour de la Terre. Dans son célèbre ouvrage *La République*, le philosophe grec Platon donna la plus ancienne déclaration définissant l'ordre des planètes dans la tradition astronomique grecque connue. Il lista, dans l'ordre croissant de distance à la Terre: la Lune, le Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter, Saturne, puis les étoiles fixes. Dans son dialogue *Timée*, Platon proposa que la progression de ces corps dépende de leur distance à la Terre, le corps le plus éloigné se déplaçant le plus lentement. Aristote, un élève de Platon, observa une occultation de Mars par la Lune en 365 av. J.-C. Il en conclut que Mars devait se trouver plus loin que la Lune et nota que d'autres occultations d'autres astres avaient été observées par les Égyptiens et les Babyloniens. Il utilisa ces preuves observées pour défendre le séquençage grec des planètes. Son ouvrage *De Caelo* (« Du Ciel » en français) présente un modèle de l'univers dans lequel le Soleil, la Lune et les planètes tournent autour de la Terre à des distances fixes. Une version plus sophistiquée du modèle géocentrique fut développée par l'astronome grec Hipparque dans laquelle il proposa que Mars se déplace le long d'une piste circulaire appelée épicycle qui, à son tour, tourne en orbite autour de la Terre sur un grand cercle appelé déférent, ceci afin d'expliquer le mouvement rétrograde de Mars.



Schéma de 1524 montrant la conception géocentrique de l'univers



Trajectoire de Mars d'après le système géocentrique de Ptolémée. Le point E est l'équant; O est le centre de l'excentrique, tracé en pointillés. Les droites (Om-Mars) et (Os-Soleil) restent toujours parallèles entre elles

En Égypte romaine (IIe siècle), Ptolémée s'attela à résoudre le problème du mouvement orbital de Mars. En effet, les observations montraient que la planète rouge semblait se déplacer 40% plus vite d'un côté de son orbite que de l'autre, ce qui allait à l'encontre du modèle aristotélicien du mouvement uniforme. Il modifia donc le modèle de mouvement planétaire en ajoutant l'équant un modèle mathématique expliquant que la vitesse angulaire d'un corps stellaire (en l'occurrence Mars) n'est plus constante vis-à-vis du centre du cercle mais vis-à-vis d'un point distinct de celui-ci, le point équant. Il proposa donc un nouvel ordre des planètes, par distance croissante à la Terre : la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, puis

les étoiles fixes. Les travaux et modèles astronomiques de Ptolémée furent regroupés dans son ouvrage *l'Almageste* qui devint le traité de référence de l'astronomie occidentale pour les quatorze siècles suivants. Au V^e siècle, le traité d'astronomie indien *Surya Siddhanta* estima la taille angulaire de Mars à 2 minutes d'arc ($1^\circ/60$) et sa distance par rapport à la Terre à 10 433 000 km soit 1 296 600 yojana (un yojana représentant environ 8 km dans le *Surya Siddhanta*). De ces mesures, ils évaluèrent le diamètre de Mars à 6 070 km (754,4 yojana) soit moins de 11% d'erreur par rapport à la valeur actuellement admise de 6 788 km. Toutefois, cette estimation était fondée sur une estimation inexacte de la taille angulaire de la planète. Le résultat fut peut-être influencé par le travail de Ptolémée qui donna à Mars une taille angulaire de 1,57 minutes d'arc. Ces deux estimations étaient significativement supérieures à celle obtenues plus tard par télescope. En 1543, l'astronome polonais Nicolas Copernic publia un modèle héliocentrique dans son ouvrage *Des révolutions des sphères célestes*. Cette approche plaçait la Terre en orbite autour du Soleil entre les orbites circulaires de Vénus et de Mars. Son modèle expliqua avec succès pourquoi les planètes Mars, Jupiter et Saturne étaient de l'autre côté du ciel par rapport au Soleil quand elles étaient au milieu de leurs mouvements rétrogrades. Copernic fut ainsi capable de trier correctement les planètes selon leur ordre héliocentrique en se basant sur leur période orbitale autour du Soleil. Sa théorie s'imposa auprès des astronomes européens, en particulier après la publication des *Tables pruteniques* en 1511 par l'astronome allemand Erasmus Reinhold qui utilisaient le modèle de Copernic pour calculer les positions des corps du Système solaire. Le 13 octobre 1590, l'astronome allemand Michael Maestlin observa une occultation de Mars par Vénus. Un de ses élèves, Johannes Kepler, devint rapidement un adepte du système copernicien. Après la fin de ses études, celui-ci fut l'assistant du noble et astronome danois Tycho Brahe. Grâce à l'accès accordé aux observations détaillées de Mars de Tycho, Kepler travailla à un assemblage mathématique pour remplacer les Tables pruteniques. Après avoir échoué à plusieurs reprises à fixer le déplacement de Mars sur une orbite circulaire comme l'exige le système copernicien, il parvint à faire correspondre les observations de Tycho en supposant que l'orbite de Mars était elliptique et que le Soleil était situé à un des foyers. Ce modèle devint la base des lois de Kepler, décrivant les mouvements des planètes autour du Soleil et publiées en plusieurs volumes dans son ouvrage *Epitome astronomia Copernicanae* (Épitomé de l'astronomie copernicienne) entre 1615 et 1621.

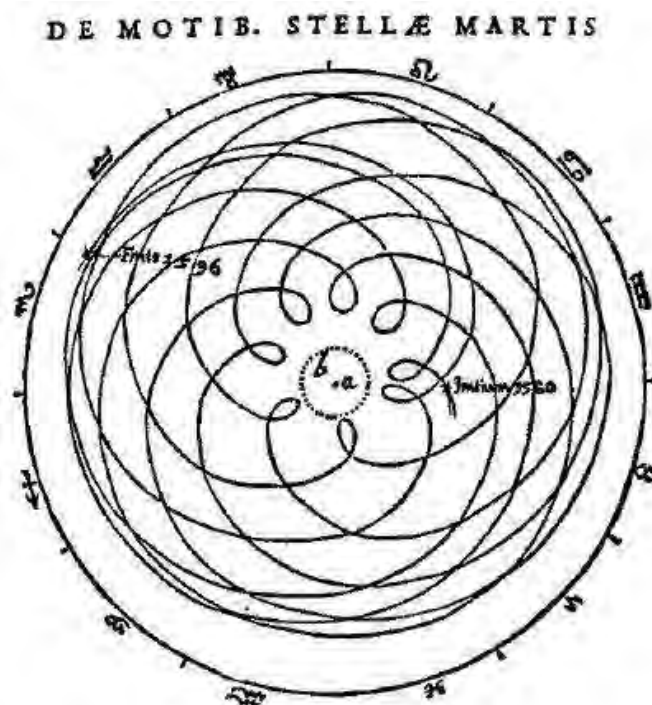
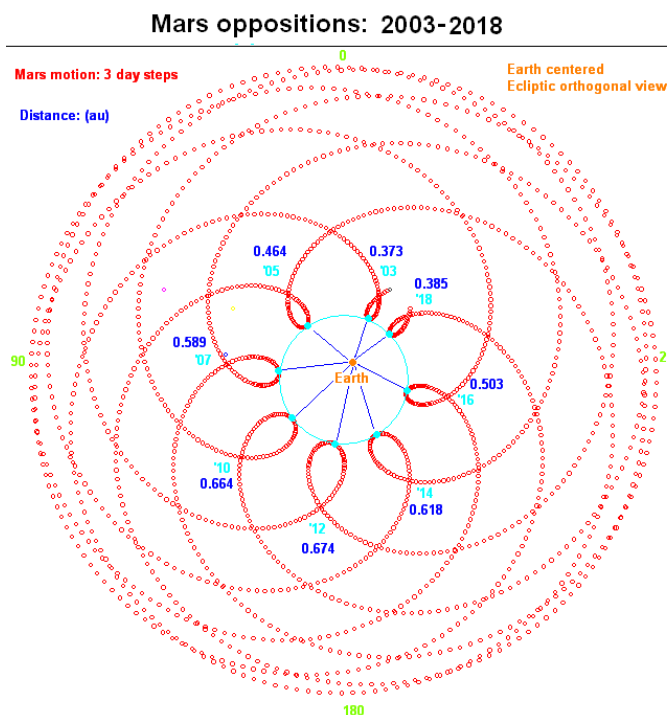


Illustration des mouvements de Mars par rapport à la Terre provenant de l'ouvrage *Astronomia nova* (1609)



Modèle informatique moderne illustrant les oppositions de Mars, correspondant avec le modèle de Kepler

3) Les premières observations télescopiques (1600 - 1800)

Lorsque Mars est le plus proche de la Terre, sa taille angulaire est de 25 secondes d'arc ce qui est beaucoup trop petit pour obtenir des informations sur la planète à l'œil nu. Ainsi, avant l'invention du télescope, rien n'était connu de la planète à part sa position dans le ciel. Le savant italien Galilée fut la première personne connue utilisant un télescope pour effectuer des observations astronomiques. Ses textes indiquent qu'il commença à observer Mars à travers un télescope en septembre 1610. Cet instrument était trop primitif pour afficher tous les détails de la surface de la planète, Galilée a donc décidé d'observer si Mars montrait des phases d'obscurité partielle, comme le font Vénus ou la Lune. Même s'il était incertain de son succès, il nota en décembre 1610 que la taille angulaire de Mars avait diminuée. L'astronome polonais Johannes Hevelius parvint à observer une phase de Mars en 1645.



Dessin du globe martien réalisé en 1659 par Huygens, montrant la tâche sombre de Syrtis Major et Planum Australe



Photographie réalisée par le télescope spatial Hubble montrant Syrtis Major et les calottes glaciaires, premières tâches d'albédo martiennes observées

Le prêtre jésuite Daniello Bartoli rapporta avoir vu deux taches sombres sur Mars. Lors des oppositions de 1651, 1653 et 1655, quand Mars passa le plus près de la Terre, l'astronome italien Giovanni Battista Riccioli et son élève Francesco Grimaldi notèrent des tâches réfléchissantes sur la planète rouge. La première personne à réaliser une carte de Mars montrant des caractéristiques de la surface de la planète fut l'astronome hollandais Christiaan Huygens. Le 28 novembre 1659, il dessina une carte sur laquelle figure une région sombre aujourd'hui connue sous le nom de Syrtis Major Planum et peut-être l'une des deux calottes polaires. La même année, il réussit à mesurer la période de rotation de la planète, d'environ 24 heures. Il fit une estimation approximative du diamètre de Mars, devinant qu'il représentait 60% de celui de la Terre, une estimation proche de la valeur en vigueur aujourd'hui, estimée à 53%. La première mention d'une des deux calottes polaires martienne fut peut-être faite par Giovanni Domenico Cassini en 1666, lorsqu'il remarqua une tâche blanche au sud de la planète, aujourd'hui connue sous le nom de Planum Australe. Cette même année, il utilisa l'observation de ces marques pour déterminer une période de rotation de 24 h et 40 min, une valeur qui diffère de la valeur actuelle de seulement 3 minutes. En 1672, Huygens remarqua une tâche blanche floue au pôle nord. Après que Cassini fut devenu le premier directeur de l'observatoire de Paris en 1671, il aborda le problème de l'échelle physique du Système solaire. La taille relative des orbites des planètes était connue grâce à la troisième loi de Kepler, il suffisait donc de connaître la taille d'une seule des orbites pour déterminer la taille de toutes les autres. Pour cela, Cassini mesura la position de Mars par rapport aux étoiles en différents points de la Terre, et mesura ainsi le parallaxe diurne de la planète. Au cours de cette année, la planète se situait au point de son orbite le plus rapproché du Soleil (au périhélie) et était particulièrement proche de la Terre. Cassini et l'astronome français Jean Picard déterminèrent la position de Mars par rapport à Paris tandis que l'astronome Jean Richer, à 7 000 km de

Paris, détermina la position de Mars par rapport à Cayenne, en Amérique du Sud. Le but de la mesure de la parallaxe de Mars par Richer était de fixer la distance Terre-Mars au moment de l'observation, le rayon terrestre étant connu avec précision par les récentes mesures de Picard. Ainsi on obtiendrait l'échelle du système solaire par la Troisième Loi de Kepler. La parallaxe de Mars mesurée par Cassini, Picard et Richer est 25", impliquant pour celle du Soleil 9,5". Ces données permettent d'évaluer la distance Terre-Soleil, c'est-à-dire l'unité astronomique, à $(57060 \times 360 \times 360 \times 3600) / (2\pi \times 2\pi \times 9,5) \approx 7,098 \times 10^{10}$ toises (ou environ 138 millions de kilomètres). La valeur admise actuellement pour la parallaxe de Mars est 8,794". La mesure de 1673 sous-évalue ainsi la valeur exacte de l'unité astronomique d'environ 8,5 %, car 1 U.A. vaut actuellement 149 597,87 km. Compte tenu de l'instrumentation assez précaire de l'époque, la valeur de parallaxe obtenue par Cassini, Richer et Picard ne différa que de 10% de la valeur correcte actuellement admise. Ce résultat fut soutenu par l'astronome anglais John Flamsteed. En 1704, l'astronome franco-italien Giacomo Filippo Maraldi fit une étude systématique de la calotte polaire australe et observa que sa forme variait en fonction de la rotation de la planète, ce qui indiquait que la calotte n'était pas centrée sur le pôle. Il observa aussi que sa taille variait avec le temps. L'astronome allemand naturalisé anglais Sir William Herschel commença à observer Mars en 1777 et en particulier ses calottes polaires. En 1781, il nota que la calotte australe apparaissait « extrêmement grande » et que le pôle sud était dans l'obscurité les douze mois précédant. Durant l'année 1784, la calotte australe apparut beaucoup plus petite, ce qui amena Herschel à suggérer que les calottes variaient avec les saisons de la planète et donc qu'elles étaient constituées de glace. En 1781, il estima la période de rotation de Mars à 24 h, 39 min et 21,67 s et mesura son obliquité à 28.5°. Il nota que Mars avait une « atmosphère considérable, mais modérée, de sorte que ses habitants jouissent probablement d'une situation à bien des égards semblables aux nôtres ». Entre 1796 et 1809, l'astronome français Honoré Flaugergues remarqua des obscurcissements de « couleur ocre » masquant la surface de Mars. Il s'agit de la première observation connue des tempêtes de poussière martiennes.

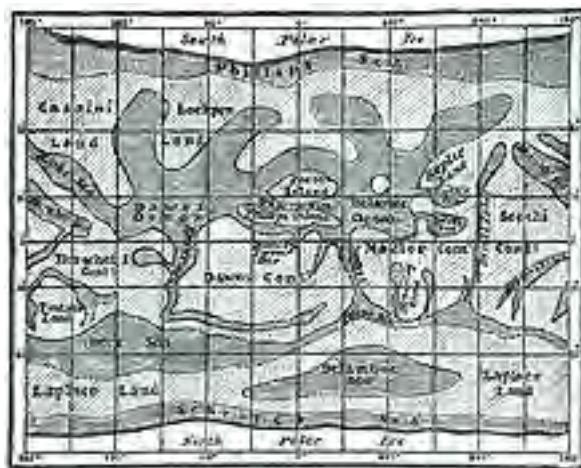
4) La période « géographique » (1800 - 1877)



Carte de Mars dessinée par les astronomes allemands Beer et Mädler en 1840

Au début du XIX^e siècle, l'augmentation de la taille et de la qualité des télescopes permit un progrès significatif dans les capacités d'observation. La plus remarquable de ces améliorations fut le doublet achromatique de l'opticien allemand Joseph von Fraunhofer qui permit d'éliminer le coma, un effet optique pouvant fausser les bordures de l'image. En 1812, Fraunhofer parvint à créer une lentille achromatique objective de 190 mm de diamètre. La taille de cette lentille primaire est le facteur principal dans la détermination de la capacité de collecte de lumière et de la résolution d'une lunette astronomique. Durant l'opposition de Mars de 1830, les astronomes allemands Johann Heinrich von Mädler et Guillaume Beer utilisèrent une lunette Fraunhofer de 95 mm pour étudier intensivement la planète. Ils choisirent une caractéristique située à 8° au sud de l'équateur comme point de référence (caractéristique nommée plus tard Sinus Meridiani et qui devint le méridien zéro de Mars). Au cours de leurs observations, les deux astronomes remarquèrent que la plupart des caractéristiques de la surface étaient permanentes et déterminèrent plus précisément la période de rotation de la planète. En 1840, Mädler utilisa les données de dix ans d'observation pour dessiner la première carte de Mars. Plutôt que de donner des noms aux différentes caractéristiques, Beer et Mädler les marquèrent par des simple lettres. Ainsi, Sinus Meridiani était la caractéristique « a ». Travaillant à l'observatoire du Vatican lors de l'opposition de 1858, l'astronome italien Angelo Secchi remarqua une grande trace triangulaire bleue sur la surface de Mars. Il appela cette trace « Scorpion Bleu ». Cette même formation saisonnière d'apparence nuageuse fut observée par

l'astronome anglais Joseph Norman Lockyer et par d'autres observateurs. Durant l'opposition de 1862, l'astronome hollandais Frederik Kaiser réalisa des dessins de Mars. En comparant ses illustrations avec celles réalisées par Huygens et par le philosophe naturaliste anglais Robert Hooke, il fut capable d'affiner la période de rotation de Mars. Sa valeur de 24 h, 37 min et 22,6 s étant précise au dixième de seconde près.



Une version plus récente de la carte de Mars produite par Richard A. Proctor en 1905

Secchi réalisa quelques-unes des premières illustrations en couleur de la planète Mars en 1863 et utilisa les noms de célèbres explorateurs pour désigner les caractéristiques. En 1869, il observa deux formations linéaires sombres sur la surface qu'il nomma *canali*, mot italien signifiant « canaux ». En 1867, l'astronome anglais Richard A. Proctor créa une carte plus détaillée de la surface s'appuyant sur les dessins de 1864 de l'astronome William Rutter Dawes. Proctor nomma les différentes taches sombres et claires avec les noms d'astronomes anciens et contemporains, qui contribuèrent à l'observation de Mars. Au cours de la même décennie, des cartes et nomenclatures similaires furent réalisées par l'astronome français Camille Flammarion et par l'astronome anglais Nathan Green. Entre 1862 et 1864, l'astronome allemand Johann K. F. Zöllner développa à l'Université de Leipzig un luxmètre conçu pour mesurer la réflectivité de la Lune, des planètes et des étoiles. Pour Mars, il obtint un albédo de 0,27. Entre 1877 et 1893, les deux astronomes allemands Gustav Müller et Paul Kempf observèrent Mars avec le luxmètre de Zöllner. Ils obtinrent un faible coefficient de phase (la variation de la réflectivité en fonction de l'angle), indiquant que la surface de Mars était lisse et dépourvue de grandes irrégularités. En 1867, l'astronome français Jules Janssen et l'astronome anglais William Huggins utilisèrent des spectroscopes pour examiner l'atmosphère de la planète rouge. Ils comparèrent le spectre visible de Mars avec celui de la Lune. Comme le spectre de cette dernière ne présentait pas de raies d'absorption de l'eau, ils pensèrent avoir détecté la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars. Ce résultat fut confirmé par l'astronome allemand Hermann C. Vogel en 1872 puis par l'astronome anglais Edward Maunder en 1875 mais sera plus tard remis en question. Une opposition périhélique particulièrement favorable eut lieu en 1877. L'astronome anglais David Gill profita de cette opportunité pour calculer la parallaxe diurne de Mars depuis île de l'Ascension, le conduisant à une estimation de la parallaxe de $8,78 \pm 0,01$ secondes d'arc. Utilisant ce résultat, il fut en mesure de déterminer plus précisément la distance de la Terre par rapport au Soleil, en fonction de la taille relative des orbites de Mars et de la Terre. Il remarqua que le bord du disque de Mars apparaissait flou en raison de son atmosphère, ce qui limita la précision qu'il pourrait obtenir pour calculer la position de la planète. Les 16 et 17 août 1877, l'astronome américain Asaph Hall découvrit les deux lunes de Mars en utilisant le télescope de 660 mm de l'observatoire naval des États-Unis, la plus grande lunette astronomique du monde à cette époque. Le nom des deux satellites, Phobos et Déimos, furent choisis par Hall sur une suggestion de Henry George Madan, un professeur de sciences de l'Eton College, en Angleterre.

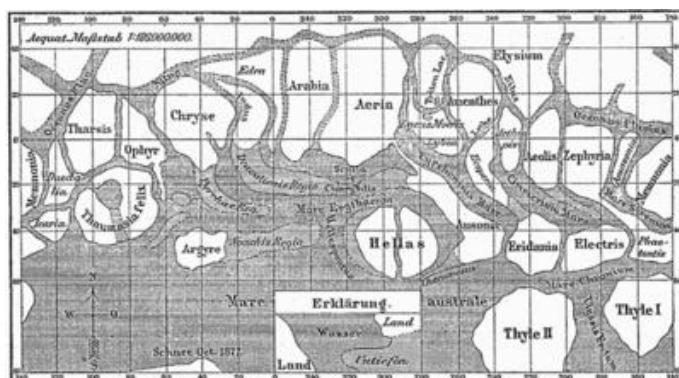
5) Les canaux martiens

Durant l'opposition de 1877, l'astronome italien Giovanni Schiaparelli utilisa une lunette de 220 mm pour dresser la première carte détaillée de la planète Mars. Cette carte comportait notamment des formations appelées *canali*, qui se révélèrent être des illusions d'optiques quelques années après. Durant l'opposition de 1877, l'astronome italien Giovanni Schiaparelli utilisa une lunette de 220 mm pour dresser la première carte détaillée de la planète Mars.

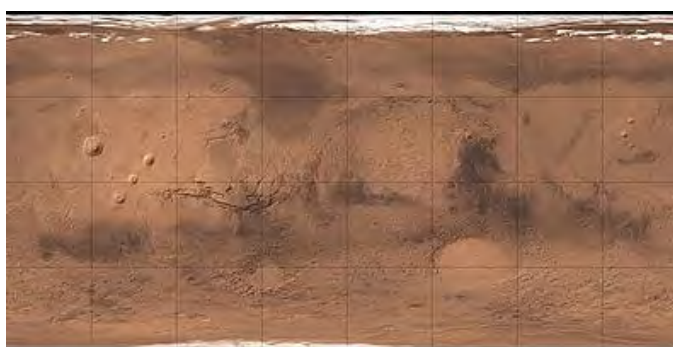


Dessin du globe martien réalisé par Percival Lowell entre 1894 et 1914 représentant les fameux canaux martiens, canaux qui se révélèrent être des illusions d'optiques

Cette carte comportait notamment des formations appelées *canali*, qui se révélèrent être des illusions d'optiques quelques années après. Ces *canali* avaient la forme de longues lignes droites sur la surface de la planète et étaient nommées par Schiaparelli avec le nom de célèbres cours d'eau Terrestres. Le terme *canali* fut populairement traduit en anglais par *canaux*. En 1886, l'astronome anglais William F. Denning remarqua que ces canaux étaient de nature irrégulière et présentaient des concentrations et des interruptions. Et en 1895, l'astronome anglais Edward Maunder acquiesça la certitude que ces lignes n'étaient que les sommes de plusieurs petits détails et non pas des formations distinctes. Dans son ouvrage de 1892, *La planète Mars et ses conditions d'habitabilité*, Camille Flammarion écrit à propos de la ressemblance entre ces canaux martiens et les canaux artificiels construits par l'Homme. Il suggère que ces canaux furent bâtis par une espèce intelligente plus avancée que l'humanité dans le but de survivre à l'aridité de la planète rouge. Influencé par les observations de Schiaparelli, l'astronome américain Percival Lowell fonda en 1894 l'observatoire Lowell, doté de télescopes de 300 mm et 450 mm. L'observatoire fut utilisé pour l'observation de Mars lors de la dernière bonne opportunité en 1894 puis lors des oppositions suivantes, moins favorables. Lowell publia divers livres sur Mars et sur la vie martienne qui eurent une grande influence sur le public. Les *canali* furent observés par d'autres astronomes, notamment par les français Henri Joseph Perrotin et Louis Thollon qui utilisèrent la lunette de 380 mm de l'observatoire de Nice, l'un des plus grand télescope de son temps. A partir de 1901, l'astronome américain Andrew E. Douglass tenta de photographier ces fameux canaux martiens. Ses efforts semblèrent se concrétiser lorsque l'astronome Carl Lampland des photographies des supposés canaux en 1905. Bien que ces résultats aient rencontré un accueil favorable, ils devinrent contestés par l'astronome grec Eugène Antoniadi, par le célèbre naturaliste britannique Alfred Russel Wallace et par d'autres scientifiques convaincus que ces canaux n'étaient que des illusions d'optique. Plus les télescopes devenaient précis et perfectionnés, plus les *canali* observés étaient tordus et petits. Lorsque Camille Flammarion observa la planète rouge en 1909 à l'aide d'un télescope de 840 mm, il distingua des motifs irréguliers à la surface mais ne distingua aucun *canali*.

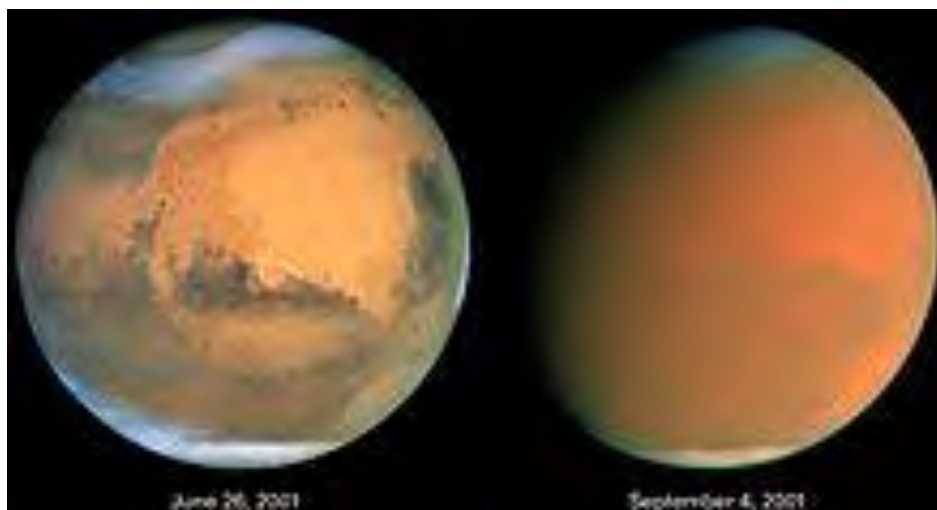


Carte de Mars dessinée par Giovanni Schiaparelli parue dans le Meyers Konversations-Lexikon en 1888.



Carte de Mars reconstituée à partir des mesures de Mars Global Surveyor (MOLA) et des observations de Viking.

6) Précision des paramètres planétaires (1870 - 1950)



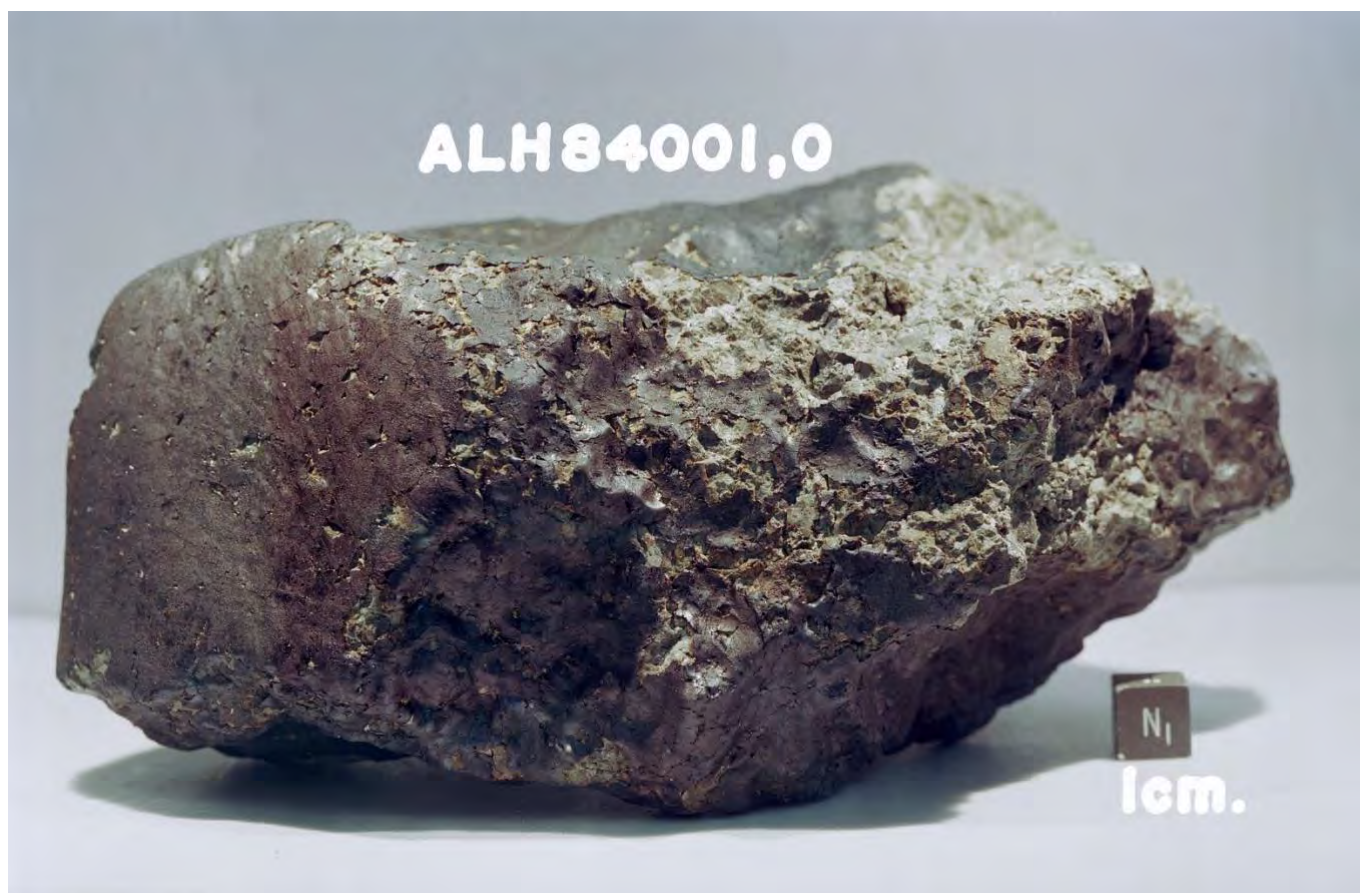
Sur l'image de gauche, de fins nuages martiens sont visibles près des régions polaires. Sur l'image de droite, la surface de Mars est masquée par une gigantesque tempête de sable. Clichés pris par le télescope spatial Hubble en 2001.

L'obscurcissement de la surface causée par des « nuages jaunes » a été remarqué dès les années 1870 lorsque ces derniers furent observés par Schiaparelli. La présence de ces nuages fut aussi observée lors des oppositions de 1892 et 1907. En 1909, Antoniadi nota que la présence de nuages jaunes était associée à l'obscurcissement de l'albédo de la surface. Il découvre que Mars apparaît plus jaune durant les oppositions, lorsque la planète est le plus proche du Soleil et reçoit le plus d'énergie, et suggère que ces nuages sont causés par de la poussière martienne soulevée par le vent. En 1894, l'astronome américain William W. Campbell constata que le spectre de Mars était identique au spectre de la Lune, jetant le doute sur la théorie naissante de la similitude entre l'atmosphère de Mars et celle de la Terre. Les précédentes détections d'eau dans l'atmosphère martienne furent expliquées par des conditions défavorables et Campbell considéra que la signature de l'eau était entièrement imputable à l'atmosphère terrestre. Bien qu'il fut d'accord sur le fait que les calottes glaciaires indiquait qu'il y avait de l'eau dans l'atmosphère, la faible taille de ces calottes lui semblait incompatible avec une quantité de vapeur d'eau suffisante pour être détectable depuis la Terre. À l'époque, ces résultats furent controversés et critiqués par la communauté astronomique internationale mais en 1925, ils furent confirmés par l'astronome américain Walter S. Adams. L'astronome germano-balte Hermann Struve utilisa les changements observés dans les orbites des lunes martiennes pour déterminer l'influence gravitationnelle de la forme de la planète. En 1895, il utilisa ces données pour estimer que le diamètre équatorial de Mars est 1/190 plus grand que son diamètre polaire. En 1911, il précisa la valeur à 1/192. Ce résultat fut confirmé par le météorologiste américain Edgar W. Woolard en 1944. En utilisant un thermocouple fixé au télescope Hooker de 2,54 m de l'observatoire du Mont Wilson, les astronomes américains Seth Barnes Nicholson et Edison Pettit furent capables, en 1924, de mesurer l'énergie thermique rayonnée par la surface de Mars. Ils déterminèrent que la température variait de -68°C au pôle jusqu'à 7°C au centre du disque (correspondant à l'équateur). À partir de la même année, le physicien américain William Coblentz et l'astronome américain Carl Lampland débutèrent des mesures de la radiométrie de Mars. Les résultats montrèrent notamment que la température nocturne de la planète chutait à -85°C , indiquant une « énorme fluctuation journalière » des températures. La température des nuages martiens fut mesurée à -30°C . En 1926, en mesurant les lignes spectrales décalées vers le rouge par les mouvements orbitaux de Mars et de la Terre, l'astronome américain Walter S. Adams fut capable de mesurer directement la quantité d'oxygène et de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère de Mars. Il nota que des « conditions extrêmement désertiques » prévalaient sur Mars. En 1934, Adams et l'astronome américain Theodore Dunham, Jr. trouvèrent que pour une surface égale, la quantité d'oxygène présente dans l'atmosphère martienne était cent fois inférieure à la quantité trouvée dans l'atmosphère terrestre. En 1927, l'étudiant néerlandais diplômé Cyprianus Annius van den Bosch détermina la masse de la planète Mars en analysant le mouvement des deux lunes, avec une précision de 0.2%. Ce résultat fut confirmé par le physicien Willem de Sitter en 1938. En utilisant les observations de l'astéroïde géocroiseur Éros, l'astronome germano-américain Eugene Rabe

fut en mesure de déterminer indépendamment la masse de Mars, ainsi que celle d'autres planètes du Système solaire interne en fonction des perturbations gravitationnelles causées à l'astéroïde. Il estima sa marge d'erreur à 0,05%, mais des vérifications ultérieures montrèrent que cette technique obtenait des résultats médiocres en comparaison d'autres méthodes.

Au cours des années 1920, l'astronome français Bernard Lyot utilisa un polarimètre pour étudier les propriétés de la surface de la Lune et des planètes. En 1929, en constatant que la lumière polarisée émise depuis la surface martienne était très similaire à celle émise par la surface de la Lune, il suggéra que ces observations pouvaient s'expliquer par la présence de gel, ou même d'une éventuelle végétation. En se fondant sur la quantité de lumière solaire diffusée par l'atmosphère martienne, il détermina que cette dernière n'était que d'au maximum 1/15 de l'épaisseur de l'atmosphère terrestre. Avec une telle épaisseur, la pression à la surface ne peut excéder 2,4 kPa (24 mbar). En utilisant la spectrométrie infrarouge, l'astronome néerlandais et américain Gerard Kuiper détecta du dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la planète rouge. Il fut capable d'estimer que pour une surface égale, la quantité de dioxyde de carbone présente dans l'atmosphère martienne était deux fois supérieure à celle présente dans l'atmosphère terrestre. Cependant, Kuiper ayant surestimé la pression à la surface de Mars, il conclut à tort que les calottes glaciaires ne pouvaient être composées de dioxyde de carbone gelé. En 1948, le météorologiste américain Seymour Hess détermina que la formations des fins nuages martiens ne nécessitait que 4 mm de précipitations et d'une pression de vapeur saturante de 0,1 kPa (1 mbar). La première nomenclature standard des formations d'albédo fut introduite en 1960 par l'Union astronomique internationale (UAI) quand l'organisation adopta 128 noms issus de la carte nommée *La Planète Mars* dessinée par Eugène Antoniadi en 1929. Un groupe de travail pour la nomenclature du système planétaire a été fondé en 1973 afin de standardiser les conventions de nommage pour Mars et les autres corps célestes.

7) L'ère de la télédétection (depuis 1950)



*Photographie de la météorite « potentiellement » martienne ALH 84001
Tombée en Antarctique il y a 13.000 ans et découverte en 1984.*

L'*International Planetary Patrol Program* (Programme International de Patrouille Planétaire) a été formé en 1969 par la NASA afin de coordonner la collecte ininterrompue d'images et d'observations des surfaces des planètes. Le programme se concentra notamment sur l'observation des tempêtes de poussière sévissant sur Mars. Les images ainsi obtenues ont permis aux scientifiques d'étudier les modèles saisonniers de la planète et de remarquer que les tempêtes de poussière martiennes étaient plus fréquentes lorsque Mars était proche du Soleil. Depuis les années 1960, de nombreux véhicules spatiaux furent envoyés pour explorer Mars sous toutes les coutures, depuis la surface ou l'orbite de la planète rouge. En addition à cette analyse *in situ*, de nombreux télescopes basés au sol ou en orbite autour de la Terre pratiquent la télédétection dans de larges gammes du spectre électromagnétique. Cette télédétection inclut l'observation infrarouge, pour déterminer la composition de la surface, l'observation dans l'ultraviolet pour observer la composition atmosphérique, et les mesures radio pour déterminer la vitesse du vent. Le télescope spatial Hubble a été utilisé pour effectuer des études systématiques de Mars et a réalisé les photos de Mars de plus grande résolution jamais prises depuis la Terre. Ce télescope peut prendre des photos utiles de la planète rouge quand il est à une distance angulaire d'au moins 50° du Soleil. Hubble peut prendre des clichés d'un hémisphère, ce qui donne une vue globale du système météorologique. Les télescopes équipés de capteurs photographiques situés sur la terre ferme peuvent aussi prendre des photographies utiles de Mars, permettant un suivi régulier des conditions météorologiques de la planète lors des oppositions. Les émissions de rayons X depuis la planète Mars furent observés en premier en 2001 grâce au télescope spatial Chandra et en 2003, il a été montré que ces rayons X étaient divisées en deux composantes. La première composante étant issue des rayons X produits par le Soleil et diffusés par la couche supérieure de l'atmosphère de Mars. La seconde provenant des interactions entre les ions et donnant lieu à des échanges de charges. L'émission de cette dernière composante fut observée portant jusqu'à huit fois le rayon de la planète par l'observatoire spatial XMM-Newton. En 1983, l'analyse de 3 types de météorites (shergottites, nakhlites et chassignites, rassemblées dans le groupe SNC) montra qu'elles étaient originaires de Mars. La météorite Allan Hills 84001, découverte en Antarctique en 1984, est supposée provenir de Mars mais possède une composition entièrement différente de celles du groupe SNC. En 1996, il a été annoncé que cette météorite présentait une microscopique structure tubulaire que la NASA a identifié comme étant une bactérie martienne fossilisée. Cependant cette découverte a été remise en question, des études suggérant que cette formation tubulaire était d'origine minérale, d'autres suggérant une possible contamination terrienne. L'analyse chimique des météorites martiennes trouvées sur Terre suggère que la température ambiante à la surface de la planète Mars est restée en dessous du point de congélation de l'eau (0 °C) une grande partie des quatre derniers milliards d'années, handicapant sérieusement le développement de toute forme de vie.

II Caractéristiques physiques et orbitales de Mars

Quatrième planète du Système solaire par ordre de distance croissante en partant du Soleil, Mars est une planète tellurique moitié moins grande que la Terre et près de dix fois moins massive, dont la superficie est un peu inférieure à celle des terres émergées de notre planète (144,8 contre 148,9 millions de km²). La gravité y est le tiers de celle de la Terre, tandis que la durée du jour solaire martien, appelé *sol*, excède celle du jour terrestre d'un peu moins de 40 minutes.

Mars est une fois et demie plus éloignée du Soleil que la Terre, sur une orbite sensiblement plus elliptique, et reçoit, selon sa position sur cette orbite, entre deux et trois fois moins d'énergie solaire que notre planète. L'atmosphère de Mars étant de surcroît plus de 150 fois moins dense que la nôtre et ne générant par conséquent qu'un effet de serre très limité, ce faible rayonnement solaire explique que la température moyenne sur Mars soit d'environ -65 °C.

Mars ♂	
	
Mosaïque assemblée à partir d'images prises par l'orbiteur Viking 1 le 22 février 1980.	
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	227 936 637 km
Aphélie	249 228 730 km
Périhélie	206 644 545 km
Circonférence orbitale	1 429 038 772 km (9.553 UA)
Excentricité	0.09341233
Période de révolution	686.9601 j (1.8808 a)
Période synodique	779.9643 j
Vitesse orbitale moyenne	24.077 km/s
Vitesse orbitale maximale	26.499 km/s
Vitesse orbitale minimale	21.972 km/s

Inclinaison sur l'écliptique	1.85061°
Nœud ascendant	49.578°
Argument du périhélie	286.46230°
Satellites connus	2 (Phobos, Déimos)
Caractéristiques physiques	
Ravon équatorial	3 396.2 ± 0.1 km (0.533 Terre)
Ravon polaire	3 376.2 ± 0.1 km (0.531 Terre)
Ravon moyen volumétrique	3 389.5 km (0.532 Terre)
Anlatissement	0.00589 ± 0.00015
Périmètre équatorial	21 344 km (0.5326 Terre)
Superficie	144 798 500 km ² (0.284 Terre)
Volume	163.18×10 ⁹ km ³ (0.151 Terre)
Masse	641.85×10 ²¹ kg (0.107 Terre)
Masse volumique globale	3 933.5 ± 0.4 kg/m ³
Gravité de surface	3.711 m/s ² (0.376 g)
Vitesse de libération	5.027 km/s
Période de rotation (jour)	1.025957 j (24.622962 h)
Vitesse de rotation (à)	868.220 km/h
Inclinaison de l'axe	25.19°
Albédo géométrique visuel	0.15
Albédo de Bond	0.25
Irradiance solaire	589.2 W/m ² (0.431 Terre)
Température d'équilibre du	210.1 K (-62.9 °C)
Température de surface :	
Maximum :	270 K (+25 °C)
Moyenne :	210 K (-63 °C)
Minimum :	140 K (-133 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	636 (30 à 1 155) Pa
Masse volumique au sol	0.020 kg/m ³
Masse totale	25×10 ¹⁵ kg
Hauteur d'échelle	11.1 km
Masse molaire moyenne	43.34 ¹ . g/mol
Dioxyde de carbone CO₂	95.32 %
Diazote N₂	2.7 %
Argon Ar	1.6 %
Dioxygène O₂	0.13 %
Monoxyde de carbone CO	0.07 %
Vapeur d'eau H₂O	0.03 %
Monoxyde d'azote NO	130 ppm ²
Hydrogène moléculaire H₂	15 ppm

Néon Ne	2.5 ppb
Eau lourde HDO	850 ppb
Krypton Kr	300 ppb
Méthanal HCHO	130 ppb
Xénon Xe	80 ppb
Ozone O₃	30 ppb
Peroxyde d'hydrogène H₂O₂	18 ppb
Méthane CH₄	10.5 ppb

La fine atmosphère martienne, dans laquelle circulent des nuages localement abondants, est le siège d'une météorologie particulière, dominée par des tempêtes de poussières qui obscurcissent parfois la planète tout entière. Son excentricité orbitale cinq fois plus marquée que celle de la Terre est à l'origine d'une asymétrie saisonnière très sensible sur Mars : dans l'hémisphère nord, la saison la plus longue est le printemps (198,6 jours), qui excède la plus courte (l'automne, 146,6 jours) de 35,5 %; sur Terre, l'été de l'hémisphère nord, saison la plus longue, n'excède la durée de l'hiver que de 5 %. Cette particularité explique également que la superficie de la calotte polaire australe se réduise nettement plus en été que celle de la calotte polaire boréale. La distance moyenne de Mars au Soleil est d'environ 227,937 millions de kilomètres, soit 1,5237 UA. Cette distance varie entre un périhélie de 1,381 UA et un aphélie de 1,666 UA, correspondant à une excentricité orbitale de 0,093315. La période orbitale de Mars est de 686,96 jours terrestres, soit 1,8808 années terrestres, et le jour solaire y dure 24 h 39 min 35,244 s.

Le tableau ci-dessous permet de comparer les valeurs de quelques paramètres physiques entre Mars et la Terre :

Propriété	Valeur martienne	Valeur terrestre (Mars % Terre)
Rayon équatorial	3 396,2 ± 0,1 km	6 378,1 km (53,3 %)
Rayon polaire	3 376,2 ± 0,1 km	6 356,8 km (53,1 %)
Rayon moyen	3 389,5 km	6 371,0 km (53,2 %)
Surface	144 798 500 km ²	510 072 000 km ² (28,4 %)
Volume	1,6318×10 ¹¹ km ³	1,0832073×10 ¹² km ³ (15,1 %)
Masse	6,4185×10 ²³ kg	5,9736×10 ²⁴ kg (10,7 %)
Masse volumique	3 933,5 ± 0,4 kg/m ³	5 515 kg/m ³ (71,3 %)
Gravité de surface à	3,711 m/s ²	9,780327 m/s ² (37,9 %)
Vitesse de libération	5 027 m/s	11 186 m/s (44,9 %)
Période de rotation	1,02595675 j ≈ 88 642,663 s	86 164,098903691 s (102,9 %)
Durée du jour solaire	1 sol ≈ 1,02749125 j ≈	1 j = 86 400 s (102,75 %)
Inclinaison de l'axe	25,19°	23,439281°
Albédo de Bond	0,25	0,29
Albédo géométrique	0,15	0,367
Demi-grand axe de	227 939 100 km	149 597 887,5 km (152,4 %)
Excentricité orbitale	0,093315	0,016710219 (558,4 %)
Période orbitale	668,5991 sols ≈ 686,971 j	365,256366 j (188,1 %)
Aphélie	249 209 300 km	152 097 701 km (163,8 %)
Périhélie	206 669 000 km	147 098 074 km (140,5 %)
Rayonnement solaire	492 à 715 W/m ²	1 321 à 1 413 W/m ²
Température moyenne au	-63 °C ≈ 210 K	14 °C ≈ 287 K
Température la plus	-3 °C ≈ 270 K	58 °C ≈ 331 K
Température la plus basse	-133 °C ≈ 140 K	-89 °C ≈ 184 K



La Terre et Mars à la même échelle

A) Variations de l'excentricité

Des sept autres planètes du Système solaire, seule Mercure possède une excentricité plus élevée que celle de Mars. Toutefois, par le passé, l'orbite de Mars aurait été plus circulaire qu'aujourd'hui, avec une excentricité d'environ 0,002 il y a 1,35 million d'années. L'excentricité de Mars évoluerait selon deux cycles superposés, le premier d'une période de 96.000 ans et le second d'une période de 2 200 000 ans, de sorte qu'elle devrait encore croître au cours des 25.000 prochaines années.

B) Variations de l'obliquité

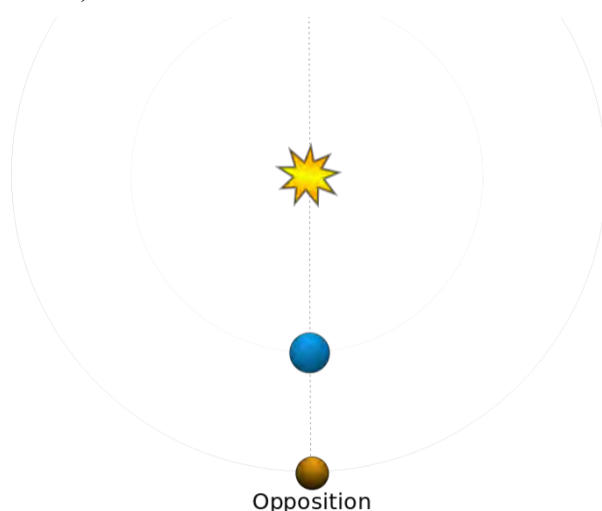
L'obliquité désigne l'inclinaison de l'axe de rotation d'une planète sur son plan orbital autour du Soleil. L'obliquité moyenne martienne est très comparable à celle de la Terre : $25,2^\circ$ et $23,3^\circ$ respectivement. Toutefois, ces valeurs proches ne résultent pas de la même dynamique. Sur Terre, le couple Lune-Terre maintient l'obliquité dans une fourchette de valeurs restreinte, avec une amplitude d'un degré et demi seulement. L'obliquité martienne connaît par contre une évolution chaotique car elle connaît des variations périodiques dues aux interactions gravitationnelles avec les autres planètes du Système solaire et n'est par conséquent calculable avec une marge d'erreur acceptable que pour quelques millions d'années seulement dans le passé.

Parmi les facteurs influençant l'obliquité figure la variation de l'inclinaison du plan orbital de Mars (le plan orbital terrestre, ou « plan de l'écliptique », connaît également des variations angulaires). Ces variations cycliques ont été évaluées par simulations informatiques dès les années 1970 comme ayant une périodicité de 120 000 ans s'inscrivant elle-même dans un super-cycle de 1,2 million d'années avec pour valeurs extrêmes $14,9^\circ$ et $35,5^\circ$. Un cycle encore plus long se superposerait à cet ensemble, de l'ordre de 10 millions d'années, dû à une résonance orbitale entre la rotation de la planète et son orbite autour du Soleil, susceptible d'avoir porté à 40° l'obliquité de Mars il y a seulement 5 millions d'années. Des simulations plus récentes, réalisées au début des années 1990, ont de surcroît révélé des variations chaotiques de l'obliquité martienne, dont les valeurs possibles s'inscriraient de 11° à 49° . Encore affinées à l'aide des données recueillies par les sondes martiennes des années 1990 et 2000, ces simulations numériques ont mis en évidence la prépondérance des variations chaotiques de l'obliquité martienne dès qu'on remonte au-delà de quelques millions d'années, ce qui rend aléatoire toute prédiction de la valeur de l'obliquité au-delà de quelques dizaines de millions d'années dans le passé. Une équipe européenne a ainsi évalué à 63 % la probabilité que l'obliquité de Mars ait atteint au moins 60° au cours du dernier milliard d'années, et à plus de 89 % au cours des trois derniers milliards d'années. Ces variations d'obliquité induisent des variations climatiques très significatives à la surface de la planète, affectant notamment la répartition de la glace d'eau en fonction des latitudes. Ainsi, la glace tend à s'accumuler aux pôles en période de faible obliquité comme actuellement, tandis qu'elle tend à migrer aux basses latitudes en période de forte obliquité. Les données recueillies depuis le début du siècle tendent à montrer que Mars sortirait en ce moment même d'un « âge glaciaire », notamment en raison de l'observation de structures glaciaires (glaciers, fragments de banquise et pergélisol notamment) jusqu'à des latitudes aussi basses que 30° et qui semblent connaître une érosion active. Dans la mesure où la pression atmosphérique moyenne au sol dépend de la quantité de dioxyde de carbone gelé aux pôles, les variations d'obliquité ont également un impact sur la masse totale de l'atmosphère de Mars, la pression atmosphérique moyenne pouvant même tomber, en période de faible obliquité, à seulement 30 Pa (à peine 5 % de la pression atmosphérique standard actuelle) et induire un réchauffement de 20 à 30 K du sous-sol martien en réduisant la conductivité thermique du régolithe dont la taille moyenne des

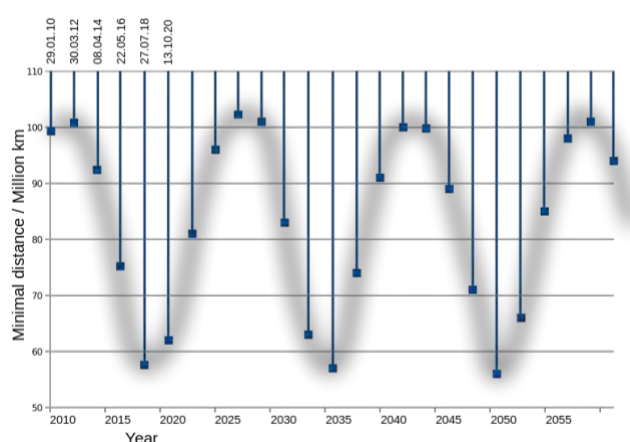
pores serait comparable au libre parcours moyen des molécules de gaz dans une atmosphère aussi raréfiée, ce qui bloquerait la dissipation du « flux aréothermique », c'est-à-dire du flux géothermique martien. Un tel réchauffement pourrait expliquer de nombreuses formations géologiques impliquant un sous-sol chargé d'eau liquide sans qu'il soit nécessaire d'invoquer un accroissement passé de la pression atmosphérique ou du flux thermique de la planète.

C) Oppositions Terre-Mars

Mars est la planète extérieure la plus proche de la Terre. La distance qui sépare les deux astres est la plus faible lorsque Mars est en opposition, c'est-à-dire lorsque la Terre s'intercale entre Mars et le Soleil. Toutefois, compte tenu de l'inclinaison et de l'excentricité orbitale, le moment précis où Mars est le plus proche de la Terre peut différer de quelques jours du moment de l'opposition astronomique. Ainsi, l'opposition du 28 août 2003 avait lieu précisément à 17 h 58 min 49 s UTC tandis que la plus grande proximité entre les deux planètes avait eu lieu la veille, le 27 août 2003 à 9 h 51 min 14 s UTC (données IMCCE).



La Terre et Mars en opposition



Distance minimale Terre-Mars, période 2010-2060

Ces oppositions surviennent approximativement tous les 780 jours, les deux dernières en date s'étant produites le 29 janvier 2010 et le 3 mars 2012. Compte tenu de l'excentricité respective des orbites de Mars et de la Terre, la distance Terre-Mars n'est pas constante à chaque opposition. L'excentricité de Mars étant plus importante que celle de la Terre, c'est lorsque Mars est au périhélie que le rapprochement est le plus favorable. Cette situation se rencontre tous les quinze ans environ, après sept oppositions. Ainsi, le 27 août 2003 à 9 h 51 min 14 s UTC, Mars était distante de la Terre de 55,758 millions de kilomètres, soit 0,3727 UA; c'est la plus grande proximité entre Mars et la Terre depuis 59 618 ans. Un rapprochement encore un peu plus resserré est prévu le 28 août 2287, avec une distance de 55,688 millions de kilomètres.

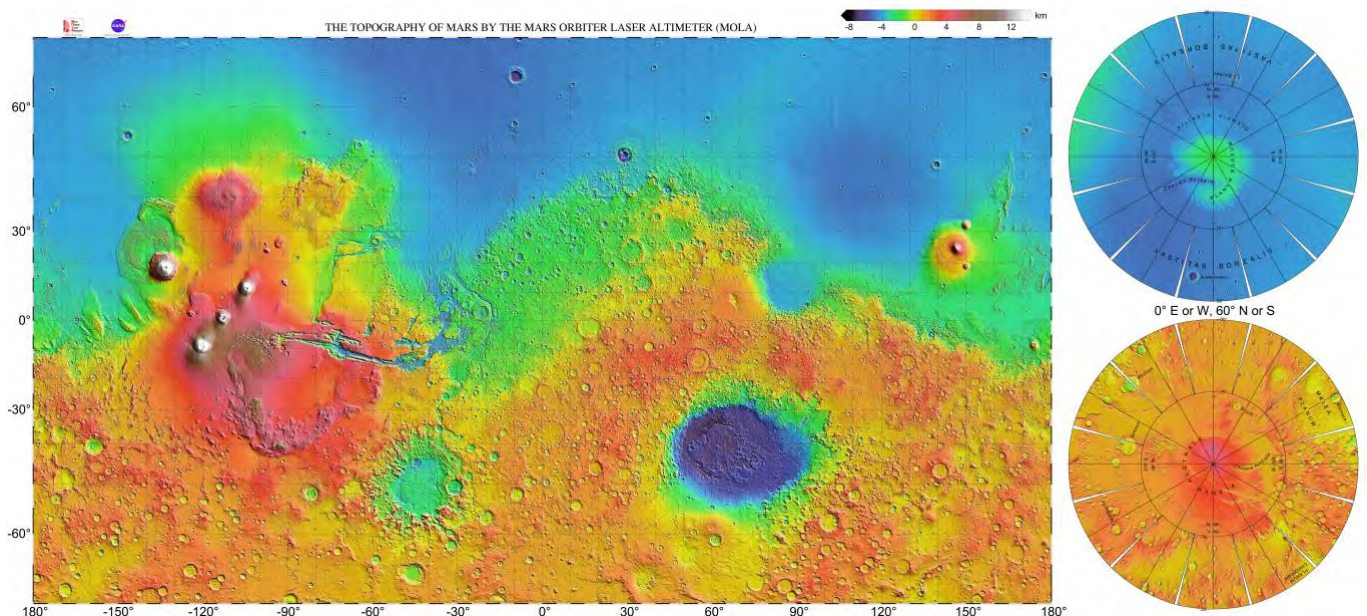
Distances minimales Terre-Mars (en millions de km)			
Date	Distance (UA)	Distance (Mkm)	Diamètre apparent
27 août 2003	0,372719	55,758	25,13 "
15 août 2050	0,374041	55,957	25,04 "
30 août 2082	0,373564	55,884	25,08 "
19 août 2129	0,373276	55,841	25,10 "
24 août 2208	0,372794	55,769	25,13 "
28 août 2287	0,372254	55,688	25,16 "

En tenant compte des influences gravitationnelles des autres planètes sur l'excentricité orbitale de Mars qui continuera à croître légèrement au cours des 25 000 prochaines années, il est possible de prédire des rapprochements encore plus étroits : 55,652 millions de kilomètres le 3 septembre 2650 et 55,651 millions de kilomètres le 8 septembre 2729.

D) Géographie de Mars

La **géographie de Mars**, parfois appelée **aréographie**, regroupe les disciplines, telles que la topographie, la géomorphologie, voire la climatologie martiennes, concernées par l'étude de la géographie physique de Mars. La topographie martienne est caractérisée par l'opposition entre les plaines basses et sans relief de l'hémisphère nord, géologiquement récentes, et les hautes terres fortement cratérisées et au relief localement accidenté dans l'hémisphère sud, géologiquement datées du premier milliard d'années suivant la formation de la planète. Ces deux domaines, radicalement différents, sont délimités par une frontière géologique très franche, interrompue en deux endroits par deux régions volcaniques (le renflement de Tharsis et Elysium Planitia) dans lesquelles se trouvent les cinq plus hauts édifices volcaniques de tout le Système solaire : le plus « petit » d'entre eux, Elysium Mons, culmine à plus de 14 km au-dessus du niveau de référence martien, tandis que le plus élevé, Olympus Mons, a une hauteur totale de 22,5 km de la base au sommet, et culmine à 21,2 km au-dessus du niveau de référence. Mars ne possédant aucun océan pour définir une surface équipotentielle globale comme sur Terre, il a été nécessaire de définir arbitrairement une notion équivalente au niveau de la mer sur Terre afin de pouvoir déterminer les altitudes sur Mars. La surface équipotentielle de référence retenue est celle à laquelle la pression atmosphérique moyenne, déterminée par occultation radio depuis la Terre et à l'aide des sondes satellisées autour de Mars, vaut 610 Pa.

Altitudes



Carte topographique des altitudes martiennes, basée sur les données du MOLA de Mars Global Surveyor.

Latitudes

Les latitudes ont initialement été déterminées sur Mars à partir d'une graduation projetée sur la surface martienne photographiée par Mariner 9 entre l'équateur et les pôles, dans le cadre d'un système qualifié de *planétographique*. C'est ce système qui a été utilisé au début des années 1970 par le programme Viking.

Nom	Pluriel	Sionification	Exemple
Catena	Catenae	Chaîne de cratères d'impact ou de cavités d'effondrement	Ophir Catenae
Cavus	Cavi	Trou. creux prononcé d'origine non météoritique	Amenthes Cavi
Chaos	Chaos	Terrain d'effondrement chaotique	Hvdransis
Chasma	Chasmata	Canvon élargi. Vallée encaissée	Candor Chasma
Colles	Collis	Colline. petite élévation	Tartarus Colles
Crater	Craters	Cratère d'origine météoritique	Schiaparelli
Dorsum	Dorsa	Formation surélevée allongée. crête	Xanthe Dorsa
Fluctus	Fluctus	Terrain en forme d'écoulement	Tantalus
Fossa	Fossae	Fossé. chenal. vallée étroite	Medusae
Labes	Labes	Déclivité résultant d'un glissement de terrain dans Valles	Candor Labes

Labvrinthus	Labvrinthus	Canvons entrecroisés	Noctis
Lingula	Lingulae	Bordure de plateau en forme de lobe	Ultima Lingula
Mensa	Mensae	Table. mesa	Cydonia
Mons	Montes	Relief élevé en forme de montagne isolée ou de chaîne	Olympus Mons
Patera	Paterae	Reliefs plus ou moins étalés évoquant une soucoupe renversée.	Alba Patera
Palus	Paludes	Petite plaine	Cerberus Palus
Planitia	Planitiae	Vaste étendue plane de faible altitude. grand bassin d'impact	Utonia Planitia
Planum	Plani	Vaste étendue plane d'altitude élevée. haut plateau	Lunae Planum
Runes	Runi	Escarpement droit. falaise plane	Utonia Runes
Scolulus	Scoluli	Escarpement irrégulier. falaise lobée	Eridania
Sulcus	Sulci ⁴	Rides et sillons d'un terrain plissé	Lycus Sulci
Terra	Terrae	Terrains anciens très cratérisés d'altitude moyenne à élevée	Noachis Terra
Tholus	Tholi	Dôme. coupole	Biblis Tholus
Unda	Undae ⁴	Ondulations	Olympia Undae
Vallis	Valles	Vallée. au sens très large	Ares Vallis
Vastitas	Vastitas	Forme extrême de planitia. particulière vaste et sans relief	Vastitas

Les mesures fines réalisées dans le tournant des années 2000 par l'altimètre laser de Mars Global Surveyor (le MOLA, pour *Mars Orbiter Laser Altimeter*) ont permis de mettre en place un système de coordonnées dit *planétocentrique* dans lequel les latitudes sont déterminées par l'angle formé par la droite reliant un point de la surface martienne au centre du globe martien avec le plan équatorial de Mars. Les latitudes exprimées dans ces deux systèmes, se confondent exactement aux pôles et à l'équateur, mais peuvent être plus élevées d'un tiers de degré dans le système planétographique par rapport au système planétocentrique aux alentours de 30 à 60° de latitude nord ou sud.

Longitudes

Si l'équateur, défini par la rotation de Mars, permet de localiser les latitudes sans ambiguïté, la définition du premier méridien est en revanche arbitraire. Les astronomes allemands Wilhelm Beer et Johann Heinrich Mädler choisirent une petite zone circulaire, ultérieurement nommée Sinus Meridiani, comme point de référence pour la première carte systématique de Mars en 1830-32. En 1877, ce choix fut adopté comme premier méridien par l'astronome italien Giovanni Schiaparelli lorsqu'il commença son travail de cartographie martienne. En 1972, après la transmission par Mariner 9 d'un nombre important d'images de Mars, un petit cratère (appelé par la suite Airy-0) situé dans Sinus Meridiani sur la ligne tracée par Beer et Mädler, fut choisi par Merton Davies de la RAND Corporation afin de fournir une définition plus exacte de la longitude 0°. À la différence de la Terre, les longitudes du système planétographique comme du système planétocentrique sont toujours exprimées sur Mars dans le système décimal (et non dans le système sexagésimal). De plus, elles sont exprimées de 0 à 360° W dans le système planétographique et de 0 à 360° E dans le système planétocentrique, c'est-à-dire respectivement avec les longitudes croissant vers l'ouest et avec les longitudes croissant vers l'est. Depuis le début du siècle, le système planétocentrique prend le pas sur le système planétographique, aussi bien à la NASA qu'à l'ESA, bien que les deux soient encore agréés par l'UAI.

Nomenclature

Johann Heinrich Mädler et Wilhelm Beer furent les premiers « aréographes ». Ils réalisèrent à partir de 1830 une observation systématique des caractéristiques de la surface martienne après avoir établi que ces caractéristiques étaient pour la plupart permanentes et après avoir déterminé la période de rotation de la planète. En 1840, Mädler compila dix ans d'observation et traça la première carte globale de Mars. Plutôt que de donner des noms aux différentes zones, Beer et Mädler les désignèrent simplement par des lettres; Sinus Meridiani y était par exemple référencé par « a ». Au cours de la vingtaine d'années suivante, les instruments astronomiques s'améliorant, davantage de détails de la surface de Mars pu être observé, rendant caduc l'utilisation de lettres. Vue de la Terre, la surface de Mars se divise en deux zones possédant des albédos différents. Les plaines claires du Nord, couvertes de poussière et de sable riche en oxydes de fer rouges, furent initialement assimilées à des continents et portent des noms comme Arabia Terra ou

Amazonis Planitia. Les hauts plateaux sombres du Sud furent à l'inverse considérés comme des mers (Mare Erythraeum, Mare Sirenum ou Aurorae Sinus).



Carte de Mars par Giovanni Schiaparelli (vers 1888)

Nomenclature moderne

Actuellement, les noms de caractéristiques martiennes proviennent d'un certain nombre de sources. Les larges zones à albédo plus ou moins constant ont conservé leurs noms anciens, lequel est parfois mis à jour pour refléter les nouvelles connaissances à leur sujet. Par exemple, *Nix Olympica* (« les neiges de l'Olympe » en latin) est devenu Olympus Mons. Les grands cratères portent le nom de scientifiques et d'écrivains de science-fiction; les petits cratères, ceux de villes et villages terrestres.

Le groupe de travail pour la nomenclature planétaire de l'Union astronomique internationale est responsable des dénominations martiennes.

Atlas de Mars. Les quadrangles

La surface de la planète Mars a été divisée par l'USGS en trente **quadrangles**, ainsi nommés car ils sont délimités en fonction des latitudes et longitudes martiennes, ce qui leur confère une géométrie quadrangulaire. Chaque hémisphère martien compte :

- huit quadrangles couvrant chacun 45° en longitude entre 0 et 30° en latitude
- six quadrangles couvrant chacun 60° en longitude entre 30° et 65° en latitude
- un quadrangle couvrant les latitudes supérieures à 65°

Les quadrangles de Mars sont nommés à partir des formations géologiques remarquables qu'ils recouvrent et sont préfixés par les lettres MC (de l'anglais « *Mars Chart* »). Dans le tableau ci-dessous, les longitudes sont exprimées d'abord croissant vers l'est (système en vigueur à la NASA depuis 2002 et adopté par l'ESA) puis croissant vers l'ouest (ancien système de coordonnées développé pour le programme Viking et encore mentionné sur certaines cartes, même récentes).

Quadrangle	Numéro	Latitudes	Longitudes	
Mare Boreum	MC-01	65° à 90° N	0° à 360°	
Diacria	MC-02	30° à 65° N	180° à 240° E	120° à 180° W
Arcadia	MC-03	30° à 65° N	240° à 300° E	60° à 120° W
Mare Acidalium	MC-04	30° à 65° N	300° à 360° E	0° à 60° W
Ismenius Lacus	MC-05	30° à 65° N	0° à 60° E	300° à 360° W
Casius	MC-06	30° à 65° N	60° à 120° E	240° à 300° W
Cebrenia	MC-07	30° à 65° N	120° à 180° E	180° à 240° W
Amazonis	MC-08	0° à 30° N	180° à 225° E	135° à 180° W
Tharsis	MC-09	0° à 30° N	225° à 270° E	90° à 135° W
Lunae Palus	MC-10	0° à 30° N	270° à 315° E	45° à 90° W
Oxia Palus	MC-11	0° à 30° N	315° à 360° E	0° à 45° W
Arabia	MC-12	0° à 30° N	0° à 45° E	315° à 360° W

Syrtris Major	MC-13	0° à 30° N	45° à 90° E	270° à 315° W
Amenthes	MC-14	0° à 30° N	90° à 135° E	225° à 270° W
Elysium	MC-15	0° à 30° N	135° à 180° E	180° à 225° W
Memnonia	MC-16	-30° à 0° S	180° à 225° E	135° à 180° W
Phoenicis Lacus	MC-17	-30° à 0° S	225° à 270° E	90° à 135° W
Coprates	MC-18	-30° à 0° S	270° à 315° E	45° à 90° W
Margaritifer Sinus	MC-19	-30° à 0° S	315° à 360° E	0° à 45° W
Sinus Sabaeus	MC-20	-30° à 0° S	0° à 45° E	315° à 360° W
Iapygia	MC-21	-30° à 0° S	45° à 90° E	270° à 315° W
Mare Tyrrhenum	MC-22	-30° à 0° S	90° à 135° E	225° à 270° W
Aeolis	MC-23	-30° à 0° S	135° à 180° E	180° à 225° W
Phaethontis	MC-24	-65° à -30° S	180° à 240° E	120° à 180° W
Thaumasias	MC-25	-65° à -30° S	240° à 300° E	60° à 120° W
Argyre	MC-26	-65° à -30° S	300° à 360° E	0° à 60° W
Noachis	MC-27	-65° à -30° S	0° à 60° E	300° à 360° W
Hellas	MC-28	-65° à -30° S	60° à 120° E	240° à 300° W
Eridania	MC-29	-65° à -30° S	120° à 180° E	180° à 240° W
Mare Australe	MC-30	-90° à -65° S	0° à 360°	

La carte en page 14 permet de repérer les grandes régions martiennes, notamment :

- la dichotomie crustale entre hémisphères nord et sud,
- les grands bassins d'impact de l'hémisphère sud, Argyre par 50° S et 316° E, et Hellas par 42,7° S et 70° E, et au nord Utopia Planitia par 49,7° N et 118° E,
- le renflement de Tharsis et les trois volcans de Tharsis Montes ainsi qu'Olympus Mons et Alba Mons, dans l'hémisphère nord à gauche, et à droite les volcans d'Elysium, près d'Utopia,
- le système de canyons de Valles Marineris, partant de la région de Tharsis jusqu'au petit bassin d'impact de Chryse Planitia, centré autour de 15° S et 300° E.

Le trait le plus frappant de la géographie martienne est sa « dichotomie crustale », c'est-à-dire l'opposition très nette entre d'une part un hémisphère nord constitué d'une vaste plaine lisse à une altitude d'une demi-douzaine de kilomètres sous le niveau de référence, et d'autre part un hémisphère sud formé de plateaux souvent élevés et très cratérisés au relief pouvant être localement assez accidenté. Ces deux domaines géographiques sont séparés par une limite très nette, légèrement oblique sur l'équateur. Deux régions volcaniques proches l'une de l'autre se trouvent précisément sur cette frontière géologique, dont l'une est un immense soulèvement de 5 500 km de diamètre, le renflement de Tharsis, dont la moitié nord-ouest regroupe une douzaine de volcans majeurs parmi lesquels Olympus Mons, tandis que la région méridionale se compose d'un vaste ensemble de hauts plateaux volcaniques tels que Syria Planum et Solis Planum, et la partie orientale est marquée par le système de canyons de Valles Marineris prolongeant par l'est le réseau de Noctis Labyrinthus. Deux grands bassins d'impact sont nettement visibles dans l'hémisphère sud, Argyre Planitia et surtout Hellas Planitia, au fond duquel a été relevée la plus grande profondeur à la surface de Mars, avec une altitude de -8 200 m par rapport au niveau de référence. Le point le plus élevé se trouve quant à lui au sommet d'Olympus Mons, à 21 229 m au-dessus du niveau de référence; les cinq montagnes les plus hautes du Système solaire sont d'ailleurs cinq volcans martiens, dont quatre se trouvent sur le renflement de Tharsis et le cinquième dans la seconde région volcanique de Mars, Elysium Planitia.

Origine de la dichotomie martienne

Deux types de scénarios ont été proposés pour rendre compte de cette situation. Les premiers reposent sur la dynamique interne de la planète, les mouvements de convection du manteau et une ébauche de tectonique des plaques, à la manière de la formation des supercontinents terrestres à l'aube de l'histoire de notre planète. Les seconds reposent sur un ou plusieurs grands impacts entraînant la fusion de l'écorce dans l'hémisphère nord. L'étude des bassins d'impact enfouis sous la surface a par ailleurs permis d'établir que la dichotomie crustale martienne remonte à plus de quatre milliards d'années avant le présent, et est donc une structure

héritée des premiers âges de la planète. Certaines formations plus récentes à la limite entre les deux domaines suggèrent de surcroît une relaxation isostatique des hautes terres du sud après le comblement volcanique de la dépression de l'hémisphère nord, ce qui plaide également pour la grande ancienneté de cette dichotomie.



Coucher de soleil vu du cratère Gusev par le rover Spirit le 19 mai 2005 en vraies couleurs restituées à travers des filtres à 750, 530 et 430 nm. Le diamètre apparent du Soleil vu de Mars n'est que des deux tiers de celui vu de la Terre. La lueur de crépuscule se prolonge deux bonnes heures après que le soleil a disparu derrière l'horizon en raison de la grande quantité de poussières présentes jusqu'à une altitude élevée dans l'atmosphère de Mars. © NASA

III Atmosphère, climats et radiations

A) Atmosphère de Mars

L'**atmosphère de Mars** est la couche de gaz entourant la planète Mars. La pression au sol de l'atmosphère martienne varie entre 30 Pa (0,03 kPa) au sommet d'Olympus Mons et 1 155 Pa (1,155 kPa) dans les profondeurs de Hellas Planitia. La pression moyenne est 600 Pa (0,6 kPa, soit 6 millibars, environ 170 fois moins que sur Terre) et sa masse totale est estimée à 25 tératonnes. L'atmosphère de Mars est en majorité composée de dioxyde de carbone (95 %), de diazote (3 %) et d'argon (1,6 %), et contient des traces de dioxygène, d'eau, et de méthane. Elle est poussiéreuse pendant les tempêtes, conférant au ciel une couleur rouille lorsqu'elle est observée depuis la surface, et bleue lors des périodes d'accalmie. Les données de *Mariner 9*, *Mars Exploration Rovers* et d'autres sondes indiquent qu'il s'agit de particules d'argile dont la taille médiane est comprise entre 1,5 et 3 micromètres suivant les auteurs. Depuis la détection du méthane, qui pourrait indiquer la présence de vie sur Mars, l'intérêt de l'étude de la planète et de son atmosphère s'est accru. Toutefois ce méthane pourrait résulter d'un processus géochimique ou volcanique.

Origine

L'hypothèse de la nébuleuse solaire est celle généralement acceptée par la communauté scientifique. Cette nébuleuse était notamment composée de gaz et de poussières. Parmi ces gaz se trouvaient l'hydrogène et l'hélium qui, du fait de leur légèreté ont été entraînés par le vent solaire hors de la région centrale du système solaire (où Mars s'est formée). Toutefois, les gaz rares tels que le néon, le krypton, et le xénon, plus lourds, ont pu rester dans cette région de la nébuleuse solaire. Les planètes, quant à elles, se sont formées par accréation et condensation des gaz et des poussières sous l'influence de la gravitation. Après la formation de la planète, la température régnant à la surface a entraîné la libération dans l'atmosphère des gaz présents dans les minéraux et les poussières. Cette période de dégazage a probablement libéré, sur Mars, du CO₂, de la vapeur d'eau (qui s'est ensuite décomposée en oxygène qui a oxydé les roches, et en hydrogène qui s'est échappé du fait de sa légèreté), du monoxyde de carbone et de l'azote. Mais les impacts de météorites ont aussi joué un rôle dans la formation de l'atmosphère car ces corps ont libéré des gaz, lors de leur collision avec la surface, qui ont enrichi l'atmosphère de la planète. Toutefois, ils ne semblent pas constituer l'origine principale des gaz atmosphériques martiens.

Évolution

Les récentes découvertes faites à partir des observations du spectro-imageur OMEGA de la sonde Mars Express ont permis de proposer une échelle des temps géologiques alternative, fondée sur les périodes de formation des roches hydratées observées à la surface de Mars :

- Le Phyllosien (du nom des phyllosilicates hydratés observés sur les terrains les plus anciens) : cette première ère martienne serait apparue peu de temps après la formation de la planète, il y a 4,5 milliards d'années. Pendant 300 millions d'années, le climat sur Mars aurait été suffisamment chaud et humide et la pression atmosphérique suffisamment forte pour qu'il y ait de l'eau liquide.
- Le Theiikien (du nom grec « *theiikos* » signifiant sulfurique) : cette deuxième ère aurait eu lieu entre 4,2 et 3,8 milliards d'années. Au cours de cette période, un enchaînement d'événements aurait profondément modifié le climat martien, le rendant sec et acide, favorable à la formation des sulfates. En premier lieu, la dynamo martienne aurait cessé de fonctionner, privant la planète de son bouclier magnétique. Dès lors, les vents solaires auraient progressivement arraché à Mars son atmosphère. Puis d'importantes éruptions volcaniques à l'origine de la formation du dôme de Tharsis et du remplissage des plaines du nord auraient éjecté de grandes quantités de soufre dans l'atmosphère.
- Le Siderikien (du nom grec « *siderikos* » signifiant ferrique) : cette troisième et dernière ère martienne aurait débuté il y a 3,8 ou 3,5 milliards d'années et se poursuivrait encore aujourd'hui. Durant cette période, l'atmosphère martienne, devenue très ténue et pauvre en vapeur d'eau, aurait lentement oxydé un sol martien riche en fer, donnant à la planète sa couleur rouge.

Atmosphère de Mars



Atmosphère de Mars visible à l'horizon

Informations générales

Pression atmosphérique	6,36 mbar
------------------------	-----------

Masse	25 Tt
-------	-------

Composition volumétrique

Dioxyde de carbone (CO ₂)	95,32 %
---------------------------------------	---------

Diazote (N ₂)	2,7 %
---------------------------	-------

Argon (Ar)	1,6 %
------------	-------

Dioxygène (O ₂)	0,13 %
-----------------------------	--------

Monoxyde de carbone (CO)	0,07 %
--------------------------	--------

Vapeur d'eau (H ₂ O)	0,03 %
---------------------------------	--------

Monoxyde d'azote (NO)	0,013 %
-----------------------	---------

Néon (Ne)	2,5 ppm
-----------	---------

Krypton (Kr)	300 ppb
--------------	---------

Méthanal (CH ₂ O)	130 ppb
------------------------------	---------

Xénon (Xe)	80 ppb
------------	--------

Ozone	30 ppb
-------	--------

Méthane	10,5 ppb
---------	----------

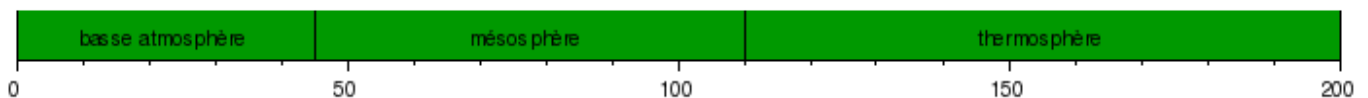
L'atmosphère martienne il y a 3,6 milliards d'années

Selon les résultats d'une étude publiée dans la revue *Nature Geoscience*, « la pression atmosphérique d'il y a 3,6 milliards d'années devait se situer autour de 0,9 bar », « 150 fois plus que la valeur actuellement observée ». Cette valeur a été obtenue grâce à l'analyse des images fournies par le Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) sur lesquelles apparaissent « plus de 300 cratères d'impact imprimés à la surface de Mars dans une région s'étalant sur 84.000 kilomètres carrés et située près de l'équateur ». En effet, « plus l'atmosphère d'une planète est dense, moins les météorites ont de chance d'arriver à percuter sa surface en restant intactes », ce qui signifie que, pour une atmosphère donnée, il « correspond une "taille minimale" de météorite capable d'y creuser un cratère ». Dans cette zone, 10 % des cratères ont un diamètre inférieur ou égal à 50 mètres. Un logiciel simulant l'arrivée de météorites sur Mars et prenant en compte des atmosphères de différentes densités a alors été utilisé. Bien que la pression atmosphérique estimée soit comparable à celle actuellement présente à la surface de la Terre, il semble que ce fût néanmoins « insuffisant pour permettre de conserver de l'eau liquide à la surface de Mars » et que l'atmosphère de Mars il y a 3,6 milliards d'années n'aurait jamais été assez dense pour permettre de façon durable des températures assez élevées pour l'émergence de la vie : les estimations indiquent en effet qu'il aurait fallu une atmosphère trois fois plus importante pour maintenir durablement la surface de Mars au-dessus du point de congélation. On peut donc en « exclure un effet de serre chaud et humide, et les températures moyennes à long terme étaient très probablement inférieures au point de congélation ». Il en résulte que les coulées d'eau à la surface de Mars n'auraient été qu'épisodiques, résultat éventuel de « la variation d'inclinaison des pôles de la planète rouge ou d'éruptions volcaniques », ou encore « d'une collision entre des astéroïdes, générant une chaleur intense », ces deux derniers scénarios ayant pu épaissir l'atmosphère pendant plusieurs dizaines voire centaines d'années.

B) Structure

L'atmosphère de Mars se subdivise en quatre couches majeures :

- La basse atmosphère, ou troposphère : c'est une région chaude affectée par la chaleur de la poussière flottant dans l'air et le sol.
- La couche atmosphérique intermédiaire, ou mésosphère : Mars a un courant-jet qui parcourt cette région.
- La haute atmosphère, ou thermosphère : la température est, dans cette région, élevée à cause de la chaleur solaire. Ici, les gaz atmosphériques commencent à se séparer les uns des autres plutôt que de former le mélange que l'on trouve dans les couches atmosphériques inférieures.
- L'exosphère : commençant vers 200 kilomètres d'altitude, cette région est celle où l'atmosphère s'évanouit peu à peu dans l'espace. Il n'y a aucune frontière nette entre l'atmosphère et l'espace, elle disparaît peu à peu.



Troposphère

La troposphère martienne s'étend jusqu'à environ 45 km d'altitude. Elle se caractérise, tout comme la troposphère terrestre, par une baisse progressive de sa température en fonction de l'altitude. Dans cette couche atmosphérique, les échanges de chaleur se font principalement avec le sol et notamment avec la poussière en suspension. De même, en cas de tempêtes de poussière la température de l'atmosphère peut augmenter fortement, ce qui réduit la part des échanges thermiques avec la surface dans le contrôle de la température mais réduit aussi l'importance des variations de température durant la journée. La diminution de la température est due, quant à elle, au phénomène de détente adiabatique. Toutefois le rayonnement infrarouge émis par la surface et les particules en suspension qui absorbent une partie de la chaleur reçue du Soleil limite la baisse de température causée par ce phénomène.

Mésosphère

La mésosphère martienne s'étend de 45 km à 110 km d'altitude. Un courant-jet parcourt cette région où les températures sont, par ailleurs, relativement constantes. En effet, le rayonnement ultraviolet ne peut être absorbé car il n'y a pas sur Mars une couche d'ozone comme sur Terre.

Thermosphère et ionosphère

La thermosphère est la partie de l'atmosphère martienne qui s'étend de la mésopause, à 110 km jusqu'à la thermopause, située vers 200 km d'altitude. La température régnant dans cette région atmosphérique augmente à nouveau en fonction de l'altitude en raison de l'absorption des rayons ultraviolets par les composants atmosphériques. Dans cette couche atmosphérique, le rayonnement solaire ionise les gaz, formant ainsi l'ionosphère. Cette ionisation est due d'une part à la baisse de densité de l'atmosphère martienne vers 120 km d'altitude, et d'autre part à l'absence de champ magnétique qui permet la pénétration du vent solaire dans l'atmosphère. Cette couche s'étend de 100 km à près de 800 km d'altitude.

C) Composition

Dioxyde de carbone

Le composant principal de l'atmosphère martien est le dioxyde de carbone (CO₂). Durant l'hiver martien les pôles sont perpétuellement dans l'obscurité et la surface devient si froide que près de 25 % du CO₂ atmosphérique se condense aux calottes polaires en glace de CO₂ solide (glace sèche). Quand les pôles sont à nouveau exposés à la lumière solaire, l'été martien, la glace de CO₂ se sublime dans l'atmosphère. Ce processus conduit à des variations significatives de la pression et de la composition atmosphérique durant l'année martienne au niveau des pôles.

Argon

L'atmosphère de Mars est aussi enrichie en argon, un gaz rare, en comparaison des autres atmosphères des planètes du Système solaire. Contrairement au dioxyde de carbone, l'argon ne se condense pas dans l'atmosphère martienne, ainsi la quantité d'argon dans l'atmosphère martienne est constante. Toutefois, la concentration relative dans un lieu donné peut changer à cause des variations de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Des données relevées par satellites ont récemment montré une augmentation de la quantité d'argon atmosphérique au-dessus du pôle sud de Mars en automne, qui se dissipe lors du printemps suivant.

Eau

Puisque le dioxyde de carbone se sublime dans l'atmosphère durant l'été martien, il laisse des traces d'eau. Les vents saisonniers soufflent aux pôles à une vitesse approchant les 400 km/h et transportent de grandes quantités de poussière et de vapeur d'eau donnant naissance à des cirrus. Ces nuages d'eau glacée ont été photographiés par le rover *Opportunity* en 2004. Les scientifiques de la NASA travaillant sur la mission Phoenix Mars confirmèrent le 31 juillet 2008 qu'ils avaient trouvé de la glace d'eau sous la surface du pôle nord de Mars.

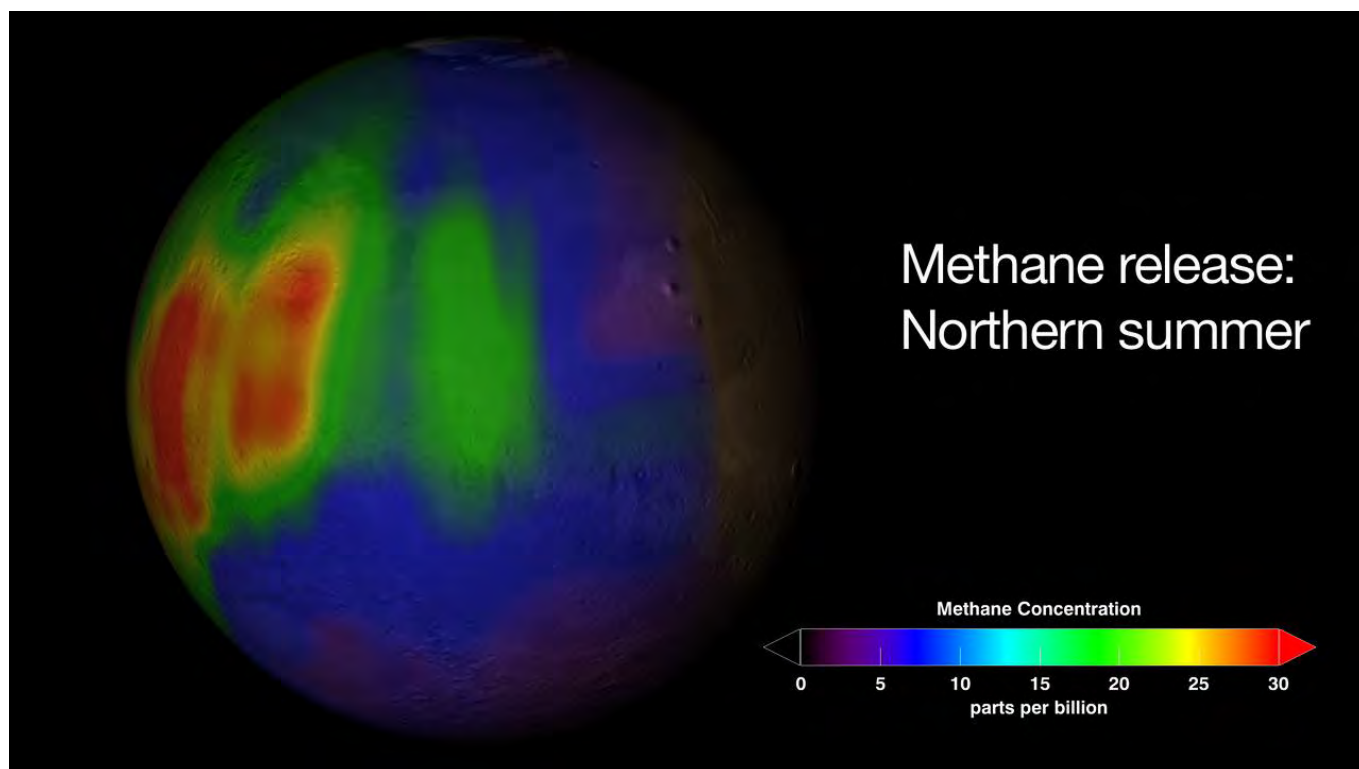
Méthanal

En février 2005, du méthanal a été découvert par la sonde Mars Express, en quantité beaucoup plus importante que prévu, ce qui a soutenu la théorie de la vie microbienne. Les résultats de ces mesures sont encore l'objet de nombreux débats scientifiques sans conclusion définitive. Une partie des scientifiques soutient que les mesures ont été interprétées de façon erronée.

Présence de méthane

Des traces de méthane, en parties par milliard, ont été découvertes dans l'atmosphère de Mars par une équipe au Goddard Space Flight Center de la NASA en 2003. En mars 2004 la sonde Mars Express et des observations du Canada-France-Hawaii Telescope suggérèrent aussi la présence de méthane dans l'atmosphère avec une concentration de 10 ppb. La présence de méthane sur Mars est intrigante, puisqu'en tant que gaz instable il indique la présence d'une source sur la planète. On estime que Mars doit produire 270 tonnes de méthane par an, mais les impacts d'astéroïdes ne représentent que 0,8 % de la production totale de méthane. Bien que l'existence de sources géologiques de méthane soit envisageable, l'absence de volcanisme, ou de points chauds, n'est pas favorable à l'émission d'un méthane d'origine géologique.

L'existence de vie micro-organique telle que les micro-organismes méthanogènes serait une possibilité, mais cette source n'est pas encore prouvée. Le méthane semble arriver par saccades, ce qui suggère qu'il est rapidement détruit avant qu'il ne soit uniformément réparti dans l'atmosphère. Il semble donc aussi continuellement relâché dans l'atmosphère.



Distribution du méthane dans l'atmosphère de Mars en été et dans l'hémisphère nord

Des traces de méthane, en parties par milliard, ont été découvertes dans l'atmosphère de Mars par une équipe au Goddard Space Flight Center de la NASA en 2003. En mars 2004 la sonde Mars Express et des observations du Canada-France-Hawaii Telescope suggérèrent aussi la présence de méthane dans l'atmosphère avec une concentration de 10 ppb. La présence de méthane sur Mars est intrigante, puisqu'en tant que gaz instable il indique la présence d'une source sur la planète. On estime que Mars doit produire 270 tonnes de méthane par an, mais les impacts d'astéroïdes ne représentent que 0,8 % de la production totale de méthane. Bien que l'existence de sources géologiques de méthane soit envisageable, l'absence de volcanisme, ou de points chauds, n'est pas favorable à l'émission d'un méthane d'origine géologique. L'existence de vie micro-organique telle que les micro-organismes méthanogènes serait une possibilité, mais cette source n'est pas encore prouvée. Le méthane semble arriver par saccades, ce qui suggère qu'il est rapidement détruit avant qu'il ne soit uniformément réparti dans l'atmosphère. Il semble donc aussi continuellement relâché dans l'atmosphère. Des projets sont en préparation pour rechercher un « gaz compagnon » afin d'identifier la source la plus probable de méthane; dans les océans terrestres, la production de méthane d'origine biologique tend à être accompagnée d'éthane, tandis que le méthane d'origine volcanique est accompagné de dioxyde de soufre. On a montré récemment que le méthane pouvait être produit par un processus non biologique impliquant l'eau, le dioxyde de carbone, et l'olivine, qui est commune sur Mars. Les conditions requises pour cette réaction (c'est-à-dire des températures et pressions élevées) n'existent pas actuellement à la surface de la planète, mais pourraient exister au sein de la croûte. Pour prouver l'existence de ce processus, de la serpentine, un minéral résultant lui aussi du processus, devait être détectée. Cette détection a été effectuée en 2009 par le spectromètre CRISM de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. L'Agence spatiale européenne (ASE) remarqua que la concentration de méthane coïncidait avec la présence de vapeur d'eau. Dans la haute atmosphère ces deux gaz sont distribués uniformément, mais, près de la surface, ils se concentrent en trois régions équatoriales, c'est-à-dire Arabia Terra, Elysium Planitia, et Arcadia Memnonia. Afin d'exclure la nature biologique du méthane, une sonde future devra posséder un spectromètre de masse, puisque les isotopes carbone 12 et carbone 14 peuvent distinguer l'origine biologique ou non biologique du méthane. En 2012, le Mars Science Laboratory

mesurera ces isotopes dans le CO₂ et le méthane. Si une vie martienne microscopique produit du méthane, elle serait susceptible de se trouver profondément sous terre, où il fait encore suffisamment chaud pour que de l'eau liquide existe.

Ammoniac

L'ammoniac dans l'atmosphère martienne est hautement instable et ne dure que quelques heures. En dépit de cette durée de vie minime, ce composé a été détecté sur Mars. La découverte de l'ammoniac est un argument utilisé par les tenants de la théorie de la présence actuelle de vie sur Mars. Cependant, les résultats des mesures spectrométriques ont été mis en cause par la communauté scientifique qui souligne que le spectromètre utilisé n'a pas une sensibilité suffisante pour distinguer l'ammoniac du dioxyde de carbone. Pour des résultats définitifs, il faudra reconduire une mission de mesure.

D) Conditions atmosphériques et climatiques

Historique des observations

Giancomo Miraldi découvrit en 1704 que la calotte polaire sud n'était pas centrée sur l'axe de rotation de Mars. Durant l'opposition de 1719, Miraldi observa deux calottes polaires et une variation dans le temps de leurs étendues respectives.

William Herschel a été le premier à déduire la faible densité de l'atmosphère martienne dans sa publication de 1784. Quand Mars passa devant deux étoiles de faible intensité, Herschel constata que leurs brillances n'étaient pas affectées par l'atmosphère de la planète. Il conclut alors qu'il y avait trop peu d'atmosphère autour de Mars pour interférer avec leur lumière. Honoré Flaugergues découvrit en 1809 des « nuages jaunes » sur la surface de Mars. C'est la première observation connue des tempêtes de poussières martiennes.

Paléoclimatologie martienne

Avant d'aborder un examen sérieux de la paléoclimatologie martienne, certains termes doivent être définis, spécialement les termes étrangers. Il y a deux échelles de temps pour Mars. La première, fondée sur la densité des cratères, compte trois ères, le Noachien, le Hespérien, et l'Amazonien. La seconde, fondée sur les minéraux, comprend également trois ères, le Phyllosien, le Theiikien, et le Sidérilien. Des observations et des modèles fournissent des informations non seulement à propos des conditions atmosphériques et climatiques actuelles mais aussi sur le climat passé. L'atmosphère de l'ère noachienne a souvent été considérée comme riche en carbone. Mais des observations récentes ont montré, grâce aux dépôts argileux, qu'il y avait peu de formations carbonatées dans les argiles datant de cette époque. La découverte de goéthite par Spirit a mené à la conclusion que les conditions climatiques dans le passé lointain de Mars permettaient l'écoulement de l'eau sur sa surface. La morphologie de certains cratères d'impact indique que le sol était humide lors de l'impact.

Temps

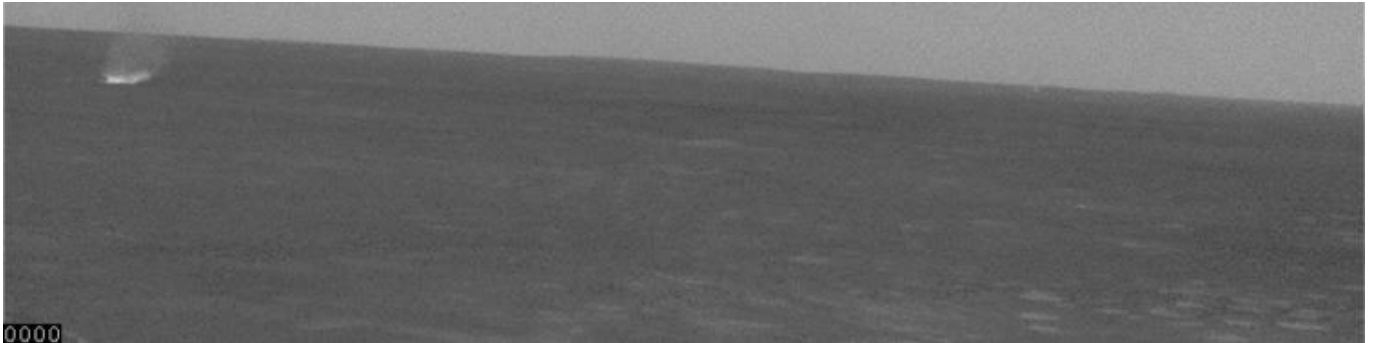
La température et la circulation atmosphérique martiennes varient d'année en année. Mars n'a pas d'océan, une des sources des variations de la température sur Terre. Les données de la caméra de Mars Orbital, commençant en mars 1999 et couvrant une période de 2,5 années martiennes, montrent que le temps martien tend à être plus répétitif, donc plus prévisible, que celui de la Terre. Si un événement se produit à un moment donné durant une année, les données disponibles indiquent qu'il y a de fortes possibilités que cet événement se reproduise l'année suivante au même lieu. Le 29 septembre 2008, la sonde Phoenix lander prit des photos de neige tombant à partir de nuages se trouvant à 4,5 km au-dessus de son point d'atterrissage près du cratère Heimdall. Cette neige se vaporisa avant d'atteindre le sol; ce phénomène s'appelle virga.

Nuages

Les vents soulèvent des particules d'argile de taille inférieure à 100 micromètres. En faibles quantités, ces particules donnent au ciel sa couleur orange ocre. On observe peu fréquemment des tempêtes qui peuvent obscurcir tout ou partie de la planète. Il existe également des nuages d'eau et de dioxyde de carbone dont l'aspect est très proche de celui des cirrus. Certains nuages sont si fins qu'ils ne peuvent être aperçus que lorsqu'ils reflètent la lumière du Soleil dans l'obscurité. En ce sens, ils sont proches des nuages noctulescents de la Terre.

Poussières

La caractéristique particulière de l'atmosphère martienne est d'être constamment chargée en poussières, dont les grains ont un diamètre moyen de l'ordre de $1,5\ \mu\text{m}$ responsable de la teinte ocre du ciel martien. Cette poussière est continuellement injectée dans l'atmosphère par des tourbillons de poussière (couramment désignés par le terme anglais *dust devils*), comme celui observé ci-dessous par le rover Spirit le 12 mars 2005.



Déplacement d'un tourbillon de poussière



Traînées laissées par des tourbillons de poussière vues par l'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter le 24 août 2009 au nord du cratère Antoniadi par $26,7^\circ\text{ N}$ et $62,8^\circ\text{ E}$. La bande blanchâtre qui traverse l'image est une pente givrée sous un banc de brouillard et traversée de traînées noires.

De tels tourbillons sont loin d'être anecdotiques, et tant leur permanence que leur accumulation conduit à empoussiérer des volumes considérables d'atmosphère, comme l'illustre un cliché saisissant (ci-dessus), où l'on voit une multitude de traînées noires laissées par des tourbillons qui ont emporté la couche de poussières superficielle, de couleur rouge orangé caractéristique de l'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 (hématite) amorphe, laissant apparaître les couches plus profondes de sable plus sombre, peut-être en rapport avec la région

volcanique voisine de Syrtis Major Planum. La couche de poussières ainsi soulevée n'est jamais très massive, et l'étude de la grande tempête globale de 2001, au cours de laquelle la poussière avait gagné toutes les couches atmosphériques jusqu'à 60 km d'altitude, a conduit à estimer que si toute la poussière alors soulevée se déposait uniformément entre 58° N et 58° S, elle ne formerait qu'une pellicule de 3 µm d'épaisseur. La dynamique de la poussière dans l'atmosphère martienne est conditionnée par la ténuité de cette atmosphère et par la faible gravité à la surface de la planète. Ainsi, alors que les grains de poussière martiens ont typiquement quelques micromètres de diamètre, on a calculé que des grains de 20 µm peuvent être soulevés par des vents d'à peine 2 m/s et maintenus indéfiniment en suspension par des turbulences de seulement 0,8 m/s. Les grains de poussière en suspension dans l'atmosphère sont responsables de la couleur rouille de cette dernière, qui vire au bleu autour du soleil lors de son coucher, comme l'ont découvert les sondes Viking 1 et Viking 2 et que les sondes suivantes ont bien illustré par la suite :



Ciel martien au crépuscule et à midi vu par Mars Pathfinder en 1999

L'observation de l'activité atmosphérique de Mars à l'aide du télescope spatial Hubble entre 1996 et 1997, alors que la planète exposait son pôle nord au début du printemps, a permis de mettre en évidence le rôle de la sublimation des calottes polaires dans la génération de masses d'air à l'origine de vents qui soulèvent d'importantes quantités de poussières et sont susceptibles de déclencher de véritables tempêtes de poussières à l'échelle de la planète tout entière, comme celle qui a affecté l'ensemble de l'atmosphère martienne en été 2001.

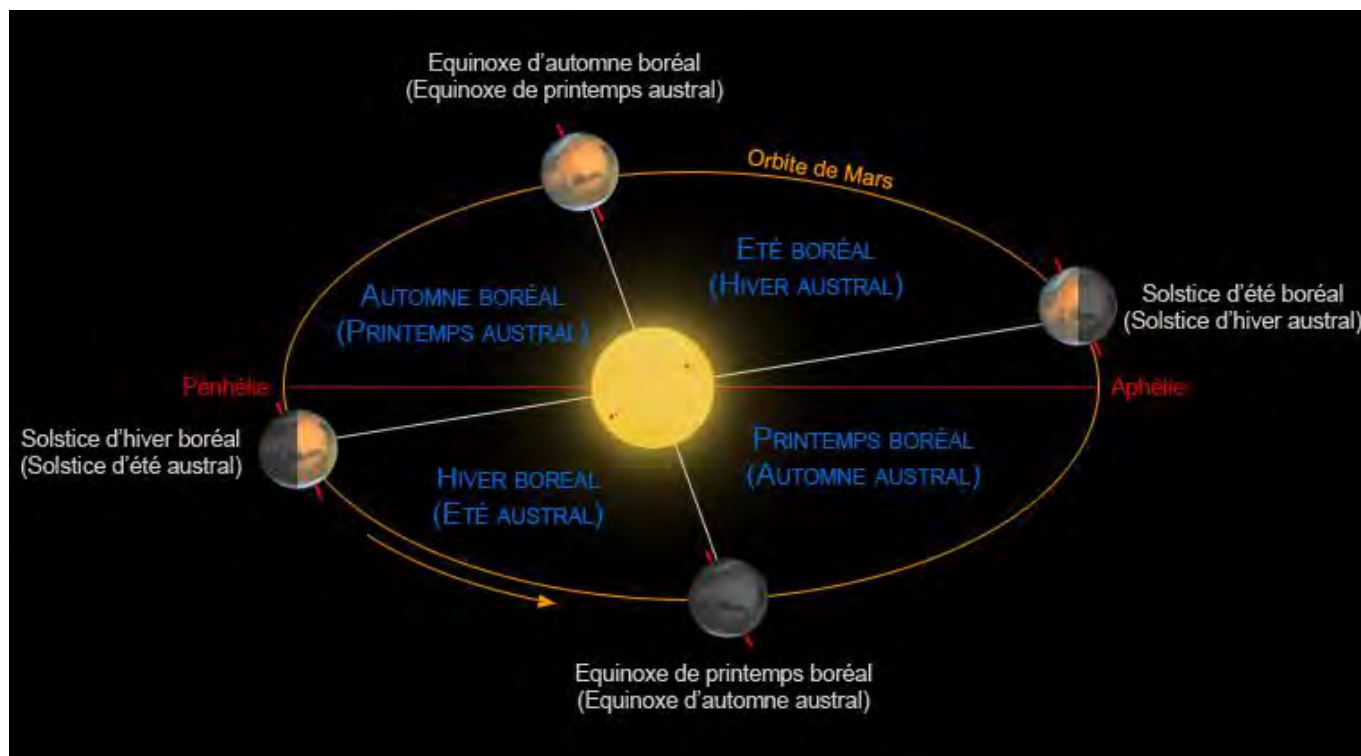
Température

La température moyenne sur Mars est -63 °C (à comparer aux 15 °C sur Terre). Cette température est causée par la faible densité de l'atmosphère qui fait que l'effet de serre induit n'est que de 3 kelvins (33 K pour la Terre). En outre, la distance avec le Soleil étant en moyenne 1,5 fois plus importante, Mars reçoit 57 % d'énergie solaire par unité d'aire en moins que la Terre, soit seulement 12 % de l'énergie solaire totale arrivant sur Terre, leurs diamètres respectifs pris en considération. Toutefois, si la température au sol peut descendre à -143 °C en hiver aux pôles, elle peut atteindre 27 °C en plein été aux basses latitudes. À noter également que la faible inertie de stockage de la chaleur, notamment due à l'absence d'océan et à une atmosphère ténue, induit de fortes variations thermiques entre le jour et la nuit : de -89 °C à -24 °C sur le site de Viking 1 (Chryse Planitia).

Saisons

L'inclinaison de l'axe de Mars est 25,19°, soit très proche des 23,45° de celle de la Terre. Mars connaît donc des saisons opposées dans les hémisphères nord et sud. Avec une excentricité orbitale de 0,0934 (0,0167 pour la Terre), l'orbite de Mars est fortement elliptique et sa distance au Soleil varie entre un maximum, l'aphélie, de 249,228 millions de kilomètres et un minimum, le périhélie, de 206,644 millions

de kilomètres. En outre, le périhélie coïncide avec le solstice d'hiver boréal, et l'aphélie avec le solstice d'été boréal. Ceci a pour effet de provoquer des différences dans la durée et l'intensité des saisons observées aux deux hémisphères. Au périhélie par exemple, le pôle sud est orienté vers le Soleil et reçoit 40 % d'énergie en plus que le pôle nord à l'aphélie.



Cycle des saisons martiennes

Saisons		Jours martiens (sur Mars)	Jours terrestres (sur Terre)
Hémisphère nord	Hémisphère sud		
Printemps	Automne	193,30	92,764
Été	Hiver	178,64	93,647
Automne	Printemps	142,70	89,836
Hiver	Été	153,95	88,997

Les hivers sont relativement « doux » et courts dans l'hémisphère nord, longs et froids dans l'hémisphère sud. De même, les étés sont courts et chauds au sud, longs et frais au nord. Les écarts de températures sont ainsi plus élevés au sud qu'au nord.

Cycle glaciaire

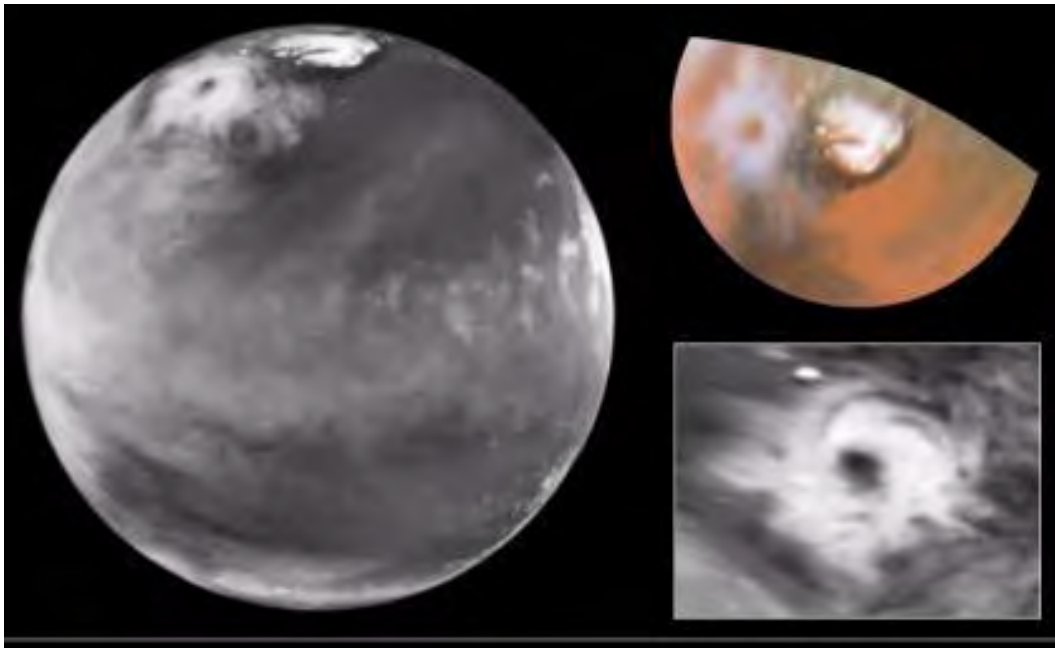
L'obliquité de la planète, qui n'est pas stabilisée par la présence d'un satellite massif comme c'est le cas pour la Terre, suit un régime chaotique selon une périodicité d'environ 120 000 ans. Elle oscille entre 0° et 60° et connaît des phases relativement stabilisées entrecoupées de changements brusques, ce qui bouleverse complètement le climat martien. Des recherches poussées, assistées d'un modèle climatique général relativement simplificateur, montrent l'existence probable de tendances climatiques de long terme : en régime de forte obliquité, la glace s'accumule dans quelques régions équatoriales isolées; en régime de faible obliquité, ces calottes fondent et la glace s'accumule aux hautes latitudes sud et nord, de façon généralisée. On retrouve alors une dynamique pseudo-glaciaire-interglaciaire par analogie à la Terre. En fait, ces phases sont plus marquées sur Mars et pourraient expliquer pourquoi d'immenses étendues du sous-sol martien aux hautes latitudes sont constituées d'un mélange de glace et de régolithe dans des proportions étonnantes. Globalement, ces résultats, bien qu'imprécis et tributaires de postulats forts, sont compatibles avec les données et hypothèses géologiques et chimiques issues des missions spatiales successives.

Vents

La surface de Mars a une faible inertie thermique, ce qui signifie qu'elle chauffe rapidement quand le Soleil l'éclaire. Sur Terre, le vent se crée là où il y a des changements brutaux d'inertie thermique, tel que de la mer vers la terre. Il n'y a pas de mers sur Mars, mais il y a des régions où l'inertie thermique du sol change, créant des vents matinaux et du soir apparentées à la brise marine terrestre. Le projet Antares *Mars Small-Scale Weather* (MSW) a récemment découvert quelques faiblesses dans le modèle climatique actuel dû au paramètre des sols. Ces faiblesses sont en train d'être corrigées et devraient conduire à des évaluations plus précises. À basses latitudes, la circulation de Hadley domine et est presque le même processus qui, sur Terre, génère les alizés. À hautes latitudes, une série de régions de hautes et basses pressions, appelées ondes de pression baroclines, domine le temps. Mars est plus sèche et plus froide que la Terre, en conséquence la poussière soulevée par ces vents tend à rester dans l'atmosphère plus longtemps que sur Terre puisqu'il n'y a pas de précipitations pour la rabattre (sauf la neige de CO₂). Une des différences majeures entre les circulations de Hadley martienne et terrestre est leur vitesse.

Tempêtes cycloniques

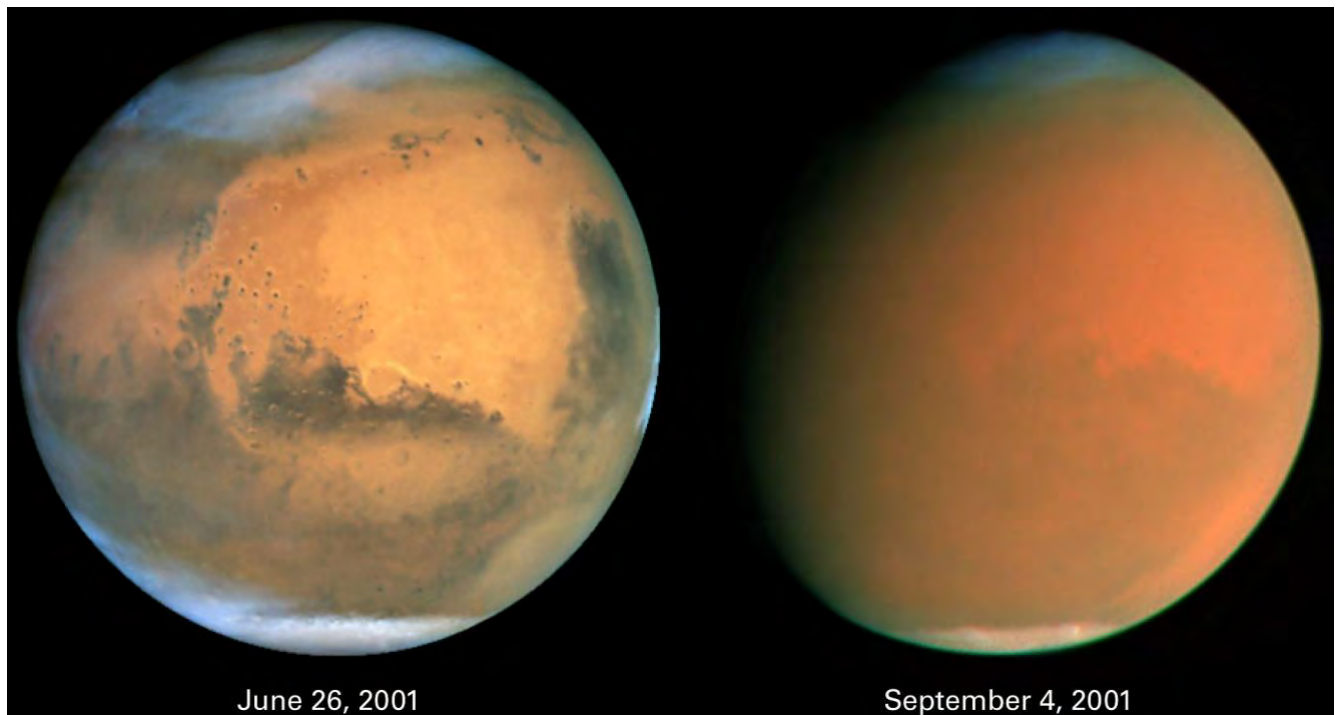
Des tempêtes cycloniques similaires aux cyclones sur Terre ont été détectées pour la première fois par le programme de cartographie de Viking puis par plusieurs sondes et télescopes. Les images les présentent de couleur blanche à la différence des tempêtes de sable. Ces tempêtes tendent à apparaître durant l'été dans l'hémisphère nord et seulement aux hautes latitudes. Les spéculations tendent à montrer que ces tempêtes sont dues aux conditions climatiques uniques existant au pôle nord.



Hubble, Cyclone polaire sur Mars

Pression atmosphérique

La pression atmosphérique sur Mars est de 600 Pa en moyenne (soit 6,3 mbar), ce qui est beaucoup moins que les 101 300 Pa sur Terre. Une des conséquences est que l'atmosphère de Mars réagit plus rapidement à une énergie donnée que l'atmosphère terrestre. Toutefois elle peut varier lorsque la glace des pôles se sublime (notamment le dioxyde de carbone). En outre, la pression atmosphérique est aussi fonction de l'altitude. L'altitude de référence (niveau 0) est conventionnellement établie sur Mars comme celle à laquelle la pression atmosphérique moyenne est de 610 Pa, pression correspondant peu ou prou au point triple de l'eau. La pression monte quand l'altitude baisse et inversement. Bien que les températures sur Mars puissent dépasser 0 °C, l'eau liquide y est instable car, au-dessus du niveau 0 ou, en tout état de cause, à une pression inférieure à 610 Pa, l'eau glacée se sublime en vapeur d'eau. Par contre, sous le niveau 0 (en fait, à une pression supérieure à 610 Pa), comme par exemple dans l'hémisphère nord ou dans le cratère d'impact d'Hellas Planitia, le plus grand et le plus profond cratère de Mars où la pression atmosphérique peut atteindre 1 155 Pa à son point le plus bas, on pourrait trouver de l'eau liquide si la température dépassait 0 °C.



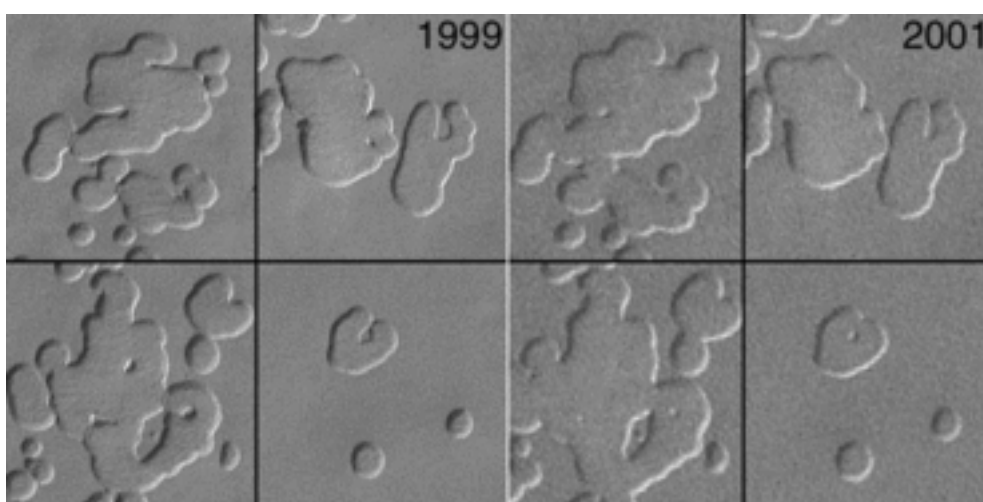
Photomontage de la planète Mars avant (à gauche) et pendant (à droite) la tempête de septembre 2001

Deux visages radicalement différents de la planète rouge apparaissent dans la comparaison de ces images. Quand Hubble a pris des images de Mars le 26 juin 2001, les prémices de la tempête étaient déjà là, dans l'immense bassin Hellas (l'ovale en position à 4 heures sur le disque martien) et dans une autre tempête sur la calotte polaire Nord. Quand Hubble a photographié Mars début septembre, la tempête faisait rage depuis déjà deux mois, obscurcissant tous les détails de la surface de la planète. La fine poussière en suspension bloque une partie significative de la lumière solaire, ainsi empêchée d'atteindre la surface martienne. Ceci provoque un réchauffement de la haute atmosphère. Les tempêtes saisonnières globales de poussière sur Mars ont été observées au télescope depuis des siècles, mais celle-ci est la plus importante observée depuis plusieurs dizaines d'années. Hormis le courant-jet qui parcourt la mésosphère martienne, il est à noter qu'il n'existe qu'une seule cellule de Hadley sur Mars mais beaucoup plus marquée en altitude et en amplitude, joignant les deux hémisphères et qui s'inverse deux fois par an. De même, vers la fin du printemps austral, quand Mars est au plus près du Soleil, des tempêtes locales et parfois régionales apparaissent. Exceptionnellement, ces tempêtes peuvent devenir planétaires et durer plusieurs mois comme ce fut le cas en 1971 et, dans une moindre mesure, en 2001. De minuscules grains de poussière sont alors soulevés, rendant la surface de Mars quasiment invisible. Ces tempêtes de poussière naissent en général au-dessus du Bassin d'Hellas. Les importantes différences thermiques observées entre le pôle et les régions avoisinantes provoquent des vents violents à l'origine du soulèvement de fines particules dans l'atmosphère. Lors de tempêtes globales, ce phénomène provoque d'importantes modifications climatiques : les poussières en suspension absorbent le rayonnement solaire, réchauffant ainsi l'atmosphère et réduisant dans le même temps l'insolation au sol. Ainsi, lors de la tempête de 2001, la température atmosphérique s'est élevée de 30 °C alors que la température au sol s'est abaissée de 10 °C.

Changement climatique

Des changements se sont produits autour du pôle sud de Mars (Planum Australe) ces dernières années. En 1999, le Mars Global Surveyor photographia des fosses dans les couches de dioxyde de carbone gelé du pôle sud martien. À cause de leur forme saisissante et de leur orientation, ces fosses sont connues comme des éléments appelés *swiss cheese features*. En 2001, le vaisseau photographia à nouveau ces fosses et remarqua qu'elles s'étaient agrandies, se retirant de 3 mètres en une année martienne. Ces caractéristiques géologiques sont causées par l'évaporation de la glace sèche exposant la couche de glace d'eau inerte. Des observations récentes indiquent que le pôle sud martien continue de se sublimer. Ces fosses continuent de s'agrandir au même rythme de 3 mètres par année martienne.

Un article de la NASA indique que ces fosses suggèrent un "changement climatique en cours" sur Mars. Ailleurs sur la planète, les régions de basses altitudes contiennent plus de glace d'eau. Ces données, interprétées par les scientifiques comme le signe que Mars pourrait connaître actuellement une transition entre une période glaciaire et une période interglaciaire similaire à celle qu'a connue la Terre il y a près de 12 000 ans, ont parfois été comprises par le grand public comme révélatrices d'un « réchauffement climatique martien », d'origine nécessairement non-humaine, et contredisant, par conséquent, les conclusions du Quatrième rapport du GIEC relatives à l'origine humaine du réchauffement climatique terrestre. Les débats sur la question ont été particulièrement aigus en automne 2007, dans la foulée de la publication de ce rapport. Avec le recul, il apparaît cependant que les observations martiennes n'ont jamais indiqué autre chose qu'un réchauffement climatique localisé à la calotte résiduelle australe, et non un réchauffement climatique global. De plus, le climat martien est très largement conditionné par les tempêtes de poussières et les variations d'albédo qui en découlent, davantage que par le rayonnement solaire — contrairement au climat terrestre — ce qui limite la pertinence des raisonnements établissant des parallèles entre les deux planètes. Et, surtout, les observations les plus récentes, notamment celles de la sonde 2001 Mars Odyssey, qui est toujours en fonctionnement, ne confirment pas la tendance à long terme à la sublimation des calottes polaires, mais indiqueraient au contraire des variations annuelles autour d'une valeur stable.



Fosses « gryère » au pôle sud, MGS 1999, NASA

Le rayonnement solaire, cause du réchauffement planétaire de Mars ?

En dépit de l'absence de données échelonnées dans le temps de la température martienne, K.I. Abdusamatov a proposé que parallèlement au réchauffement climatique — observé simultanément sur Mars et sur la Terre, et quelques sceptiques du réchauffement climatique pensent que c'est la preuve que l'homme n'est pas la cause de l'actuel changement sur Terre — les variations solaires pourraient être la cause directe de cette élévation de la température". D'autres scientifiques considèrent que les variations observées pourraient être causées par des irrégularités de l'orbite de Mars ou une combinaison des effets solaires et orbitaux.

Utilisation potentielle par l'homme

Il a été proposé que l'exploration humaine de la planète pourrait utiliser le dioxyde de carbone pour fabriquer du carburant afin de préparer le voyage de retour. Ainsi le projet Mars Direct, proposé par Robert Zubrin énonce qu'une fois sur place, un ensemble relativement simple de réactions chimiques (la réaction de Sabatier couplée à l'électrolyse) combinerait un peu d'hydrogène emporté par l'ERV avec du dioxyde de carbone de l'atmosphère de Mars pour créer jusqu'à 112 tonnes de propergol de méthane et d'oxygène liquide, dont 96 tonnes seraient nécessaires pour renvoyer l'ERV sur Terre à la fin de la mission.

Climat

Du fait de son éloignement plus grand par rapport au Soleil que celui de la Terre, Mars reçoit du Soleil une énergie variant de 492 à 715 W/m² selon sa position sur son orbite, contre de 1 321 à 1 413 W/m² pour la Terre, c'est-à-dire de 37,2 % à 50,6 % entre les aphélies et les périhélies respectivement. L'atmosphère martienne étant de surcroît 150 fois moins dense que celle de la Terre, elle ne génère qu'un effet de serre

négligeable, d'où une température moyenne d'environ 210 K (-63 °C) à la surface de Mars, avec des variations diurnes importantes en raison de la faible inertie thermique de cette atmosphère : Viking 1 Lander avait ainsi relevé des variations diurnes allant typiquement de 184 à 242 K, soit de -89 à -31 °C, tandis que les températures extrêmes, assez variables selon les sources, seraient d'environ 130 et 297 K, c'est-à-dire, en chiffres ronds, de l'ordre de -145 et +25 °C.

Saisons

L'obliquité de Mars est proche de celle de la Terre (respectivement 25.19° contre 23.44°) mais l'excentricité de l'orbite martienne est sensiblement plus élevée (0,09332 contre 0,01671 pour la Terre) de sorte que, si Mars possède des saisons similaires à celles de la Terre, celles-ci sont d'intensité et de durée très inégales au cours de l'année martienne (voir tableau ci-contre). L'hémisphère nord connaît ainsi des saisons moins marquées que l'hémisphère sud, car Mars est à son aphélie à la fin du printemps et à son périhélie à la fin de l'automne, d'où des hivers courts et doux et des étés longs et frais; le printemps dure ainsi 52 jours de plus que l'automne. À l'inverse, l'hémisphère sud connaît des saisons très marquées, avec des hivers longs et très froids tandis que les étés sont courts et plus chauds que ceux de l'hémisphère nord. C'est donc dans l'hémisphère sud qu'on observe les écarts de température les plus élevés

Le simulateur Mars24 Sunclock de la NASA donne, pour l'hémisphère nord, les dates suivantes pour le début de chaque saison :

Saison (hémisphère nord)	Durée sur Mars		Durée sur Terre
	Sols	Jours	
Printemps	193,30	198,614	92,764
Été	178,64	183,551	93,647
Automne	142,70	146,623	89,836
Hiver	153,95	158,182	88,997
Année	668,59	686,97	365,25

Printemps	21 janvier 2006	9 décembre 2007	26 octobre 2009	13 septembre 2011	31 juillet 2013	18 juin 2015
Été	7 août 2006	24 juin 2008	12 mai 2010	29 mars 2012	14 février 2014	2 janvier 2016
Automne	7 février 2007	25 décembre 2008	12 novembre 2010	29 septembre 2012	17 août 2014	4 juillet 2016
Hiver	4 juillet 2007	21 mai 2009	7 avril 2011	22 février 2013	10 janvier 2015	27 novembre 2016

Vers la fin du printemps austral, lorsque Mars est au plus près du Soleil, des tempêtes locales et parfois régionales apparaissent. Exceptionnellement, ces tempêtes peuvent devenir planétaires et durer plusieurs mois comme ce fut le cas en 1971 et, dans une moindre mesure, en 2001. De minuscules grains de poussière sont alors soulevés, rendant la surface de Mars quasiment invisible. Ces tempêtes de poussière naissent en général au-dessus du Bassin d'Hellas. Les importantes différences thermiques observées entre le pôle et les régions avoisinantes provoquent des vents violents à l'origine du soulèvement de fines particules dans l'atmosphère. Lors de tempêtes globales, ce phénomène provoque d'importantes modifications climatiques : les poussières en suspension absorbent le rayonnement solaire, réchauffant ainsi l'atmosphère et réduisant dans le même temps l'insolation au sol. Ainsi, lors de la tempête de 2001, la température atmosphérique s'est élevée de 30 K alors que la température au sol s'est abaissée de 10 K. Il n'existe qu'une seule cellule de Hadley sur Mars mais beaucoup plus marquée en altitude et en amplitude, joignant les deux hémisphères et qui s'inverse deux fois par an. Enfin, l'obliquité de la planète, qui n'est pas stabilisée par la présence d'un satellite massif comme c'est le cas pour la Terre, suit un régime chaotique selon une cyclicité d'environ 120 000 ans. Elle oscille entre 0° et 60° et connaît des phases relativement stabilisées entrecoupées de changements brusques, ce qui bouleverse complètement le climat martien.

Condensation hivernale de l'atmosphère aux pôles

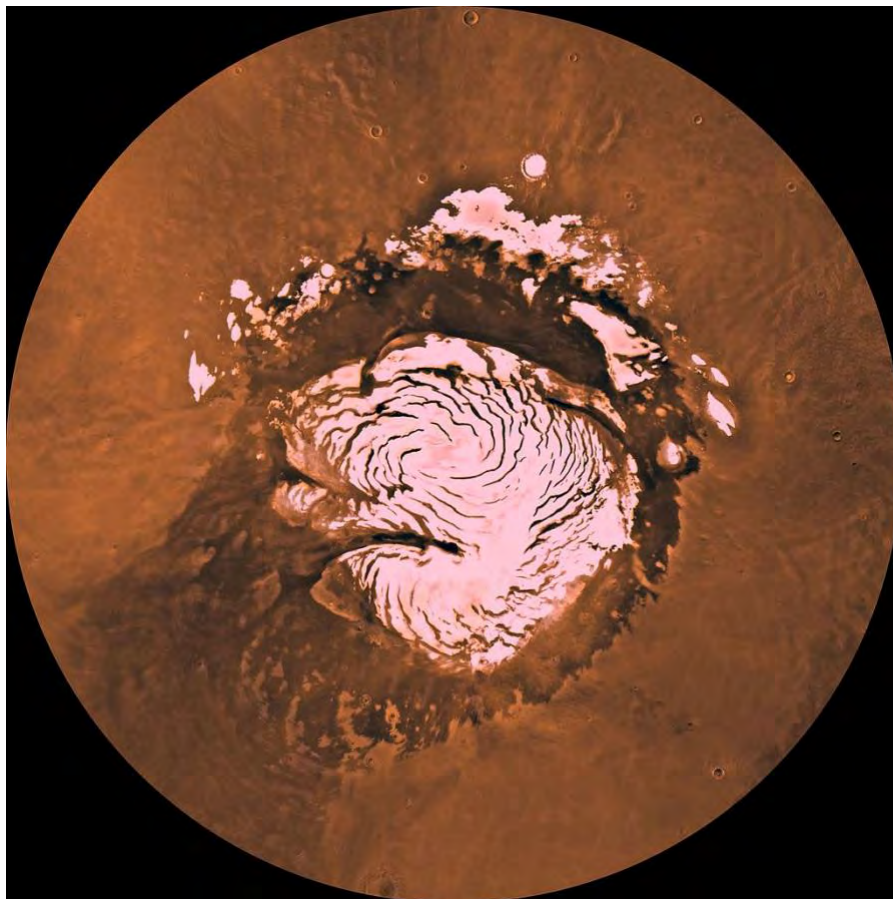
L'une des caractéristiques propres à la planète Mars est qu'une fraction significative de son atmosphère se condense alternativement au pôle sud et au pôle nord lors de l'hiver austral et de l'hiver boréal

respectivement. Les conditions hivernales aux pôles (pression et température) sont en effet favorables à la condensation du dioxyde de carbone : la pression de vapeur saturante du CO₂ à 150 K (-123 °C) se trouve être voisine de 800 Pa, et tombe à seulement 400 Pa à 145 K (-128 °C), qui sont des températures courantes lors de l'hiver austral; il y a condensation du CO₂ dès que la pression partielle de ce gaz dépasse la pression de vapeur saturante correspondant à la température à laquelle il se trouve. La sonde Viking 1 a mesuré la pression atmosphérique sur une année complète à son point d'atterrissage situé par 22,697° N et 312,778° E dans le bassin de Chryse Planitia, à une altitude d'environ -3 300 m par rapport au niveau de référence. La pression atmosphérique moyenne s'est révélée évoluer tout au long de l'année selon les saisons, avec des valeurs approximatives, en chiffres ronds, de 850 Pa au printemps, 680 Pa en été, 900 Pa en automne et 800 Pa en hiver : ces variations s'expliquent bien si l'on considère que la calotte hivernale australe condense une masse de glace carbonique supérieure à celle de la calotte hivernale boréale, tandis qu'à l'automne de l'hémisphère nord l'essentiel de la calotte australe s'est sublimée alors que la calotte boréale commence tout juste à se condenser.

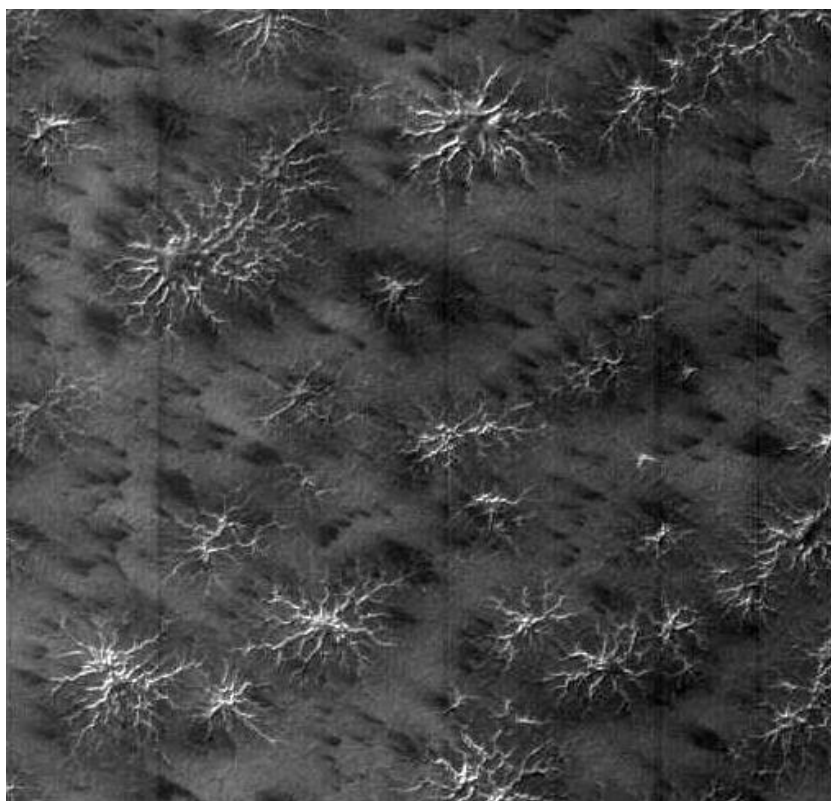
Calottes polaires

Les calottes polaires de Mars ont été observées pour la première fois au milieu du XVII^e siècle par Jean-Dominique Cassini et Christian Huygens. Leur taille varie considérablement au cours des saisons par échange de dioxyde de carbone et d'eau avec l'atmosphère. Mars possède une calotte polaire à chaque pôle, ces calottes ayant chacune une dynamique particulière en raison de la dissymétrie des saisons sur Mars : l'hiver austral est bien plus long et plus froid que l'hiver boréal, tandis que l'été austral est plus chaud que celui de l'hémisphère nord. Il s'ensuit que la température des pôles martiens varie différemment au cours de l'année au pôle nord et au pôle sud, avec un minimum comparable de -120 °C au nord et -130 °C au sud, mais un maximum de -100 °C au nord et de -50 °C au sud : c'est ce qui explique que la calotte résiduelle boréale ait environ 1 000 km de diamètre, soit deux à trois fois moins que son extension maximum, tandis que la calotte résiduelle australe n'a qu'environ 300 km de diamètre. Contrairement à celles de la Terre, les calottes polaires martiennes sont constituées, en surface, essentiellement de glace de dioxyde de carbone et d'une fraction de glace d'eau. Elles atteignent des épaisseurs considérables, la calotte australe ayant été mesurée par l'instrument italo-américain MARSIS de la sonde européenne Mars Express comme ayant une épaisseur atteignant 3,7 km. L'instrument OMEGA, également embarqué à bord de cette sonde, avait permis d'estimer à 15 % la teneur globale en eau de la glace polaire australe, les 85 % restants étant constitués de CO₂ gelé. Mais l'épaisseur de la calotte semble au contraire constituée de dépôts de poussières mêlés de glace d'eau en proportions variables selon les couches successives. Ceci représente finalement des quantités d'eau considérables, dont on a calculé qu'elles permettraient de recouvrir toute la surface de Mars sur une épaisseur de 11 m.

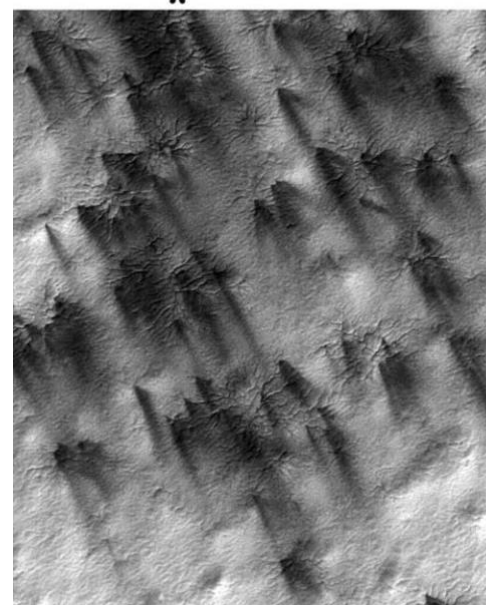
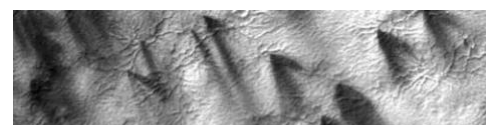
Avec ses 300 km de diamètre, la calotte résiduelle australe est à l'inverse trois fois plus petite que la calotte résiduelle boréale (1 000 km de diamètre). Elles sont de nature très différente des calottes saisonnières, contenant une forte proportion de glace d'eau mêlée de terre avec une structure stratifiée révélée par l'instrument THEMIS de la sonde 2001 Mars Odyssey, avec une épaisseur atteignant localement plusieurs kilomètres. Leurs surfaces sont entaillées par de profondes vallées, appelées *chasmata* (pluriel du latin *chasma* désignant des vallées encaissées), qui forment des spirales dont le sens de rotation est conditionné par la force de Coriolis. Ainsi, les vallées s'enroulent autour du pôle sud dans le sens des aiguilles d'une montre alors qu'elles s'enroulent autour du pôle nord dans le sens inverse. La calotte résiduelle boréale ne contient pas de glace carbonique, mais la calotte résiduelle australe en est presque entièrement recouverte d'une croûte d'une dizaine de mètres d'épaisseur dont la surface alvéolée rappelle celle d'une tranche de gruyère; des observations réalisées par la sonde Mars Global Surveyor ont montré que le diamètre moyen des alvéoles augmentait au fil des saisons, suggérant un réchauffement climatique dans l'hémisphère sud. Les calottes polaires ont un impact important sur la composition atmosphérique globale de la planète. Le cycle des condensations et sublimations du CO₂ fait varier la pression atmosphérique de près d'un tiers, et, pendant l'été boréal, la glace d'eau qui compose la calotte polaire résiduelle nord se sublime, injectant de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Si toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère venait à précipiter, elle formerait une couche de moins de 10 µm d'épaisseur durant l'hiver et de plus de 40 µm en plein été.



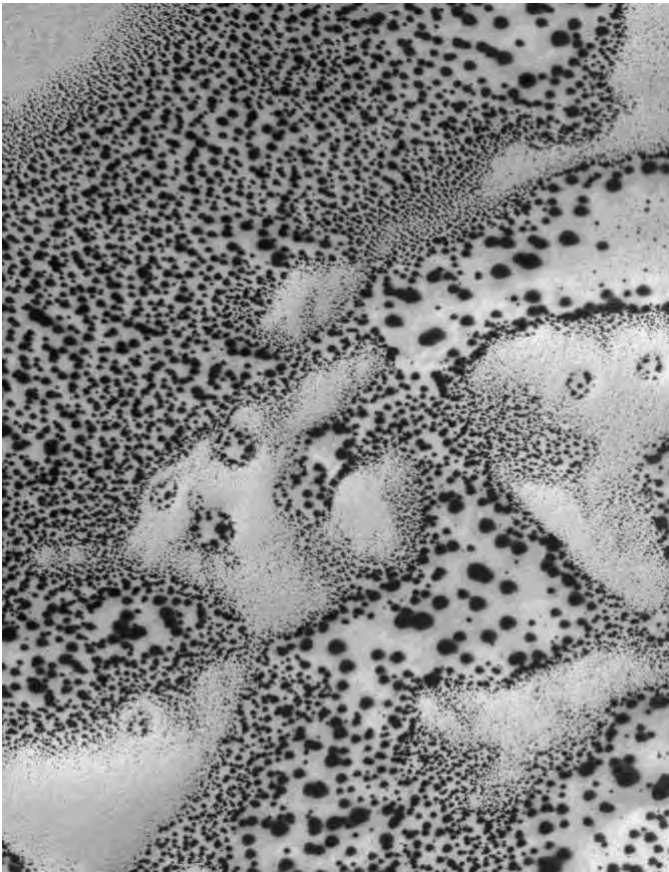
Vue de la calotte résiduelle boréale



Vue de la MOC de MGS montrant un champ de formations « en araignée » sur une coûte de glace carbonique localement opacifiée par du givre de CO2



Région illustrant la corrélation entre les traînées noires, les points noirs et les structures en araignée sur une surface de givre carbonique



Cette image de Mars Global Surveyor (MGS) montre des taches sombres formées dans le dioxyde de carbone gelé qui couvre la surface des zones sablonneuses de la région du pôle Sud. Le printemps arrivait dans l'hémisphère sud, ce qui annonçait le début du processus de dégel. Le fait que les dunes de sable commencent à dégeler plus tôt que les autres surfaces et que le processus de dégel provoque ainsi la formation de taches est connu depuis le début de la mission MGS. Cet endroit est situé à 66,8° S et 15,7° O. Cette image correspond à une zone de 3 km de large lors du printemps austral de Mars

Radiations

L'absence de magnétosphère autour de Mars a pour conséquence d'exposer directement la surface de la planète aux rayons cosmiques et aux bouffées de protons solaires, à l'origine d'une radioactivité ambiante très supérieure sur Mars à celle relevée à la surface de la Terre. L'instrument MARIE (*Mars Radiation Environment*) de la sonde 2001 Mars Odyssey a permis, dans les années 2002-2003, d'évaluer la dose efficace en orbite martienne entre 400 et 500 mSv/an, soit un peu plus du double de celle reçue dans la station spatiale internationale, tandis qu'au sol, au niveau de référence martien, les doses reçues seraient deux à trois fois plus faibles, un peu moins de 200 mSv/an, en raison de l'absorption d'une partie des radiations solaires et galactiques par l'atmosphère. À titre de comparaison, la radioactivité moyenne sur Terre s'élève, en France, à environ 3,5 mSv/an et la dose cumulée admise pour un astronaute sur toute sa carrière n'excède pas quelques sieverts. L'instrument MARIE a par ailleurs révélé que cette radioactivité est très inégalement répartie dans le temps, avec un bruit de fond d'environ 220 µGy/jour sur lequel s'inscrivent des pics parfois 150 fois plus intenses, correspondant aux bouffées de protons énergétiques (plusieurs dizaines de mégaélectron-volts) émis lors d'une éruption solaire ou par l'onde de choc d'une éjection de masse coronale.

IV Géologie de Mars

A) Cadre chronologique

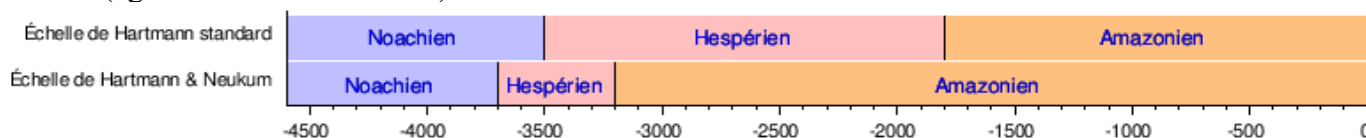
La **géologie de Mars** recouvre l'étude scientifique de Mars, de ses propriétés physiques, de ses reliefs, de sa composition, de son histoire et de tous les phénomènes qui l'ont affectée ou l'affectent encore. Il s'agit d'une discipline relativement récente, inaugurée le 14 juillet 1965 à l'occasion du premier survol de Mars par la sonde spatiale Mariner 4, qui permit de découvrir une planète dépourvue de champ magnétique global, présentant une surface cratérisée rappelant celle de la Lune, une atmosphère ténue, une pression au sol d'environ 600 Pa et une température moyenne de 210 K (-63 °C). Cependant, c'est avec la sonde Mariner 9 que l'étude systématique et approfondie de la planète Mars commence, le 13 novembre 1971. Premier engin à se satelliser autour d'une autre planète que la Terre, Mariner 9 a permis de cartographier la totalité de la surface martienne avec une résolution comprise entre 100 m et 1 km par pixel, révélant toutes les structures géologiques majeures de la planète, sa dichotomie crustale, ses massifs volcaniques gigantesques et son système de canyons appelé Valles Marineris en référence au programme Mariner en général, et à Mariner 9 en particulier. Ensuite, le programme Viking à la fin des années 1970, le programme Phobos à la fin des années 1980 et les missions Mars Global Surveyor et Mars Pathfinder dans les années 1990, ont permis d'affiner les connaissances sur la « planète rouge ». Les « orbiteurs » 2001 Mars Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter et Mars Express, ainsi que les rovers Spirit, Opportunity et Curiosity au sol, complétés par « l'atterrisseur » Phoenix, ont ouvert la voie à une véritable étude géologique martienne. Les études se poursuivent en 2012 avec la mission américaine Mars Science Laboratory et la mission russe Phobos-Grunt, qui emportait le petit satellite chinois Yinghuo 1 pour étudier l'interaction du vent solaire et de l'atmosphère de Mars. À horizon plus lointain on peut citer le robot mobile européen ExoMars du programme Aurora, destiné à analyser le sol en vue d'y rechercher des traces d'exobiologie passée ou présente, ainsi que la mission Mars Sample Return, partagée entre l'ESA et la NASA, conçue pour rapporter quelques centaines de grammes d'échantillons de sol martien sur Terre. L'étude systématique de la planète a radicalement transformé la vision que nous en avons. Mars est aujourd'hui perçue comme une planète au passé riche et géologiquement très actif, entourée jadis d'un champ magnétique global et qui possédait alors presque certainement une atmosphère épaisse et de grandes quantités d'eau liquide plutôt acide. De surcroît, son noyau serait toujours essentiellement, voire entièrement, liquide, et il n'est pas totalement exclu que certains volcans puissent encore connaître une activité épisodique.

La géologie martienne est marquée par la dichotomie crustale entre les basses plaines peu cratérisées de l'hémisphère nord et les hautes terres très cratérisées de l'hémisphère sud, avec, entre ces deux domaines principaux, deux régions volcaniques bien différenciées. En vertu du principe empirique selon lequel l'âge d'une région est une fonction croissante de son taux de cratérisation, ces trois types majeurs de terrains martiens ont très tôt été rattachés à trois époques caractéristiques de l'histoire géologique de la planète, nommées d'après des régions typiques de ces périodes :

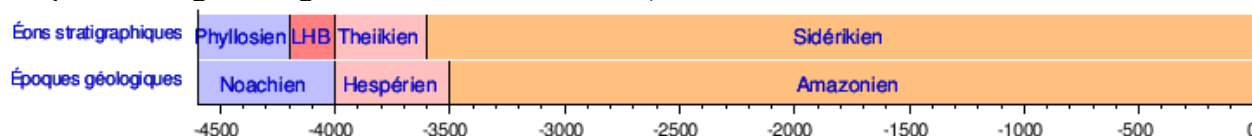
- Le **Noachien** (du nom de Noachis Terra) correspond aux terrains les plus anciens, depuis la formation de la planète il y a 4,6 milliards d'années, jusqu'à 3,7 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais 3,5 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann standard), fortement cratérisés et situés majoritairement dans l'hémisphère sud. Mars avait sans doute une atmosphère épaisse à cette époque, dont la pression et l'effet de serre ont certainement permis l'existence d'une hydrosphère grâce à de grandes quantités d'eau liquide. La fin de cette époque aurait été marquée par les impacts d'astéroïdes du grand bombardement tardif, daté aux environs de 4,1 à 3,8 milliards d'années, ainsi que par le début d'une intense activité volcanique, notamment dans la région du renflement de Tharsis.
- Le **Hespérien** (du nom d'Hesperia Planum) correspond aux terrains de 3,7 à 3,2 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais de 3,5 à 1,8 milliard d'années selon l'échelle de Hartmann standard), marqués par un épisode d'activité volcanique majeur se traduisant par des coulées de lave et des dépôts soufrés. Le champ magnétique global aurait disparu dès la fin du Noachien, permettant au vent solaire d'éroder l'atmosphère de Mars, dont la température et la pression au sol auraient commencé à baisser significativement, de sorte que l'eau liquide aurait cessé d'exister de façon permanente à la surface de la planète.

- **L'Amazonien** (du nom d'Amazonis Planitia) correspond aux terrains de moins de 3,2 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais de seulement 1,8 milliard d'années selon l'échelle de Hartmann standard), très peu cratérisés et situés très majoritairement dans l'hémisphère nord, à une altitude inférieure au niveau de référence de la planète. L'activité volcanique se serait prolongée, en perdant de son intensité tout au long de cette époque, en quatre épisodes majeurs, le dernier survenant il y a environ cent millions d'années, certains terrains volcaniques semblant même ne dater que de quelques millions d'années. L'érosion de l'atmosphère par le vent solaire se serait prolongée pendant des milliards d'années jusqu'à ce que la pression se stabilise au voisinage du point triple de l'eau, dont la pression est de 611,73 Pa. Les structures géologiques amazoniennes sont marquées par l'aridité extrême de l'environnement martien, alors totalement dépourvu d'hydrosphère, ce qui n'empêche pas l'existence discontinue et épisodique d'eau liquide en certains points de la surface.

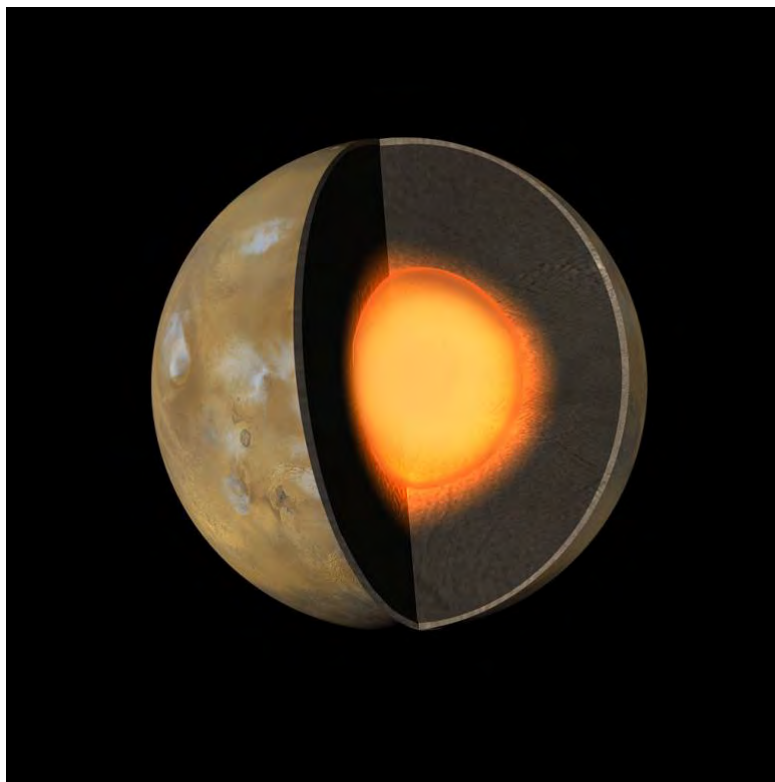
Cette chronologie en trois époques est aujourd'hui bien acceptée (la datation de chacune de ces époques demeure, en revanche, très incertaine) et permet de rendre compte des phénomènes observés à la surface de Mars par les différentes sondes en activité autour de cette planète, notamment la présence simultanée de minéraux, formés à des époques différentes, supposant pour les uns un environnement très humide et pour les autres au contraire l'absence totale d'eau liquide. Les datations proposées pour ces trois époques (ou éons) géologiques, selon l'échelle de Hartmann standard et l'échelle de Hartmann & Neukum, sont les suivantes (âges en millions d'années) :



Depuis 2004, on utilise aussi une échelle basée sur la minéralogie, avec des éons chronostratigraphiques (*LHB* correspond en anglais au grand bombardement tardif).



B) Structure interne



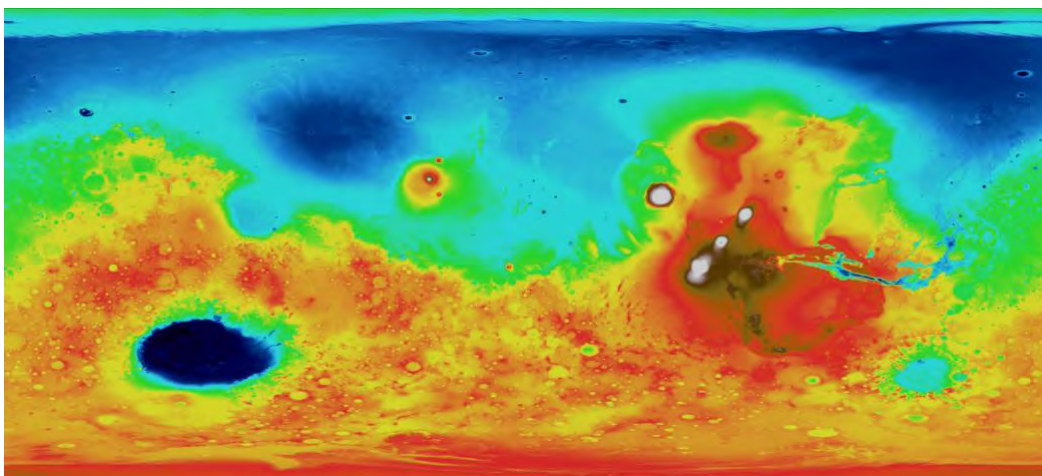
Structure interne de la planète Mars : écorce d'environ 50 km d'épaisseur, manteau d'environ 1 860 km d'épaisseur, noyau d'environ 1 480 km de rayon, essentiellement, voire entièrement, liquide.

1) Ecorce martienne

La topographie de la surface martienne révèle une nette dichotomie crustale entre, d'une part, une région de l'hémisphère sud correspondant à une écorce épaisse et irrégulière jusque sous le renflement de Tharsis, et, d'autre part, une région de l'hémisphère nord correspondant à une écorce plus fine assez uniforme. En première approximation, on peut considérer que l'écorce martienne a une masse volumique uniforme de $2\,900\text{ kg/m}^3$, ce qui conduit à une épaisseur moyenne d'environ 50 km, soit 4,4 % du volume de la planète, avec comme valeurs extrêmes 92 km dans la région de Syria Planum et à peine 3 km sous le bassin d'impact d'Isidis Planitia, tandis que l'écorce aurait moins de 10 km sous toute la région d'Utopia Planitia. D'un point de vue macroscopique, la cohérence des paramètres physiques de Mars implique que l'écorce n'ait jamais plus de 125 km d'épaisseur. L'une des révélations apportées par les mesures gravimétriques fines réalisées par Mars Global Surveyor a été la découverte de structures évoquant des chenaux enfouis sous la surface de l'hémisphère nord et détectés par leur déficit de masse alors même qu'ils demeurent invisibles en surface. Ces structures, qui correspondraient à des reliefs de 1,5 à 4,5 km si elles sont remplies de sédiments secs mais de 1 à 3 km environ dans le cas de sédiments mélangés à de la glace, sont parfaitement en accord avec le modèle, généralement admis pour décrire l'histoire de la planète Mars, selon lequel l'hémisphère nord aurait abrité, au Noachien, de vastes étendues d'eau liquide, voire un océan semi-permanent peut-être recouvert d'une banquise, au centre d'une hydrosphère globale avant d'être comblé de matériaux volcaniques à l'Hespérien et de dépôts éoliens à l'Amazonien pour donner naissance aux basses plaines uniformes caractéristiques de cet hémisphère.

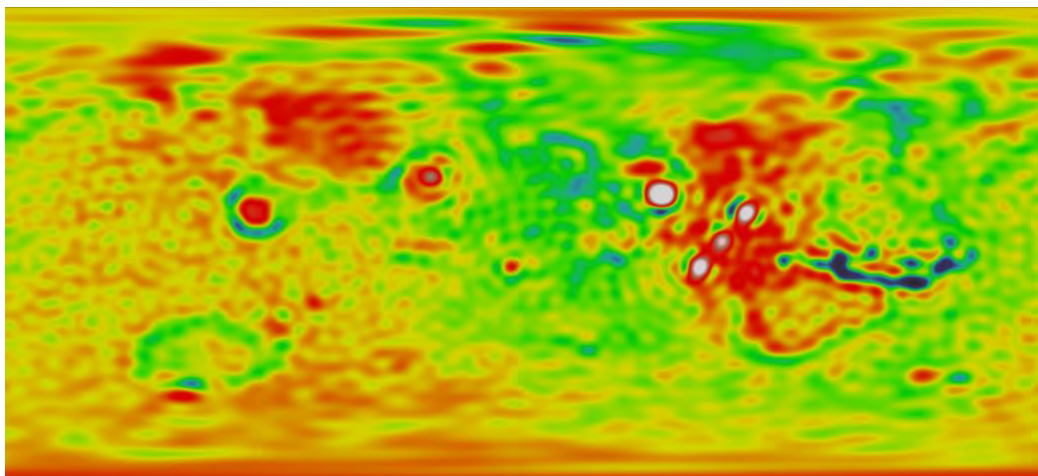
2) Topographie, champ de gravité et « Moho » de Mars

Les trois cartes ci-dessous, issues notamment des relevés topographiques et gravimétriques de la sonde Mars Global Surveyor au début des années 2000, permettent de se faire une idée plus précise de la structure de l'écorce martienne et de la distribution des masses sous la surface de la planète. C'est notamment la deuxième carte, reproduisant les variations d'intensité du champ de gravité à la surface martienne, qui donne une idée de la répartition des concentrations de masse dans l'écorce : sous les bassins d'impact, et sous les volcans; outre les anomalies correspondant au renflement de Tharsis et à Elysium Mons, on repère ainsi trois petites anomalies positives au niveau de Malea Planum, d'Hadriacus Mons et d'Hesperia Planum, trois provinces volcaniques anciennes jouxtant Hellas Planitia, tandis qu'une anomalie positive est nettement visible sous le petit bassin d'Isidis Planitia, ainsi que sous ceux d'Utopia et d'Argyre, matérialisant la concentration de masse résultant de l'impact cosmique. La troisième carte représente les variations de distance, depuis le centre de Mars, du « Moho » martien, c'est-à-dire de l'interface entre le manteau et l'écorce martienne, appelée sur Terre *discontinuité de Mohorovičić* (généralement désignée par le raccourci « *le Moho* ») en raison de son effet sur la propagation des ondes sismiques, mais qui n'a jamais pu être observé expérimentalement sur Mars faute d'étude sismique sur cette planète — ce qui permet de déduire les variations d'épaisseur de l'écorce :

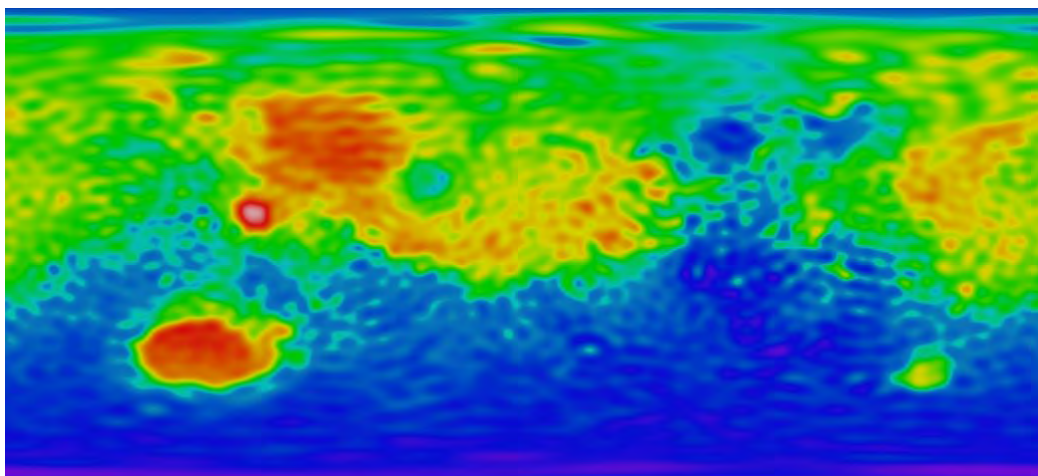


Topographie martienne vue par l'instrument MOLA de MGS. Les couleurs indiquent une altitude croissante du bleu au blanc en passant par le vert, le jaune, le rouge et le brun. Cette carte est bien connue, quoique généralement représentée avec le méridien 0° au centre, et non sur le bord gauche comme ici. On repère aisément le grand bassin d'impact d'Hellas Planitia en bleu marine en bas à gauche, Utopia Planitia

dans le quart supérieur gauche, ainsi que le renflement de Tharsis dans la partie droite de la carte, avec en diagonale les trois volcans de la chaîne de Tharsis Montes qui apparaissent en blanc, ainsi que les grands volcans boucliers d'Olympus Mons (en blanc également) et d'Alba Mons (en brun et rouge au nord de l'ensemble). À droite de Tharsis sont visibles les canyons de Valles Marineris, au sud desquels le bassin d'Argyre Planitia apparaît en bleu ciel dans le quart inférieur droit de la carte.



Champ de gravité martien déduit de la trajectoire de MGS. La carte est également tracée avec le méridien 0° sur le bord gauche, ce qui permet d'identifier d'un seul coup d'œil la contrepartie topographique des variations de gravité identifiées par la sonde. Les couleurs indiquent une gravité croissante du bleu au blanc en passant par le vert, le jaune et le rouge. On repère ainsi que le renflement de Tharsis, d'altitude très supérieure au niveau de référence martien, correspond à une anomalie de gravité positive, de même que le bassin d'Utopia Planitia, qui est pourtant d'altitude cette fois sensiblement inférieure au niveau de référence. A contrario, le sillon bleu marine apparaissant sous l'équateur à droite de la carte correspond à Valles Marineris, vaste fossé d'effondrement d'origine tectonique se traduisant par une « déchirure » de l'écorce et un défaut de masse localisé.



« **Moho** » **calculé** à partir des données topographiques et gravimétriques croisées avec l'évaluation de la densité locale de l'écorce martienne. Les couleurs indiquent une distance croissante au centre de la planète (soit une profondeur décroissante sous le niveau de référence) du bleu au blanc en passant par le vert, le jaune et le rouge; il s'agit en quelque sorte de l'altitude de la surface du manteau. On voit ainsi que l'écorce est la plus épaisse dans les régions volcaniques, notamment sous le renflement de Tharsis avec un maximum dans la région d'Olympus Mons, tandis qu'elle est la plus fine sous les bassins d'Utopia, d'Isidis, d'Hellas et d'Argyre. La dichotomie crustale martienne affecte également de façon flagrante la topographie du Moho, bien que la limite entre les deux domaines ne se superpose pas exactement avec celle visible en surface.

Le recoupement de ces trois types d'informations offre une clé essentielle pour comprendre la géologie à grande échelle des couches superficielles de la planète Mars.

3) Structure interne

En l'absence de données sismiques exploitables, la structure interne de la planète Mars demeure difficile à préciser. L'exploitation des informations recueillies par les diverses sondes qui ont exploré la planète, telles que le moment d'inertie et les relevés gravimétriques et magnétiques, a néanmoins permis de déterminer que celle-ci serait constituée d'un manteau solide de silicates riches en fer et d'un noyau liquide ou au moins encore essentiellement liquide. Une communication de 2009 a fait état de calculs fondés sur des modèles géochimiques de la planète Mars selon lesquels le noyau contiendrait de 5 à 13,5 % de soufre et le manteau contiendrait de 11 à 15,5 % de fer. Le noyau de Mars aurait un rayon compris entre 1 300 et 2 000 km (soit entre 38 % et 59 % du rayon de la planète), peut-être plus précisément entre 1 520 et 1 840 km (soit entre 45 % et 54 % du rayon de Mars), incertitude due en partie à l'inconnue concernant la fraction de manteau qui pourrait être liquide et réduirait par conséquent la taille du noyau; on trouve assez souvent citée la valeur 1 480 km comme rayon du noyau de Mars, soit 43,7 % du rayon moyen de la planète elle-même (3 393 km). Les caractéristiques physiques (taille, densité) du noyau peuvent être approchées qualitativement par le moment d'inertie de la planète, qui peut être évalué en analysant la précession de son axe de rotation ainsi que les variations de sa vitesse de rotation à travers les modulations par effet Doppler des signaux radio émis par les sondes posées à sa surface; les données de Mars Pathfinder ont ainsi permis d'affiner celles précédemment recueillies avec les sondes Viking et d'établir que la masse de Mars est plutôt concentrée en son centre, ce qui plaide pour un noyau dense et pas trop gros. Avec une température estimée à environ 2 000 K, le noyau de Mars serait entièrement liquide pour un taux d'éléments légers (essentiellement du soufre) de 14,2 % en masse, ce qui laisse supposer une composition majoritairement de fer allié à d'autres métaux (typiquement du nickel) et peut-être jusqu'à 17 % d'éléments légers. Des expériences conduites sur des systèmes fer-soufre et fer-nickel-soufre à des pressions comparables à celles estimées au cœur de Mars amènent à envisager que le noyau martien, encore entièrement liquide, se solidifierait par cristallisation superficielle, au contact du manteau, formant des sortes de « flocons » tombant en « neige » jusqu'au centre; une autre possibilité pourrait être la formation d'une graine solide de sulfure de fer cristallisé au centre du noyau liquide.

4) Champ magnétique

Mars ne possède pas de magnétosphère. Toutefois, le magnétomètre et réflectomètre à électrons MAG/ER de la sonde Mars Global Surveyor a mis en évidence dès 1997 un magnétisme rémanent, jusqu'à 30 fois supérieur à celui de l'écorce terrestre, au-dessus de certaines régions géologiquement anciennes de l'hémisphère sud, et notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum. Les mesures font état d'un champ magnétique atteignant $1,5 \mu\text{T}$ à 100 km d'altitude, ce qui requiert l'aimantation d'un volume significatif d'écorce martienne, d'au moins 10^6 km^3 . Pendant neuf ans, MGS a mesuré les paramètres magnétiques au-dessus de la surface martienne, l'instrument MGS MAG (*MGS Magnetometer*) recueillant des données vectorielles depuis une altitude typiquement de 400 km, s'approchant parfois à 90 km de la surface, et MGS ER (*MGS Electron Reflectometer*) mesurant le magnétisme total depuis une altitude de 185 km en moyenne. Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de carte magnétique de la surface martienne elle-même, de même que la nature exacte des minéraux magnétisés ne peut qu'être supposée dans l'état actuel de nos connaissances.

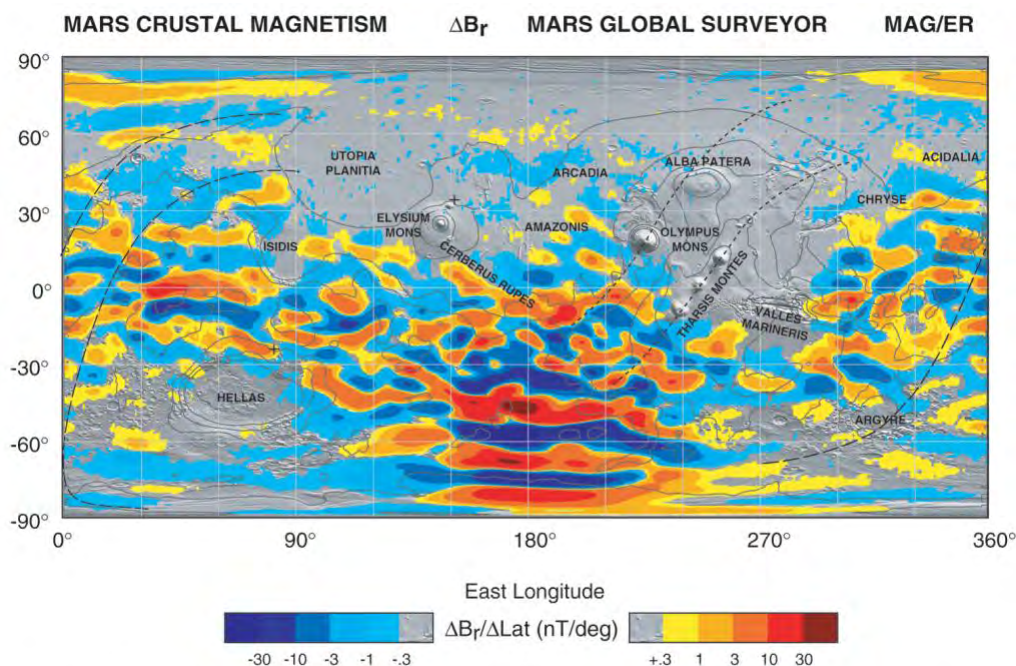
a) Géographie du paléomagnétisme martien et minéraux impliqués

L'étude des météorites de Mars suggère que ce paléomagnétisme résulte, comme sur Terre, de l'aimantation de minéraux ferromagnétiques tels que la magnétite Fe_3O_4 et la pyrrhotite Fe_{1-x}S dont les atomes alignent leur moment magnétique sur le champ magnétique global et figent cette configuration en passant en dessous de la température de Curie du minéral — soit par exemple 858 K (585 °C) pour Fe_3O_4 , mais seulement 593 K (320 °C) pour Fe_{1-x}S . Les autres minéraux candidats comme vecteurs du paléomagnétisme de l'écorce martienne sont l'ilménite FeTiO_3 en solution solide avec l'hématite Fe_2O_3 , de même structure, pour former des titanohématites, et dans une moindre mesure la titanomagnétite Fe_2TiO_4 , dont l'aimantation et la température de Curie sont cependant inférieures. L'absence d'un tel paléomagnétisme au-dessus des bassins d'impacts de l'hémisphère sud tels qu'Hellas et Argyre est généralement interprétée comme l'indication que Mars ne possédait plus de champ magnétique global lors de ces impacts, bien qu'il soit également possible que le refroidissement des matériaux sur le lieu de l'impact ait été trop rapide pour permettre l'alignement de leur aimantation éventuelle sur le champ magnétique global. A contrario, un

paléomagnétisme significatif, et parfois même assez élevé, a été relevé au-dessus des 14 bassins les plus anciens identifiés sur la planète. De la même façon, aucun champ magnétique notable n'a été détecté au-dessus des régions volcaniques majeures d'Elysium Planitia et du renflement de Tharsis, en revanche un magnétisme faible mais de plus forte intensité a été relevé au-dessus des provinces volcaniques plus petites et plus anciennes des hautes terres australes. L'analyse des composantes tridimensionnelles du champ magnétique relevé en quelques dizaines de points significatifs de la surface martienne a permis à plusieurs équipes d'extrapoler la position du pôle paléomagnétique de Mars. Ces simulations (qui doivent néanmoins être prises avec un certain recul) sont assez cohérentes entre elles et conduisent à localiser l'un des pôles paléomagnétiques martiens entre 150° E et 330° E d'une part et 30° S et 90° N d'autre part, c'est-à-dire approximativement dans un rayon de 3 600 km autour d'un point situé à mi-chemin entre Alba Mons et Olympus Mons.

b) Inversions de polarité et disparition du magnétisme global

Fait remarquable, les anomalies magnétiques mesurées par MGS sont structurées en bandes parallèles, de façon rappelant les anomalies magnétiques océaniques sur Terre (voir schéma ci-contre) : le refroidissement de la croûte océanique formée aux dorsales au fur et à mesure que les plaques s'écartent conduit celle-ci à acquérir une aimantation rémanente qui « mémorise » l'orientation du champ magnétique terrestre au passage de la température de Curie; chaque inversion du champ magnétique terrestre est donc « enregistrée » dans les roches ainsi formées, dont l'aimantation forme par conséquent des séquences symétriques de part et d'autre des dorsales. Une telle symétrie n'a en revanche jamais été relevée sur Mars, de sorte qu'aucun élément ne permet actuellement de supposer l'existence passée d'une quelconque tectonique des plaques sur la planète rouge. Seule une observation à plus haute résolution permettrait de clore le débat. Lorsqu'il est global, le champ magnétique d'une planète est principalement d'origine interne. On suppose qu'il est provoqué par la convection des fluides conducteurs (c'est-à-dire des métaux liquides) composant la partie externe du noyau. Ce processus est connu sous le nom d'effet dynamo. Ces mouvements de convection impliquent l'existence d'un gradient thermique suffisant du noyau vers le manteau; en l'absence d'un tel gradient, l'effet dynamo ne pourrait pas se maintenir. Ce fait serait à l'origine de la disparition du champ magnétique global de Mars, il y a sans doute au moins quatre milliards d'années : les impacts d'astéroïdes du grand bombardement tardif auraient injecté suffisamment d'énergie thermique dans le manteau de Mars en convertissant en chaleur l'énergie cinétique des impacteurs, ce qui aurait stoppé l'effet dynamo en annulant le gradient thermique nécessaire à son maintien.



Connerney, J. E. P. et al., (2005) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 102, No. 42, 14970-14975.

R1599_1pub

Paléomagnétisme martien mesuré par MGS au-dessus de la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum. Les bandes de polarité opposée sont bien visibles, mais aucun axe de symétrie n'a pu être mis en évidence jusqu'à présent

c) Origine de la dichotomie magnétique entre hémisphères nord et sud

L'attribution de la disparition du champ magnétique global martien à un impact cosmique a été reprise dans une théorie alternative impliquant cette fois une protoplanète résiduelle de la taille de la Lune percutant Mars bien avant le grand bombardement tardif, c'est-à-dire quelques dizaines de millions d'années seulement après la formation de la planète (de façon similaire à l'impact hypothétique de Théia avec la proto-Terre), au voisinage du pôle nord actuel et sous un angle d'incidence assez faible : cet impact serait à l'origine d'une part de la dichotomie crustale (l'idée n'est pas nouvelle, recoupant la théorie, assez discutée, du bassin boréal) et d'autre part de l'absence de paléomagnétisme dans l'écorce de l'hémisphère nord, en raison de la disparition du gradient thermique entre le noyau et le manteau dans l'hémisphère nord uniquement, laissant subsister un effet dynamo concentré dans l'hémisphère sud. Mars aurait ainsi connu transitoirement un magnétisme non pas global, mais « hémisphérique » et décentré vers le pôle sud, ce qui expliquerait l'intensité exceptionnelle du magnétisme rémanent dans certaines parties de l'écorce de l'hémisphère sud, ainsi que l'absence de paléomagnétisme notable dans l'hémisphère nord. Cette théorie n'est bien entendu pas la seule proposée pour rendre compte de la superposition d'une « dichotomie magnétique » à la dichotomie crustale martienne : la différence d'épaisseur et de structure de l'écorce martienne entre les deux hémisphères, la fonte partielle de l'écorce de l'hémisphère nord à l'origine du remodelage de sa surface, et la serpentinisation de l'écorce martienne au Noachien, sont les explications les plus couramment avancées.

C) Principales formations géologiques

Dès les premiers clichés de la planète pris au début des années 1970 par Mariner 9, les principales caractéristiques géologiques martiennes avaient été identifiées :

- deux hémisphères très différents, l'un constitué d'une vaste plaine lisse au nord et, au sud, de hauts plateaux très cratérisés rappelant la Lune
- une demi-douzaine de grands bassins d'impact
- deux massifs volcaniques, dont un énorme renflement rassemblant une demi-douzaine de volcans parmi les plus grands du système solaire
- un système de canyons aux dimensions uniques dans le système solaire
- un peu partout, des formations évoquant sans ambiguïté des lits de cours d'eau asséchés, mais on ignorait à l'époque si l'eau liquide était bien à l'origine de ces structures, qu'on attribuait aussi au dioxyde de carbone liquide (modèle dit « *White Mars* » de l'astronome australien Nick Hoffman, par opposition au modèle « *Blue Mars* » reposant sur l'eau liquide).

L'USGS avait d'emblée défini, sur la base de ces clichés, 24 unités géologiques organisées selon les régions et leur âge estimé, qui demeurent toujours valables pour une étude morphologique globale de la planète, bien que les informations alors disponibles aient été depuis considérablement enrichies — et souvent fortement nuancées — par les résultats recueillis au cours des missions d'exploration ultérieures, jusqu'à nos jours :

	Pôles	Plaines	Terrains volcaniques	Canyons et vallées	Terrains irréguliers de l'hémisphère sud
Amazonien	Aprc Apb	Apt Apc	Aps	Apy AHa	AHcf AHct ANch
Hespérien		Hpr Hprg Hpst	AHvu AHvi Hvo		
Noachien	HNdp	Npm Nplc			HNk HNbr Nc Nm Nhc

Unités géologiques martiennes proposées dès 1978 par l'USGS sur la base des clichés de Mariner 9

1) Dichotomie crustale

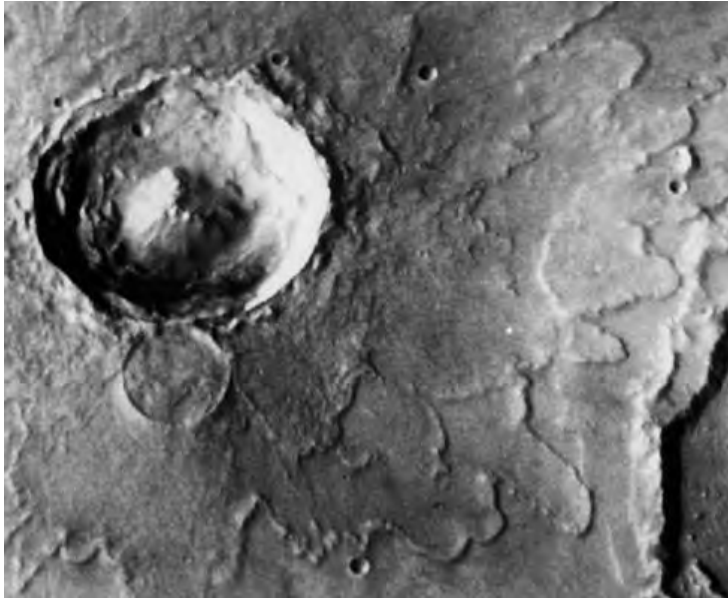
La principale caractéristique orographique de Mars est l'opposition entre, d'une part, un hémisphère nord constitué d'une vaste plaine dépourvue de relief significatif s'étendant sur un peu plus du tiers de la surface de la planète, et, d'autre part, un hémisphère sud formé de terrains élevés très cratérisés et assez accidentés, avec des failles, des escarpements, des éboulements, et des régions au relief chaotique. Ces deux régions sont de natures géologiques radicalement différentes : l'écorce martienne est sensiblement plus fine dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, les terrains de l'hémisphère sud sont plus anciens, de quelques centaines de millions d'années à un ou deux milliards d'années, que ceux de l'hémisphère nord, et les signatures spectrales minéralogiques de ces derniers semblent marquées par une ancienne présence d'eau liquide abondante et acide ayant définitivement affecté la composition minéralogique de ces régions (voir plus loin). Deux types de scénarios ont été proposés pour rendre compte de cette situation. Les premiers reposent sur la dynamique interne de la planète, les mouvements de convection du manteau et une ébauche de tectonique des plaques, à la manière de la formation des supercontinents terrestres à l'aube de l'histoire de notre planète. Les seconds reposent sur un ou plusieurs grands impacts entraînant la fusion de l'écorce dans l'hémisphère nord; les modèles à impact unique (hypothèse du Bassin boréal, notamment) se heurtent malgré tout à certaines difficultés par rapport aux observations. L'étude des bassins d'impact enfouis sous la surface a par ailleurs permis d'établir que la dichotomie crustale martienne remonte à plus de quatre milliards d'années avant le présent, et est donc une structure héritée des premiers âges de la planète. Certaines structures plus récentes à la limite entre les deux domaines suggèrent également une relaxation isostatique des hautes terres du sud après le comblement volcanique de la dépression de l'hémisphère nord, ce qui plaide également pour la grande ancienneté de cette dichotomie. Les particularités de la limite entre ces deux grands domaines géologiques martiens sont particulièrement bien illustrées par la région d'Aeolis Mensae, entre Terra Cimmeria et Elysium Planitia : on y trouve des formations tectoniques complexes et pas toujours bien comprises, ainsi que des traces d'érosion éolienne très marquées.

2) Cratères et bassins d'impact

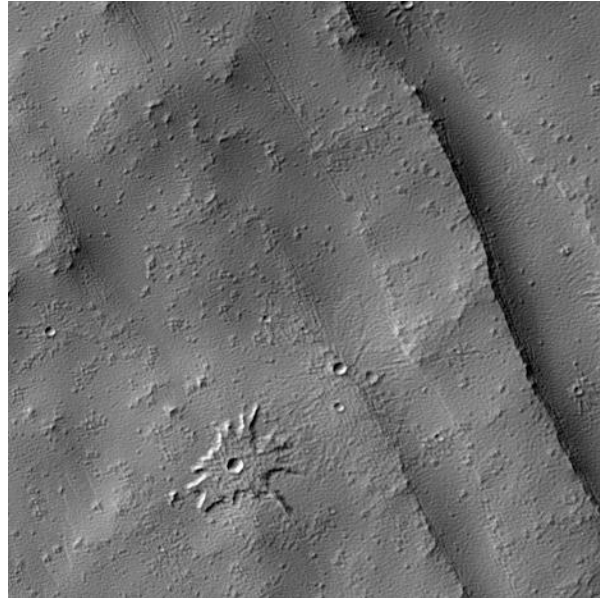
L'abondance des cratères d'impact est la caractéristique première des terrains anciens de l'hémisphère sud. Il y en a bien entendu également dans l'hémisphère nord, et les cratères martiens présentent une grande variété de formes : vieux cratères à fond plat très érodés et parfois partiellement enfouis dans l'hémisphère sud, petits cratères très creux en forme de bol sur les terrains jeunes de l'hémisphère nord, avec une particularité martienne, inconnue sur la Lune, liée à la présence de composés volatils dans le sol : les « cratères à remparts » tels que le cratère Yuty; ces cratères particuliers sont caractérisés par la présence d'éjectas lobés très reconnaissables. Les cratères dits « à piédestal » résultent, quant à eux, de l'érosion différentielle des terrains meubles environnant un cratère d'impact dont les bords et les matériaux immédiatement en contact avec l'impact ont été durcis sous l'effet mécanique et thermique du choc avec l'impacteur. L'instrument HRSC de Mars Express a fourni d'excellents clichés d'un de ces cratères dans la région d'Hephaestus Fossae. Les impacts résultant de la collision avec un impacteur suffisamment énergétique pour percer l'écorce martienne et provoquer des épanchements magmatiques donnent lieu, non plus à un cratère, mais à un bassin d'impact; les principaux bassins identifiés sans ambiguïté sur Mars sont, par taille décroissante :

- Utopia Planitia, au nord-ouest d'Elysium Mons, qui est clairement identifiée comme un bassin d'impact cosmique
- Hellas Planitia, dans l'hémisphère sud
- Argyre Planitia, également dans l'hémisphère sud
- Isidis Planitia, en bordure d'Utopia Planitia
- Chryse Planitia, en bordure d'Acidalia Planitia.

L'existence du Bassin boréal comme bassin unique est loin d'être prouvée, mais, si cette hypothèse s'avérait exacte, il regrouperait géologiquement un ensemble de dépressions comprenant Vastitas Borealis, Arcadia Planitia et Acidalia Planitia, ce qui en ferait de loin la plus vaste structure de ce type dans le système solaire. Amazonis Planitia, qui ressemble également à un bassin d'impact, n'en serait cependant pas un et aurait une origine plutôt volcanique, étant située entre les deux grandes régions volcaniques martiennes : Elysium Planitia à l'ouest et le renflement de Tharsis à l'est. L'instrument MARSIS (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding*) de Mars Express a par ailleurs révélé l'existence de nombreux autres impacts plus ou moins gros, aujourd'hui invisibles car enfouis dans le sol de la planète.

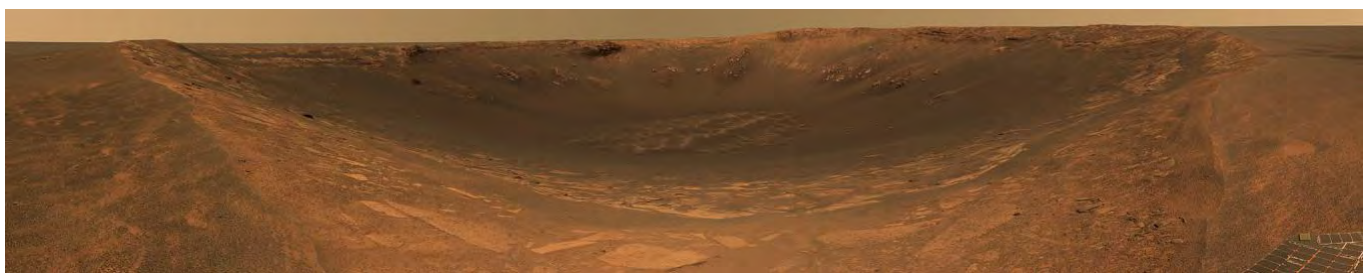


Le Cratère Yuty, de 18 km de diamètre, à la morphologie typique des cratères à rempart, avec ses éjectas lobés caractéristiques d'un sous-sol riche en substances volatiles, sans doute de la glace. Cliché Viking 1 orbiter, 1977



Cratère à piédestal sur le flanc de Biblis Patera vu le 18 juillet 2008 par l'instrument HiRISE de la sonde MRO51

La formation des bassins d'impact martiens remonte essentiellement aux premiers âges de la planète, il y a plus de quatre milliards d'années : les derniers impacts majeurs ont dû se produire à la fin du Noachien, lors du grand bombardement tardif, il y a entre 4,1 et 3,9 (voire 3,8) milliards d'années, le Bassin Caloris, sur Mercure, et Mare Imbrium (la « *Mer des Pluies* »), sur la Lune, sont également datés de cette époque, qui correspond, pour la Lune, au Nectarien et à l'Imbrien inférieur; il est possible que les satellites Phobos et Deimos aient un rapport avec cet épisode, comme astéroïdes incidents capturés par Mars, mais il resterait alors à expliquer leur orbite quasi-circulaire avec une inclinaison très faible sur l'équateur martien, ou comme agglomérats de matériaux projetés dans l'espace et satellisés à la suite de collisions avec des impacteurs de taille suffisante, Phobos en deçà et Deimos au-delà de l'orbite synchrone de Mars, laquelle correspond à une altitude de 17 000 km au-dessus de la surface; le scénario le plus probable, dans ce cas de figure, serait une ou plusieurs collisions avec un ou plusieurs planétésimaux peu après la formation de Mars (scénario similaire à celui de la formation de la Lune à la suite de l'impact de Théia sur la proto-Terre), il y a environ 4,5 milliards d'années, plutôt que lors du grand bombardement tardif, 500 millions d'années plus tard.



Moaisque panoramique du cratère Endurance reconstituée à partir de 258 clichés du rover Opportunity pris en 2004 à travers des filtres à 480, 530 et 750 nm. Ce cratère mesure environ 130 m de diamètre pour 20 m de profondeur

3) Formations volcaniques

De façon schématique, le volcanisme martien semble avoir globalement évolué depuis un volcanisme de plaine datant de la fin du Noachien à la première moitié de l'Hespérien, défini par des épanchements de lave basaltique très fluide, comme celle des « mers » lunaires, et qui constitue une fraction notable de la surface martienne, jusqu'à des cônes volcaniques bien formés rappelant les stratovolcans terrestres à partir

de la seconde moitié de l'Hespérien. Entre ces deux extrêmes, toute une gradation de morphologies permet de rendre compte de la variété de terrains et de formations volcaniques rencontrés sur toute la surface de la planète, notamment les fameux volcans boucliers martiens.

a) Plaines de lave

La plus ancienne forme de volcanisme martien, remontant à la fin du Noachien et perdurant à l'Hespérien, serait celle des étendues basaltiques qui recouvrent le fond des bassins d'impact tels qu'Argyre et Hellas, ainsi que certaines étendues planes localisées entre ces deux bassins et celui d'Isidis (notamment Syrtis Major Planum, Hesperia Planum et Malea Planum), de façon rappelant les terrains volcaniques lisses identifiés sur Mercure (par exemple Borealis Planitia), sur Vénus (typiquement Guinevere Planitia) et sur la Lune, les « mers » lunaires, la plupart du temps corrélées à des impacts cosmiques. Sur Mars, ces plaines de lave noachiennes constituent les régions de Malea Planum, Hesperia Planum et Syrtis Major Planum, qui se présentent comme des plateaux basaltiques dont la surface, typique de l'Hespérien, est géologiquement plus récente. La dynamique sous-jacente à ce type de volcanisme, entre fissure et point chaud, n'est pas vraiment comprise; en particulier, on n'explique pas vraiment le fait que les volcans de Malea, d'Hesperia et d'Elysium soient plus ou moins alignés sur une aussi grande distance. Une chambre magmatique a été identifiée sous les caldeiras de Syrtis Major par l'anomalie gravitationnelle qu'elle provoque. Syrtis Major Planum apparaît ainsi comme un volcan bouclier particulièrement plat et érodé. Ces formations combinent des caractéristiques effusives et explosives les faisant ressembler aux boucliers pyroclastiques terrestres, tels que l'Emi Koussi dans le massif du Tibesti. C'est notamment le cas d'Hesperia Planum, dont le front occidental au contact d'Hellas Planitia, à proximité immédiate d'Hadriacus Mons, présente des cavités éboulées, telles qu'Ausonia Cavus, plus ou moins souterraines prolongées par des lits de cours d'eau asséchés (Dao Vallis et Niger Vallis voire Harmakhis Vallis un peu plus loin au sud) qui rappellent, à bien plus grande échelle, les traces laissées sur Terre par des lahars. Des plaines de lave bien plus vastes, et aussi parfois assez récentes (jusqu'à la seconde moitié de l'Amazonien), entourent les édifices des deux grands domaines volcaniques martiens, à savoir Elysium Planitia et surtout le renflement de Tharsis de part et d'autre d'Amazonis Planitia. L'exemple typique en est le très vaste ensemble d'âges hétérogènes formé par les plateaux de Daedalia, Icaria, Syria, Sinai, Solis, Thaumasia et Bosporos au sud de Valles Marineris : au moins 163 bouches volcaniques ont été recensées sur le renflement de Syria, à l'origine de coulées de lave s'étendant sur plus de 45 000 km². Toutes ces plaines semblent résulter d'épanchements de lave sur les flancs des volcans, voire des premières coulées de lave très fluide des volcans eux-mêmes. Ainsi, la surface particulièrement lisse d'Amazonis Planitia résulterait de dépôts volcaniques continus depuis l'Hespérien jusqu'à des périodes assez récentes de l'Amazonien.



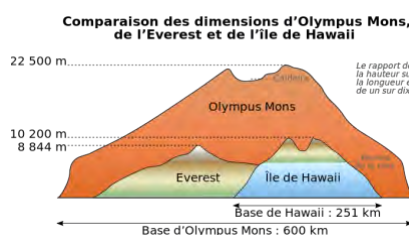
L'Emi Koussi, dans le massif du Tibesti au Sahara, un volcan bouclier pyroclastique de 80 par 60 km à la base et 2,3 km de haut, ressemblerait, en bien plus petit, à des volcans martiens comme Syrtis Major, Tyrrhena Patera et Hadriacus Mons

b) Volcans boucliers et stratovolcans

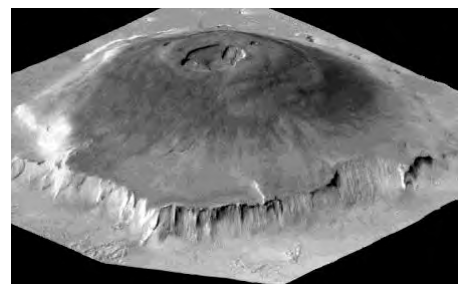
Un volcan bouclier, expression issue de l'islandais Skjaldbreiður désignant un volcan aplati en forme de « *grand bouclier* » (sens littéral de ce toponyme), est caractérisé par la très faible pente de ses flancs. Sur Terre, un tel volcan résulte d'épanchements de laves pauvres en silice, très fluides, qui s'écoulent facilement sur de grandes distances, formant des structures aplaties s'étalant sur des surfaces très importantes, contrairement, par exemple, aux stratovolcans, dont le cône, bien formé, a une base bien plus restreinte. Le type même de volcan bouclier est, sur Terre, le Mauna Loa, à Hawaï; le Piton de la Fournaise, à la Réunion, en est un autre, plus petit mais très actif. Sur Mars, les structures volcaniques les plus spectaculaires sont précisément des volcans boucliers. Le plus étendu d'entre eux, Alba Mons, s'étend sur quelque 1 600 km de large mais ne s'élève qu'à 6 800 m au-dessus du niveau de référence. L'analyse topographique détaillée de cet édifice volcanique parmi les plus volumineux du système solaire révèle trois grandes périodes d'activité à travers les ruptures de pente et les flux de lave particuliers relevés autour de son système de caldeiras. Les premières éruptions auraient consisté en des laves fluides qui se seraient répandues sur une large surface, puis des éruptions plus localisées auraient donné naissance au bouclier central, et enfin une phase finale aurait abouti au dôme portant le système de caldeiras, dont la masse aurait favorisé l'élargissement des grabens d'Alba et de Tantalus ainsi que la faible inclinaison du sommet vers l'est. Alba Mons se situe exactement aux antipodes du bassin d'impact d'Hellas Planitia, et sa formation serait peut-être due au contre-coup de l'impact à l'origine de ce bassin, il y a environ 4 milliards d'années. La datation de cet ensemble est cependant délicate, son aspect général plutôt érodé et couvert de poussières suggérant un âge ancien, mais la faible cratérisation de ses surfaces (comparée par exemple à celles de Syrtis Major, autre volcan bouclier clairement plus ancien au point de ressembler davantage à un plateau basaltique qu'à un volcan) et sa morphologie générale finalement assez proche de celle des volcans du renflement de Tharsis, avec leurs grands épanchements de lave en lobes latéraux et des éruptions successives se resserrant autour des caldeiras, plaident plutôt pour une activité centrée au milieu de l'Hespérien et se prolongeant au début de l'Amazonien. **Olympus Mons**, le plus célèbre et le plus haut des volcans martiens, culmine à 21 229 m au-dessus du niveau de référence (des altitudes supérieures sont encore très souvent publiées, même récemment sur des sites institutionnels américains, mais relèvent d'estimations du XX^e siècle antérieures aux mesures du MOLA de MGS) et possède un système de caldeiras long de 85 km, large de 60 km et d'une profondeur atteignant 3 km; il couvre une surface d'environ 320 000 km² et de 624 km de plus grande largeur, délimitée par un talus pouvant atteindre par endroits 6 000 m de dénivelé. L'origine de cet escarpement est pour l'heure inconnue : les volcans qui présentent sur Terre de telles formations sont typiques d'un volcanisme sous-glaciaire, caractérisé par l'épanchement de laves sous une masse de glace qui en limite l'extension basale pour contraindre l'édifice volcanique dans une géométrie cylindrique, comme c'est par exemple le cas du Herðubreið, en Islande; néanmoins, nous serions ici en présence d'un volcan qui se serait développé sous un inlandsis de 5 à 6 km d'épaisseur, ce qui semble *a priori* inconcevable au vu de nos connaissances actuelles sur la planète Mars, de sorte que l'origine de cette particularité topographique doit encore être expliquée, et que les théories à ce sujet abondent.



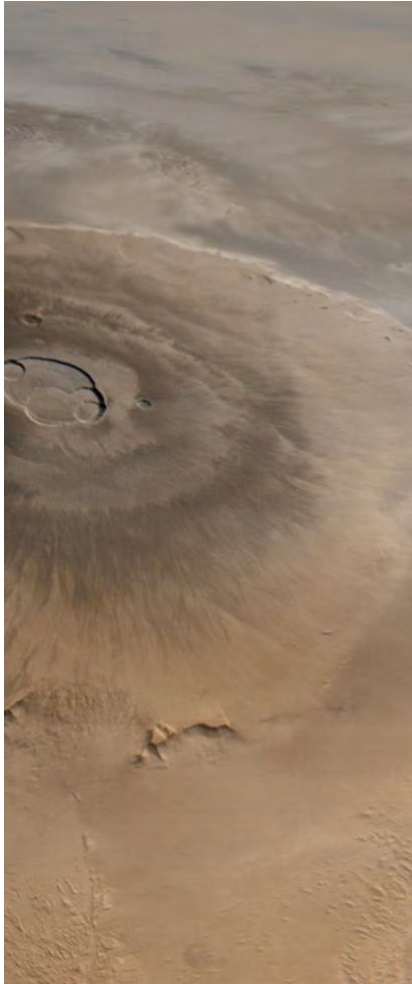
Base d'Olympus Mons à l'échelle de la France



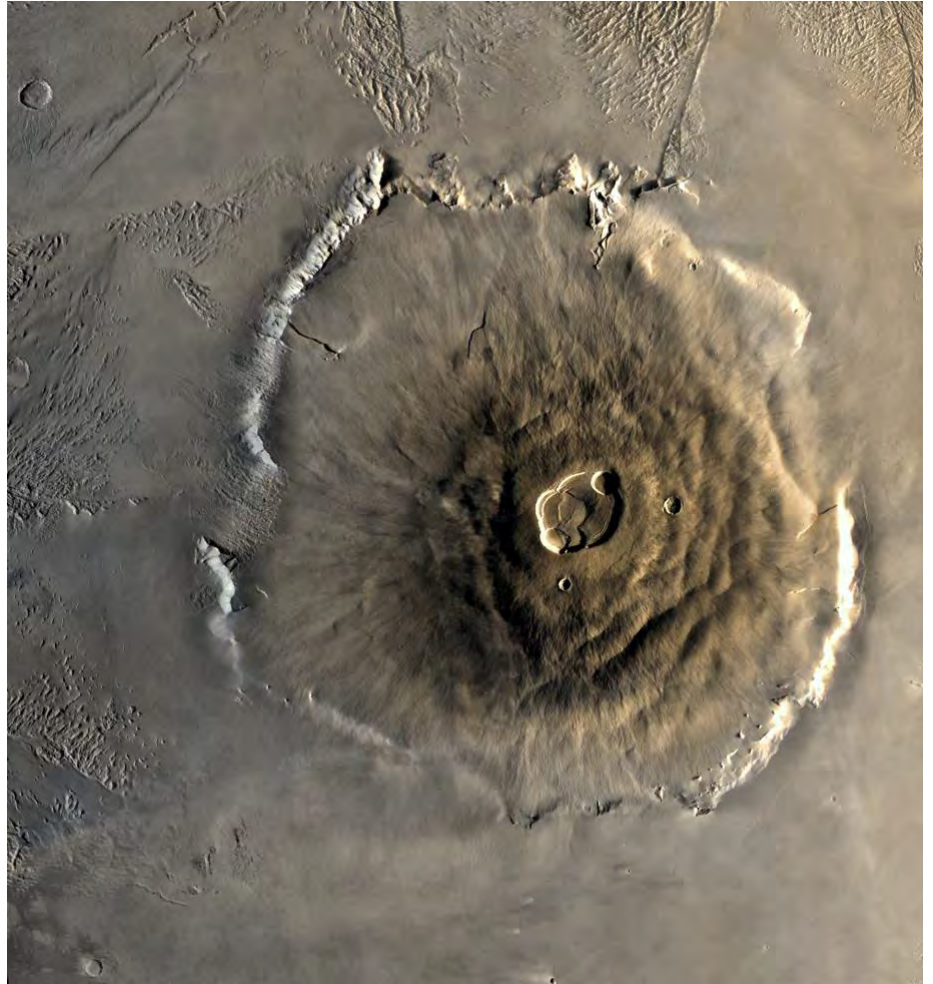
Hauteurs comparées d'Olympus Mons, du Mont Everest et du Mauna Kea, le plus haut volcan terrestre



Volumes d'Olympus Mons en 3D



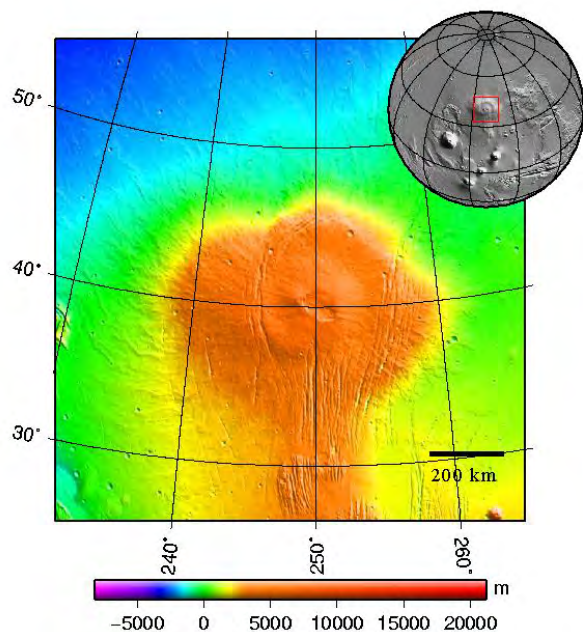
*Cliché d'Olympus Mons
obtenu par la sonde Mars
Global Surveyor le 19/10/1998*



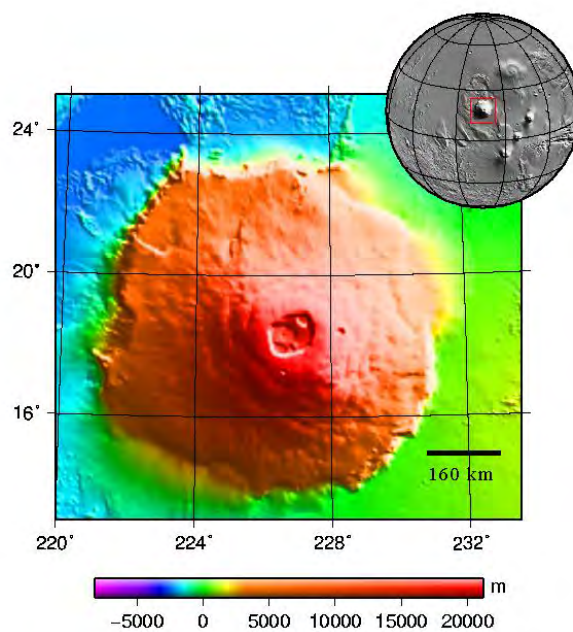
*Olympus Mons, le plus grand volcan et la plus haute montagne du
Système Solaire. Image composite réalisée à partir de clichés pris par
la sonde Viking 1, en 1978. Bien que 3 fois plus haut que l'Everest, il
ne serait pas difficile à escalader car la plupart de ses pentes sont
douces*

Les autres grands volcans martiens sont également des volcans boucliers : du nord au sud, Ascraeus Mons, Pavonis Mons et Arsia Mons constituent les Tharsis Montes et sont les trois plus grands édifices du renflement de Tharsis, tandis qu'Elysium Mons est la principale formation d'Elysium Planitia. La fluidité des laves de ces édifices volcaniques est bien illustrée par les cavités d'effondrement relevées par exemple sur le flanc sud d'Arsia Mons, formées après que la lave s'est solidifiée en surface tandis qu'elle continuait à s'écouler en dessous, laissant des cavités dont le sommet s'est effondré une fois vidées. Les volcans boucliers martiens atteignent des tailles gigantesques par rapport à leurs équivalents terrestres en raison de l'absence de tectonique des plaques sur Mars : l'écorce martienne demeure immobile par rapport aux points chauds, qui peuvent ainsi la percer au même endroit pendant de très longues périodes de temps pour donner naissance à des édifices volcaniques résultant de l'accumulation de laves pendant parfois plusieurs milliards d'années, alors que, sur Terre, le déplacement des plaques lithosphériques au-dessus de ces points chauds conduit à la formation d'un chapelet de parfois plusieurs dizaines de volcans, chacun ne demeurant actif que pendant quelques millions d'années, ce qui est bien trop bref pour permettre la formation de structures aussi imposantes que sur Mars. L'archipel d'Hawaï est le meilleur exemple terrestre illustrant le déplacement d'une plaque tectonique au-dessus d'un point chaud, en l'occurrence de la plaque pacifique au-dessus du point chaud d'Hawaï; de la même façon, l'archipel des Mascareignes résulte du déplacement de la plaque somalienne au-dessus du point chaud de la Réunion. D'autres types de volcans présents sur Mars rappellent davantage les stratovolcans, qui résultent de l'accumulation de dépôts de laves mêlées de cendres volcaniques. Ce sont les *tholi* (pluriel latin de *tholus*), édifices de taille plus modeste que les volcans boucliers, aux pentes plus accusées, surtout près du cratère, ainsi que les *paterae*, qui se réduisent parfois à leur caldeira. Tous ces types de volcans sont présents dans les régions du renflement de Tharsis et d'Elysium

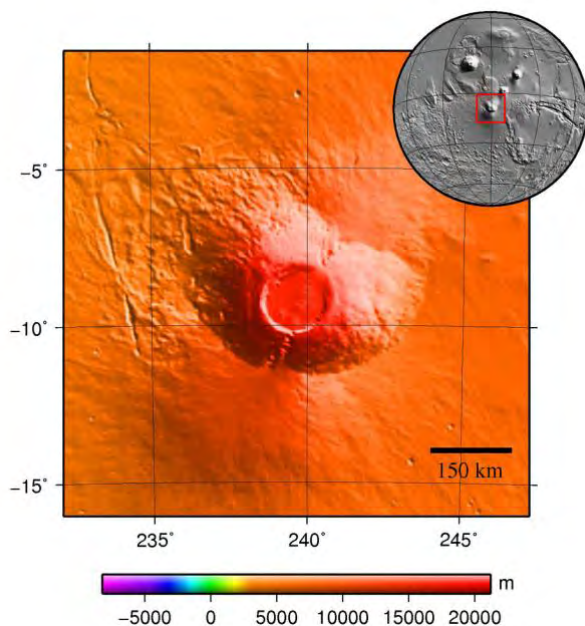
Planitia, la tendance générale étant cependant de trouver les volcans boucliers dans la région de Tharsis tandis que les volcans d'Elysium s'apparentent davantage à des stratovolcans.



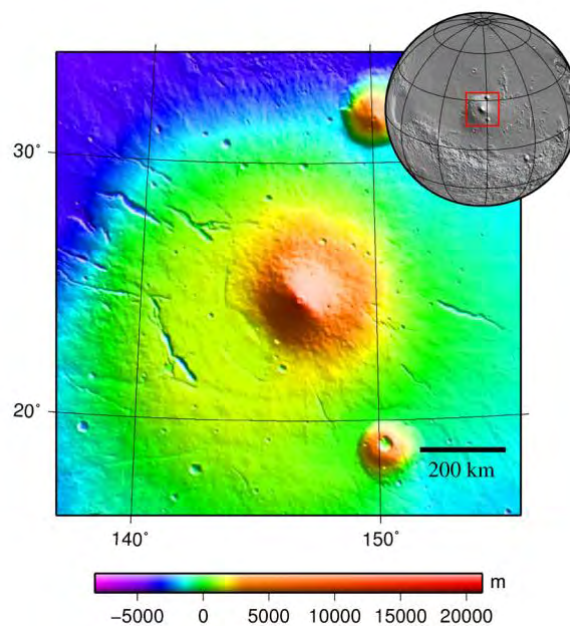
***Alba Mons**, au nord-ouest du renflement de Tharsis, est le type même du volcan bouclier, avec une largeur de 1 600 km pour seulement 6,6 km d'altitude*



***Olympus Mons**, situé à l'ouest du renflement de Tharsis, est un volcan bouclier atteignant 624 km de diamètre avec une caldeira de 85 km de long à 21,2 km d'altitude, soit environ 22,5 km au-dessus des plaines alentour*



***Arsia Mons**, un volcan bouclier d'environ 435 km de diamètre pour 9 km de haut avec une énorme caldeira de 110 km de diamètre à 16 km d'altitude; c'est le plus méridional des trois volcans des Tharsis Montes*



***Elysium Mons**, principal volcan d'Elysium Planitia, s'élève à 13 km au-dessus des plaines environnantes et mesure environ 240 km de large, avec un petit cratère circulaire de 14 km de diamètre*

c) Renflement de Tharsis : volcans, Syria Planum et Valles Marineris

Le plus spectaculaire et le plus complexe des ensembles géologiques martiens est formé des grands volcans de la région de Tharsis, Alba Mons, Olympus Mons et la chaîne de volcans de Tharsis Montes, ainsi que du système de canyons prenant naissance au niveau des failles entrecroisées de Noctis Labyrinthus pour se

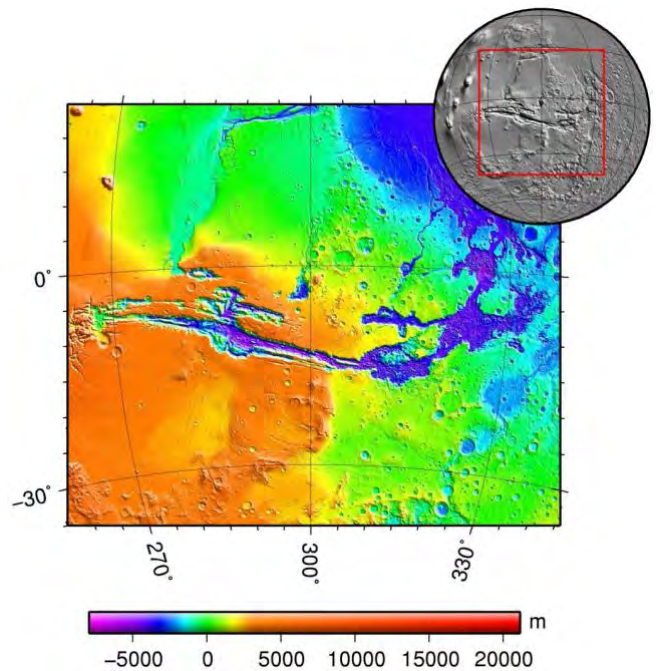
développer à travers l'ensemble de Valles Marineris puis les terrains chaotiques de Xanthe Terra et Margaritifer Terra jusqu'aux abords de Chryse Planitia. Toute cette région, le renflement de Tharsis, résulterait de la remontée d'un système de panaches mantelliques à l'origine des points chauds matérialisés par les différents volcans de Tharsis ainsi que, peut-être, des renflements de Syria Planum et des failles de Noctis Labyrinthus. Au sud de cette région, c'est tout un fragment d'écorce qui se serait soulevé et déplacé avec un mouvement de translation vers le sud doublé d'une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Syria Planum, en particulier, semble avoir joué un rôle tectonique déterminant sur l'ensemble de la région pendant une très longue période de temps, depuis le Noachien jusqu'à l'Amazonien. Des dizaines de petits volcans boucliers de quelques dizaines de kilomètres de diamètres et quelques centaines de mètres de haut parsèment ce plateau volcanique, dont la surface oscille entre 6 000 et 8 000 m d'altitude. L'unité géologique constituée par Syria Planum, Solis Planum et Thaumasia Planum pourrait être vue comme une ébauche de plaque lithosphérique, soulevée et déplacée vers le sud en formant, au sud, un début de convergence au niveau de Claritas Fossae, Coracis Fossae et Nectaris Fossae, tandis qu'au nord apparaissait un énorme rift long de 4 000 km au niveau de Noctis Labyrinthus et, surtout, de Valles Marineris, dont l'origine tectonique par l'étirement nord-sud de l'écorce martienne avait été pressentie dès la fin des années 1970 par l'analyse des images retransmises par Viking 1 Orbiter. Valles Marineris est un fossé d'effondrement élargi par l'érosion jusqu'à atteindre par endroits une largeur de 600 km et une profondeur de 10 km. L'érosion en question serait d'origine largement hydrologique, comme en témoigne la présence de sulfates hydratés, dont l'épaisseur des dépôts forme parfois de véritables montagnes, et de vallées dendritiques témoignant de l'existence passée d'un réseau de cours d'eau permanent et durable.

De surcroît, l'étude détaillée des clichés pris par les nombreuses sondes qui, en orbite, ont observé ces canyons, a révélé des formations rocheuses interprétées comme des traces d'activité fluviale très prolongée et l'analyse par Mars Global Surveyor des anomalies gravitationnelles au-dessus de cette région a montré que la signature de Valles Marineris s'étend jusque dans le bassin de Chryse Planitia, ce qui donne une idée de la quantité de matériaux charriés hors de ces canyons par l'érosion fluviale continue sur une période de temps suffisamment longue. Si les traces de volcanisme et d'activité fluviale sont patentes dans Valles Marineris, les parois de ces canyons ont surtout été altérés, à l'Amazonien, par l'érosion éolienne et les glissements de terrain, souvent de très grande ampleur; mais ces altérations révèlent à leur tour les traces d'anciens écoulements souterrains le long des failles ainsi mises à nu. Incidemment, l'estimation de la fréquence des glissements de terrain le long des parois de Valles Marineris a conduit à proposer une réduction d'un facteur 3 de la fréquence d'impact météoritique sur les surfaces martiennes depuis 3 milliards d'années, contrairement aux modèles usuels qui tablent plutôt sur un taux de cratérisation constant, lequel aurait pour conséquence l'observation d'une augmentation difficilement explicable de la fréquence des glissements de terrain. La nature des terrains formant le fond des canyons n'est toujours pas très bien comprise, notamment quant à la part entre origine volcanique et origine sédimentaire. Le volcanisme serait *a priori* plus significatif à l'ouest des canyons, à proximité de Syria Planum, et les terrains sombres qualifiés de « dépôts intérieurs stratifiés » situés dans la région de Tithonium Chasma seraient volcaniques.



Mosaïque globale de 102 images prises par l'orbiteur Viking 1 prises le 22 février 1980. Ces représentent ce qu'un observateur verrait d'un engin spatial à une altitude de 2 500 km. Au centre, Valles Marineris, plus de 3 000 km de long et jusqu'à 8 km de profondeur. Notez les canaux courant vers le nord depuis les portions au centre et à l'est de Valles Marineris vers la zone sombre, Acidalic Planitia, en haut à droite. A gauche se trouvent les trois volcans Tharsis et au sud se situe un sol ancien fortement impacté



Topographie de Valles Marineris

d) Elysium Planitia et autres volcans ... mais peut-être pingos

La seconde région volcanique de Mars est très différente de celle de Tharsis. Bien plus petite, elle est aussi nettement plus récente, avec de nombreux terrains formés semble-t-il il y a moins de cent millions d'années, certaines coulées de lave étant quant à elles datées, à partir de leur taux de cratérisation, de moins de dix millions d'années. L'une des particularités de cette région est de présenter divers modes d'interaction de la lave avec des terrains chargés de glace. Les clichés des sondes satellisées autour de Mars montrent par ailleurs un certain nombre de petits cônes surmontés d'un cratère, par exemple près du pôle nord, qui pourraient être des volcans, mais il est également possible que ce type de structure s'apparente davantage à des pingos, comme ceux d'Utopia Planitia, qui n'ont rien de volcanique mais sont, sur Terre, typiques des climats polaires, où ils résultent de la dilatation cumulative de l'eau du pergélisol lorsqu'elle fond et gèle alternativement au gré des saisons.

*NB : Un **pingo** est une colline de glace recouverte de terre et qui se rencontre dans les régions arctiques, subarctiques et antarctiques. « Pingo » est un mot inuit désignant une petite colline en forme de cône.*

e) Dykes

Le fond de certains cratères de Syrtis Major Planum montre des arêtes allongées disposées de façon ordonnée, ce qui suggère fortement qu'on soit en présence de dykes. Ces structures se forment notamment dans les terrains traversés de failles provoquées notamment par les impacts météoritiques, et résultent de la plus grande résistance à l'érosion des roches magmatiques coulées dans ces failles, constituées de matériaux plus fragiles et qui finissent par disparaître en laissant une lame basaltique ayant l'apparence d'un mur ou d'une digue (d'où le nom de ce type de structures). Un dyke peut également se former par cimentation de brèches sous l'effet d'un cours d'eau qui s'insinue dans les failles, aboutissant là encore à durcir le matériau de comblement, qui subsistera seul une fois l'érosion ayant fait son œuvre sur l'encaissant moins résistant.

La région de Huo Hsing Vallis est particulièrement intéressante à cet égard, car elle présente des dykes assez évidents dans sa partie méridionale. Sur Terre, les dykes sont fréquemment associés à des gisements de minerais importants, ce qui justifie pleinement l'intérêt qu'on peut porter à ces structures sur Mars. *NB : Un **dyke** ou **dike** est un filon de roche magmatique qui s'est infiltré dans une fracturation de l'encaissant. De ce fait, un dyke recoupe les autres roches qu'il traverse (à la différence d'un sill). Le dyke est un phénomène intrusif dans une fissure d'ouverture transversale. Selon les principes de la stratigraphie, son âge est donc toujours plus jeune que celui des roches encaissantes. Le terme provient de l'anglais dyke (à rapprocher du néerlandais dijk, qui a donné le mot français « digue »), se référant à la barre rocheuse constituée lorsque le dyke se trouve en position proche de la verticale. À la faveur d'une érosion différentielle, un dyke peut en effet se retrouver isolé de son encaissant et former un mur.*

f) Datation du volcanisme martien

La superficie et la masse de la planète Mars étant respectivement 3,5 et 10 fois moindres que celles de la Terre, cette planète s'est refroidie plus rapidement que la nôtre et son activité interne s'est donc réduite également plus vite : alors que le volcanisme et, plus généralement, la tectonique (orogénèse, séismes, tectonique des plaques, etc.) sont encore très actifs sur Terre, ils ne semblent plus être notables sur Mars, où aucune tectonique des plaques, même passée, n'a jamais pu être mise en évidence. Le volcanisme martien paraît également avoir cessé d'être actif, bien que l'âge semble-t-il très récent de certaines coulées de lave suggère, pour certains volcans, une activité actuellement certes très réduite, mais peut-être pas rigoureusement nulle, d'autant que Mars, contrairement à la Lune, n'a pas fini de se refroidir, et que son intérieur, loin d'être entièrement figé, contient en réalité un noyau peut-être entièrement liquide. D'une manière générale, l'analyse des données recueillies par Mars Express a conduit une équipe de planétologues de l'ESA dirigée par l'Allemand Gerhard Neukum à proposer une séquence en cinq épisodes volcaniques :

- épisode volcanique majeur de l'Hespérien il y a environ 3,5 milliards d'années,
- regain de volcanisme il y a environ 1,5 milliards d'années, puis entre 800 et 400 millions d'années avant le présent,
- épisodes volcaniques récents d'intensité rapidement décroissante il y a environ 200 et 100 millions d'années.

Ces datations reposent sur l'évaluation du taux de cratérisation des coulées de lave correspondantes, qui semble recoupée par les observations indirectes sur le moyen terme mais contredites par les observations directes à court terme déduites de la fréquence des impacts récents observés sur plus de dix ans par les sondes satellisées autour de Mars, la principale difficulté de ce type de datation étant d'évaluer les biais statistiques introduits par la différence notable d'ordres de grandeur entre les surfaces anciennes (âgées de plus 2 milliards d'années), qui représentent une fraction importante de la surface de Mars, et les surfaces les plus récentes (âgées de moins de 200 millions d'années), qui sont comparativement extrêmement réduites.

Par ailleurs, si la fréquence des impacts récents relevée par les sondes satellisées autour de Mars semble suggérer un taux de cratérisation plus élevé que celui habituellement retenu pour dater les formations martiennes (ce qui conduirait à devoir « rajeunir » toutes ces datations), il semblerait plutôt que, sur le long terme, ce taux de cratérisation ait au contraire été divisé par trois depuis 3 milliards d'années, ce qui tendrait à « vieillir » les datations martiennes, et ce d'autant plus qu'elles sont relatives à des phénomènes récents. Le tableau ci-dessous présente une synthèse synoptique des principaux volcans martiens et de la datation de leur formation lorsqu'elle a pu être déterminée à l'aide du taux de cratérisation relevé sur leurs différentes surfaces; ces dates, lorsqu'elles sont estimées, se rapportent aux plus anciens terrains identifiés à la surface de chacun des volcans, ceux-ci s'étant nécessairement formés plus tôt, de sorte qu'il ne peut s'agir que d'une borne inférieure à l'âge de ces volcans — ce que traduit le signe « $\geq$ » :

Volcan	Type	Coordonnées	Altitude	Âge	Localisation
Alba Mons	Bouclier	40,5° N et	~	>	Marge nord-ouest du renflement de
Uranus	Tholus	26,1° N et	~	>	Groupe d'Uranus, nord du renflement de Tharsis.
Ceraunius	Tholus	24,0° N et	~	>	
Uranus	Patera	26,0° N et	~	>	
Olympus	Bouclier	18,4° N et	21 229 m	>	Point culminant de Mars, ouest du
Tharsis	Tholus	13,4° N et	~	>	Volcan isolé au centre du renflement

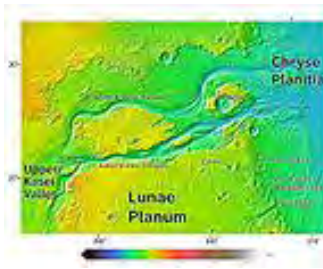
Jovis Tholus	Tholus	18,2° N et	~	>	Nord-ouest du renflement de Tharsis.
Ulysses	Tholus	2,9° N et 239,4°	~	>	Ouest du renflement de Tharsis.
Biblis Tholus	Tholus	2,7° N et 235,4°	~	>	
Ascræus	Bouclier	11,8° N et	18 225 m	>	
Pavonis Mons	Bouclier	0,8° N et 246,6°	14 058 m	>	Tharsis Montes, centre du renflement de Tharsis.
Arsia Mons	Bouclier	8,4° S et 238,9°	17 761 m	>	
Apollinaris	Stratovolcan	9,3° S et 174,4°	~	>	
Elysium	Gris	24,8° N et	14 028 m	>	Groupe principal au nord-ouest d'Elysium Planitia.
Hecates	Gris	32,1° N et	~	>	
Albor Tholus	Gris	18,8° N et	~	>	
Syrtis Major	Fissure	7,9° N et 67,9°	~	>	Plateau de Syrtis Major Planum.
Tyrrhena	Fissure	21,1° S et	~	>	Centre ouest d'Hesperia Planum.
Hadriacus	Bouclier	32,1° S et 91,8°	~ -250 m	>	Aux confins d'Hellas Planitia et
Amphitrites	Bouclier	58,7° S et 60,9°	~	>	Malea Planum, au sud-ouest d'Hellas Planitia.
Peneus Patera	Bouclier	57,8° S et 52,5°	~ n. d.		
Malea Patera	Bouclier	63,4° S et	~ 0 m n. d.		
Pityusa Patera	Bouclier	66,8° S et	~ n. d.		

Identification et âge des principaux volcans martiens

4) Formations vraisemblablement d'origine hydrologique

Les images de la surface martienne transmises dès les années 1970 par les sondes Viking en orbite autour de la planète rouge ont révélé l'omniprésence des formations géologiques résultant semble-t-il de l'action, parfois prolongée, de grandes quantités d'un liquide alors encore impossible à préciser, H₂O ou CO₂ selon les principales hypothèses formulées à l'époque, connues respectivement sous le nom « *Blue Mars* » et « *White Mars*, » ce dernier modèle, fondé sur le CO₂, défendu notamment par l'astronome australien Nick Hoffman, de l'université de Melbourne; ce n'est qu'avec la caractérisation *in situ* de jarosite (minéral se formant en milieux aqueux) par le rover américain Opportunity en 2004, ainsi que de phyllosilicates (altération aqueuse de roches ignées) et de kiesérite (minéral hydraté) par la sonde européenne Mars Express en 2005, que la nature de ce liquide a pu être formellement identifiée comme étant de l'eau, identification qui avait fait l'objet de réfutations minoritaires jusqu'au début des années 2000. Si les vallées fluviales elles-mêmes sont bien dessinées et bien évidentes à la surface de Mars, il manque en revanche toutes les structures de plus petites dimensions susceptibles d'indiquer l'origine de ces écoulements, malgré la très haute résolution des vues prises récemment par des sondes telles que Mars Global Surveyor avec l'instrument HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*). Cela pourrait signifier que ces vallées sont des structures très anciennes révélées par l'érosion partielle des sols, lesquels dissimuleraient par conséquent les traces de sources et des torrents à l'origine de ces cours d'eau. Les vallées sont en effet souvent discontinues, avec des segments invisibles sous ce qui semble être une région de terrains plus récents et moins érodés. Une autre hypothèse est qu'elles proviendraient de l'écoulement plus récent d'eau fondue du pergélisol, ce qui expliquerait pourquoi de nombreux « cours d'eau » martiens semblent se terminer par une cavité en hémicycle.

Clichés de la sonde Viking orbiter illustrant la possible action passée d'eau liquide à la surface de Mars



Carte topographique de la région de Kasei Valles, Bahram Vallis, Veda Vallis, Maumee Vallis et Maja Vallis, par 24,4° N et 295° E où ont été pris plusieurs clichés qui suivent



« Îles » profilées par le courant de Maja Vallis, dans le quadrangle de Lunae Palus



« Îles » en forme de larmes formées par les éjectas des cratères Lod, Bok et Gold à « l'embouchure » d'Ares Vallis dans Chryse Planitia, par 21° N et 329° E



Traces d'écoulements liquides dans la région occidentale de Chryse Planitia à l'embouchure de Maja Vallis, par 21° N et 311° E; l'image suivante détaille les environs du cratère Dromore



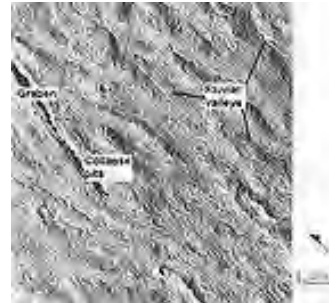
Érosion a priori d'origine hydrologique autour du cratère Dromore, par 19,9° N et 310,3° E



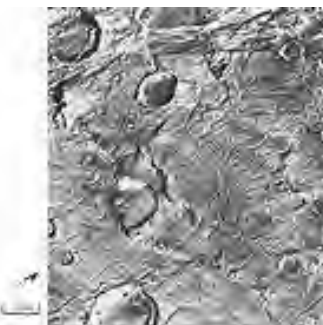
Écoulements à travers Veda Vallis, Maumee Vallis et Maja Vallis en direction de Chryse Planitia



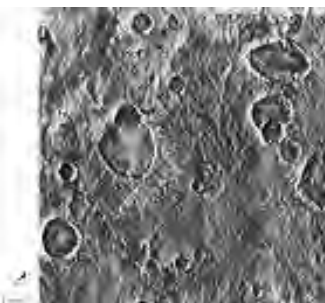
Écoulements des éjectas du cratère Arandas autour de cratères plus petits par 43° N et 346° E, marqués par de fines flèches blanches (assez peu visibles sur ce cliché ancien)



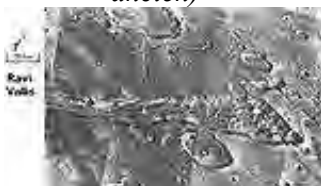
Chenaux sur les flancs d'Alba Mons, la plupart imputables à des écoulements de lave mais certains semblant davantage relever d'une érosion pluvieuse



Systèmes de vallées dentritiques observés dans le quadrangle de Thaumasia, un type de structure dont l'origine est généralement pluvieuse



Vallées arborescentes dans le quadrangle de Margaritifer Sinus



Ravi Vallis, dans le quadrangle de Margaritifer Sinus

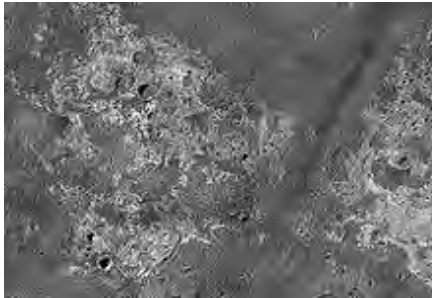


Vallées dans la région de Warrego Vallis

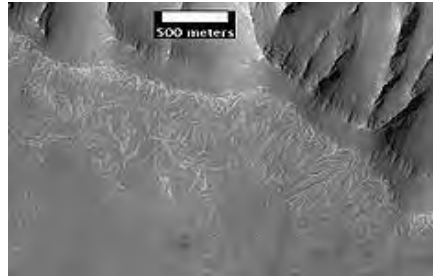
a) Ravines

Les clichés à haute résolution ont également mis en évidence la présence de plusieurs centaines de ravines (appelées *gullies* par les Anglo-saxons) sur les parois de nombreux cratères et canyons des terrains noachiens de l'hémisphère sud, le plus souvent face à l'équateur et jusqu'à une latitude d'environ 30° S; ces structures ne semblent pas particulièrement érodées et ne présentent pas non plus de traces d'impact postérieures à leur formation, ce qui indiquerait leur apparition récente.

Clichés de l'instrument HiRISE de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter



Vallées arborescentes du plateau de Candor dans le quadrangle de Coprates, qui sont de forts indicateurs d'un climat durablement pluvieux



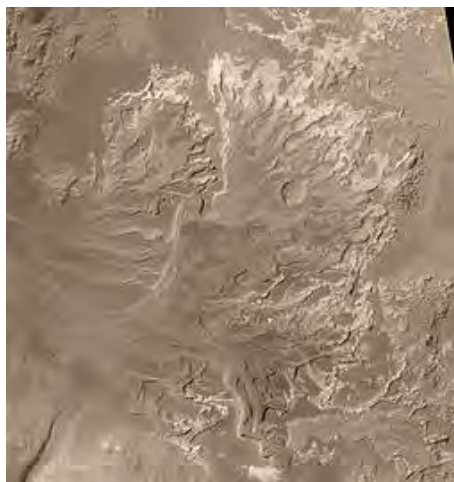
Région d'Ius Chasma dans le quadrangle de Coprates, dont les chenaux ont une densité et une organisation suggérant fortement leur formation à partir de précipitations pluvieuses



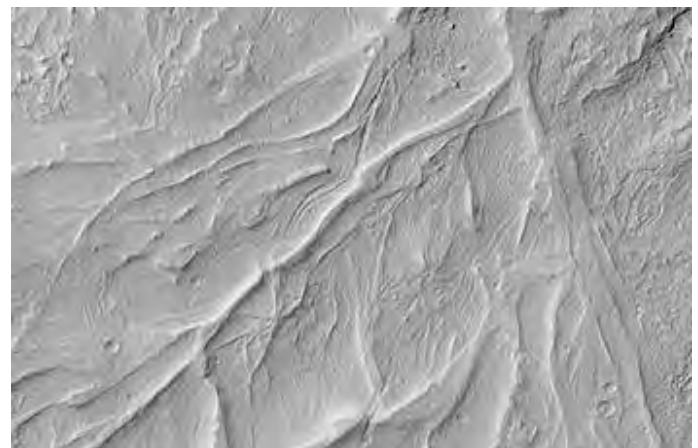
Ravines dans la région de Sirenum Fossae, par 38,9° S et 195,9° E

b) Deltas argileux et vallées au relief inversé

L'un des types de formations géologiques les plus remarquables concernant la présence passée de cours d'eau à la surface de Mars sont les vallées au relief inversé, qui résultent de l'érosion éolienne des terrains environnant un ancien lit de cours d'eau, ce dernier devenant saillant car moins facilement érodé en raison de l'action durcissante, par cimentation, de l'eau qui s'écoulait jadis à cet endroit : les minéraux dissous dans l'eau précipitent entre les interstices de la couche sédimentaire sous-jacente, qui s'en trouve durcie par rapport aux terrains environnants. On voit ainsi apparaître, sous l'effet d'une érosion éolienne uniforme, des vallées en négatif, saillantes au lieu d'être en creux, comme c'est par exemple le cas au niveau du cratère Miyamoto, dans la région de Meridiani Planum. Des formations géologiques spectaculaires et très explicites, telles que des deltas, comme par exemple ceux du cratère Jezero par 18,9° N et 77,5° E ou du cratère Eberswalde (auparavant appelé « *cratère Holden NE* ») par 24,3° S et 326,5° E, ont également été observés, respectivement par l'instrument CRISM de Mars Reconnaissance Orbiter et la MOC de Mars Global Surveyor. Outre ces formations elles-mêmes, qui sont, sans ambiguïté, liées à une activité hydrologique passée, de nombreux minéraux typiquement associés aux milieux humides y ont été identifiés, notamment des phyllosilicates (voir plus loin).



Delta argileux en relief inversé observé le 13 novembre 2003 par la MOC de MGS près du cratère Eberswalde par 24,3° S et 326,5° E



Crêtes sinueuses dans la région de Medusae Fossae, au sud d'Amazonis Planitia, illustrant les reliefs inversés révélant d'anciens lits de cours d'eau durcis par cimentation, vues par MRO le 8 avril 2008

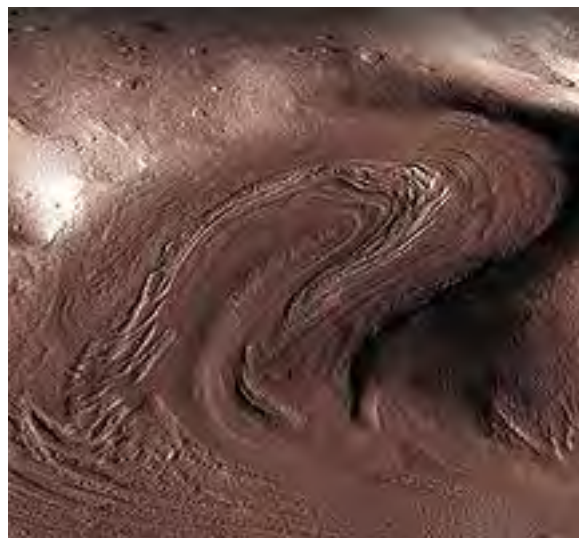
5) Glaciers, lacs gelés et fragments de banquise

Mars étant une planète froide depuis trois ou quatre milliards d'années qui semble avoir possédé une hydrosphère significative il y a également trois ou quatre milliards d'années, il ne paraît pas surprenant d'y trouver de nombreuses formations évoquant l'action passée ou présente de glaciers. Certaines formations en forme de langue sont assez typiques (voir ci-dessous), tandis que des régions entières paraissent avoir été marquées par la glace, notamment Deuteronilus Mensae, qui serait particulièrement riche en glace sous seulement quelques mètres de rochers. Les glaciers martiens semblent souvent associés aux terrains irréguliers, aux cratères d'impact et aux volcans; on en a notamment décrit sur Hecates Tholus, Arsia Mons, Pavonis Mons et Olympus Mons.

Formations géologiques martiennes évoquant des glaciers



Glacier en forme de langue par 31,41° S et 112,65° E dans la région d'Hellas Planitia



Dépôt lobé à la frontière matérialisant la dichotomie crustale martienne

L'ESA a publié en été 2005 des clichés (alors assez médiatisés) pris par l'instrument HRSC de la sonde Mars Express montrant un cratère anonyme de 35 km de diamètre et 2 km de profondeur, situé par 70,5° N et 103° E dans la grande plaine boréale de Vastitas Borealis, dont le fond est partiellement recouvert de glace d'eau sur un champ de dunes sombres émergeant à la périphérie de la glace. Plus spectaculaire encore, des formations évoquant assez distinctement la surface « fossilisée » d'une mer couverte de fragments de banquise disloquée ont été identifiées la même années par la même sonde dans l'est de la région d'Elysium Planitia, par environ 5° N et 150° E couvrant une surface voisine de celle de la mer du Nord (800 × 900 km² pour 45 m de profondeur) et datée d'environ 5 millions d'années.

6) Formations de Medusæ Fossæ

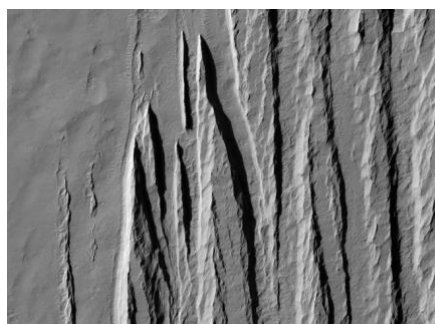
Une vaste région martienne, longeant par le nord la frontière géologique matérialisant la dichotomie crustale au sud d'Amazonis Planitia entre les deux régions volcaniques d'Elysium Planitia et du renflement de Tharsis, est caractérisée par des formations atypiques se présentant comme des massifs lobés à la surface ondulée, géologiquement très jeunes au vu de la quasi absence de cratères à leur surface (mais d'origine sans doute bien plus ancienne, remontant probablement à l'Hespérien), et qui recouvrent parfois clairement des topographies plus anciennes : Lucus Planum par 4° S et 182° E, Eumenides Dorsum par 4,4° N et 203,5° E, Amazonis Mensa par 2° S et 212,5° E, et Gordii Dorsum par 4,4° N et 215,9° E; plus à l'ouest, Aeolis Planum par 0,8° S et 145° E, et Zephyria Planum par 1° S et 153,1° E, au sud d'Elysium Planitia, sont également intégrés à cet ensemble. La plus emblématique et la moins bien comprise de ces formations est celle entourant Medusæ Fossæ, située par 3,2° S et 197° E, au sud-ouest d'Eumenides Dorsum, dans le quart nord-est du quadrangle de Memnonia (cf. quadrangle MC-16 de l'USGS). Ce matériau particulier présente une texture meuble et une fragilité à l'érosion éolienne bien mises en évidence à travers ses yardangs vus par l'imageur thermique THEMIS de la sonde 2001 Mars Odyssey, et page suivante par HiRISE.

*NB : Un **yardang** est une crête rocheuse créée par l'érosion éolienne dans un milieu désertique. Les yardangs sont généralement de forme allongée, au moins trois fois plus longs que larges; vus de dessus, ils ressemblent à la coque d'un bateau. Le côté exposé au vent est abrupt et escarpé et la structure devient de plus en plus basse et étroite à mesure que l'on s'éloigne du vent.*

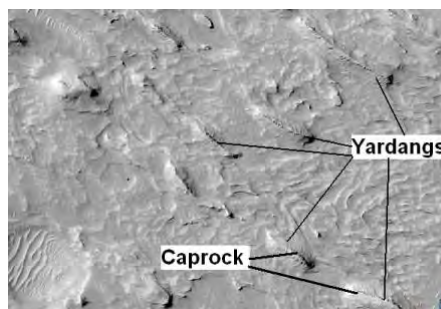
La sonde européenne Mars Express et sa caméra HRSC ont également fourni des clichés détaillés de cette région.

Mars Express a permis l'étude intensive de la formation de Medusae Fossae à l'aide de son radar MARSIS, sous la responsabilité de l'Italien Giovanni Picardi. Ces études ont montré qu'il s'agit de dépôts atteignant par endroits 2,5 km d'épaisseur, dont les propriétés électriques sont compatibles à la fois avec une nature poreuse (dépôts de cendres volcaniques d'origine éolienne) et une nature aqueuse (glace d'eau chargée de poussières, comme dans la calotte polaire australe résiduelle), les données alors recueillies ne permettant pas de trancher entre ces deux possibilités. Des analyses récentes ont montré que ces dépôts se sont peut-être étendus au-delà de la frontière géologique marquant la dichotomie crustale, comme pourraient le laisser penser des formations interprétées comme des restes de dépôts similaires sur les hautes terres au sud de Medusae Fossae. L'instrument SHARAD de Mars Reconnaissance Orbiter, précisément conçu pour analyser les échos radar superficiels, avait par ailleurs permis de déterminer que la structure des couches de dépôts constituant la formation de Medusae Fossae diffère de celle des calottes polaires, dans la mesure où aucune stratification particulière n'a pu être mise en évidence à partir des données recueillies par cet instrument, et ce malgré le fait qu'une stratification des terrains correspondants par couches de quelques dizaines de mètres d'épaisseur soit décelable dans l'infrarouge et la lumière visible; a contrario, la calotte australe résiduelle montre quant à elle une stratification parfaitement détectable par SHARAD.

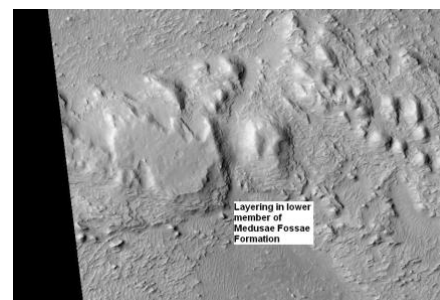
Yardangs de la formation de Medusae Fossae vus par l'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter



Vue de la formation de Medusae Fossae le 2 août 2008 par l'instrument HiRISE de MRO, dans le quadrangle d'Aeolis par 10,2° S et 176,4° E



Vue de la formation de Medusae Fossae le 30 septembre 2006 par l'instrument HiRISE de MRO, dans le quadrangle d'Elysium par 0,5° N et 142,1° E



Strates de la formation de Medusae Fossae vues le 9 janvier 2008 par l'instrument HiRISE de MRO, dans le quadrangle d'Aeolis par 2,1° S et 148,8° E

7) Calottes polaires

Mars possède une calotte polaire à chaque pôle, ces calottes ayant chacune une dynamique particulière en raison de la dissymétrie des saisons sur Mars : l'hiver austral est bien plus long et plus froid que l'hiver boréal, tandis que l'été austral est plus chaud que celui de l'hémisphère nord. Il s'ensuit que la température des pôles martiens varie différemment au cours de l'année au pôle nord et au pôle sud, avec un minimum comparable de -120 °C au nord et -130 °C au sud, mais un maximum de -100 °C au nord et de -50 °C au sud : c'est ce qui explique que la calotte résiduelle boréale ait environ 1 000 km de diamètre, soit deux à trois fois moins que son extension maximum, tandis que la calotte résiduelle australe n'a qu'environ 300 km de diamètre. Contrairement à celles de la Terre, les calottes polaires martiennes sont constituées, en surface, essentiellement de glace de dioxyde de carbone et d'une fraction de glace d'eau. Elles atteignent des épaisseurs considérables, la calotte australe ayant été mesurée par l'instrument italo-américain MARSIS de la sonde européenne Mars Express comme ayant une épaisseur atteignant 3,7 km. L'instrument OMEGA, également embarqué à bord de cette sonde, avait permis d'estimer à 15 % la teneur globale en eau de la

glace polaire australe, les 85 % restants étant constitués de CO₂ gelé. Mais l'épaisseur de la calotte semble au contraire constituée de dépôts de poussières mêlés de glace d'eau en proportions variables selon les couches successives. Ceci représente finalement des quantités d'eau considérables, dont on a calculé qu'elles permettraient de recouvrir toute la surface de Mars sur une épaisseur de 11 m.

La calotte polaire australe a été particulièrement étudiée par les sondes en orbite autour de la planète rouge, ce qui permet d'en dresser un portrait assez complet :

- La calotte résiduelle australe est constituée en surface d'une couche assez fine de glace carbonique relativement pure, ne dépassant pas quelques dizaines de mètres d'épaisseur. Cette calotte résiduelle présente une surface en « gruyère, » constituée de trous dans la couche de glace. En automne, elle se recouvre d'une fine couche de glace carbonique très pure de quelques mètres d'épaisseur, qui disparaît au printemps en laissant apparaître à nouveau les mêmes trous aux mêmes endroits. Les variations à la surface de la calotte résiduelle sont infimes d'une année sur l'autre, mais semblent montrer une sublimation progressive de la calotte résiduelle australe.
- Sous la couche superficielle de glace carbonique de la calotte résiduelle australe se trouve un matériau *a priori* riche en glace d'eau qui forme l'essentiel du volume de la calotte elle-même. Ce matériau peut être vu en tranches à la faveur des chasmata qui l'entaillent, montrant alors une structure stratifiée, en couches alternativement claires et sombres, semblable à celle de la calotte nord. Ces différentes strates de matériaux persistent sur de grandes distances et semblent résulter de la superposition de couches formées lors de conditions climatiques globalement très distinctes les unes des autres, ce qui n'est pas sans rappeler l'effet observé sur Terre des cycles de Milankovitch. Mars Global Surveyor a ainsi observé plusieurs discontinuités dans les strates polaires, ce qui témoignerait de l'érosion éolienne survenue pendant l'interruption des processus conduisant aux dépôts stratifiés, lesquels ont pu reprendre après que l'érosion eut modifié les surfaces précédemment déposées.
- La calotte hivernale australe, plus épaisse que celle de l'hémisphère nord, est constituée d'un ou deux mètres de glace carbonique très pure, au point d'être quasiment transparente et de laisser voir la couleur du sol en surplomb. Cette croûte de glace, qui s'étend jusqu'à des latitudes de seulement 55° S et dépasse donc 3 000 km de diamètre, est craquelée en surface pour donner un aspect en peau de lézard, parcourue de sillons d'environ 50 cm à 1,50 m de profondeur et 6 m de large, formant des motifs en étoile dits « en araignée » (voir plus loin dans l'article) ainsi que des structures dites « en éventail » assimilées à des geysers de CO₂ chargés de poussières dont on voit la marque des panaches sur le sol sous forme de traînées sombres plus ou moins divergentes selon la stabilité des vents dominants.

a) Excentricité de la calotte résiduelle australe

Par ailleurs, la compréhension du régime des vents aux latitudes tempérées de Mars, et notamment l'effet du bassin d'impact d'Hellas Planitia sur la circulation atmosphérique aux latitudes moyennes australes, a permis d'expliquer pourquoi la calotte résiduelle australe est décalée, lorsqu'elle est réduite à sa plus faible extension à la fin de l'été, de 3° sur le méridien 315° E : ce bassin vaste et profond stabilise un puissant système dépressionnaire à l'ouest du pôle sud, dans la région d'Argentea Planum jusqu'au-dessus de la calotte australe résiduelle, et un anticyclone à l'est du pôle sud, vers Hellas Planitia et Promethei Planum; les conditions de l'atmosphère martienne dans le système dépressionnaire occidental sont réunies près du pôle sud pour déclencher des chutes de neige carbonique, tandis que les conditions anticycloniques ne permettent jamais de telles chutes de neige et n'autorise le dépôt de glace carbonique au sol que par condensation sous forme de givre.

b) Geysers, points noirs et « araignées »

Les régions polaires martiennes présentent des manifestations géologiques inattendues : outre les traînées noires sur terrains en pente, diverses structures telles que les points noirs sur les dunes, souvent associés à des motifs dits « en araignée, » sont typiques de la « zone cryptique, » située environ entre 60° et 80° de latitude sud et 50° et 210° de longitude est; ces structures particulières correspondraient à des manifestations de type geyser résultant de la sublimation de dioxyde de carbone dans le sous-sol. Les points noirs ont typiquement entre de 15 et 45 m de large et sont espacés de quelques centaines de mètres. Ils apparaissent

au printemps au voisinage des calottes polaires, notamment celle de l'hémisphère sud qui se restreint bien davantage que celle de l'hémisphère nord pendant l'été, et demeurent visibles pendant quelques mois avant de s'évanouir avant l'automne; ils ne réapparaissent qu'au printemps suivant, parfois au même endroit. Ces points noirs sont souvent associés à des structures « en araignée, » qui semblent résulter de l'affaissement convergent du sol après sublimation d'une couche de CO₂ gelé sous une couche superficielle de poussières. La pression du CO₂ gazeux peut être suffisante pour provoquer un jet propulsé à plus de 160 km/h, emportant des poussières issues d'en dessous de la surface du sol, qui sont souvent plus sombres que celles des couches superficielles, ce qui expliquerait les structures observées au sol dans ces régions particulières du pôle sud de Mars.

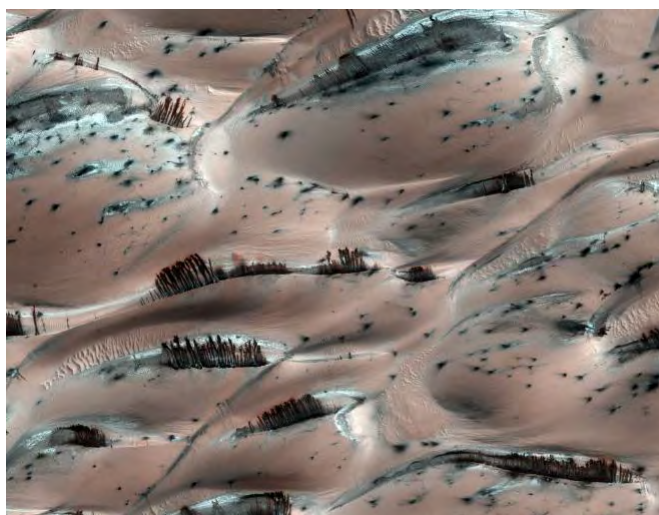
8) Traînées noires sur terrains en pente

L'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter a révélé l'existence insoupçonnée de traînées noires matérialisant les lignes de plus grande pente sur les bords de nombreux cratères ainsi que sur divers terrains en pente. Appelées *dark slope streaks* en anglais, ce sont des formations assez fines qui peuvent néanmoins atteindre plusieurs centaines de mètres de long. Ces traînées s'allongent lentement au fil du temps, toujours en partant d'une source ponctuelle. Celles qui viennent de se former sont très sombres, et pâlisent au fur et à mesure qu'elles vieillissent; leur durée de vie est de quelques dizaines de mois. L'origine de ces formations demeure incertaine; l'hypothèse généralement retenue en fait des écoulements de sable plus sombre issu des couches plus profondes des terrains sur lesquels elles sont observées, tandis que certains auteurs les attribuent à des écoulements de saumures provenant de la fonte partielle du pergélisol.

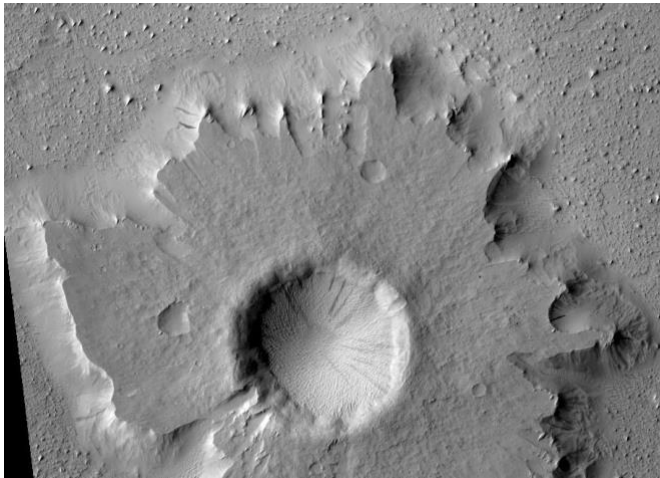


Traînées noires photographiées le 3 décembre 2006 par l'instrument HiRISE de MRO dans la région d'Acheron Fossae, par 37,3° N et 229,1° E.

On observe nettement sur cette image l'éclaircissement progressif de ces traînées, qui deviennent plus claires que la surface environnante. La nature exacte des phénomènes en cause n'est pas connue



Lorsqu'elles prennent naissance sur la crête des dunes martiennes, les traînées noires donnent l'illusion, à faible résolution, de rangées d'arbres éparses au milieu de buissons. La région photographiée ici montre des traînées noires s'écoulant vers le haut de l'image, parmi des points noirs (voir paragraphe précédent); elle se trouve au nord d'Utopia Planitia, en lisière de la calotte polaire boréale, par 83,5° N et 118,6° E. Le sol paraît rosé et localement blanc en raison d'une couche de givre de dioxyde de carbone. La définition de cette image permet d'observer des détails de 25 cm au premier plan

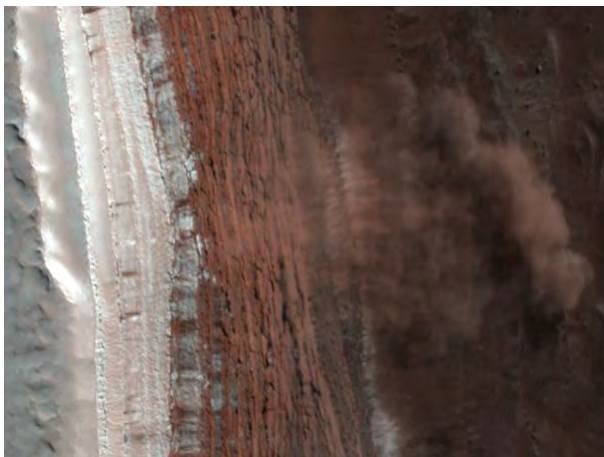


Cratère à piédestal présentant des traînées sombres au sud-ouest d'Amazonis Planitia, par 7,3° N et 195,4° E

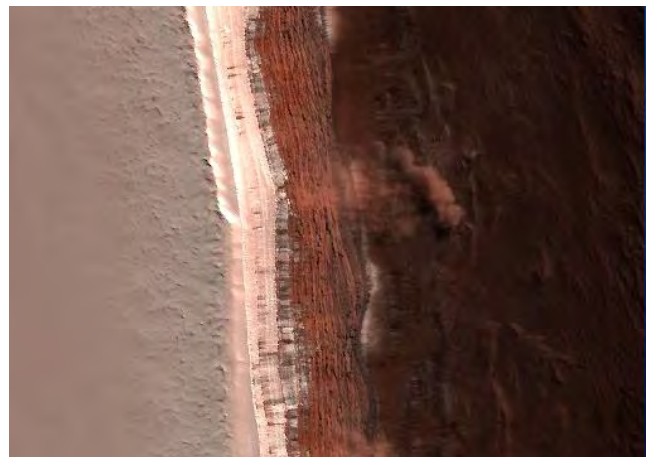


Ravines inhabituelles sur le bord du cratère Newton, par 40,5° S et 201,9° E dans la région de Terra Sirenum, vues par la MOC de MGS le 7 octobre 2002

9) Avalanches et glissements de terrain



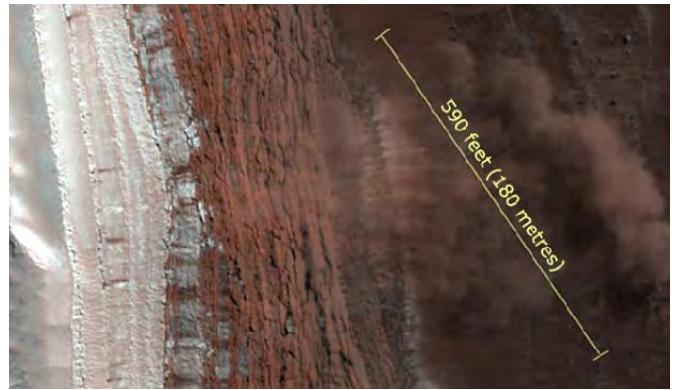
Glissement de terrain observé par l'instrument HiRISE de MRO le 19 février 2008¹⁵⁸. La glace d'eau est bien visible au sommet de la falaise sous forme d'une couche blanche. C'est une partie de ce matériau qui a glissé en contrebas, formant une « avalanche » à l'origine de volutes de poussières et de cristaux de glace mêlés suffisamment épais pour projeter leur ombre en dessous d'elles. Le soleil éclaire la scène depuis l'angle supérieur droit



Autre vue du phénomène, plus large que l'image précédente



Nuage de poussières soulevé par le glissement de terrain



L'échelle permet d'estimer la largeur du glissement de terrain

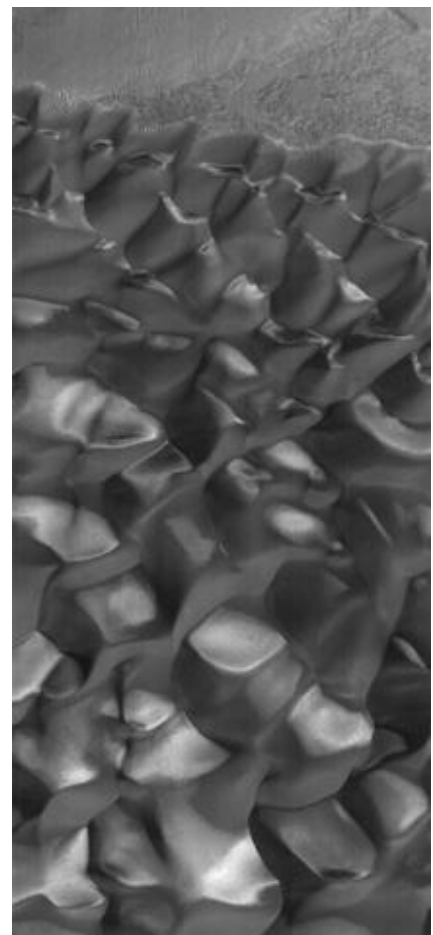
L'instrument HiRISE de la sonde MRO a immortalisé, le 19 février 2008, un glissement de terrain de grande ampleur sur une falaise d'environ 700 m de haut, rendu notamment visible par le nuage de poussières qui s'est élevé au-dessus de la région à la suite de ce phénomène.

10) Dunes

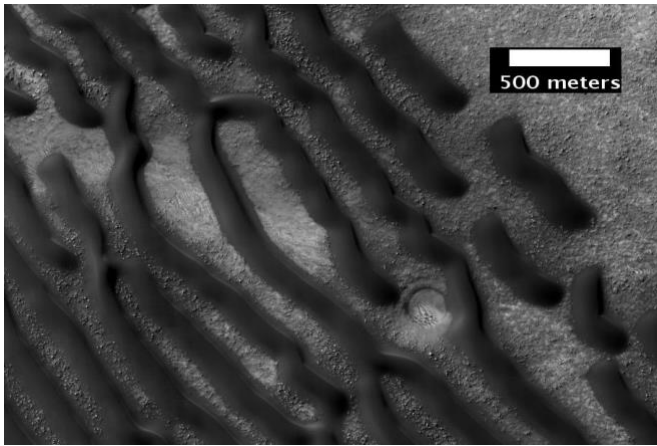
La poussière martienne, dont les grains ont au plus quelques micromètres de diamètre, est bien plus fine que le sable (qui correspond à une granulométrie de 50 μm à 2 mm) mais peut néanmoins conduire à des formations semblables à celles rencontrées sur Terre dans les déserts de sable, telles que des barkhanes et des champs de dunes.



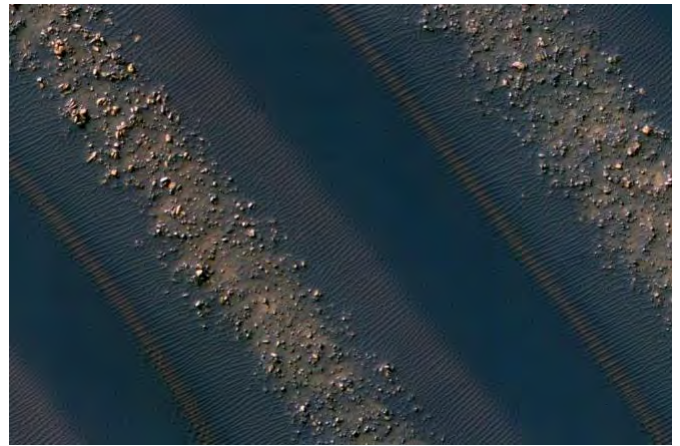
*Barkhanes de la région de Noachis Terra,
par 41,4° S et 44,6° E*



*Dunes sombres, vraisemblablement
basaltiques,
vues par la MOC de MGS*



Champ de dunes vu par l'instrument HiRISE de MRO par 42,7° S et 38,0° E

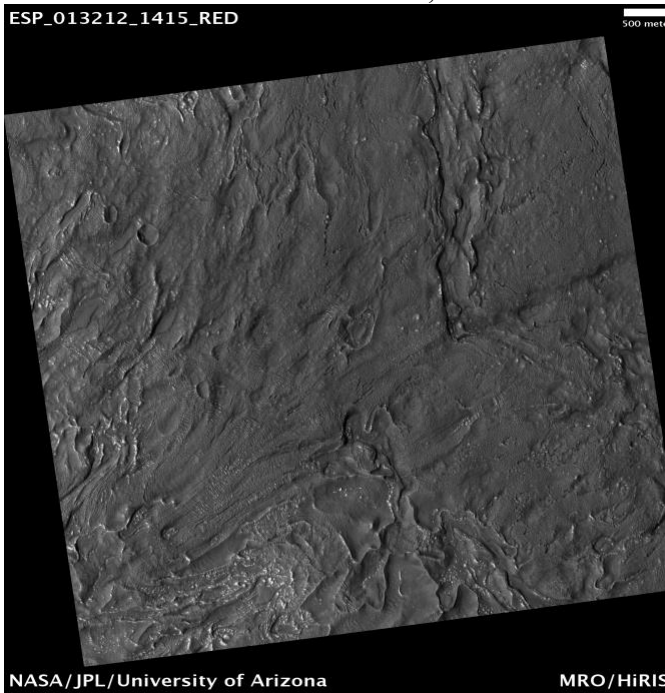


Gros plan sur le champ de dunes précédent

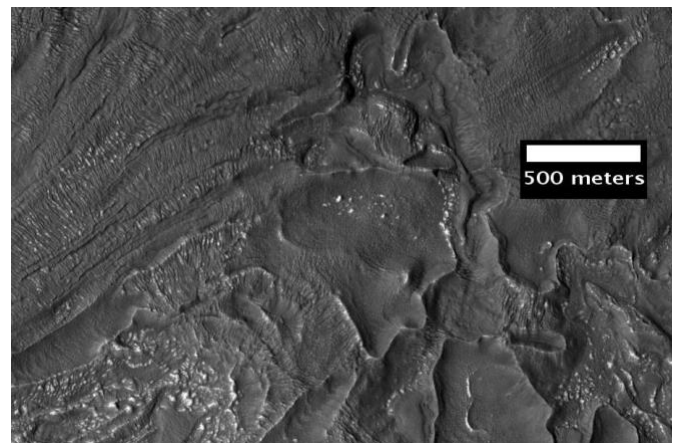
11) Terrains tourmentés

Les deux grands domaines géologiques martiens (hautes terres cratérisées de l'hémisphère sud d'un côté, plaines basses et lisses de l'hémisphère nord de l'autre) forment une dichotomie crustale matérialisée par une région intermédiaire essentiellement constituée de terrains dits « tourmentés, » que les Anglo-saxons appellent *fretted terrains*. Ce type de reliefs, découvert avec les clichés transmis par la sonde Mariner 9, est caractérisé par des escarpements et des falaises d'un à deux kilomètres de dénivelé et des vallées fluviales larges à fond plat et aux bords abrupts. Une région caractéristique de ce type de terrains se trouve entre les longitudes 0° et 90° E, et les latitudes 30° N et 50° N.

On trouve également de tels terrains en bordure des grands bassins d'impact, tels que celui d'Hellas Planitia, à « l'embouchure » de Reull Vallis, formant transition avec les hautes terres de Promethei Terra :



Région au terrain tourmenté près de Reull Vallis, 38,3° S et 96,9° E

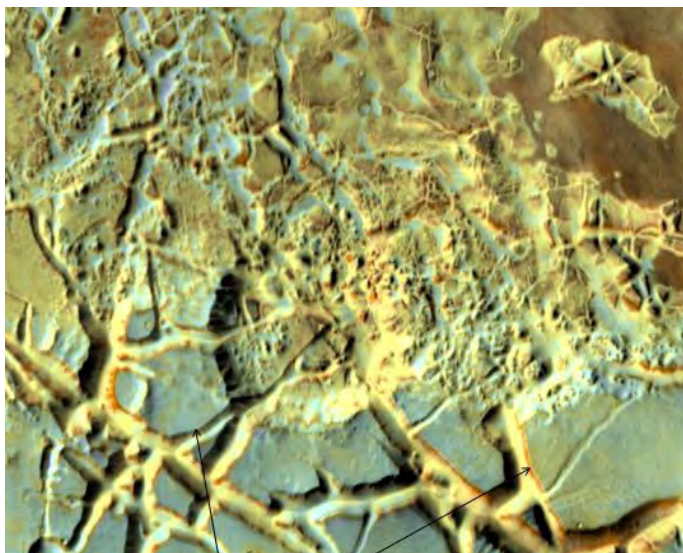


Gros plan de la vue précédente

12) Terrains chaotiques

Les terrains chaotiques résulteraient de l'action de grandes quantités d'eau soudainement libérées du sous-sol. Les structures interprétées comme des lits de cours d'eau asséchés prennent en effet souvent naissance dans des régions chaotiques. L'hématite Fe_2O_3 , très abondante dans ces structures (les dépôts d'hématite d'Aram Chaos sont les seconds plus importants identifiés sur Mars), constituent une indication forte de la présence passée de grandes quantités d'eau liquide dans ces régions. On reconnaît ce type de terrains à la

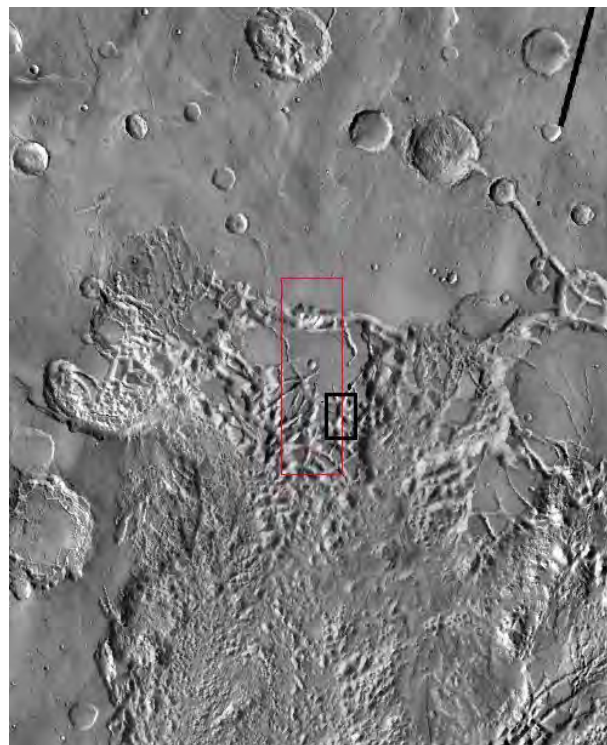
présence de mesas, de buttes, de collines, découpées par des vallées qui peuvent sembler disposées avec une certaine régularité. Il s'agit de formations anciennes, dont l'âge, estimé à partir du taux de cratérisation de leur fond ainsi que par recoupement avec d'autres structures géologiques dont l'âge a pu être déterminé par ailleurs, remonterait entre 3,8 et 2,0 milliards d'années avant le présent. Ces régions semblent par endroits moins effondrées, donnant lieu à des mesas de plus grande taille, qui pourraient alors encore contenir de grandes quantités d'eau gelée. Le volcanisme pourrait avoir joué un rôle déterminant dans la formation de ce type de structures, au moins pour certaines d'entre elles. Ainsi, des basaltes riches en olivines ont été identifiés dans Hydraotes Chaos.



Ground ice may still be beneath the blocks and mesas.

(De la glace dans le sol peut encore se trouver sous les blocs et les mesas)

Région d'Aram Chaos vue par l'instrument THEMIS de la sonde 2001 Mars Odyssey le 10 décembre 2007



Vue large d'Aureum Chaos



Vue d'Ister Chaos par l'instrument HiRISE de la sonde MRO



Gros plan sur Ister Chaos

Un corpus de 35 météorites de Mars est aujourd'hui répertorié (d'autres sources peuvent indiquer un nombre bien plus élevé que 35), permettant de tirer quelques conclusions préliminaires sur la nature des sols martiens :

- 34 achondrites, c'est-à-dire des météorites pierreuses (moins de 35 % de métaux) dépourvues de chondres, collectivement désignées par le sigle « SNC, » abréviation de *Shergottite*, *Nakhlite* et *Chassignite* :
 - **25 shergottites**, datées d'environ 4,1 à 4,3 milliards d'années avant le présent (mais parfois encore de seulement 150 à 570 millions d'années), de nature ignée principalement basaltique, dont certaines portent des traces de carbonates et de sulfates hydratés indiquant leur exposition à l'eau avant leur éjection dans l'espace. Le site Planet-Terre de l'ENS de Lyon livre une analyse pétrologique approfondie de la météorite Shergotty.
 - **7 nakhlites**, roches ignées constituées de basalte avec des cristaux d'augite et d'olivine, formées il y a 1,3 milliards d'années peut-être dans l'une des régions volcaniques de Mars. Ces météorites auraient été altérées par de l'eau liquide il y a 620 millions d'années avant d'être projetées dans l'espace il y a 10,75 millions d'années et tomber sur Terre à l'Holocène.
 - **2 chassignites**, qui sont des dunites d'olivine.
- La **météorite ALH 84001**, atypique et non classée, riche en orthopyroxènes, devenue célèbre par une fameuse micrographie dévoilant des structures d'apparence biologique, dont la formation serait datée d'environ 4,1 milliards d'années avant le présent.

D) Minéralogie de la surface martienne

Bien que peu nombreuses et restreintes à des époques géologiques limitées, ces météorites permettent d'évaluer l'importance des roches basaltiques sur Mars. Elles soulignent les différences de composition chimique entre Mars et la Terre et témoignent de la présence d'eau liquide à la surface de la planète il y a plus de 4 milliards d'années.

1) Analyses in situ

Les sondes spatiales qui ont exploré la planète nous ont permis de mieux en connaître la composition chimique en surface. Dès les années 1970, les sondes Viking 1 et Viking 2 ont analysé le sol martien, révélant une nature qui pourrait correspondre à l'érosion de basaltes. Ces analyses ont montré une abondance élevée en silicium Si et en fer Fe, ainsi qu'en magnésium Mg, aluminium Al, soufre S, calcium Ca et titane Ti, avec des traces de strontium Sr, d'yttrium Y et peut-être de zirconium Zr. Le taux de soufre était près de deux fois supérieur et celui de potassium cinq fois inférieur à la moyenne de l'écorce terrestre. Le sol contenait également des composés de soufre et de chlore ressemblant aux dépôts résultant de l'évaporation de l'eau de mer. La concentration en soufre était plus élevée en surface qu'en profondeur. Les expériences destinées à déterminer la présence d'éventuels microorganismes dans le sol martien en mesurant la libération d'oxygène après adjonction de « nutriments » ont mesuré un dégagement de molécules O₂ significatif, ce qui, en l'absence d'autres traces biologiques par ailleurs relevées, a été attribué à la présence d'ions superoxyde O₂. Le spectromètre APXS de Mars Pathfinder a réalisé en automne 1997 une série de mesures exprimées en pourcentage pondéral d'oxydes et reproduites dans le tableau suivant (la colonne de droite donne la somme initiale des pourcentages obtenus avant étalonnage) :

Données recueillies en automne 1997 par le spectromètre à rayons X, protons et particules alpha (APXS) de Mars Pathfinder :

« Terre »

« Terre » analysée	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	Somme initiale
Après déploiement	2,3 ± 0,9	7,9 ± 1,2	7,4 ± 0,7	51,0 ± 2,5	4,0 ± 0,8	0,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	6,9 ± 1,0	1,2 ± 0,2	16,6 ± 1,7	68,6
Près de Yogi	3,8 ± 1,5	8,3 ± 1,2	9,1 ± 0,9	48,0 ± 2,4	6,5 ± 1,3	0,6 ± 0,2	0,2 ± 0,1	5,6 ± 0,8	1,4 ± 0,2	14,4 ± 1,4	78,2
Sombre près de Yogi	2,8 ± 1,1	7,5 ± 1,1	8,7 ± 0,9	47,9 ± 2,4	5,6 ± 1,1	0,6 ± 0,2	0,3 ± 0,1	6,5 ± 1,0	0,9 ± 0,1	17,3 ± 1,7	89,1

« Scooby Doo »	2,0 ± 0,8	7,1 ± 1,1	9,1 ± 0,9	51,6 ± 2,6	5,3 ± 1,1	0,7 ± 0,2	0,5 ± 0,1	7,3 ± 1,1	1,1 ± 0,2	13,4 ± 1,3	99,2
Près de Lamb	1,5 ± 0,6	7,9 ± 1,2	8,3 ± 0,8	48,2 ± 2,4	6,2 ± 1,2	0,7 ± 0,2	0,2 ± 0,1	6,4 ± 1,0	1,1 ± 0,2	17,4 ± 1,7	92,9
Dune de la Sirène	1,3 ± 0,7	7,3 ± 1,1	8,4 ± 0,8	50,2 ± 2,5	5,2 ± 1,0	0,6 ± 0,2	0,5 ± 0,1	6,0 ± 0,9	1,3 ± 0,2	17,1 ± 1,7	98,9
Pierres & Roches											
Pierres & Roches	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	Cl	K₂O	CaO	TiO₂	FeO	Somme initiale
Barnacle Bill	3,2 ± 1,3	3,0 ± 0,5	10,8 ± 1,1	58,6 ± 2,9	2,2 ± 0,4	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	5,3 ± 0,8	0,8 ± 0,2	12,9 ± 1,3	92,7
Yogi	1,7 ± 0,7	5,9 ± 0,9	9,1 ± 0,9	55,5 ± 2,8	3,9 ± 0,8	0,6 ± 0,2	0,5 ± 0,1	6,6 ± 1,0	0,9 ± 0,1	13,1 ± 1,3	85,9
Wedge	3,1 ± 1,2	4,9 ± 0,7	10,0 ± 1,0	52,2 ± 2,6	2,8 ± 0,6	0,5 ± 0,2	0,7 ± 0,1	7,4 ± 1,1	1,0 ± 0,1	15,4 ± 1,5	97,1
Shark	2,0 ± 0,8	3,0 ± 0,5	9,9 ± 1,0	61,2 ± 3,1	0,7 ± 0,3	0,3 ± 0,2	0,5 ± 0,1	7,8 ± 1,2	0,7 ± 0,1	11,9 ± 1,2	78,3
Demi Dome	2,4 ± 1,0	4,9 ± 0,7	10,6 ± 1,1	55,3 ± 2,8	2,6 ± 0,5	0,6 ± 0,2	0,8 ± 0,1	6,0 ± 0,9	0,9 ± 0,1	13,9 ± 1,4	92,6
Pierres sans terre (données calculées)	2,6 ± 1,5	2,0 ± 0,7	10,6 ± 0,7	62,0 ± 2,7	0,0	0,2 ± 0,2	0,7 ± 0,2	7,3 ± 1,1	0,7 ± 0,1	12,0 ± 1,3	—

La teinte rougeâtre de la planète provient avant tout de l'oxyde de fer (III) Fe_2O_3 , omniprésent à sa surface. Cette hématite amorphe (l'hématite cristallisée, quant à elle, est de couleur grise) constitue une fraction importante des grains de poussière transportés par les vents qui balayent continuellement la surface de la planète, mais ne semble pas pénétrer très profondément dans le sol, à en juger par les traces laissées depuis l'hiver 2004 par les roues des rovers Spirit et Opportunity, qui montrent que la couleur rouille est celle des couches de poussières, plus épaisses et recouvertes de poussières sombres pour Opportunity, tandis que les roches elles-mêmes sont nettement plus sombres. Par ailleurs, le sol de Mars analysé *in situ* par la sonde Phoenix en automne 2008 s'est révélé être alcalin ($\text{pH} \approx 7,7 \pm 0,5$) et contenir de nombreux sels, avec une abondance élevée de potassium K^+ , de chlorures Cl^- , de perchlorates ClO_4^- et de magnésium Mg^{2+} . La présence de perchlorates, notamment, a été abondamment commentée, car *a priori* assez peu compatible avec la possibilité d'une vie martienne. Ces sels ont la particularité d'abaisser sensiblement la température de fusion de la glace d'eau et pourraient expliquer les « ravines » régulièrement observées par les sondes en orbite autour de la planète, qui seraient ainsi les traces d'écoulements de saumures sur des terrains en pente. D'une manière générale, les rochers martiens se sont révélés être principalement de nature basaltique tholéitique.



Sol jonché de rochers volcaniques vu par Mars Pathfinder le 8 septembre 1999



Autre vue du sol martien, par le rover Spirit le 13 avril 2006

2) Résultats des sondes en orbite martienne

Des sondes américaines (notamment 2001 Mars Odyssey et Mars Reconnaissance Orbiter) et européenne (Mars Express) ont étudié globalement la planète pendant plusieurs années, permettant d'élargir et d'affiner notre compréhension de sa nature et de son histoire. Si elles ont confirmé la prédominance des basaltes à la surface de la planète, ces sondes ont également recueilli quelques résultats inattendus.

a) Olivines et pyroxènes

Ainsi, la sonde Mars Express, de l'ESA, possède un instrument appelé OMEGA (acronyme signifiant « Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité ») de réalisation essentiellement française et sous la responsabilité de Jean-Pierre Bibring, de l'IAS à Orsay, qui mesure le spectre infrarouge (dans les longueurs d'onde comprises entre 0,35 et 5,2 μm) de la lumière solaire réfléchi par la surface martienne dans le but d'y déceler le spectre d'absorption des différents minéraux. Cette expérience a pu confirmer l'abondance des roches ignées sur la surface de Mars, notamment des olivines et des pyroxènes, mais ces derniers ont un taux de calcium plus bas dans les hautes terres cratérisées de l'hémisphère sud que dans le reste de la planète, où on le rencontre avec de l'olivine; ainsi, les matériaux les plus anciens de l'écorce martienne se seraient formés à partir d'un manteau appauvri en aluminium et en calcium. Olivines et pyroxènes sont les constituants principaux des péridotites, des roches plutoniques bien connues sur Terre pour être le principal constituant du manteau.

b) Phyllosilicates, altération aqueuse de roches ignées

Une découverte déterminante dans la compréhension de l'histoire de la planète Mars a été l'identification par OMEGA de phyllosilicates largement répandus dans les régions les plus anciennes de la planète, révélant l'interaction prolongée des roches ignées avec l'eau liquide. L'instrument CRISM — *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* — de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter a permis de préciser la nature de ces minéraux :

- kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$,
- chlorites $(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH})_6$,
- illites $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$ ou muscovite $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$,
- ainsi qu'une nouvelle classe de silicates hydratés (silice hydratée).

Divers phyllosilicates contenant des hydroxydes de fer et de magnésium en proportions variables ont ainsi été observés, et les smectites telles que la nontronite $\text{Ca}_{0,5}(\text{Si}_{7,5}\text{Al}_{0,5}\text{Fe}_{0,2})(\text{Fe}_{3,5}\text{Al}_{0,4}\text{Mg}_{0,1})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ et la saponite $(\text{Ca}_{0,5}\text{Na})_{0,33}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sont les plus répandues, bien que des chlorites soient présentes par endroits.

Toutes ces observations sont riches d'enseignements quant à l'histoire géologique de la planète Mars, et notamment ses conditions atmosphériques au Noachien, c'est-à-dire aux débuts de son existence.

c) Chlorures et sulfates hydratés, marqueurs d'un passé humide

OMEGA a également permis de détecter, en de nombreux endroits de la planète, des sulfates hydratés, tels que, par exemple, de la kiesérite $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dans la région de Meridiani Planum, voire, dans la région de Valles Marineris, des sulfates encore davantage hydratés dont il n'a pas été possible d'identifier la nature minéralogique, ainsi que des dépôts de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur de la kiesérite au fond d'un lac asséché, indiquant un changement de nature saline de ce plan d'eau au cours de son assèchement, passant du sulfate de magnésium $[\text{Mg}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$ au sulfate de calcium $[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$. De vastes étendues de sulfate de calcium hydraté, vraisemblablement du gypse, ont également été détectées en bordure de la calotte polaire boréale. La présence de ces minéraux hydratés est une indication forte de la présence passée d'étendues d'eau liquide à la surface de Mars, une eau contenant notamment des sulfates de magnésium et de calcium dissous. La sonde 2001 Mars Odyssey a détecté également la présence de chlorures dans les hautes terres de l'hémisphère sud, résultant de l'évaporation de plans d'eau salée ne dépassant pas 25 km^2 en divers endroits de ces terrains anciens remontant au Noachien voire, pour certains, au début de l'Hespérien.

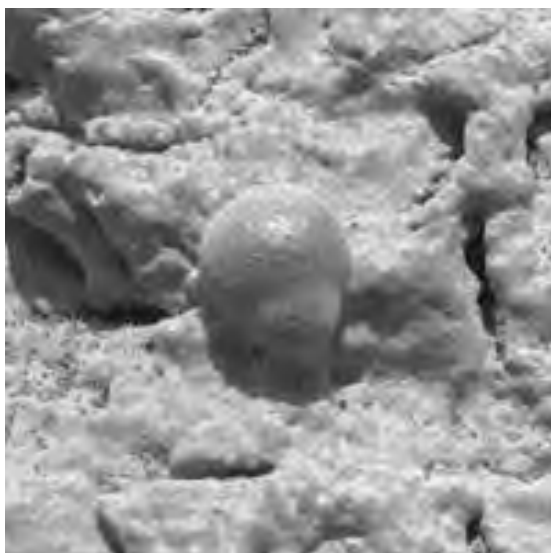
d) Méthane et hydrothermalisme dans la région de Nili Fossae

L'un des résultats les plus étonnants de Mars Reconnaissance Orbiter provient de l'étude détaillée en 2008 de la région de Nili Fossae, identifiée début 2009 comme source d'importants dégagements de méthane. Le méthane a été détecté dès 2003 dans l'atmosphère de Mars, aussi bien par des sondes telles que Mars Express que depuis la Terre; ces émissions de CH_4 se concentreraient notamment en trois zones

particulières de la région de Syrtis Major Planum. Or le méthane est instable dans l'atmosphère martienne, des études récentes suggérant même qu'il soit six cents fois moins stable qu'estimé initialement (on évaluait sa durée de vie moyenne à 300 ans) car le taux de méthane n'a pas le temps de s'uniformiser dans l'atmosphère et demeure concentré autour de ses zones d'émission, ce qui correspondrait à une durée de vie de quelques centaines de jours, avec une source de méthane 600 fois plus puissante qu'estimé initialement, émettant ce gaz une soixantaine de jours par année martienne, à la fin de l'été de l'hémisphère nord. Les analyses géologiques menées en 2008 par Mars Reconnaissance Orbiter dans la région de Nili Fossae ont révélé la présence d'argiles ferromagnésiennes (smectites), d'olivine (silicate ferromagnésien $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, détectée dès 2003) et de magnésite (carbonate de magnésium MgCO_3), ainsi que de serpentine. La présence simultanée de ces minéraux permet d'expliquer assez simplement la formation de méthane, car, sur Terre, du méthane CH_4 se forme en présence de carbonates (tels que le MgCO_3 détecté en 2008) et d'eau liquide lors du métamorphisme hydrothermal d'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 ou d'olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ en serpentine $(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, particulièrement lorsque le taux de magnésium dans l'olivine n'est pas trop élevé et lorsque la pression partielle de dioxyde de carbone CO_2 est insuffisante pour conduire à la formation de talc $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ mais aboutit au contraire à la formation de serpentine et de magnétite Fe_3O_4 , comme dans la réaction : $24 \text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5}\text{SiO}_4 + 26 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 12 \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CH}_4$

La probabilité de ce type de réactions dans la région de Nili Fossae est renforcée par la nature volcanique de Syrtis Major Planum et par l'étroite corrélation, observée dès 2004, entre le taux d'humidité d'une région et la concentration de méthane dans l'atmosphère.

e) Olivine et jarosite, ne subsistant qu'en climat aride



Sphérule sur le rocher surnommé « El Capitan » dans Meridiani Planum par le rover Opportunity en février 2004

L'olivine, découverte dans la région de Nili Fossae ainsi qu'en d'autres régions martiennes par le *Thermal Emission Spectrometer* (TES) de Mars Global Surveyor, est un minéral instable en milieu aqueux, donnant facilement d'autres minéraux tels que de l'iddingsite, de la goethite, de la serpentine, des chlorites, des smectites, de la maghémite et de l'hématite; la présence d'olivine sur Mars indique donc des surfaces qui n'ont pas été exposées à l'eau liquide depuis la formation de ces minéraux, laquelle remonte à plusieurs milliards d'années, jusqu'au Noachien pour les terrains les plus anciens. Il s'agit donc d'une indication forte de l'aridité extrême du climat martien au cours de l'Amazonien, aridité qui avait semble-t-il déjà commencé, au moins localement, à la fin de l'Hespérien. Par ailleurs, la découverte en 2004 de jarosite, un sulfate ferrique hydraté de sodium de formule $\text{NaFe}^{(\text{III})}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$, par le rover martien Opportunity sur Meridiani Planum, a permis de préciser encore davantage l'enchaînement des épisodes climatiques sur Mars. Ce minéral se forme en effet, sur Terre, par l'altération de roches volcaniques en milieu aqueux oxydant acide, de sorte que sa détection sur Mars implique l'existence d'une période de climat humide permettant l'existence d'eau liquide acide. Mais ce minéral est également assez rapidement dégradé par

l'humidité, pour former des oxyhydroxydes ferriques tels que la goethite $\alpha\text{-FeO(OH)}$, qui a par ailleurs été retrouvée en d'autres endroits de la planète (notamment par le rover Spirit dans le cratère Gusev). Par conséquent, la formation de la jarosite en climat humide a dû être rapidement suivie jusqu'à nos jours d'un climat aride afin de préserver ce minéral, nouvelle indication que l'eau liquide avait cessé d'exister à l'Amazonien mais avait été présente aux époques antérieures de l'histoire de Mars.

E) Histoire géologique de Mars

Le scénario qui suit se veut une synthèse plausible déduites de nos connaissances actuelles issues des différentes campagnes d'exploration de la planète Mars depuis une quarantaine d'années et dont les résultats ont été résumés plus haut.

1) Acte I – Formation et différenciation

Comme les autres planètes du système solaire, la planète Mars se serait formée il y a environ 4,6 milliards d'années par accréation gravitationnelle de planétésimaux résultant de la condensation de la nébuleuse solaire. Étant située en deçà de la limite des 4 UA du Soleil, au-delà de laquelle peuvent se condenser les composés volatils tels que l'eau H_2O , le méthane CH_4 ou encore l'ammoniac NH_3 , Mars s'est formée à partir de planétésimaux de nature essentiellement sidérophile (riches en fer) et lithophile (constitués de silicates), mais avec une teneur accrue en éléments chalcophiles, à commencer par le soufre qui semble bien plus abondant sur Mars que sur Terre, comme l'ont révélé d'intéressantes mesures réalisées par Mars Global Surveyor. Cette teneur élevée en soufre aurait eu pour effet de favoriser la différenciation du globe martien, d'une part en abaissant la température de fusion des matériaux qui le constituent, et d'autre part en formant des sulfures de fer qui ont séparé chimiquement le fer des silicates et ont accéléré sa concentration au centre de la planète pour y former un noyau d'éléments sidérophiles, plus riche en éléments chalcophiles que le noyau terrestre; l'étude des isotopes radiogéniques des météorites de Mars, et notamment du système $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$, a ainsi révélé que le noyau de Mars se serait formé en à peine 30 millions d'années, contre plus de 50 millions d'années pour la Terre. Ce taux d'éléments légers expliquerait à la fois pourquoi le noyau de Mars est encore liquide, et pourquoi les épanchements de lave les plus anciens identifiés à la surface de la planète semblent avoir été particulièrement fluides, jusqu'à s'écouler sur près d'un millier de kilomètres autour d'Alba Patera par exemple. La nature des planétésimaux qui ont conduit à la formation de la planète a déterminé la nature de l'atmosphère primordiale de Mars, par dégazage progressif des matériaux en fusion dans la masse de la planète en cours de différenciation. En l'état actuel de nos connaissances, cette atmosphère devait être essentiellement constituée de vapeur d'eau H_2O ainsi que de dioxyde de carbone CO_2 , d'azote N_2 , de dioxyde de soufre SO_2 , et peut-être d'assez grandes quantités de méthane CH_4 . Au début de son existence, Mars a certainement dû perdre, plus rapidement que la Terre, une fraction importante de la chaleur issue de l'énergie cinétique des planétésimaux qui se sont écrasés les uns sur les autres pour conduire à sa formation : sa masse est en effet 10 fois moindre que celle de la Terre, alors que sa surface est seulement 3,5 fois plus réduite, ce qui signifie que le rapport surface/masse de la planète rouge est près de trois fois plus élevé que celui de notre planète. Une croûte a donc certainement dû se solidifier à sa surface en une centaine de millions d'années, et il est possible que la dichotomie crustale observée aujourd'hui entre les hémisphères nord et sud remonte aux quelques centaines de millions d'années qui ont suivi la formation de la planète. Une fois suffisamment refroidie, il y a environ 4,5 à 4,4 milliards d'années, la surface solide de la planète dut recevoir en pluie la vapeur d'eau atmosphérique condensée, qui réagit avec le fer contenu dans les minéraux chauffés pour l'oxyder en libérant de l'hydrogène H_2 , lequel, trop léger pour s'accumuler dans l'atmosphère, s'échappa dans l'espace. Ceci aurait conduit à une atmosphère primitive où ne subsistèrent plus que le CO_2 , le N_2 et le SO_2 comme constituants majoritaires de l'atmosphère martienne primitive, avec une pression atmosphérique totale alors plusieurs centaines de fois supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui, la pression standard actuelle au niveau de référence martien est par définition de 610 Pa.

2) Acte II – Champ magnétique global et climat tempéré humide

a. Environnement martien au Noachien

Pendant l'époque géologique appelée *Noachien* qui prit fin il y a environ 3,7 à 3,5 milliards d'années, Mars semble avoir offert des conditions très différentes de celles d'aujourd'hui et assez similaires à celles de la

Terre à cette époque, avec un champ magnétique global protégeant une atmosphère épaisse et peut-être tempérée permettant l'existence d'une hydrosphère centrée autour d'un océan boréal occupant l'actuelle étendue de Vastitas Borealis. L'existence passée d'un champ magnétique global autour de Mars a été découverte à travers l'observation, réalisée dès 1998 par Mars Global Surveyor, d'un paléomagnétisme au-dessus des terrains les plus anciens de l'hémisphère sud, notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum³⁰. La magnétosphère générée par ce champ magnétique global devait agir, comme la magnétosphère terrestre de nos jours, en protégeant l'atmosphère de Mars de l'érosion par le vent solaire, qui tend à éjecter dans l'espace les atomes de la haute atmosphère en leur transférant l'énergie nécessaire pour atteindre la vitesse de libération. Un effet de serre aurait été à l'œuvre pour tempérer l'atmosphère martienne, qui sinon aurait été plus froide qu'aujourd'hui en raison du plus faible rayonnement émis par le Soleil, alors encore jeune et en voie de stabilisation. Les simulations montrent qu'une pression partielle de 150 kPa de CO₂ aurait permis d'avoir une température moyenne au sol égale à celle d'aujourd'hui, soit 210 K (un peu moins de -60 °C). Un renforcement de cet effet de serre au-delà de cette température aurait pu provenir de plusieurs facteurs complémentaires :

- la condensation du CO₂ en nuages réfléchissants dans le domaine de l'infrarouge aurait contribué à renvoyer au sol le rayonnement thermique qu'il émet, de façon encore plus efficace que ne le font les nuages terrestres, constitués d'eau.
- la présence en haute altitude de SO₂ très absorbant dans le domaine de l'ultraviolet aurait contribué à réchauffer la haute atmosphère, comme le fait la couche d'ozone sur Terre par un mécanisme similaire.
- le rôle de l'eau et du méthane (le CH₄ génère un effet de serre vingt fois plus puissant que celui du CO₂) n'est peut-être pas non plus à négliger.

b. Indices d'une hydrosphère martienne au Noachien

Nous savons que l'eau liquide était alors abondante sur Mars car l'étude minéralogique de la surface de la planète a révélé la présence significative de phyllosilicates dans les terrains remontant à cette époque. Or les phyllosilicates sont de bons indicateurs de l'altération de roches ignées en milieu humide. L'abondance de ces minéraux dans les sols antérieurs à environ 4,2 milliards d'années a conduit l'équipe de planétologues de l'ESA responsable de l'instrument OMEGA et dirigée par Jean-Pierre Bibring à proposer la dénomination de Phyllosien pour l'éon stratigraphique correspondant : c'est l'époque semble-t-il la plus humide qu'ait connue la planète Mars. Des études plus fines réalisées *in situ* par les deux Mars Exploration Rovers Spirit et Opportunity respectivement dans le cratère Gusev, au sud d'Apollinaris Patera, et sur Meridiani Planum, suggèrent même l'existence passée d'une hydrosphère suffisamment importante pour avoir pu homogénéiser le taux de phosphore des minéraux analysés sur ces deux sites situés de part et d'autre de la planète. Une approche différente, fondée sur la cartographie de l'abondance du thorium, du potassium et du chlore à la surface de Mars par le spectromètre gamma (GRS) de la sonde Mars Odyssey, aboutit au même résultat. Par ailleurs, l'étude détaillée des traces laissées dans le paysage martien par de supposés cours d'eau et étendues liquides a conduit à proposer l'existence d'un véritable océan couvrant près du tiers de la surface de la planète au niveau de l'actuel Vastitas Borealis. Dans un article de 1991 devenu classique, Baker *et al.* allaient jusqu'à identifier certaines structures aux traces d'un ancien rivage. Les lignes côtières ainsi identifiées se trouvaient de surcroît correspondre aux courbes d'altitude constante corrigées des déformations ultérieures déduites du volcanisme et d'estimations quant au changement d'axe de rotation de la planète. Ces projections, parfois assez hardies, n'ont cependant pas convaincu tout le monde, et d'autres théories ont également été proposées pour rendre compte de ces observations, notamment en se fondant sur la possible origine volcanique des structures ainsi interprétées. Dans le même ordre d'idées, l'existence du lac Eridania au cœur des hautes terres de Terra Cimmeria a été suggérée pour expliquer notamment la genèse de Ma'adim Vallis à partir de l'observation de certaines formations topographiques interprétées comme d'anciens rivages fossilisés.

3) Acte III – Premiers épanchements volcaniques et grand bombardement tardif

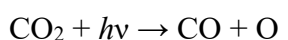
Alors que le Phyllosien semble avoir été plutôt dépourvu d'activité volcanique, l'analyse détaillée des données recueillies par l'instrument OMEGA de Mars Express, conçu pour l'analyse minéralogique de la surface martienne, a conduit à identifier, à la fin de cet éon, une période de transition, s'étendant d'environ 4,2 à 4,0 milliards d'années avant le présent, marquée par l'apparition d'une activité volcanique significative

alors que la planète connaissait vraisemblablement encore des conditions tempérées et humides sous une atmosphère plutôt épaisse. De surcroît, l'exploration par des sondes de la surface des planètes telluriques (à commencer par la Lune) à la fin du XX^e siècle a conduit à postuler un épisode dit de « grand bombardement tardif » (appelé *Late Heavy Bombardment* par les Anglo-saxons) s'étendant sur une période datée approximativement de 4,0 à 3,8 milliards d'années avant le présent, à plus ou moins 50 millions d'années près. C'est au cours de cet épisode que se seraient formés les grands bassins d'impact aujourd'hui visibles sur Mars, tels qu'Hellas, Argyre ou encore Utopia. Survenu à la fois sur Terre et sur Mars, ce cataclysme serait peut-être également à l'origine de la différence de concentration en oxyde de fer (plus du simple au double) observée entre le manteau de la Terre et celui de Mars. Les impacts cosmiques auraient en effet liquéfié le manteau terrestre sur peut-être 1 200 à 2 000 km d'épaisseur, portant la température de ce matériau jusqu'à 3 200 °C, température suffisante pour réduire le FeO en fer et en oxygène. Le noyau terrestre aurait ainsi connu un apport supplémentaire en fer issu de la réduction du manteau à l'issue de ce bombardement météoritique, ce qui expliquerait la teneur pondérale résiduelle d'environ 8 % de FeO dans le manteau terrestre. Sur Mars, au contraire, la température du manteau fondu n'aurait jamais dépassé 2 200 °C, température insuffisante pour réduire l'oxyde de fer(II) et laissant donc inchangée la teneur en FeO du manteau martien à environ 18 %. Ceci expliquerait pourquoi Mars est aujourd'hui extérieurement plus de deux fois plus riche en oxydes de fer que la Terre alors que ces deux planètes sont supposées avoir été originellement similaires. À l'issue de ces impacts géants, les conditions à la surface de la planète ont vraisemblablement été sensiblement altérées. En premier lieu, Mars aurait perdu une fraction importante de son atmosphère, dispersée dans l'espace sous l'effet de ces collisions. Le climat général de la planète aurait été bouleversé par les poussières et les gaz injectés dans l'atmosphère lors de ces collisions, ainsi que par un possible changement d'obliquité lors de tels impacts. Mais il est également possible que l'énergie cinétique des impacteurs, en injectant de l'énergie thermique dans le manteau martien, ait modifié le gradient thermique dont on suppose qu'il entretient, dans le noyau planétaire, les mouvements de convection à l'origine de l'effet dynamo générant le champ magnétique global, ce qui aurait fait disparaître la magnétosphère martienne dès la fin du Noachien.

4) Acte IV – Formation des grandes structures volcaniques martiennes

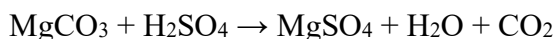
Les impacts à l'origine des grands bassins martiens ont peut-être initié le plus grand épisode volcanique de l'histoire de la planète, définissant l'époque qu'on appelle l'Hespérien. Celle-ci est caractérisée, d'un point de vue pétrologique, par l'abondance des minéraux contenant du soufre, et notamment de sulfates hydratés tels que la kiesérite $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Les principales formations volcaniques martiennes seraient apparues à l'Hespérien, peut-être même, pour certaines, dès la fin du Noachien; c'est notamment le cas des plaines de laves telles que Malea Planum, Hesperia Planum et Syrtis Major Planum. Alba Mons aurait peut-être également commencé son activité à ce moment, à la suite de l'impact à l'origine du bassin d'Hellas Planitia situé aux antipodes. Le renflement de Tharsis et les volcans d'Elysium Planitia, en revanche, remonteraient au milieu de l'Hespérien, aux alentours de 3,5 milliards d'années avant le présent, date qui correspondrait à la période d'activité volcanique maximum sur la planète rouge; Alba Mons aurait ainsi connu sa plus grande activité dans la seconde moitié de l'Hespérien jusqu'au début de l'Amazonien. Ce volcanisme aurait libéré dans l'atmosphère de Mars de grandes quantités de dioxyde de soufre SO_2 qui, en réagissant avec l'eau dans les nuages, aurait formé du trioxyde de soufre SO_3 donnant, en solution dans l'eau, de l'acide sulfurique H_2SO_4 . Cette réaction aurait sans doute été favorisée sur Mars par la photolyse à haute altitude des molécules d'eau sous l'action du rayonnement ultraviolet du Soleil, qui libère notamment des radicaux hydroxyle $\text{HO}^\bullet$ et produit du peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , un agent oxydant.

La comparaison avec l'atmosphère de Vénus, qui possède des nuages d'acide sulfurique dans une atmosphère de dioxyde de carbone, souligne également le rôle de la dissociation photochimique du dioxyde de carbone par les ultraviolets de moins de 169 nm pour initier l'oxydation du dioxyde de soufre :



L'eau martienne aurait donc été chargée d'acide sulfurique à l'Hespérien, ce qui aurait à la fois pour conséquence d'abaisser sensiblement son point de congélation — l'eutectique du mélange

$\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ gèle ainsi un peu en dessous de -20°C , et celui du mélange $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 6,5\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ gèle autour de 210 K, température légèrement inférieure à -60°C , qui est la température moyenne actuelle sur Mars — et de conduire à la formation de sulfates plutôt que de carbonates. Ainsi s'expliquerait pourquoi, alors que Mars possédait *a priori* une atmosphère de CO_2 et de grandes étendues d'eau liquide, on n'y trouve quasiment pas de carbonates, alors que les sulfates semblent, au contraire, particulièrement abondants : la formation des carbonates est inhibée par l'acidité — que la présence de sulfates laisse supposer (la sidérite FeCO_3 , *a priori* le carbonate le moins soluble, ne précipite qu'à $\text{pH} > 5$) — et la libération continue de SO_2 par l'activité volcanique à l'Hespérien aurait déplacé le CO_2 des carbonates qui auraient pu s'être formés au Noachien pour les remplacer par des sulfates, comme cela se produit par exemple à pH faible avec le magnésium :



La chronostratigraphie minéralogique proposée par l'équipe de Jean-Pierre Bibring, en charge de l'instrument OMEGA de la sonde Mars Express, fait correspondre, à l'Hespérien, l'éon stratigraphique appelé « Theiikien, » terme forgé (*via* l'anglais) à partir du grec ancien τὸ θεῖον signifiant « soufre » qui serait cependant daté de 4,0 à 3,6 milliards d'années avant le présent, c'est-à-dire avec un décalage de 300 à 400 millions d'années vers le passé par rapport à l'échelle de Hartmann & Neukum.

5) Acte V – Ralentissement du volcanisme et dessiccation de l'atmosphère

Une fois passé l'épisode volcanique majeur de l'Hespérien, Mars aurait progressivement vu son activité interne se réduire jusqu'à nos jours, où elle semble être devenue imperceptible, voire peut-être nulle. En effet, plusieurs épisodes volcaniques, d'intensité décroissante, auraient eu lieu au cours de l'Amazonien, notamment au niveau d'Olympus Mons, et certaines éruptions se seraient même produites il y a seulement 2 millions d'années, mais cette activité demeure épisodique et, en tout état de cause, insignifiante comparée par exemple au volcanisme existant actuellement sur Terre. Parallèlement, l'atmosphère de Mars aurait subi une érosion continue depuis le début de l'Hespérien sous l'effet du vent solaire à la suite de la disparition de la magnétosphère, sans doute dès la fin du Noachien. Une telle érosion, même modérée, mais continue sur plusieurs milliards d'années, aurait sans difficulté dispersé dans l'espace l'essentiel de ce qu'il restait d'enveloppe gazeuse à la surface de Mars après le grand bombardement tardif. Il s'en est suivi la disparition progressive de l'effet de serre dû au CO_2 martien, d'où la baisse continue de la température et de la pression atmosphérique de la planète à partir de l'Hespérien et tout au long de l'Amazonien. La présence d'eau liquide sur Mars a donc progressivement cessé d'être continue pour ne plus être qu'éparse et épisodique. Les conditions martiennes actuelles permettent en effet l'existence d'eau liquide dans les régions les plus basses de la planète dans la mesure où cette eau est chargée de chlorures et/ou d'acide sulfurique, ce qui semble précisément être le cas sur Mars compte tenu du résultat des analyses effectuées *in situ* par les sondes qui ont étudié chimiquement le sol de la planète rouge. Des précipitations significatives semblent également avoir eu lieu jusqu'au milieu de l'Amazonien, à en juger par les arêtes sinueuses identifiées par exemple à l'est d'Aeolis Mensae. Mais, au cours de l'Hespérien et de l'Amazonien, les conditions martiennes globales sont passées d'une atmosphère épaisse, humide et tempérée à une atmosphère ténue, aride et froide. Ces conditions particulières, exposant, pendant des milliards d'années, les minéraux de la surface martienne à une atmosphère sèche chargée d'ions oxydants, ont favorisé l'oxydation anhydre du fer sous forme d'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 (hématite) amorphe, à l'origine de la couleur rouille caractéristique de la planète. Cette oxydation demeure néanmoins limitée à la surface, les matériaux situés immédiatement en dessous étant la plupart du temps demeurés dans leur état antérieur, avec une couleur plus sombre. Cette prédominance des oxydes ferriques est à l'origine du terme *sidérikien* désignant l'éon stratigraphique correspondant, forgé par les planétologues de l'Agence spatiale européenne à partir du grec ancien ὁ σιδήρεος signifiant « fer » et qui débiterait dès 3,6 milliards d'années avant le présent. La transition entre Hespérien et Amazonien aurait en fait été assez progressive, ce qui explique l'extrême variabilité des dates définissant la limite entre ces deux époques : 3,2 milliards d'années avant le présent selon l'échelle de Hartmann & Neukum, mais seulement 1,8 milliards d'années selon l'échelle standard de Hartmann.

V Les satellites de Mars

Les **satellites naturels connus de Mars**, Phobos et Déimos, sont deux petits corps qui orbitent près de la planète, à quelques milliers de kilomètres de celle-ci, et sont peut-être des astéroïdes capturés ou bien un seul satellite à l'origine qui se serait disloqué. À cause des forces de marée de Mars, ces deux satellites sont en rotation synchrone et montrent donc toujours la même face à la planète.

Histoire des observations

C'est après la découverte des quatre grands satellites naturels de Jupiter en 1610 par Galilée que Johannes Kepler postule que, puisque la Terre n'en possède qu'un seul, Mars, qui se trouve entre les deux planètes, se doit d'en avoir deux. Kepler, à la suite d'une erreur de déchiffrement d'une anagramme de Galilée concernant les anneaux de Saturne, pense même que ce dernier a réussi à observer ces deux satellites.

Dans la littérature

Dans son roman *Voyage à Laputa* (1727), l'écrivain Jonathan Swift indique l'existence des deux satellites de Mars et il donne même leur période de rotation et leur distance par rapport à la planète :

« *Ils [les Laputiens] ont également découvert deux étoiles mineures, ou satellites, qui tournent autour de Mars; la plus intérieure distante de la planète d'exactly trois diamètres, et la plus extérieure de cinq; la première fait un tour dans l'espace en dix heures, et la seconde en vingt et une heures et demi* ». - Jonathan Swift, *Gulliver's Travels*, partie III, chapitre III (1726)

Les demi-grands axes réels de Phobos et Déimos, exprimés en diamètres martiens moyens, sont de 1,38 et 3,46 respectivement. Les périodes de révolution réelles correspondantes sont 7 h 39 min et de 30 h 18 min. En 1752, Voltaire mentionne lui aussi l'existence de ces satellites dans *Micromégas* :

« *ils côtoyèrent la planète de Mars, qui, comme on sait, est cinq fois plus petite que notre petit globe; ils virent deux lunes qui servent à cette planète* ». - Voltaire, *Micromégas*, chapitre III (1752)

Découverte

Plusieurs astronomes ont tenté de détecter des lunes martiennes. Parmi eux on peut citer : William Herschel en 1783, Heinrich Louis d'Arrest en 1862 et 1864 et Edward Singleton Holden en 1875.

En août 1877, Mars est en opposition, l'astronome américain Asaph Hall découvre Déimos puis Phobos à l'aide d'un télescope de 26 pouces (66 centimètres) depuis l'observatoire naval des États-Unis de Washington. Les résultats de ses observations sont publiés dans le *Astronomische Nachrichten*. Souhaitant être le seul à être crédité de la découverte, il attend début août, que son assistant Edward Singleton Holden soit invité par Henry Draper de New-York, pour débiter les observations. Il met au point un cache pour masquer l'éclat de Mars dans cette zone proche. Dans la nuit du 10 août 1877 alors qu'il est prêt à abandonner, son épouse Angelina Stickne l'encourage à poursuivre ses explorations. La nuit suivante, il distingue un point brillant mais le brouillard l'empêche de poursuivre ses observations. Ce n'est que la nuit du 16 au 17 août qu'il peut reprendre ses travaux. Le deuxième satellite, Phobos, est lui découvert le 17. L'annonce publique a lieu le 18 août. Quelques jours après cette annonce, Simon Newcomb tente de revendiquer la paternité de la découverte dans un article du *New York Tribune*. Le 28 août Holden, l'assistant de Hall, et Draper annoncent avoir découvert un troisième satellite, puis un quatrième. On s'aperçoit rapidement que ces corps ne sont pas en orbite autour de Mars. Les satellites ont été originellement nommés *Phobus* et *Deimus* à la suite d'une suggestion d'Henry Madan d'après la ligne 119 du chant XV de l'Iliade. Dans la mythologie grecque, Phobos et Déimos sont les fils du dieu Arès, en grec ancien *Φόβος* / *Phóbos* signifie « peur » et *Δεῖμος* / *Deĩmos* « terreur ». Cette dénomination est un jeu de mot sur la polysémie du mot satellite qui peut désigner à la fois un astre (les satellites de la planète) ou bien une personne, un garde du corps (les satellites du dieu). Pour l'anecdote, Henry Madan, qui était professeur au collège d'Eton, est également le grand-oncle de Venetia Burney qui a suggéré le nom de Pluton en 1930.

Observations

Depuis d'autres recherches ont été réalisées pour découvrir des satellites supplémentaires. En 2004 Scott S. Sheppard et David Jewitt ont exploré systématiquement la sphère de Hill de Mars hormis la couronne la plus interne, contenant Phobos et Deimos, qui était masquée par la lumière de Mars. Ils n'ont pu trouver de

corps dépassant une magnitude apparente de 23.5, ce qui correspond à un rayon de 90 m pour un albédo de 0,07.

*Deimos (à gauche) et Phobos (à droite)
vus par Spirit depuis la surface de Mars*

Explorations

Phobos et Déimos ont été photographiés à de nombreuses reprises par des sondes spatiales dont l'objectif principal était l'exploration de Mars. La sonde Mariner 7 a fourni involontairement la première image de Phobos en 1969. Il faut attendre la sonde Mariner 9 de 1971 pour des photographies de bonne qualité des satellites, alors que cette observation ne faisait pas partie du programme de la mission. En effet, quand Mariner 9 se place en orbite, la surface Martienne est masquée par une tempête de poussière. La Nasa décide en attendant d'observer les lunes martiennes. En 1977 Viking 1 et Viking 2 s'approchent respectivement à 100 km de Phobos et à 30 km de Déimos, fournissant les premiers clichés détaillés de leurs surfaces. Mars Global Surveyor en 1998 et 2003 et Mars Express en 2004 ont également fourni des données sur les satellites. Les deux seules sondes dédiées à Phobos furent les sondes soviétiques Phobos 1 et Phobos 2 en 1988; la première fut perdue sur le trajet entre la Terre et Mars et la seconde retourna 37 images et données avant de tomber en panne. L'agence spatiale fédérale russe a lancé une mission vers Phobos en 2011. Baptisée Phobos-Grunt, elle devait rapporter des échantillons du satellite, mais n'a pas réussi à quitter l'orbite terrestre. EADS Astrium projette également une mission similaire.



A) Phobos

Phobos, en nom systématique **Mars I**, est le plus grand des deux satellites de Mars (l'autre étant Déimos). Des deux, il est le plus proche de la planète. Les noms de ces deux satellites proviennent de Phobos et Déimos, les deux jumeaux que le dieu Arès (Mars pour les Romains) eut de la déesse Aphrodite (Vénus pour les Romains).

Phobos

Vue de Phobos par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter

Type

Satellite naturel de Mars

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe

9 377,1 km

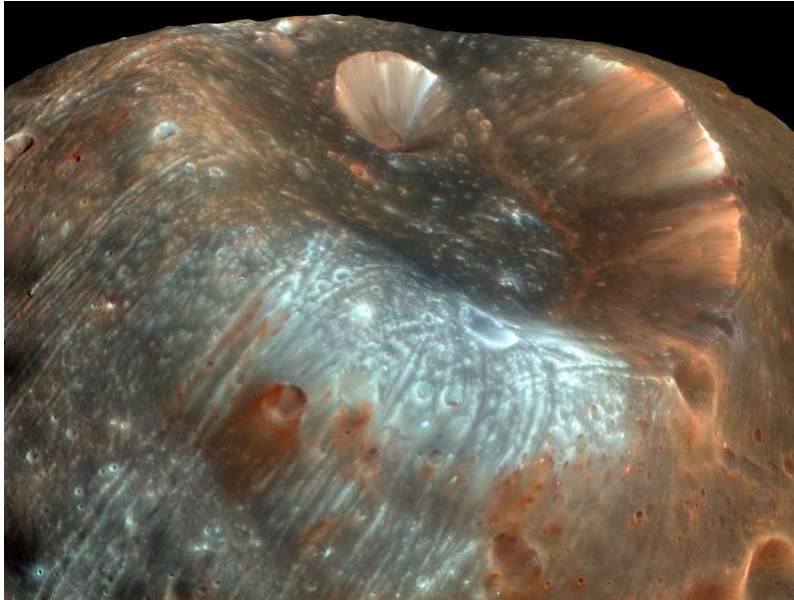
Excentricité	0,0151
Période de révolution	0,319 j (7 h 39 min)
Inclinaison	1,075°
Caractéristiques physiques	
Dimensions	26,8 × 22,4 × 18,4 km
Masse	1,072 × 10 ¹⁶ kg
Masse volumique moyenne	1,85 × 10 ³ kg/m ³
Gravité à la surface	0,005 m/s ²
Albédo moyen	0,07
Température de surface	~ 233 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	Pas d'atmosphère
Découverte	
Découvert par	Asaph Hall le 18/8/1877

Phobos est un corps très irrégulier, de dimensions 26,8 × 22,4 × 18,4 km, bien trop peu massif pour être en équilibre hydrostatique et donc pour avoir pris une forme quasi-sphérique; il s'agit d'ailleurs de l'un des plus petits satellites naturels du Système solaire. Du simple fait de sa forme, la gravité à sa surface varie d'environ 210 % suivant l'endroit où elle est mesurée.

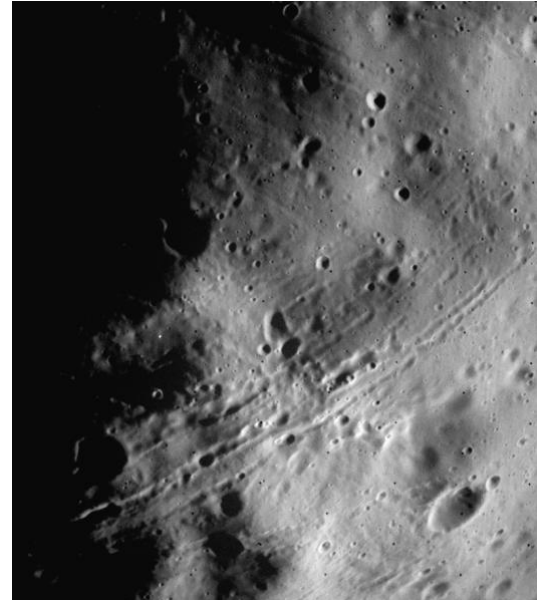
Phobos est un corps sombre qui semble être composé de chondrite carbonée, une composition similaire à celle des astéroïdes de type C dans la ceinture d'astéroïdes externe. Cependant, la masse volumique de Phobos est trop faible pour qu'il soit intégralement composé de roche et il possède une porosité significative. Il a été suggéré que Phobos pourrait contenir un réservoir de glace substantiel, mais des observations spectrales ont écarté cette hypothèse. La sonde soviétique Phobos 2 détecta que des gaz s'échappaient de Phobos en quantité faible mais régulière. Malheureusement la sonde tomba en panne avant d'avoir pu déterminer la nature de ce gaz. En 1989, cette sonde Phobos 2 a été insérée sur une orbite de quasi-satellite par rapport à Phobos. Des images provenant de Mars Global Surveyor montrent que Phobos est recouvert d'une couche de régolithe d'au moins 100 m d'épaisseur; on pense qu'il provient d'impacts avec d'autres corps, mais on ignore comment il a pu adhérer à un objet ne possédant quasiment pas de gravité. Au cours de l'été 2008, la sonde Mars Express a permis de préciser quelques caractéristiques de Phobos, dont la masse et la densité.

Caractéristiques géologiques

De nombreux cratères sont présents à la surface de Phobos. Le plus grand de ces cratères est nommé « Stickney », du nom de jeune fille de l'épouse d'Asaph Hall. Comme le cratère Herschell sur Mimas, mais à une échelle plus petite, l'impact qui a créé le cratère Stickney a probablement failli faire éclater Phobos. Des sillons s'étendent à la surface de Phobos, mesurant typiquement moins de 30 m de profondeur, 100 à 200 m de largeur et jusqu'à 20 km de long. Initialement, on supposait qu'ils résultaient de l'impact ayant formé le cratère Stickney, mais des analyses de données provenant de Mars Express ont révélé une origine indépendante : il s'agit de dépôts de matériaux déplacés par des impacts provenant de la surface de Mars. La météorite de Kaidun a été présentée comme originaire de Phobos, mais la composition détaillée de la lune n'étant pas connue, ceci est difficile à vérifier. Les caractéristiques géologiques de Phobos sont nommées d'après les astronomes qui ont étudié le satellite, ainsi que des personnages et des lieux des Voyages de Gulliver de Jonathan Swift. Plusieurs cratères ont été nommés, ainsi qu'une dorsale, Kepler Dorsum, d'après l'astronome Johannes Kepler.



Le cratère Stickney



Surface de Phobos prise en 1977 par la sonde Viking 1

Orbite

Phobos se déplace sur une orbite relativement circulaire (0,0151 d'excentricité) et faiblement inclinée ($1,093^\circ$ par rapport à l'Équateur de Mars). Avec un demi-grand axe de 9 377 km, Phobos orbite à seulement 6 000 km au-dessus du sol martien (le rayon de Mars est d'environ 3 400 km). Il est donc plus proche de la planète que tout autre satellite naturel du Système solaire. Par comparaison, la Lune orbite à 384 000 km de la Terre. Phobos orbite en dessous de l'orbite synchrone, c'est-à-dire qu'il réalise une révolution autour de Mars en moins de temps qu'il n'en faut pour que Mars ne tourne sur elle-même : sa période orbitale n'est que de 7 h 39 min, tandis que le jour martien est de l'ordre de 24 h 36 min. Pour un observateur martien, Phobos se lève à l'ouest, traverse le ciel rapidement (en 4 h 15 min ou moins) et se couche à l'est, à peu près deux fois par jour, à 11 h 6 min d'intervalle. Son orbite est si basse qu'il ne peut pas être aperçu depuis les régions polaires (à partir de $70,4^\circ$ de latitude) et reste à ces endroits en dessous de l'horizon. La taille apparente de Phobos depuis Mars varie suivant la latitude et la position du satellite dans le ciel. Pour un observateur situé à l'équateur, Phobos possède un diamètre angulaire de $0,14^\circ$ au lever et de $0,20^\circ$ au zénith, une augmentation de 45 %. À titre de comparaison, le Soleil a un diamètre apparent de $0,35^\circ$ dans le ciel martien; la Lune vue de la Terre mesure environ $0,5^\circ$. Un observateur martien situé à des latitudes plus élevées percevrait Phobos plus petit parce qu'il en serait significativement plus éloigné. Vu de Phobos, Mars apparaîtrait 6 400 fois plus grand et 2 500 fois plus brillant que la pleine Lune vue de la Terre, remplissant un quart d'un hémisphère céleste. Les phases de Phobos peuvent être perçues depuis Mars; sa période synodique est seulement 13 secondes plus longue que sa période sidérale.

Transits

Pour un observateur martien, Phobos transite régulièrement devant le Soleil. Il n'est pas assez grand pour couvrir le disque solaire dans son intégralité et ne peut donc pas créer d'éclipse totale. Plusieurs de ces transits ont été photographiés par le rover *Opportunity*. Pendant ces transits, l'ombre (ou plutôt l'anté-ombre) et la pénombre de Phobos est visible à la surface de Mars et a été photographiée par plusieurs sondes spatiales.

Fin

L'orbite basse de Phobos signifie qu'il sera un jour détruit : les forces de marée abaissent progressivement son orbite, au rythme actuel de 1,8 m par siècle. On s'attend à ce qu'il soit détruit dans environ 11 millions d'années : il devrait s'écraser à la surface de Mars ou plus probablement se briser et former un anneau planétaire. En prenant compte de sa forme irrégulière et en considérant qu'il s'agit d'un amas de roches (plus spécifiquement un objet de Mohr-Coulomb), il a été calculé que Phobos est stable par rapport aux forces de marées, mais qu'il devrait dépasser la limite de Roche lorsque son rayon orbital descendra en dessous de 7 100 km et sera probablement détruit peu après.

Origine

Phobos et Deimos ont tous les deux beaucoup de caractéristiques en commun avec les astéroïdes de type C, au niveau du spectre, de l'albédo et de la masse volumique. En conséquence, il a été postulé que les deux satellites pourraient provenir de la ceinture d'astéroïdes et auraient été capturés par Mars. Cependant, les deux lunes sont situées sur des orbites très circulaires très peu inclinées par rapport au plan équatorial de Mars. On attendrait de lunes capturées des orbites excentriques et des inclinaisons aléatoires. D'autre part, les récentes images de Phobos envoyées par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter montrent clairement une zone bleue près du bord d'un cratère, sur une surface par ailleurs rouge. Un tel contraste est rare sur un astéroïde. Des astronomes estiment que le bleu correspond à du sol récemment mis à nu, n'ayant pas encore été coloré en rouge; pour d'autres, il s'agit d'une matière souterraine totalement différente qui surgit à l'extérieur.

Phobos « creux »

Dans les années 1950 et 1960, l'orbite inhabituelle de Phobos et sa faible densité ont conduit à spéculer qu'il pourrait s'agir d'un objet artificiel creux. Vers 1958, l'astrophysicien russe Iosef Shklovski, étudiant l'accélération du mouvement orbital de Phobos, suggéra que le satellite était formé d'une mince couche de métal. Shklovsky basa ses analyses sur des estimations de la densité de la haute atmosphère martienne et en déduisit que pour prendre en compte un léger freinage, Phobos devait être très léger; un calcul conduisit à le modéliser par une sphère d'acier creuse de 16 km de diamètre et de moins de 6 cm d'épaisseur.

En février 1960, dans une lettre au journal *Astronautics*, Fred Singer, conseiller scientifique du président des États-Unis Eisenhower, soutint la théorie de Shklovsky, allant jusqu'à affirmer que « le but [de Phobos] est probablement de balayer les rayonnements dans l'atmosphère martienne, afin que les Martiens puissent exploiter les alentours de leur planète ».

Par la suite, l'existence de l'accélération ayant conduit à ces assertions fut mise en doute, et le problème avait disparu en 1969. Les études antérieures surestimaient la perte d'altitude de Phobos en utilisant des valeurs de 5 cm/an qui furent par la suite révisées à 1,8 cm/an. Les perturbations de l'accélération du satellite sont désormais attribuées à des effets de marée qui n'étaient pas pris en compte alors. La masse volumique de Phobos est actuellement évaluée à 1 900 kg/m³, ce qui ne correspond pas à une coquille creuse. En outre, les images obtenues par les sondes spatiales depuis les années 1970 indiquent clairement que Phobos est un objet d'origine naturelle, amplement cratérisé à l'instar de la plupart des lunes du Système solaire. Cependant, à la suite de l'analyse des données recueillies en 2008 par la sonde MEX de l'Agence Spatiale Européenne, il semblerait que Phobos présenterait une importante porosité, de l'ordre de 25 à 35 %.

Exploration

Phobos a été photographié à de nombreuses reprises par des sondes spatiales dont l'objectif principal était l'exploration de Mars. La première était Mariner 9 en 1971, suivie par Viking 1 en 1977, Mars Global Surveyor en 1998 et 2003 et Mars Express en 2004. Les deux seules sondes dédiées à Phobos furent les sondes soviétiques Phobos 1 et Phobos 2 en 1988; la première fut perdue sur le trajet entre la Terre et Mars et la seconde retourna quelques images et données avant de tomber en panne. En mars 2010, Mars express est passé à 67 kilomètres de Phobos. L'agence spatiale fédérale russe et le CNES ont lancé une mission vers Phobos le 9 novembre 2011. Baptisée Phobos-Grunt, elle devait rapporter des échantillons du satellite au printemps 2013, mais n'a jamais réussi à quitter l'orbite terrestre. EADS Astrium projette également une mission similaire. En août 2013, le rover Curiosity en mission d'exploration à la surface de Mars photographie l'éclipse de Déimos par Phobos.

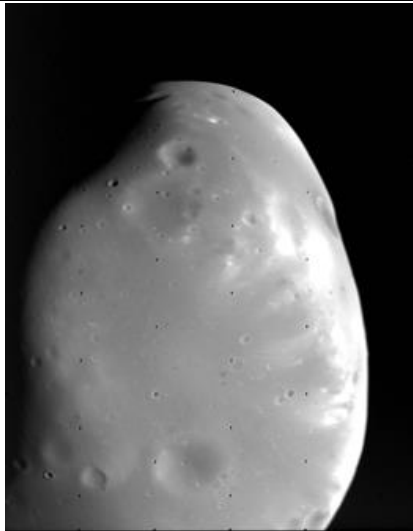
B) Deimos

Déimos, en désignation systématique **Mars II**, est le plus petit et le plus éloigné des deux satellites naturels de Mars (l'autre étant Phobos).

Masse et dimension

Déimos est un petit corps fortement irrégulier, avec des dimensions de 15 × 12 × 10 km; comme beaucoup d'objets de cette taille, Déimos possède une forme non sphérique, n'étant pas suffisamment massif pour prendre une forme plus régulière. Il s'agit de l'un des plus petits satellites naturels d'une planète du Système solaire, mais des satellites plus petits sont connus autour de Jupiter, Saturne ou Uranus. Par comparaison,

Déimos est trois cents fois plus petit que la Lune, deux fois plus petit que l'autre satellite de Mars, Phobos. La masse de Déimos est également faible : $1,476 \times 10^{15}$ kg (soit un peu moins de 1 500 milliards de tonnes), soit moins d'un septième de celle de Phobos et environ 50 millions de fois moins que celle de la Lune. Sa masse volumique est $2,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La gravité à la surface de Déimos est très faible ($0,004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) : un homme à sa surface aurait l'impression de ne peser que quelques grammes. Il possède une vitesse de libération de $22 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ce qui permettrait de se mettre en orbite simplement en courant (s'il était possible de courir à sa surface).

Déimos	
	
Vue de Déimos par la sonde Viking 2.	
Type	Satellite naturel de Mars
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	23 460 km
Excentricité	0,0002
Période de révolution	1,26244 j
Inclinaison	0,93° (par rapport à l'équateur de Mars)
Caractéristiques physiques	
Dimensions	15,0 × 12 × 10,4 km
Masse	$1,48 \times 10^{15} \text{ kg}$
Masse volumique moyenne	$2,2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Gravité à la surface	$0,0039 \text{ m/s}^2$
Période de rotation	1,26244 j
Albédo moyen	0,07
Température de surface	≈233 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	Aucune
Découverte	
Découvert par	Asaph Hall. le 12 août 1877

Surface

La surface de Déimos est très sombre (son albédo n'atteint que 0,07) et est d'une couleur noire rougeâtre. On peut discerner des taches claires qui seraient causées par de fines particules éjectées lors des impacts de météorites. Sur les images prises par la sonde *Viking 2* en 1977, la surface de Déimos semble recouverte d'une épaisse couche de régolithe qui en efface les reliefs. Des observations menées par le radiotélescope d'Arecibo en 2005 semblent confirmer la nature de cette couche, ainsi que le très faible albédo du satellite, peut-être le plus faible mesuré dans le Système solaire. La couche de régolithe pourrait atteindre 100 m de profondeur et serait causée par la pulvérisation de météorites sur sa surface. On ne retrouve pas cette abondance de régolithe sur Phobos où la poussière subit l'influence des forces de marées de Mars. Toute la surface de Déimos n'est pas connue : seuls 60 % ont été photographiés par des sondes spatiales. Si la densité de cratère est la même que sur Phobos, leurs reliefs sont moins marqués car ils sont partiellement comblés par le régolithe. Seuls deux cratères de Déimos ont été nommés : Swift et Voltaire. Le plus grand mesure 3 km de diamètre, une taille conséquente pour un astre aussi petit.

Composition interne

Déimos est trop petit pour posséder une structure complexe, et il est un simple agrégat de matière. Possédant une densité très faible, il pourrait être composé de roche et de glace ou être poreux. Sa couleur et sa densité sont proches de celles des astéroïdes de type « C » (chondrites carbonées) que l'on trouve dans la ceinture principale.

Orbite

D'un demi grand axe de 23 460 km, son orbite est presque circulaire (son excentricité n'atteint que 0,0002) et faiblement inclinée par rapport à l'équateur de Mars (0,93°). Sa vitesse orbitale moyenne autour de Mars est de 1,35 km·s⁻¹.

Situé légèrement au-delà de l'orbite synchrone de Mars (17 000 km), Déimos s'éloigne lentement de la planète.

Comme la Lune ou Phobos, il est en rotation synchrone, présentant toujours la même face à la planète. Sa période de rotation est donc exactement la même que sa période de révolution autour de Mars: 30 heures et 18 minutes.

Origine

La densité de cratères donne un âge entre 2,5 et 3 milliards d'années. Phobos et Deimos ont tous les deux beaucoup de caractéristiques en commun avec les astéroïdes de type C, au niveau du spectre, de l'albédo et de la masse volumique. En conséquence, il a été postulé que les deux satellites pourraient provenir de la ceinture d'astéroïdes et auraient été capturés par Mars. Cependant, les deux lunes sont situées sur des orbites très circulaires très peu inclinées par rapport au plan équatorial de Mars. On attendrait de lunes capturées des orbites excentriques et des inclinaisons aléatoires. Pour expliquer l'orbite circulaire et la faible inclinaison des deux lunes, deux autres hypothèses ont été avancées. La première est la coaccrétion. Comme les lunes des géantes gazeuses, Phobos et Deimos se seraient formés en même temps que Mars. La seconde fait des deux lunes les résidus d'un impact météoritique sur Mars. Ces hypothèses nécessitent pour Phobos et Deimos une composition très proches de Mars ce qui semble *a priori* contradictoire, sauf à supposer que la couleur de surface des lunes soit due à des silicates altérés par les rayons cosmiques.

Visibilité

Depuis la Terre

À cause de sa petite taille et de son faible albédo, il possède une magnitude apparente de 12,7. Son observation est donc très difficile pour un astronome amateur.

Depuis Mars

Vu depuis Mars, Déimos possède un diamètre angulaire de 2,5 minutes d'arc ce qui rend son disque difficilement discernable à l'œil nu. À la pleine lune, sa luminosité serait à peu près celle de Vénus vue de la Terre. À cause de sa proximité et de la faible inclinaison de son orbite, un observateur doit se trouver entre -82° et +82° de latitude pour l'observer. Vu depuis la surface, il se lève à l'est et se couche à l'ouest. Comme la période de révolution de Déimos n'est que de six heures plus longue que la période de rotation

de Mars, il lui faut 2 jours et 16 heures entre le moment où il se lève sur l'horizon et le moment où il se couche. Pendant cette période il présente deux fois de suite ses phases croissantes et décroissantes.

Transits

Déimos passe en moyenne deux fois par année martienne devant le Soleil quand il est observé depuis un point fixe de Mars. À cause de sa petite taille, il ne peut pas provoquer une éclipse totale et ne couvre environ qu'un pour cent du disque solaire. Il apparaît donc comme un petit point noir traversant le Soleil. Son diamètre angulaire est seulement 2,5 fois plus grand que celui d'un transit de Vénus observé de la Terre. Le transit de Déimos a été photographié par les deux rovers de la mission Mars Exploration Rover (MER), le 4 mars 2004 pour Opportunity et le 13 mars 2004 pour Spirit depuis le site du Cratère Gusev.

Historique

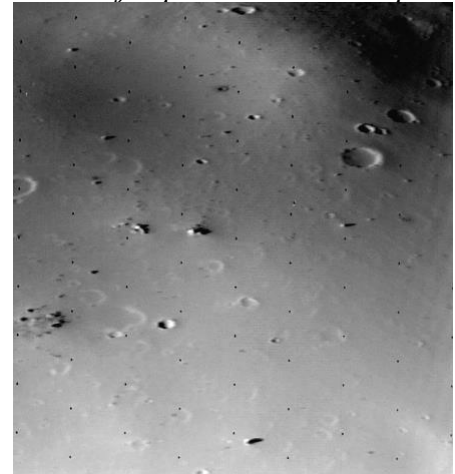
Supposition

Johannes Kepler pensait que le nombre de satellites autour d'une planète était organisé selon un ordre croissant à partir de la Terre. Ainsi, il suppose que Mars dispose de deux satellites (le double de la Terre), Jupiter quatre (découverts par Galilée), Saturne huit, etc. Cette idée est reprise par Jonathan Swift dans son œuvre *Les Voyages de Gulliver* publiée en 1726 (ce dernier va jusqu'à donner des périodes de révolution qui se sont révélées relativement proches de la réalité) et Voltaire dans *Micromégas* en 1752. Cette hypothèse ne se basait sur aucune observation et s'est révélée inexacte, sauf pour Mars, où à ce jour on ne connaît que deux satellites.

Exploration

Aucune mission spatiale n'a été spécifiquement consacrée à Déimos. En revanche, plusieurs sondes destinées à l'exploration de Mars ont été utilisées pour observer Déimos. Les premières photographies spatiales de Déimos furent effectuées par la sonde américaine *Mariner 9*, en 1971. Cette observation ne faisait pas partie du programme initial : *Mariner 9* était exclusivement destinée à observer la surface martienne. Lors de son insertion orbitale, celle-ci était masquée par une violente tempête de poussière; la NASA décida de repousser les observations de Mars; dans l'intervalle, les deux lunes de la planète furent photographiées. En octobre 1977, l'orbiteur de la sonde américaine *Viking 2* s'approcha à plusieurs reprises de Déimos, jusqu'à 22 km de distance. Elle obtint des clichés d'une résolution supérieure à 1,5 mètre par pixel. Le 10 juillet 2006, la sonde américaine *Mars Global Surveyor* photographia Déimos à une distance de 22 985 km, obtenant une image d'une résolution de 95 mètres par pixel. *Viking 2* et *Mars Global Surveyor* sont les deux seules sondes à s'être approchées de manière significative de Déimos. En 2007, il n'existait aucun projet pour obtenir d'autres clichés détaillés de la surface du satellite. En août 2013, le rover *Curiosity* en exploration à la surface de Mars photographie l'éclipse de Déimos par Phobos.

Vue de Deimos à 30 km de distance. C'est l'une des meilleures résolutions d'images prises en orbite ou survol par une sonde spatiale, ici Viking 2. L'image couvre une zone de 1,2 km par 1,5 km et montre des éléments d'une taille de 3 mètres. Beaucoup de cratères sont ici recouverts d'une couche de régolithe pouvant aller jusqu'à 50 mètres d'épaisseur



Photographie de Déimos par la sonde Viking 1

VI Les sondes envoyées vers Mars

L'**exploration de Mars** tient une place particulièrement importante dans les programmes scientifiques d'exploration du système solaire des principales puissances spatiales. Près de quarante sondes, orbiteurs et atterrisseurs, ont été envoyées vers Mars depuis le début des années 1960. Les motivations sont multiples. Mars constitue d'abord une destination proche ce qui permet d'y envoyer relativement facilement des engins spatiaux. Par ailleurs, contrairement aux autres planètes du Système solaire, Mars a sans aucun doute connu par le passé des conditions assez proches de celles régnant sur Terre qui ont pu, mais cela reste à confirmer, permettre l'apparition de la vie. Depuis l'invention du télescope cette planète de type terrestre intrigue les scientifiques comme le grand public. Certains ont spéculé sur la présence d'une civilisation martienne. Mais le premier survol de Mars par la sonde américaine Mariner 4 (1964) dévoile une planète beaucoup moins accueillante que prévu dotée d'une atmosphère très ténue, sans champ magnétique pour la protéger des rayonnements stérilisants et comportant une surface d'apparence lunaire très ancienne. Toutefois les observations plus poussées menées par l'orbiteur Mariner 9 (1971) montrent que Mars présente en fait une géologie plus complexe avec des traces de volcanisme et des formes peut-être façonnées par des eaux de surface. Mars a été un des enjeux de la Course à l'espace, affrontement pacifique entre les États-Unis et l'Union soviétique à l'époque de la Guerre froide. L'URSS parvient la première à poser sur le sol de la planète l'atterrisseur Mars 3 (1971) mais celui-ci ne survit que 20 secondes. Les deux atterrisseurs américains du programme Viking accompagnés par des orbiteurs qui arrivent sur Mars en 1976 se caractérisent par leur longévité et fournissent une moisson d'informations sur la planète : composition de l'atmosphère, météorologie martienne, premières analyses du sol martien in situ. Une tentative de détection d'une vie microbienne au moyen d'un mini laboratoire embarqué ne fournit pas de résultat déterminant. Durant les 20 ans qui suivent plus aucune mission n'est lancée vers Mars. Dès cette époque des projets de missions spatiale habitée sont élaborés. Mais le défi technique et financier soulevé par une telle mission reste dans les années 2010 hors de portée des capacités des agences spatiales les mieux dotées. Les années 1990 voient la reprise des missions d'exploration de Mars avec des résultats contrastés. Pas moins de sept sondes spatiales sont perdues : les deux sondes spatiales du programme soviétique Phobos (1988) lancées vers le satellite Phobos, la sonde de la NASA (Mars Observer (1992), la sonde soviétique Mars 96 (1996) développée avec une forte participation européenne, les sondes américaines Mars Climate Orbiter (1998) et Mars Polar Lander (1998), et enfin la sonde japonaise Nozomi (1998). La NASA connaît toutefois deux succès l'un essentiellement technologique avec le petit rover Sojourner déposé sur le sol martien par Mars Pathfinder (1996) et l'autre scientifique avec l'orbiteur Mars Global Surveyor (1996) qui va collecter des données détaillées sur la planète durant 9 ans. Ce dernier détecte la présence de minéraux qui prouvent que Mars n'a pas toujours été la planète aride que l'on connaît aujourd'hui.

Les années 2000 sont beaucoup plus fructueuses. Au début de cette décennie la NASA développe plusieurs missions à budget modéré dont l'objectif principal est la recherche de la présence passée et présente d'eau. Ce sont les orbiteurs 2001 Mars Odyssey et Mars Reconnaissance Orbiter (2005), les deux rovers MER (2003) et l'atterrisseur Phoenix (2007) qui se pose sur la calotte polaire. L'ensemble des informations recueillies complétées par celle de l'orbiteur européen Mars Express (2003) permettent d'esquisser une histoire géologique et climatique de Mars et de préparer la mission particulièrement ambitieuse et coûteuse du rover Mars Science Laboratory lancé en 2011. Celui-ci, doté d'une instrumentation scientifique sophistiquée, doit réaliser une étude géologique et minéralogique très poussée qui pourrait permettre de détecter indirectement la présence passée d'une vie sur Mars. Mais cette période est également marquée par l'abandon du projet de retour d'échantillon martien stoppé pour des raisons techniques et financières et de celui du réseau de stations météorologiques MetNet. Malgré la récession économique qui limite les budgets de l'exploration spatiale à partir de 2011, Mars reste une destination très visitée avec les orbiteurs Maven (étude des mécanismes qui entraînent la disparition de l'atmosphère martienne) et Mars Orbiter Mission lancés en 2013, l'atterrisseur InSight chargé d'étudier la structure interne de la planète et l'orbiteur ExoMars Trace Gas Orbiter qui remplit une mission analogue à MAVEN en 2016, le rover européen ExoMars en 2018 et le rover Mars 2020 chargé de préparer une future mission de retour d'échantillons sur Terre.

L'état des connaissances au début de l'ère spatiale

À la fin des années 1950, peu avant que les premières sondes spatiales vers Mars ne soient lancées, les connaissances sur Mars découlent des observations effectuées avec les télescopes terrestres qui ne permettent pas de distinguer des détails inférieurs à 100 km. Ces instruments permettent de distinguer une planète rougeâtre comportant des structures au sol de grande taille alternativement claires et sombres et deux calottes polaires dont la taille varie au cours de l'année. On considère généralement que ces dernières sont constituées de glace d'eau. Pour les scientifiques la planète présente une atmosphère car à certaines périodes de l'année les détails de la surface s'estompent et qu'on a pu observer des nuages de couleur blanche ou jaune. Enfin certains observateurs estiment qu'une végétation fruste (lichens) subsiste peut être à la surface de la planète ce qui expliquerait les variations de teinte observée selon les saisons. Les estimations de pression atmosphérique sont largement au-dessus de la réalité et les températures avancées (de 10 à 25 °C à l'équateur dans une étude réalisée dans les années 1920) sont également fortement surévaluées.

A) Déroulement d'une mission automatique vers Mars

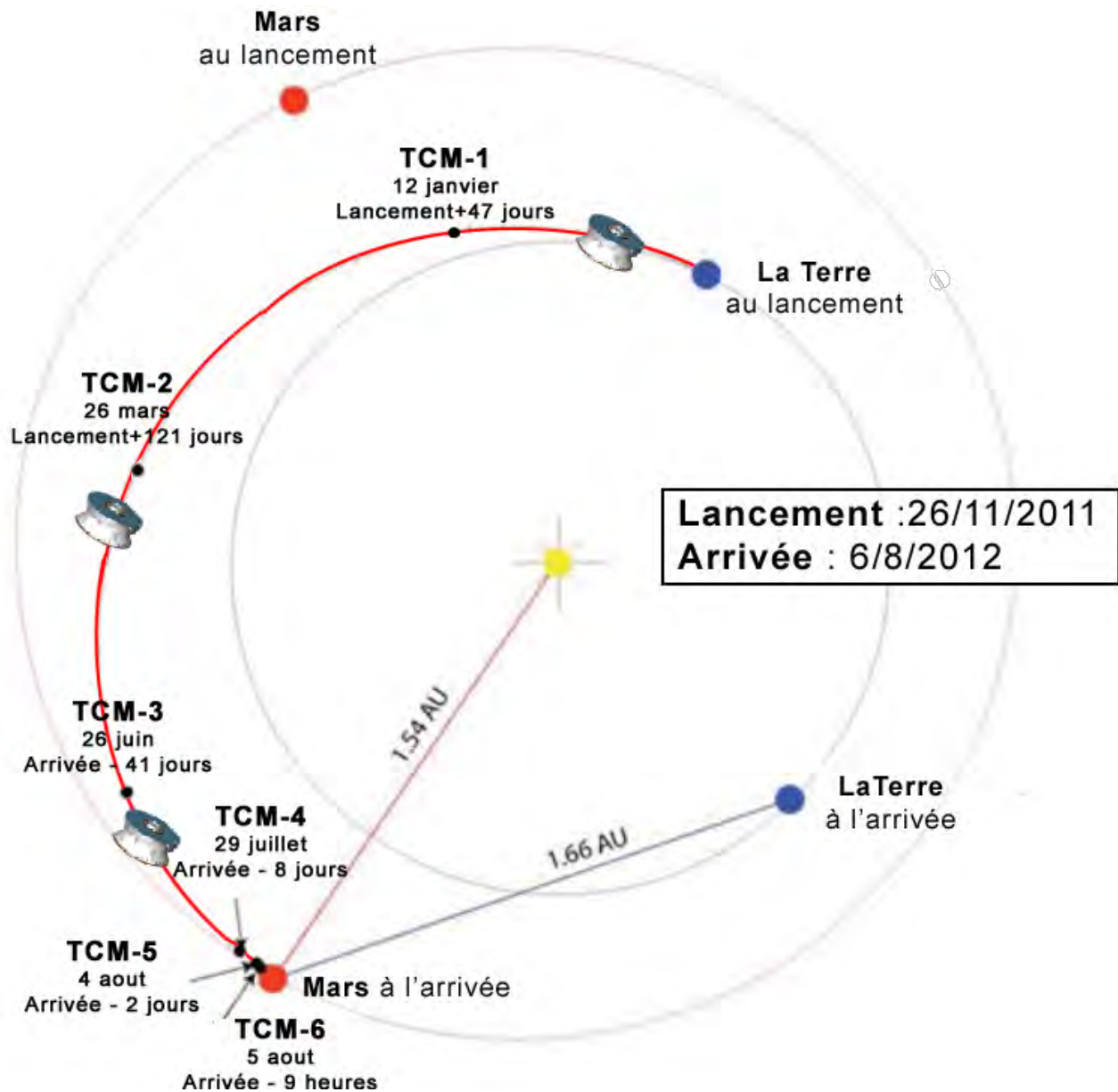
Une fenêtre de lancement tous les deux ans

Une sonde spatiale ne peut rejoindre en ligne droite Mars. Le choix de sa trajectoire et de manière liée sa date de lancement est contraint par les règles de la mécanique spatiale :

- Mars se déplace sur une orbite située à l'extérieur de celle de la Terre et sur le même plan que celle-ci. Sa distance avec la Terre varie fortement : lorsqu'elle se situe derrière le Soleil vu de la Terre, elle se trouve à 400 millions de km (plus de mille fois la distance Terre-Lune parcourue en 3 jours par les astronautes du programme Apollo), tandis qu'elle n'est éloignée que de 56 millions de km lorsqu'elle occupe la position relative opposée;
- les deux planètes se déplacent à des vitesses considérables sur leur orbite (près de 30 km/s pour la Terre, 21 km/s pour Mars). Cette vitesse est communiquée au vaisseau lorsqu'il décolle de la Terre. Ceci rend impossible avec les capacités des fusées actuelles d'effectuer une route directe vers Mars qui nécessiterait d'annuler en partie l'énorme vitesse acquise au départ;
- la trajectoire qui consomme le moins de carburant consiste à lancer le vaisseau sur une orbite elliptique qui tangente l'orbite terrestre au départ et l'orbite martienne à son arrivée (orbite de Hohmann). Cette trajectoire ne peut être parcourue dans un temps et avec une dépense d'énergie raisonnable que lorsque Mars est en opposition avec la Terre. Cette configuration se reproduit à peu près tous les 26 mois. Le temps mis par un vaisseau pour parcourir le trajet Terre-Mars dans la configuration la plus favorable tout en réduisant la consommation de carburant au minimum est de 258 jours. En dépensant relativement peu de carburant supplémentaire, on peut faire chuter cette durée à 180 jours.

La mise en orbite autour de Mars

Une fois que la sonde spatiale a échappé à l'attraction terrestre, si elle dispose d'une vitesse suffisante et qu'elle est lancée sous le bon azimuth lorsque la fenêtre de lancement est ouverte (tous les 26 mois), la sonde spatiale peut effectuer un survol de Mars. Il est toutefois nécessaire qu'elle effectue quelques corrections de trajectoire durant son transit pour survoler à faible distance la planète. Pour pouvoir se mettre en orbite autour de Mars, la sonde doit décélérer fortement. Cette décélération (environ 2,3 km/s) doit être d'autant plus importante que l'orbite visée est proche de Mars. La quantité de carburant qui doit être emportée pour cette manœuvre représente 40 à 50 % de la masse de la sonde. La NASA a mis au point une technique pour réduire la masse de carburant emportée : la sonde spatiale est placée sur une orbite fortement elliptique qui demande nettement moins de carburant puis l'orbite est progressivement réduite par des passages de la sonde dans les couches supérieures de l'atmosphère martienne qui réduit la vitesse de l'engin et donc son orbite. Cette technique dite du freinage atmosphérique a été expérimentée pour la première fois avec Mars Global Surveyor en 1996. Elle nécessite une extrême précision de la trajectoire pour éviter que la sonde ne se trouve dans une atmosphère trop épaisse et ne se désintègre. Elle est d'autant plus difficile à appliquer sur Mars que la pression atmosphérique peut varier très rapidement du simple au double sous l'effet des tempêtes.



Le vol interplanétaire de la sonde spatiale MSL : un exemple typique de transit entre la Terre et Mars

Atterrir sur Mars

Pour faire atterrir une sonde spatiale sur le sol martien il est nécessaire d'annuler la vitesse que celle-ci va acquérir automatiquement en plongeant vers le sol martien. Si la sonde s'est mise auparavant en orbite basse autour de Mars elle doit décélérer d'environ 4,1 km/s. Dans le cas général pour économiser du carburant, l'atterrisseur en provenance de la Terre plonge directement vers le sol martien et sa vitesse est comprise pour les missions américaines entre 4,5 (sondes Viking) et 7,5 km/s (Mars Pathfinder). Pour annuler cette vitesse il existe plusieurs méthodes qui sont en pratique combinées :

- l'aérofreinage utilise les forces de trainée c'est-à-dire le frottement de l'atmosphère. C'est ce que font les vaisseaux habités qui reviennent sur Terre en décélérant légèrement ce qui fait décroître leur orbite de manière à entamer le processus. L'atmosphère fait alors tout le travail et la seule pénalité en poids est constituée par la masse du bouclier thermique qui protège le vaisseau de l'élévation de température très forte durant la phase de freinage (la masse de ce bouclier peut être néanmoins significative). Cette méthode peut être utilisée à toutes les vitesses.
- L'utilisation d'un parachute ne permet de réduire la vitesse qu'à partir du moment où celle-ci se situe autour de Mach 1. Par ailleurs elle n'est pas suffisante pour poser la sonde sur le sol car la vitesse résiduelle est trop importante (a fortiori sur Mars à l'atmosphère ténue) et cette phase de vol passif ne permet pas d'éviter une zone d'atterrissage parsemée d'obstacles.

- on peut également annuler la vitesse en ayant recours à la poussée de moteurs-fusées. Cette solution est extrêmement coûteuse car elle nécessite de consacrer une grande partie de la masse du vaisseau au carburant utilisé. La masse qui doit être sacrifiée est proportionnelle à la gravité de la planète : poser sur la Lune le module Apollo sacrifie ainsi la moitié du poids du vaisseau au profit du carburant avec une vitesse à annuler 3 fois plus faible que sur Mars. Si on a recours à la méthode coûteuse consistant à utiliser des moteurs-fusées sur une partie significative du vol (pour produire une décélération comprise entre 0,9 et 1,4 km/s, 20 à 30 % de la masse du vaisseau est sacrifiée au profit du carburant selon l'étude de Braun et Manning), sa mise en œuvre est difficile car, à vitesse hypersonique, l'éjection des gaz des moteurs perturbe l'écoulement aérodynamique.
- Pour poser la sonde sur le sol sans l'endommager, plusieurs techniques ont été utilisées : dans le cas d'un atterrisseur fixe recours aux moteurs fusées solidaires de la sonde, utilisation de coussins gonflables (« Airbags ») ou recours à un étage grue à la manière du robot Mars Science Laboratory.

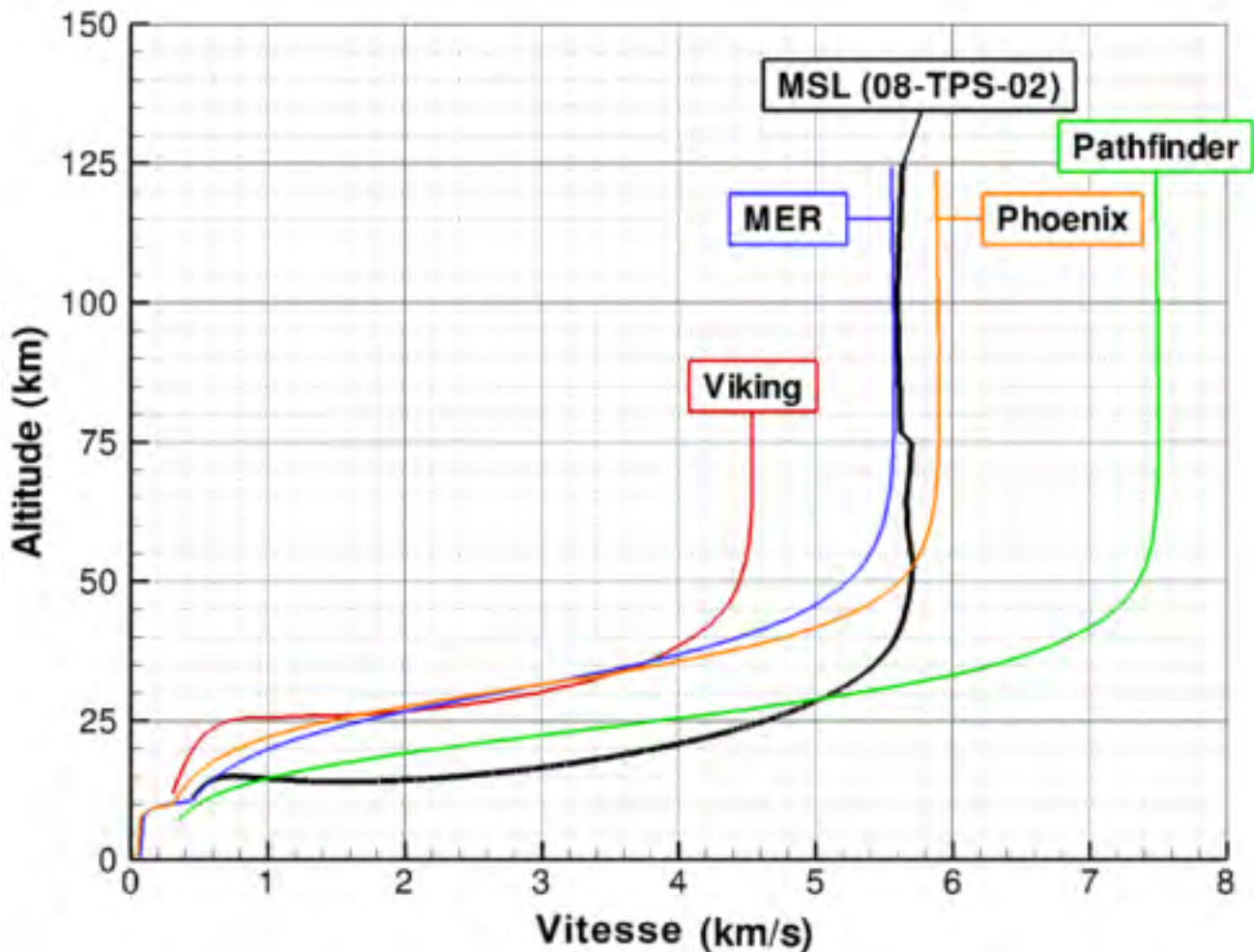


Schéma 1 : la trajectoire d'entrée de plusieurs sondes martiennes

La densité très faible de l'atmosphère de Mars (1 % de celle de la Terre) la place, pour le scénario de descente, dans une situation intermédiaire entre la Terre et la Lune. Le robot Mars Science Laboratory, qui a atterri sur Mars le 6 août 2012, est obligé de recourir à des moteurs pour se freiner à partir de l'altitude de 1 500 mètres. Le problème devient d'autant plus aigu que la charge à poser est lourde. Le deuxième problème soulevé par la faiblesse de la trainée atmosphérique sur Mars est que la vitesse ne devient inférieure à Mach 1 que lorsque le vaisseau est très près du sol : le vaisseau dispose de très peu de temps pour modifier le site d'atterrissage si la trajectoire du vaisseau l'amène sur une zone parsemée d'obstacles ou le conduit à une trop grande distance du lieu visé. La précision de l'atterrissage obtenue est de quelques kilomètres pour le robot MSL qui a recours aux techniques les plus pointues. De plus cette contrainte interdit l'atterrissage sur des zones situées à des altitudes trop élevées car la couche de l'atmosphère traversée est d'autant plus réduite que l'altitude est élevée (soit près de 50 % de la superficie de Mars).

Des recherches sont menées à la NASA pour améliorer l'efficacité du freinage dans une atmosphère peu dense. Différentes techniques sont à l'étude :

- bouclier thermique gonflable offrant une surface de freinage beaucoup plus importante dans la phase haute de la descente;
- structure en forme d'anneau gonflable en remorque du vaisseau à la manière d'une ancre flottante durant la phase haute du vol;
- ballute (croisement entre un parachute et un ballon) déployé avant l'entrée dans l'atmosphère martienne et travaillant également à la manière d'une ancre flottante;
- parachute de très grande dimension (près de 90 mètres de diamètre pour un module pesant 50 tonnes) déployé alors que le vaisseau est à vitesse hypersonique;

Comparaison des performances des différents atterrisseurs martiens américains

Caractéristiques	Viking (1975)	Mars Pathfinder (1996)	MER (2003)	MSL (2011)
Masse au début de la rentrée atmosphérique	992 kg	584 kg	827 kg	3 299 kg
Masse à l'atterrissage	590 kg	360 kg	539 kg	1 541 kg
Masse du rover	-	10,5 kg	185 kg	899 kg
Contrôle durant la rentrée atmosphérique	Orientation uniquement	Non	Non	Angle d'attaque
Ratio portance/trainée	0,18	0	0	0,22
Diamètre du parachute	16 m	12,5 m	14 m	21,5 m
Vitesse à l'ouverture du parachute	Mach 1,1	Mach 1,57	Mach 1,77	Mach 2
Vitesse verticale et horizontale à l'atterrissage	$V_v < 2,4 \text{ m/s}$ $V_h < 1 \text{ m/s}$	$V_v < 12,5 \text{ m/s}$ $V_h < 20 \text{ m/s}$	$V_v < 8 \text{ m/s}$ $V_h < 11,5 \text{ m/s}$	$V_v < 0,75 \text{ m/s}$ $V_h < 0,5 \text{ m/s}$
Méthode d'atterrissage	Rétrofusées	Coussins gonflables	Coussins gonflables	Grutage
Précision de l'atterrissage	280x180 km	200x100 km	80x12 km	7x20 km

B) Les premières sondes et orbiteurs

Ce sont les soviétiques qui se lanceront les premiers dans l'exploration de Mars. Les américains ne les rejoindront que quatre ans plus tard avec le programme Mariner.

1) Première tentative : les missions soviétiques Mars 1 et Zond 2

Dès 1960, l'Union soviétique, qui, contrairement aux États-Unis, dispose déjà à cette époque des lanceurs puissants requis pour des missions d'exploration interplanétaire, envoie deux sondes spatiales vers Mars. Leur objectif est de photographier la surface de la planète mais également d'étudier le milieu interplanétaire et ses effets sur les équipements embarqués. Mais les deux tentatives Marsnik 1 (Mars 1960A) lancé le 10 octobre 1960 et Marsnik 2 (Mars 1960B) lancé quatre jours plus tard échouent à la suite de défaillances du lanceur. En 1962, trois nouvelles tentatives sont effectuées. Le 24 octobre 1962, Spoutnik 22 (aussi nommé Mars 1962A) explose au cours de la manœuvre d'insertion en orbite terrestre. Huit jours plus tard, Mars 1, qui doit survoler Mars afin de prendre des images de sa surface et transmettre des données sur sa structure atmosphérique ainsi que sur le rayonnement cosmique, réussit à échapper à l'attraction terrestre mais, alors qu'elle est à mi-distance de son objectif, la sonde interrompt subitement ses communications. Le 4 novembre 1962, Spoutnik 24 (Mars 1962B) qui emporte le premier atterrisseur jamais conçu ne réussit pas Mars

l'injection sur une orbite de transit. En 1964, l'URSS fait une nouvelle tentative avec le lancement de Zond 2, le 30 novembre 1964. Mais ce nouvel essai aboutit encore sur un échec : la communication est perdue alors que la sonde fait route vers Mars.

2) Le survol de Mariner 4 (1965)

La première fusée américaine à disposer d'une capacité suffisante pour lancer des sondes interplanétaires est l'AtlasAgena. Celle-ci est utilisée pour la première fois en 1962 pour lancer vers Vénus deux sondes spatiales Mariner. Vénus constitue en effet une cible plus facile que Mars qui est à la fois plus éloignée du Soleil et de la Terre. Une sonde spatiale lancée vers Mars nécessite une meilleure isolation thermique, une redondance plus poussée compte tenu de la durée du transit, un équipement radio plus puissant, Le programme d'exploration du système solaire américain est à l'époque porté par le centre Jet Propulsion Laboratory (JPL). Celui-ci obtient en 1962 l'autorisation de développer une mission vers Mars. Cette première mission doit être un simple survol : l'insertion en orbite autour de Mars est préférable sur le plan scientifique car elle permet un temps d'observation sans commune mesure avec celui d'un survol mais ce type de mission est hors de portée des connaissances techniques de l'époque et des capacités de la fusée utilisée car elle nécessite une rétrofusée de forte masse. La petite sonde (260 kg) est équipée d'une caméra qui doit retransmettre les premières images détaillées de Mars mais également d'un magnétomètre pour mesurer le champ magnétique de la planète et de plusieurs instruments destinés à analyser le vent solaire, les particules énergétiques et les micrométéorites à proximité de Mars et dans l'espace interplanétaire. Mariner 3 et Mariner 4 sont programmées pour la prochaine fenêtre de lancement vers Mars qui s'ouvre en 1964. Mariner 3 est lancée le 5 novembre 1964 mais la coiffe ne s'éjecte pas correctement et la sonde est perdue. Le 28 novembre 1964, le lancement de Mariner 4 est un succès et la sonde entame son voyage de 8 mois vers Mars. Le 14 juillet 1965 Mariner 4 survole Mars et fournit les premières images détaillées de sa surface. Les 22 photos d'une qualité moyenne qui sont prises, couvrent environ 1 % de la superficie de Mars : elles révèlent un paysage de type lunaire couverts de cratères d'impact qui d'après leur aspect remontent à une période comprise entre 2 et 4 milliards d'années. Manifestement la planète ne connaît et n'a connu aucun phénomène d'érosion qui trahit la présence d'eau. La partie photographiée ne présente par ailleurs aucun relief, montagne ou vallée. Cette vision déprimante met fin aux spéculations d'une Mars planète jumelle de la Terre popularisée par des auteurs de fiction comme Edgar Rice Burroughs et H.G. Wells. La pression atmosphérique mesurée est tellement faible (4,1 à 7,0 millibars soit 0,5 % de celle de la Terre) que les scientifiques émettent l'hypothèse que les calottes polaires ne sont pas couvertes de glace d'eau mais de dioxyde de carbone. La température de surface mesurée, -100 °C, est également beaucoup plus basse que prévu. Enfin aucun champ magnétique n'est détecté alors que l'existence de celui-ci est une condition indispensable pour permettre à des êtres vivants de survivre en surface. En 1969, la NASA utilise un lanceur beaucoup plus puissant, l'Atlas Centaur, pour lancer vers Mars deux nouvelles sondes, Mariner 6 et Mariner 7, respectivement le 24 février 1969 et le 27 mars 1969. Celles-ci emportent des caméras plus sophistiquées et réussissent toutes deux un survol à faible distance de Mars (3 500 km). Leurs caméras réussissent à prendre près de 1200 photos de bonne qualité qui couvrent 10 % de la superficie de la planète et confirment son apparence désolée et l'absence de toute végétation. La température de la calotte polaire, mesurée à l'aide d'un radiomètre infrarouge embarqué, -133 °C indique la présence de dioxyde de carbone. Enfin la mesure de l'atténuation du signal radio des sondes au moment où elles passent derrière la planète permettent de déterminer la pression atmosphérique mesurée lors des missions précédentes.

3) Mariner 9, premier orbiteur, révèle une géologie complexe (1971)

Pour la fenêtre de lancement suivante, la NASA décide de ne pas tenter un atterrissage qui aurait été couteux mais de lancer deux orbiteurs chargés d'étudier de manière systématique la surface de Mars en particulier les calottes polaires et certaines formations détectées sur les photos prises en 1969 qui s'écartent du modèle lunaire. Les sondes sont nettement plus lourdes (près d'une tonne) car elles emportent une rétrofusée pour la mise en orbite autour de Mars. La première, Mariner 8, est victime d'une défaillance de son lanceur, une fusée Atlas Centaur. Mariner 9 est lancée trois semaines plus tard, le 30 mai 1971 et devient le 14 novembre 1971 le premier satellite artificiel d'une autre planète que la Terre. À son arrivée Mars est complètement voilée par une tempête de poussière qui ne se calme qu'au bout d'un mois. L'orbiteur est placé sur une orbite elliptique de $1\,650 \times 16\,860$ km qui lui permet de réaliser une cartographie de 70 % de la surface de Mars.

La sonde spatiale transmet des images qui révèlent une planète très différente et beaucoup plus intéressante que ce qu'avait laissé entrevoir Mariner 6. La sonde spatiale découvre notamment l'énorme canyon de Valles Marineris profond de 6 km large d'une centaine de km et long de plusieurs milliers de km. Celui-ci se prolonge par des formations géologiques qui ressemblent à des vallées asséchées. La caméra de la sonde spatiale photographie dans la région d'Hellas des plaines comportant peu de cratères donc géologiquement relativement jeunes. Enfin on découvre plusieurs anciens volcans dont Olympus Mons qui avec ses 25 km de haut constituent le relief le plus élevé du système solaire. Les satellites Phobos et Déimos sont également photographiés. De nombreuses formations donnent à penser que l'eau a coulé par le passé sur Mars. La vie a pu apparaître comme sur Terre à cette époque mais le seul moyen de le savoir est d'étudier sur place le sol de la planète, mission confiée au programme Viking en plein développement à cette époque.

C) Les premiers atterrisseurs

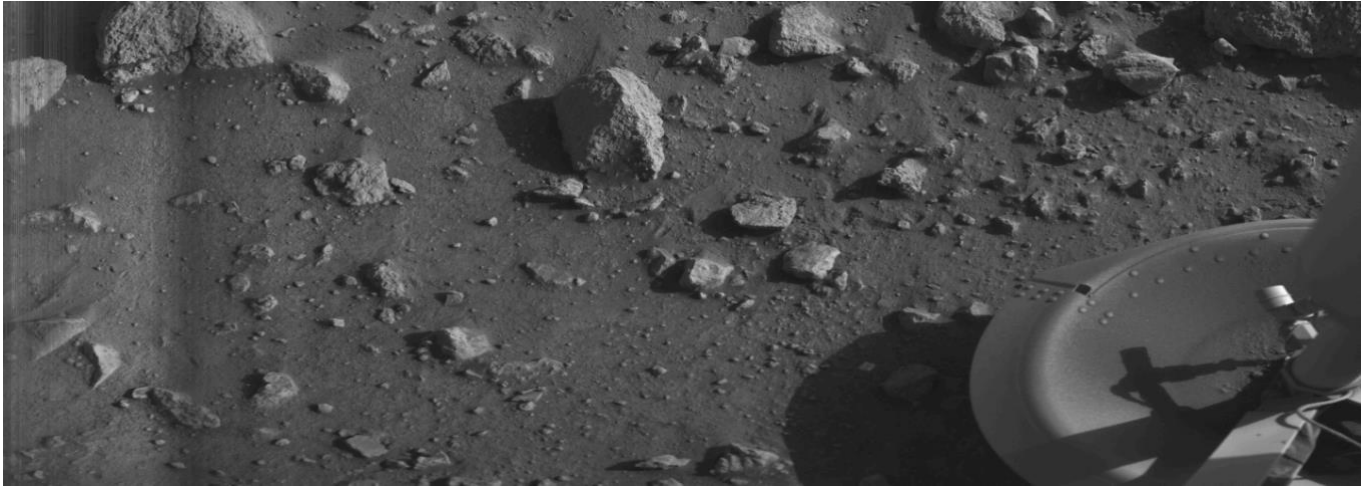
Après le succès du programme Mariner, l'URSS et les États-Unis se concentreront sur des missions plus ambitieuses, faire atterrir une sonde sur Mars. Cet objectif sera d'abord atteint par les russes avec le programme Mars puis par les américains, mais de façon plus convaincante, avec le programme Viking.

1) Le programme soviétique Mars

En 1971, peu après l'échec de Cosmos 419 et dix ans après la première sonde Mars 1, les scientifiques soviétiques lancent avec succès Mars 2 et Mars 3 le 19 mai 1971 et le 28 mai 1971. Chacune de ces deux sondes emporte avec elle un atterrisseur. L'atterrisseur de Mars 2 pénètre dans l'atmosphère martienne 27 novembre 1971, mais sous un angle d'incidence trop fort, causant sa perte. Mars 2 reste néanmoins le premier objet humain à avoir touché la surface de Mars. Cinq jours plus tard, c'est au tour de Mars 3 de larguer son atterrisseur. Cette fois-ci, c'est un succès. Le 2 décembre 1971, l'atterrisseur se pose en douceur. Malheureusement, il ne fonctionne que 20 secondes, le temps de transmettre une image floue et très sombre. Cette défaillance est attribuée à une tempête, expliquant ainsi la faible qualité de l'image reçue. En 1973, les Soviétiques envoient pas moins de quatre sondes en direction de Mars. Mars 4 et Mars 5 sont destinées à se satelliser alors que Mars 6 et Mars 7 emportent chacune un atterrisseur. De ces quatre sondes, seul Mars 5 connaît un succès et peut transmettre 60 images avant de subir une avarie. L'atterrisseur de Mars 6 transmet des données pendant la descente mais cesse d'émettre peu de temps avant son atterrissage présumé. Mars 4 et Mars 7 ratent toutes les deux la « planète rouge ».

2) Les atterrisseurs Viking

En 1975, deux sondes américaines sont envoyées vers Mars, Viking 1 le 20 août 1975 et Viking 2 le 9 septembre 1975, composées chacune d'un satellite d'observation et d'un module d'atterrissage. Les orbiteurs doivent réaliser une cartographie précise de la surface de Mars tandis que les atterrisseurs sont conçus pour détecter une éventuelle forme de vie élémentaire. Au bout d'un voyage de dix mois, les deux sondes parviennent à se placer sur leur orbite. Le 20 juillet 1976, Viking 1 Lander est détaché de son module orbital. Après une descente de quelques heures, il touche le sol martien à l'ouest de Chryse Planitia et transmet ses premières images. Viking 2 Lander atterrit quant à lui le 3 septembre 1976 à 200 kilomètres à l'ouest du cratère d'impact Mie situé dans Utopia Planitia. Même si aucune forme de vie n'a été détectée, le programme Viking reste une réussite spectaculaire. Viking 1 a transmis des informations pendant plus de six ans et Viking 2, pendant près de quatre ans, démontrant une nouvelle fois, après le succès du programme Mariner et celui d'Apollo, l'immense savoir-faire américain en matière d'exploration spatiale. Durant tout ce temps, la quantité de données transmise a été colossale. Les atterrisseurs ont analysé la composition de l'atmosphère et du sol et collecté des données météorologiques sur plus de trois années martiennes (six années terrestre). Les orbiteurs ont photographié la quasi-totalité de la planète avec une résolution inférieure à 300 mètres par pixel et noté les importantes variations de pression atmosphérique liées au cycle du dioxyde de carbone. En outre, l'observation détaillée de Mars a permis de mettre en évidence la présence passée d'eau liquide à sa surface, relançant ainsi la question de la vie sur la « planète rouge ».



Première image transmise de la surface de Mars par Viking 1 quelques minutes après son atterrissage

D) Une pause de 15/20 ans (1975-1996)

Le succès éclatant des missions Viking est paradoxalement suivi d'une période de plus de 20 ans (1975-1996) sans nouvelle mission américaine et globalement sans mission réussie. La majorité des scientifiques et des ingénieurs impliqués dans le programme américain sont stimulés par les résultats fournis par les sondes Viking et attendent logiquement le lancement d'une nouvelle mission aux objectifs plus ambitieux. Mais les administrateurs de la NASA sont beaucoup moins enthousiastes. Le développement de la navette spatiale américaine draine les ressources de l'agence spatiale; de leur point de vue l'agence a atteint ses objectifs en ce qui concerne l'exploration de Mars; ils savent par ailleurs que les images de la plaine morne et rougeâtre de Mars transmises par les caméras des atterrisseurs Viking ont déçu les attentes du grand public et des décideurs politiques qui sous l'influence de certains scientifiques tenant d'une vie sur Mars, s'étaient faits une image beaucoup plus accueillante de la planète. Sur la lancée du programme Viking, les équipes de scientifiques et d'ingénieurs américaines, russes et européennes vont élaborer de nombreux projets, parfois très détaillés, mettre au point de nouveaux concepts de mission. Mais durant ces deux décennies aucun de ces projets ne se concrétisent hormis les deux sondes soviétiques Phobos lancées en 1988 qui ne parviendront pas à destination. À la suite des résultats très décevants de leur programme Mars, les Soviétiques abandonnent l'exploration de la planète pendant près de 15 ans. Ce n'est qu'en 1988 qu'ils reviennent sur le devant de la scène avec le programme Phobos dont le principal objet d'étude est le satellite Phobos. Deux sondes sont envoyées vers Mars : Phobos 1 le 7 juillet 1988 et Phobos 2 le 12 juillet 1988. Les deux lancements se déroulent correctement jusqu'au 2 septembre 1988 où Phobos 1 interrompt brutalement ses communications à la suite d'une erreur humaine. Phobos 2 reste donc la seule sonde à pouvoir accomplir sa mission. Mais le 27 mars 1989, alors que la sonde n'est plus qu'à 50 mètres de Phobos et qu'elle s'apprête à lancer ses deux atterrisseurs, les communications sont une nouvelle fois perdues. On estime aujourd'hui que ce dysfonctionnement a été provoqué par des particules émises lors d'une éruption solaire.

E) Le retour vers Mars de la NASA

1) L'échec de Mars Observer

Dix-sept ans après le programme Viking, soit le temps nécessaire pour dépouiller les données envoyées par les deux sondes jumelles, la NASA décide de retourner vers Mars en lançant Mars Observer le 25 septembre 1992. Mais le 21 août 1993, soit trois jours avant la date prévue pour l'insertion sur son orbite martienne, le contact est perdu. Mars Observer était la sonde la plus coûteuse envoyée par la NASA (813 millions de dollars). Sa charge scientifique était exceptionnelle. L'échec de cette mission particulièrement coûteuse entraîne une révision complète de la stratégie américaine d'exploration du système solaire. La NASA décide de lancer désormais des sondes spatiales moins sophistiquées mais à budget serré : l'objectif est de ne pas tout perdre en cas d'échec tout en permettant la réalisation d'un plus grand nombre de missions avec un cycle de développement raccourci. C'est le « better, faster, cheaper » (*mieux, plus vite, moins cher*) qui devient la devise du nouveau programme Discovery. Dans le cadre de ce programme et à chaque

conjonction favorable de Mars et de la Terre (environ tous les deux ans), la NASA prévoit d'envoyer à la fois une sonde spatiale de type orbiteur, qui doit effectuer ses observations depuis l'orbite martienne, et une autre de type atterrisseur, chargée de se poser sur le sol martien pour y recueillir des données scientifiques. Les objectifs qui étaient assignés initialement à la sonde Mars Observer malchanceuse, sont ventilés entre les orbiteurs beaucoup plus légers du nouveau programme : des copies des instruments scientifiques de Mars Observer seront donc embarquées sur les sondes Mars Global Surveyor qui doit être lancée en 1996, Mars Climate Orbiter (1998), Mars Odyssey (2001) et Mars Reconnaissance Orbiter (2005).

2) Mieux, plus vite, moins cher

Les deux premières sondes du nouveau programme, lancées en 1996, remplissent parfaitement leur mission : l'orbiteur Mars Global Surveyor le 7 novembre 1996, puis l'atterrisseur Mars Pathfinder le 4 décembre 1996. Mars Pathfinder est le premier à rejoindre la « planète rouge », marquant ainsi le retour au succès plus de vingt ans après Viking. Il se pose sur Mars le 4 juillet 1997 dans la région d'Ares Vallis et libère le premier robot mobile, Sojourner, qui explore les environs jusqu'à l'arrêt des transmissions le 27 septembre 1997. Mars Global Surveyor réussit quant à lui à se placer en orbite martienne le 11 septembre 1997. Pendant neuf ans, l'orbiteur étudie l'ensemble de la surface de Mars, son atmosphère et sa structure interne et nous renvoie plus de données sur la planète que toutes les autres missions réunies. Parmi les découvertes importantes, Mars Global Surveyor a révélé la présence de dépôts sédimentaires et d'hématites dans la région de Meridiani Planum, apportant ainsi deux preuves supplémentaires de la présence d'eau liquide dans un passé lointain. L'orbiteur a également découvert un champ magnétique fossile dont la structure pourrait traduire une ancienne tectonique des plaques. Enfin, il a permis de mieux comprendre le cycle de l'eau et a produit une carte topographique globale. Conformément à ses plans, la NASA lance fin 1998/début 1999 deux nouvelles sondes alors que Mars se trouve de nouveau dans une position favorable, mais Mars Climate Orbiter et Mars Polar Lander sont toutes deux victimes de défaillances à trois mois d'intervalle avant d'avoir débuté la partie scientifique de leur mission. Face à cette série de défaillances catastrophiques visiblement liées à sa nouvelle doctrine, la NASA décide de suspendre toutes les missions futures de son programme d'exploration martienne notamment les deux sondes spatiales de Mars Surveyor 2001 en voie d'achèvement. L'orbiteur, qui sera rebaptisé 2001 Mars Odyssey, a des caractéristiques très proches de Mars Climate Orbiter or la perte de cette sonde est avant tout liée à une erreur humaine. La NASA décide donc très rapidement de donner son feu vert à l'achèvement de Mars Odyssey par son constructeur Lockheed Martin. L'atterrisseur Mars Surveyor Lander 2001 quant à lui ne sera jamais lancé et servira de réservoir de pièces détachées pour les missions suivantes. Le coût total de la mission Mars Odyssey est évalué à 297 millions de dollars.

F) Les contributions des autres nations

1) Mars 96

Toujours en quête d'un succès franc et massif, les russes mettent au point une mission qui doit faire date dans l'exploration de la planète Mars. En collaboration avec l'Union européenne et les États-Unis, la Russie conçoit une énorme sonde de 6 180 kilogrammes composée d'un satellite d'observation, de deux modules d'atterrissage et de deux pénétrateurs. Il s'agit de la sonde la mieux équipée jamais lancée par l'homme et doit étudier Mars sous tous ses aspects. Mars 96 est lancée le 16 novembre 1996. Mais une probable défaillance de son lanceur, une fusée Proton, cause sa perte. La mission est un nouvel échec pour la Russie.

2) L'orbiteur japonais Nozomi

1998 marque l'entrée du Japon dans l'exploration de la planète Mars et plus généralement, dans l'exploration interplanétaire. L'objectif est de placer une sonde en orbite autour de la « planète rouge » afin d'étudier les interactions de son atmosphère avec le vent solaire. Nozomi est lancée le 3 juillet 1998. Rapidement victime d'une série d'incidents, dont une panne de son propulseur, elle doit repousser son rendez-vous avec Mars de 1999 à 2004. En 2002, alors qu'elle s'est placée en orbite héliocentrique et profite de l'assistance gravitationnelle de la Terre, la sonde est victime d'une forte éruption solaire qui met à mal ses circuits électriques, faisant craindre le pire. En effet, n'ayant pas été conçue pour atterrir sur Mars, Nozomi n'a pas subi la décontamination recommandée par le COSPAR. Si elle venait à s'écraser sur la planète, les effets pourraient donc être catastrophiques. Face à l'inquiétude de la communauté scientifique,

elle rate volontairement son objectif et passe à 1 000 kilomètres de la « planète rouge » le 14 décembre 2003.

3) L'orbiteur européen Mars Express

Objectifs scientifiques

Les objectifs de la mission sont :

- Dresser une carte en couleur et en relief de la surface de la planète avec une résolution de 10 mètres par pixel et pour des zones choisies de 2 mètres par pixel
- Réaliser une carte fournissant la composition minéralogique de la surface avec une résolution de 100 mètres par pixel
- Localiser à l'aide d'un radar la présence d'éventuelles poches d'eau ou de glace dans le sous-sol de Mars
- Déterminer la composition de l'atmosphère et les processus en jeu : échanges avec la surface, le vent solaire et le milieu interplanétaire
- Déterminer le champ de gravité de la planète et les propriétés diélectriques de la surface de la planète
- Identifier des traces de vie passées ou présentes (atterrisseur Beagle 2)

Profil de la mission

La sonde a été lancée en 2003 pour profiter d'une configuration particulièrement propice qui ne se reproduit que tous les 15 à 17 ans et qui permet à la sonde de rejoindre Mars en 7 mois au lieu des 9 à 12 mois habituels. Cinq jours avant de manœuvrer pour s'insérer en orbite autour Mars, l'atterrisseur Beagle 2 est largué sur une trajectoire qui doit lui permettre d'effectuer une rentrée atmosphérique dans la planète. La sonde utilise peu après son moteur principal pour s'insérer après plusieurs manœuvres sur une orbite polaire elliptique (250 × 10 142 km) d'inclinaison 86°35' qu'elle parcourt en 6,75 heures. Il aurait été préférable que l'orbite soit circulaire pour établir des cartes. Pour cela il aurait fallu soit embarquer beaucoup plus de carburant avec une augmentation sensible du coût de la mission ou avoir recours à l'aérofreinage mais seule la NASA maîtrise cette technique très délicate mise en œuvre par Mars Global Surveyor et Mars Odyssey. La durée nominale de la mission de l'orbiteur était d'une année martienne, soit 687 jours terrestres, et elle devrait ainsi prendre fin le 30 novembre 2005. Le prolongement de la mission d'une année martienne jusqu'au 31 octobre 2007 est prévu dès le départ car un surplus de carburant a été emporté. L'atterrisseur Beagle 2 doit se poser sur Isidis Planitia, un bassin sédimentaire qui pourrait avoir préservé les traces d'une éventuelle vie. Le lieu d'atterrissage (11,6°N, 90,75°E) a été également choisi car il est situé à une altitude suffisamment basse pour permettre de limiter l'épaisseur de l'isolation thermique nécessaire, donc sa masse, et assez dans une atmosphère assez dense pour que les parachutes le freine efficacement. Le site n'est pas trop rocheux et comporte peu de dénivellés importants ce qui limite le nombre de rebonds qu'aura à subir Beagle 2 sur ses coussins gonflables (« airbags »). Le tout réduit les risques à l'atterrissage.

Caractéristiques de la sonde Mars Express

Le corps de la sonde spatiale a la forme d'un parallélépipède de 1,5 m × 1,8 m × 1,4 sur lequel se greffe les différents équipements externes. Sur une de ses faces est placée une antenne parabolique grand gain et sur deux autres, les deux panneaux solaires. La structure est réalisée en nid d'abeille d'aluminium. Sa masse au décollage était de 1 052 kg dont 427 kg de carburant et 60 kg pour l'atterrisseur Beagle 2. Le contractant principal de Mars Express est la société EADS Astrium, à Toulouse. Le lancement a été effectué par la société russo-européenne Starsem chargée de la commercialisation des lanceurs Soyouz.

Énergie électrique

L'énergie électrique est fournie par deux panneaux solaires qui se déploient peu après que la coiffe du lanceur Soyouz a été éjectée. Ils ont une surface totale de 11,42 m² et fournissent 650 Watts lorsque Mars se trouve à son point le plus éloigné du Soleil. Cette capacité est suffisante pour la consommation de l'instrumentation scientifique et des équipements chargés de maintenir la sonde en état de marche qui culmine à 500 Watts durant les échanges de données avec la Terre. Les panneaux solaires sont orientables pour maintenir leur surface perpendiculaire aux rayons du Soleil. En parcourant son orbite la sonde subit périodiquement des éclipses de Soleil d'une durée de 90 minutes durant lesquelles trois batteries lithium-ion d'une capacité totale de 67,5 Ah prennent le relais.

Propulsion

Le moteur-fusée principal de *Mars Express* est utilisé pour placer la sonde sur son orbite martienne. Il consomme des ergols liquides contenus dans deux réservoirs de 267 litres. Le mélange est mis sous pression grâce à un réservoir d'hélium pressurisé de 35 litres et fournit une poussée de 400 newtons. Pour les corrections de trajectoire la sonde dispose de 8 petits moteurs-fusées pouvant délivrer une poussée de 10 newtons et qui sont fixés aux quatre coins de la plateforme de la sonde. Ils utilisent les mêmes carburants que le moteur principal. En cas de défaillance du propulseur principal, ces petits propulseurs pouvaient être également être utilisés pour placer *Mars Express* en orbite autour de Mars, sans toutefois lui permettre d'atteindre son orbite de travail. Le développement de ces moteurs d'appoint a été réalisé dans le cadre de la mission Cluster.

Contrôle d'attitude

Mars Express est stabilisé 3 axes. Pour ses communications avec les stations sur Terre, la précision du pointage doit être de 0,15°. Celle-ci est obtenue à l'aide de plusieurs équipements :

- Deux senseurs stellaires, dont les capteurs sont analogues à de petits télescopes, permettent de déterminer l'orientation de la sonde en identifiant automatiquement les configurations d'étoiles visibles,
- Trois gyromètres à fibre optique (un pour chaque axe de la sonde) développés pour la sonde Rosetta déterminent les vitesses de rotation radiales de la sonde,
- Deux senseurs solaires également développés pour Rosetta sont utilisés par la sonde pour s'orienter par rapport au Soleil juste après le lancement et si la sonde subit une désorientation importante.

Les petites corrections d'orientation sont effectuées à l'aide de roues de réaction : ces équipements sont utilisés pour contrôler l'orientation lorsque la sonde fait fonctionner ses moteurs ou pour maintenir l'antenne ou les instruments scientifiques pointés vers leur cible tout au long de l'orbite.

Télécommunications

Lorsque la sonde spatiale *Mars Express* entame son transit vers Mars, elle utilise une antenne faible gain de 40 cm de diamètre placée sur l'une des faces de la plateforme. Pour ses échanges de données avec la Terre, la sonde dispose d'une antenne parabolique grand gain de 1,6 mètre de diamètre. Lorsqu'elle circule sur son orbite autour de Mars, sa période orbitale est de 7,5 heures. La sonde spatiale pointe son antenne durant 6 heures vers la Terre ce qui lui permet d'envoyer et de recevoir des données. Durant l'heure et demie restante, la sonde pointe son antenne vers la surface de Mars ce qui permet aux instruments scientifiques de collecter leurs données. Durant cette phase elle peut relayer vers la Terre des données venues du sol martien qu'elle recueille grâce à deux antennes UHF. Ce dispositif prévu pour récupérer les données scientifiques de Beagle 2 a été utilisé pour communiquer avec les rovers MER de la NASA. Le système de télécommunication utilise la bande X (7.1 GHz) pour envoyer des données vers la Terre avec un débit qui peut atteindre 230 kbits/s et la bande S pour recevoir des instructions. Lorsque les données ne peuvent pas être envoyées immédiatement aux stations terrestres, elles sont stockées provisoirement dans une mémoire d'une capacité de 12 gigabits.

Contrôle thermique

La majeure partie des composants internes de *Mars Express* doivent être maintenus à une température comprise entre 10 et 20 °C. Cette température est obtenue grâce aux couches de matériau isolant réalisé en alliage d'aluminium recouvert d'une mince couche d'or qui entourent le corps de la sonde spatiale. Certains équipements tels que les panneaux solaires et l'antenne grand gain ne peuvent pas être protégés et sont portés à des températures de 150 °C lorsqu'ils sont exposés au Soleil et à -100 °C lorsqu'ils se trouvent à l'ombre. Dans ces conditions il est important qu'ils ne se déforment pas lorsque la température varie : à cet effet ils sont réalisés en composite carbone. Les instruments PFS et OMEGA doivent être maintenus à une température de -180 °C et les capteurs des caméras doivent également rester à une température extrêmement basse. Ces équipements sont isolés du reste de la sonde et sont reliés à des radiateurs situés sur une face qui n'est pas exposée au Soleil ce qui permet d'évacuer la chaleur dans l'espace dont la température est de -270 °C.

Instruments scientifiques

La charge utile de l'orbiteur est constituée de 7 instruments d'une masse totale de 116 kg :

1. ASPERA (*Analysers of Space Plasmas & Energetic Atoms*) est un instrument qui permet d'analyser les particules chargées et neutres autour de la planète Mars. L'objectif est de comprendre comment les particules du vent solaire interagissent avec l'atmosphère martienne et par quel mécanisme le vent solaire éjecte les particules de l'atmosphère dans le milieu interstellaire. Il est développé par l'Institut suédois de physique spatiale de Kiruna *avec une participation française*;
2. HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) est une caméra produisant des images en trois dimensions en couleur à haute résolution (de 10 mètres par pixel pouvant aller jusqu'à 2 mètres par pixel). Elle est fabriquée par l'Université libre de Berlin et la DLR. HRSC cartographie la surface de Mars. Par stéréographie, la caméra est également capable de fournir des données topographiques et ainsi permettre la réalisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT) avec une précision supérieure à celle de Mola, le laser altimètre américain embarqué sur MGS;
3. OMEGA (*Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité*) est un spectromètre opérant dans le proche infrarouge et les micro-ondes (gamme de longueurs d'onde de 350 μm à 5,1 μm). Il étudie la composition minéralogique de surface et la distribution de certains composés de l'atmosphère et a été conçu par l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay;
4. PFS (*Planetary Fourier Spectrometer*) est un spectromètre infrarouge développé par l'Institut de physique de l'espace interplanétaire de Rome (Italie) optimisé pour l'étude des différents composants de l'atmosphère martienne que sont le dioxyde de carbone (95 %), l'eau, le monoxyde de carbone, le méthane et le formaldéhyde;
5. MaRS (*Mars Radio Science*) est un instrument de l'université de Cologne de radiosciences, utilisant le système radio de l'orbiteur pour étudier par occultation radio l'ionosphère, l'atmosphère, la surface et le sous-sol de Mars;
6. MARSIS (*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding*) est un radar destiné à la détection de présence d'eau sous forme liquide ou solide sous la surface martienne jusqu'à une profondeur de 3 à 4 km. Il est réalisé par l'université de Rome « La Sapienza »;
7. SPICAM (*Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars*) est un spectromètre opérant dans l'ultraviolet et l'infrarouge, mesurant le taux d'ozone et de vapeur d'eau de l'atmosphère. Il est conçu par le service d'aéronomie du CNRS de Verrières-le-Buisson en France.

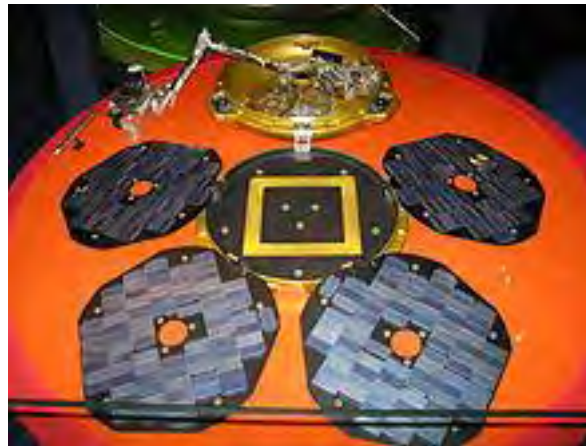
Le contrôle au sol

Le contrôle de la mission est assuré par le Centre européen d'opérations spatiales (ESOC). La salle de contrôle, nommée « salle de contrôle des missions planétaires » (en anglais Planetary missions control room), est partagée avec les missions *Rosetta* et *Vénus Express*. L'équipe de contrôle est constituée d'un manager des opérations (*Spacecraft Operations Manager*), de 8 ingénieurs d'opérations (*Spacecraft Operations Engineers*), de 3 planificateurs (*Mission Planners*), d'un analyste (*Spacecraft Analyst*) et de 5 contrôleurs (*Spacecraft Controllers*); formée 4 ans avant le lancement, elle utilise le logiciel SCOS-2000. Celle-ci est secondée par plusieurs autres équipes chargées par exemple du support informatique ou du calcul de la trajectoire.

L'atterrisseur est contrôlé par l'agence spatiale Britannique au LOCC (Lander Operations Control Centre) depuis Leicester.

La sonde passe une partie de chaque orbite tournée vers Mars et une partie tournée vers la Terre pour transmettre à 230 kb/s les informations collectées (entre 0,5 et 5 Go par jour), comme *Venus Express*. Après 6 mois environ, les données scientifiques sont transmises au Centre européen d'astronomie (ESAC) et stockées dans le Mars Express science data archive. Les antennes utilisées pour communiquer avec la sonde sont celles de *New Norcia*, en Australie, et de *Cebreros* en Espagne; toutes deux mesurant trente-cinq mètres de haut et étant conçues pour pouvoir communiquer avec les sondes les plus éloignées.

L'atterrisseur Beagle 2



Réplique de Beagle 2

Beagle 2 est un atterrisseur de très petite taille (68,8 kg) pour pouvoir être lancé par le lanceur Soyouz avec la sonde Mars Express. Il a la forme d'une soucoupe de 92,4 cm de diamètre et de 52,4 cm de haut. Il comporte :

- un bouclier avant et arrière chargé de le protéger durant la rentrée atmosphérique à grande vitesse,
- un parachute et des coussins gonflables (« airbags ») qui doivent lui permettre de se poser intact sur le sol martien
- la capsule destinée à arriver sur le sol qui renferme les instruments scientifiques et l'équipement qui doit permettre de survivre et de transmettre les données recueillies.

Cette dernière a un diamètre de 64 cm pour une hauteur de 23 cm et pèse 33,2 kg. Elle renferme une bras mobile sur lequel sont fixés les instruments : une meuleuse, une foreuse qui permet de prélever un échantillon de sol jusqu'à 3 mètres de l'atterrisseur, une paire de caméras, un microscope, un spectromètre Mössbauer et un spectromètre à rayons X. Un spectromètre de masse installé au sein de la capsule est chargé de mesurer les proportions des différents isotopes de carbone dans l'échantillon de sol ramené par le bras : ces analyses doivent permettre de déterminer si l'échantillon contenait les restes d'organismes vivants. Enfin plusieurs capteurs doivent permettre de mesurer les caractéristiques de l'environnement : température, pression, vent, poussière, flux ultraviolet. La charge utile est extrêmement miniaturisée puisque sa masse totale est de 11,4 kg. Une fois la capsule parvenue sur le sol martien, la capsule s'ouvre comme une huître et déploie quatre panneaux solaires à l'arséniure de gallium qui fournissent 87 Watts lorsque le Soleil est au plus haut. L'énergie électrique est stockée dans une batterie lithium-ion²⁴. Une antenne installée dans le couvercle de la capsule permet de communiquer avec un débit de 2 à 128 Kbits par seconde avec la Terre par l'intermédiaire de l'orbiteur.

Lancement et transit vers Mars (juin à décembre 2003)

Mars Express est lancée le 2 juin 2003 à 17 h 45 UTC, par un lanceur Soyouz doté d'un 4^e étage supérieur Fregat, depuis le Cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan. La sonde et l'étage supérieur sont placés d'abord sur une orbite d'attente de 200 km puis 1 heure 20 plus tard l'étage Fregat est rallumé et injecte la sonde sur une orbite de transfert vers Mars. Mars Express entame un périple de 400 millions de km en s'éloignant de la Terre à 3 km/s mais avec une vitesse de 32,4 km/s dans le référentiel héliocentrique. La trajectoire de la sonde et sa vitesse sont alors établies avec précision en mesurant le temps mis par des signaux émis par plusieurs stations au sol pour être renvoyés. Deux jours après le lancement, le 4 juin, les petits moteur-fusées de Mars Express sont utilisés pendant quelques minutes pour affiner la trajectoire. Au cours du premier mois du transit vers Mars le fonctionnement des instruments scientifiques est vérifié puis ceux-ci sont éteints. Durant le reste du transit vers Mars la sonde poursuit sa route en envoyant régulièrement des données permettant au contrôle au sol de vérifier son fonctionnement. À deux reprises la caméra HSRC est activée pour prendre en photo la Terre et la Lune puis de Mars à chaque fois à une distance de 5,5 millions de km. Une deuxième manœuvre de correction a lieu en septembre. En novembre, un mois avant le rendez-vous avec Mars, la sonde utilise ses petits moteurs-fusées pour modifier sa trajectoire de manière à ce que l'atterrisseur Beagle qui est dépourvu de propulsion puisse atteindre Mars

et se poser sur le site visé. Le 19 décembre 2003, cinq jours avant le rendez-vous avec Mars, le module Beagle 2 est désolidarisé de la sonde par un dispositif pyrotechnique et s'éloigne repoussé par un mécanisme qui comprend un ressort et qui met l'atterrisseur en rotation pour stabiliser sa trajectoire.

Insertion en orbite martienne

Le 20 décembre la sonde effectue une petite correction de trajectoire. Le 25 décembre la propulsion principale est utilisée durant 37 minutes et freine la sonde de 1,3 km/s pour l'insérer sur une orbite elliptique de $250 \times 150\,000$ km avec une inclinaison de 25° . Les jours suivants de petites corrections sont apportées à cette orbite puis le 30 décembre une correction plus importante place la sonde sur son orbite de travail : c'est une orbite polaire avec une inclinaison de 86° un périégée de 298 km et un apogée 10 107 km. Sur l'orbite choisie la sonde effectue un passage proche de Mars en longeant la surface d'un pôle à l'autre durant lequel elle fait fonctionner ses instruments scientifiques puis elle s'éloigne de Mars et après avoir tourné son antenne vers la Terre envoie les données recueillies. La première phase dure de 0,5 à 1 heure tandis que la période de communications avec la Terre s'étale sur 6,5 à 7 heures. À chaque nouvelle passe la sonde longe une latitude légère différente : la distance entre les traces au sol de deux passages est légèrement inférieure à la largeur du balayage de la caméra haute définition.

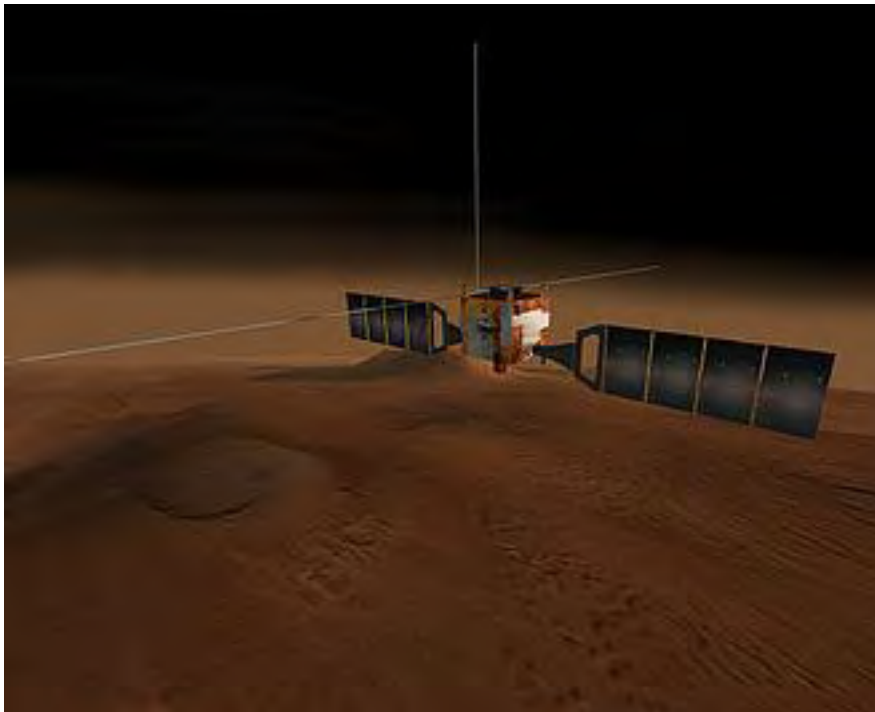
L'échec de Beagle 2

L'atterrisseur Beagle 2 ne dispose pas pour des raisons de poids d'équipements radio lui permettant d'envoyer des données sur sa situation après sa séparation avec l'orbiteur. La première émission radio doit être émise après son atterrissage sur le sol martien qui doit se produire le 25 décembre à 3h40. La sonde Mars Odyssey qui doit survoler le site vers 5h30 dispose d'un équipement de réception radio lui permettant de recevoir le signal de Beagle 2. Aucun signal ne sera capté par Mars Odyssey lors de son passage ni plus tard.

Premiers résultats

Le 23 janvier 2004, la sonde confirme l'existence d'eau sous forme de glace au pôle sud grâce aux instruments « Omega » et « Spicam ».

Déploiement de Marsis (2005)



Les antennes du radar sont déployées sur cette vue d'artiste de la sonde spatiale

Lors de la conception de SHARAD, une version améliorée du radar MARSIS qui sera embarqué à bord de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), des simulations informatiques ont mis en évidence que le déploiement de MARSIS pourrait endommager la sonde en se déployant trop rapidement. Il a donc été

décidé en avril 2004 de reporter la mise en service de MARSIS. Après enquête, le déploiement des 3 antennes radar constituant MARSIS se fait avec plus d'un an de retard, le 17 juin 2005. Mais après l'échec de nombreuses missions martiennes (Mars 96, Mars Climate Orbiter, Mars Polar Lander et Nozomi), l'ESA ne voulait prendre aucun risque avec une mission qui avait fait jusque-là un quasi-sans faute. Le radar a été mis en fonction le 19 juin et, après une période de tests, il devrait commencer ses premières véritables observations scientifiques le 4 juillet. Le 13 septembre 2005, une commission d'enquête est créée pour faire la lumière sur la cause du mauvais fonctionnement du spectromètre PFS depuis plusieurs mois. Des vibrations de la sonde dues à son activité ont été avancées pour expliquer la cause du mauvais fonctionnement, sans pouvoir en déterminer l'origine avec précision.

Survol de Phobos (2009)

Le 3 mars 2010, la sonde européenne est passée à 67 km de Phobos. L'objectif de ce passage à basse altitude était la mesure précise du champ de gravité très faible de Phobos.

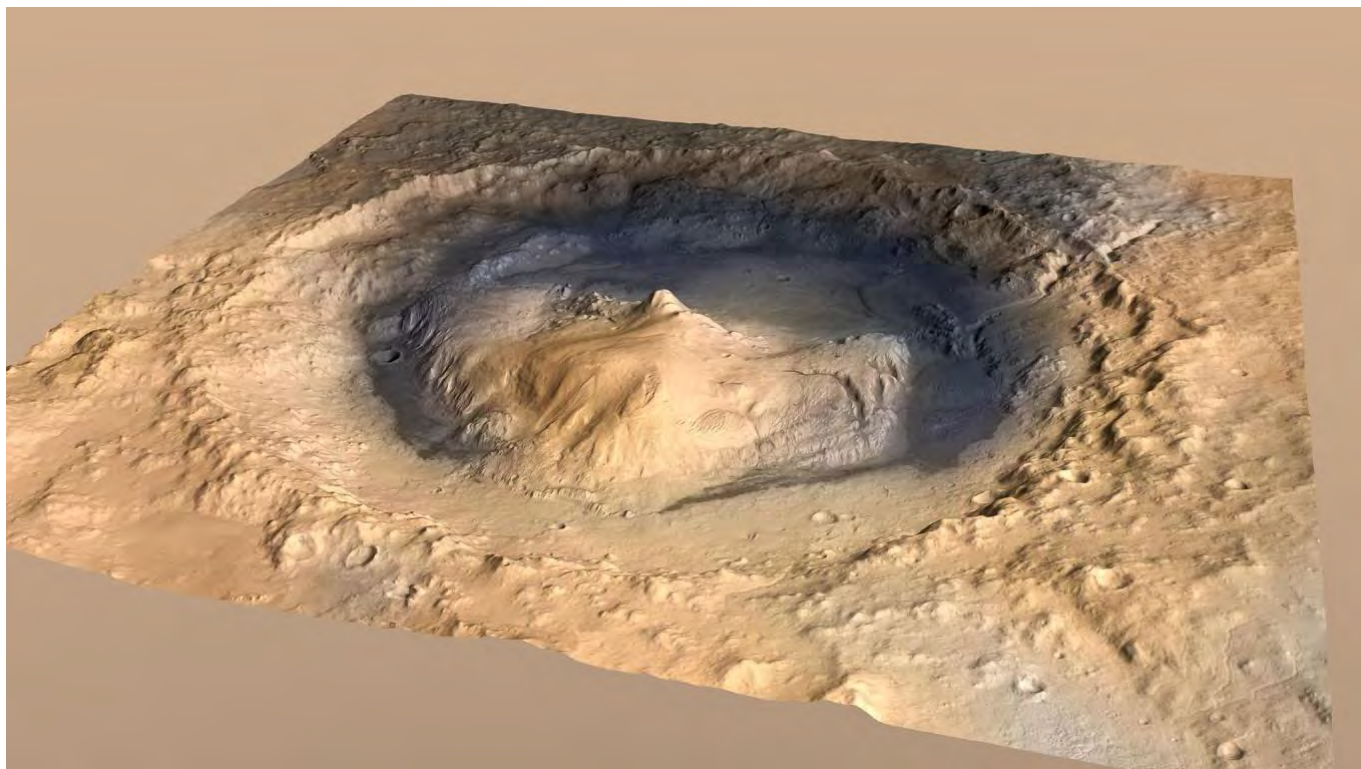
Prolongation de la mission

La mission de *Mars Express* d'une durée de 2 ans, ce qui correspond à une année martienne, a été prolongée à plusieurs reprises du fait du bon état du satellite et de ses instruments ainsi que de la qualité des données scientifiques produites. Le 28 septembre 2005, l'ESA annonce une première prolongation de 687 jours. Une deuxième prolongation est annoncée le 28 février 2007, ce qui porte la fin de la mission à mai 2009. Une nouvelle prolongation est décidée en février 2009 jusqu'à la fin de cette même année mais le 2 octobre 2009, le Comité de Programme Scientifique de l'ESA prolonge la mission MARS EXPRESS jusqu'au 31 décembre 2012 puis en novembre 2012 de deux nouvelles années. Le 19 novembre 2014 la mission est de nouveau prolongée avec 5 autres missions scientifiques de 2 ans jusqu'au 31 décembre 2016.

Résultats scientifiques

Malgré la modicité du coût de la mission, Mars Express a produit un grand nombre de résultats significatifs sur le plan scientifique. Les plus accessibles sont les photos en trois dimensions spectaculaires des canyons, anciennes vallées fluviales, cratères d'impact et des calottes polaires.

Découverte de minéraux hydratés



Cette image du cratère Gale a été réalisée à partir notamment de photos prise par la caméra HRSC de Mars Express

Le spectromètre OMEGA est le premier instrument à avoir détecté la présence de minéraux hydratés à la surface de la planète. Ces minéraux prouvent que, non seulement l'eau a circulé à la surface de la planète comme on le savait déjà à travers différents indices comme la présence de chenaux et de deltas, mais que l'eau a été présente sur des périodes suffisamment longues pour permettre la formation de roches minérales. L'instrument qui dispose d'une résolution de 5 à 10 km a détecté au cours des 10 premières années de la mission la présence de larges surfaces séparées les unes des autres recouvertes de deux types de minéraux hydratés :

- des phyllosilicates (comme l'argile) résultant de la décomposition de roches à la suite de contacts prolongés avec de l'eau. Ce type de terrain a été cartographié principalement dans les régions d'Arabia Terra, de Terra Meridiani, de Syrtis Major, de Nili Fossae et Mawrth Vallis sous la forme de dépôts de couleur sombre et de reliefs érodés.
- des sulfates hydratés qui se forment au contact d'eaux acides. Les régions recouvertes de ce type de minéral se situent à Valles Marineris, sur de grandes surfaces situées de Terra Meridiani et dans les dunes sombres de la calotte polaire nord.

Formations géologiques d'origine glaciaires récentes

La caméra HRSC a mis en évidence des formations géologiques d'origine glaciaire récentes situées aux latitudes moyennes et dans les régions tropicales : ces cônes de déjection ont été formés par l'écoulement de matériaux fluides riches en glace.

Confirmation de la présence d'eau au niveau de la calotte polaire sud

Les mesures effectuées par les engins spatiaux jusqu'à l'arrivée de *Mars Express* avaient permis de déterminer que la calotte polaire nord était composée principalement de glace d'eau tandis que la calotte polaire sud, plus froide, était composée principalement de glace de dioxyde de carbone avec peut-être de la glace d'eau. L'instrument OMEGA de *Mars Express*, en mesurant la proportion de la lumière du Soleil et de la chaleur réfléchiée par la calotte, a permis d'évaluer que celle-ci était composée à 85% de dioxyde de carbone et à 15% de glace d'eau. Les flancs escarpés de la calotte qui marquent la limite avec les plaines environnantes sont faites de glace pure. OMEGA a également permis de découvrir que les couches superficielles des plaines environnantes étaient un mélange de glace d'eau et de sol (pergélisol). Il se pourrait qu'une quantité d'eau beaucoup plus importante que prévue soit ainsi stockée dans le sol de Mars. Le radar MARSIS de la sonde spatiale a permis d'évaluer l'épaisseur des deux calottes polaires qui est évaluée à environ 3,5 km.

Épisodes volcaniques récents

Le volcanisme a joué un rôle majeur dans l'évolution de la surface de Mars. Jusqu'à récemment les spécialistes estimaient que l'activité volcanique avait cessé il y a 500 à 600 millions d'années. Des images détaillées prises par la caméra HRSC de *Mars Express* ont montré que certains des volcans les plus massifs de Mars étaient encore en activité il y a quelques millions d'années. Les volcans concernés sont Olympus Mons ainsi que trois volcans géants situés dans la région de Tharsis : Arsia Mons, Pavonis Mons et Ascraeus Mons. Leurs caldeiras centrales montrent que leur surface a été refaçonée au cours des 20 derniers millions d'années. Certains flots de lave auraient pu avoir été émis il y a deux millions d'années. Ces données suggèrent qu'une activité volcanique à petite échelle pourrait encore se produire de nos jours telles que des systèmes hydrothermaux à l'origine de réservoirs souterrains d'eau chaude. La méthode utilisée pour déterminer la date de cette activité volcanique, consiste à dénombrer les cratères d'impact visibles en surface; l'absence de cratères est synonyme d'un terrain formé récemment. Les images prises par HRSC ont également confirmé que les volcans des régions de Tharsis et Elysium sont en activité de manière sporadique depuis des milliards d'années et que l'activité à leur sommet est périodique. Le volcan de Tharsis Montes est celui dont l'activité est la plus récente et il pourrait entrer de nouveau en activité dans un futur proche. Une activité volcanique s'étalant sur une aussi longue période implique que des points chauds se sont maintenus sur des périodes particulièrement longues. Les scientifiques n'ont pas à ce jour trouvé d'explication à ce phénomène.

Évaluation du taux d'échappement de l'atmosphère martienne

Il existe de nombreux indices qui prouvent que Mars possédait au début de son existence une atmosphère épaisse, était plus chaude et comportait de grandes quantités d'eau à sa surface. Aujourd'hui l'eau a disparu et l'atmosphère est devenue extrêmement ténue. Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer cette transformation. Parmi celles-ci figure l'échappement atmosphérique un processus par lequel le vent solaire, en ionisant les couches supérieures de l'atmosphère, arrache les atomes présents qui sont éjectés dans l'espace. L'instrument ASPERA-3 a été spécifiquement conçu pour quantifier ce phénomène. Il a permis de démontrer que ce processus était efficace pour les atomes d'hydrogène et d'oxygène composant les molécules d'eau mais qu'il était peu efficace pour le dioxyde de carbone, composant majoritaire de l'atmosphère martienne. D'autres processus ont du donc contribué à la transformation de l'atmosphère martienne.

Découverte d'aurores polaires localisées

Sur Terre le phénomène des aurores polaires s'observe dans les régions des pôles lorsque les particules électriquement chargées du vent solaire canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre entrent en collision avec les molécules de gaz de la haute atmosphère. La planète Mars ne possède aucun champ magnétique global. Mais l'orbiteur de la NASA *Mars Global Surveyor* a découvert qu'il subsistait un champ magnétique résiduel dans certaines portions de la croûte planétaire. Les scientifiques soupçonnaient que ce champ magnétique résiduel pouvait être à l'origine de phénomènes similaires aux aurores polaires terrestres. L'instrument SPICAM a confirmé cette hypothèse en détectant des émissions de lumière sur la face nocturne de Mars. Les phénomènes détectés s'étendaient au-dessus d'une région d'une trentaine de km de diamètre et débutaient à une altitude évaluée à 150 km. Les régions où se manifestent ces aurores correspondent bien aux zones où subsiste un champ magnétique local.

Nouvelle couche atmosphérique dans l'ionosphère

Des expériences d'occultation radio ont été menées par *Mars Express* (Expérience MaRS) pour sonder l'atmosphère martienne. Deux couches avaient été jusque-là identifiées dans l'ionosphère de Mars. Une troisième couche a été détectée grâce à cette expérience. Elle est située entre 65 et 110 km d'altitude alors que les deux autres se trouvent respectivement à 110 et 135 km d'altitude. Cette nouvelle couche se caractérise par une densité d'électrons 10 fois plus faible que la densité moyenne de l'ionosphère martienne. Elle n'est pas continue et sa localisation varie en fonction de l'heure de la journée. Cette couche serait similaire à une couche de l'ionosphère terrestre, dite couche météoritique, créée par la destruction des météorites pénétrant dans l'atmosphère terrestre. Ce processus entraîne la production d'atomes de magnésium et de fer qui interagissent avec le rayonnement ultraviolet du Soleil et l'ionosphère en créant une couche atmosphérique particulière. La faible densité de l'atmosphère martienne fait que le processus de destruction des météorites est moins efficace et est à l'origine du caractère discontinu de cette couche sur Mars.

Détection de nuages de dioxyde de carbone

Le principal composant de l'atmosphère ténue de Mars est le dioxyde de carbone. Les variations saisonnières du climat de Mars se traduisent principalement par des cycles de vaporisation et de transformation en glace de ce gaz. On connaissait l'existence de nuages de glace de dioxyde de carbone mais c'est Mars Express qui a pu réaliser les premières observations directes de ces formations nuageuses. Plusieurs instruments (OMEGA, SPICAM, HRSC et PFS) ont pu étudier différents aspects de ces nuages situés à haute altitude dans l'atmosphère martienne en particulier au-dessus de l'équateur. Ces mesures ont permis de constater que la présence de nuages de dioxyde de carbone variait d'une année sur l'autre. En mesurant les ombres projetées sur le sol, il a pu être déterminé que ces nuages se situaient à une altitude moyenne de 80 km. SPICAM a même observé une couche de nuages de ce type formée de cristaux particulièrement petits (100 nanomètres de diamètre) à une altitude de 100 km.

Cartographie et étude de Phobos

Mars Express a effectué de nombreuses reprises des survols à faible distance de la lune martienne Phobos. Ces passages rapprochés ont permis de réaliser une cartographie très précise du satellite martien. Le passage le plus proche a été réalisé le 3 mars 2010 lorsque la sonde spatiale est passée à 67 km de sa surface permettant d'effectuer une mesure du changement de vitesse induit par sa gravité. Cette variation, bien que

de très faible ampleur (quelques millimètres par seconde), a pu être calculée en mesurant la variation de l'onde porteuse de son signal radio. La masse de Phobos a pu être ainsi évaluée avec une précision 100 fois plus grande que précédemment. En effectuant des calculs du volume de la lune à partir des photos détaillées prises par la caméra de *Mars Express*, les scientifiques ont pu déduire que la densité de Phobos était de seulement 1,86 g./cm³. Cette valeur particulièrement faible semble indiquer que Phobos est un empilement de roches comportant des espaces vides. Si ces roches sont des chondrites primitives, les espaces vides devraient représenter environ 15% du volume. Si Phobos est constituée de roches d'origine martienne, plus denses, la proportion de vide monterait à 45%. La théorie la plus courante en ce qui concerne l'origine des lunes de Mars est ce que celles-ci sont des astéroïdes capturés par la planète Mars. Mais un objet aussi poreux n'aurait sans doute pas survécu à un tel processus de capture. Par ailleurs le spectromètre PFS a permis de détecter la présence de minéraux de type phyllosilicate à la surface de Phobos, en particulier près de Stickney, le plus grand des cratères d'impact. La faible densité de Phobos et la présence à sa surface de minéraux formés en présence d'eau permettent de penser que Phobos est en réalité le résultat de l'accrétion de matériaux rocheux éjectés de la surface de Mars par un impact géant.

Détection de méthane

En mars 2004, le spectromètre FPS détecte la présence de petites quantités de méthane dans l'atmosphère. La présence de ce gaz, qui a une durée de vie de 440 ans s'il n'est pas renouvelé, ne peut avoir qu'une origine volcanique ou bactérienne. Il subsiste toutefois une certaine incertitude sur cette découverte car la quantité très faible de méthane détecté se situe à la limite de la sensibilité de l'instrument.

G) Les projets avortés : le retour d'échantillon et le réseau martien

Un des objectifs majeurs des planétologues spécialistes de Mars est de pouvoir analyser un échantillon du sol martien dans des laboratoires sur Terre. En 1988 un projet de retour d'échantillon est élaboré mais son coût, évalué à l'époque à sept milliards de dollars américains, est jugé beaucoup trop élevé par les décideurs. Au cours des années 1990 le projet de retour d'échantillon est réactivé par la NASA en partenariat avec le CNES : le scénario est élaboré en s'appuyant sur la « doctrine » des missions à bas coûts (*better, faster, cheaper*, en français « mieux, plus vite, moins cher ») promulguée par l'administrateur de la NASA de l'époque Daniel Goldin. Mais l'échec des deux missions martiennes de 1999, Mars Polar Lander et Mars Climate Orbiter, produits de cette politique, ainsi qu'une approche plus réaliste des coûts mettent fin au projet de retour d'échantillon au début des années 2000. La communauté scientifique poursuivait un autre objectif majeur consistant à mettre en place un réseau géophysique constitué de stations automatiques statiques disposées à la surface de Mars chargées de collecter des données météorologiques, sismologiques et géologiques. Au cours des années 1990 plusieurs projets (*MarsNet*, *InterMarsNet*) sont élaborés dans le cadre d'une coopération internationale pour mettre sur pied ce réseau de stations mais tous échouent pour des raisons financières. La NASA étudie à la fin des années 2000 un projet qui doit précéder et préparer la mission de retour d'échantillon. Le rover Mars Astrobiology Explorer-Cacher dispose d'une système de prélèvement permettant d'extraire carottes prélevées à une profondeur d'environ 2 m, d'une instrumentation perfectionnée permettant d'analyser et de dater les échantillons et doit expérimenter le stockage de longue durée de prélèvements de sol martien destinés à être récupérés par la future mission de retour d'échantillon. Il est également prévu d'expérimenter de nouvelles techniques d'atterrissage permettant d'améliorer la précision de l'atterrissage condition indispensable pour pouvoir ramener un échantillon sur Terre. Mais cette mission ambitieuse, dont le coût est évalué entre 1,5 et 2 milliards \$ en 2009 est annulée en 2011 à la suite des difficultés financières rencontrées par la NASA.

H) Les années 2000

Au début des années 2000 les projets martiens d'envergure ne sont plus à l'ordre du jour au sein de la NASA comme dans le cadre d'une coopération internationale, faute d'appuis financiers. Néanmoins pas moins de cinq sondes, dont une européenne, seront lancées en direction de Mars. Toutes auront pour objectif principal l'étude de l'eau au cours de l'histoire géologique de la « planète rouge ». L'agence spatiale américaine développe les rovers MER aux capacités limitées.

1) L'orbiteur 2001 Mars Odyssey (2001)

2001 Mars Odyssey est une sonde spatiale de la NASA placée en orbite en 2002 autour de la planète Mars. Cet orbiteur de taille relativement modeste héritée du programme « *better, faster, cheaper* » (*mieux, plus*

vite, moins cher) avait pour objectifs principaux de dresser une carte de la distribution des minéraux et des éléments chimiques à la surface de Mars et de détecter la présence éventuelle d'eau à l'aide de ses trois instruments scientifiques hérités en partie de la mission Mars Observer.

Mars Odyssey a parfaitement rempli sa mission : les instruments de la sonde spatiale ont permis de mettre en évidence de grandes quantités de glace stockées sous les deux pôles et a permis de mettre évidence l'abondance particulièrement importante du potassium. Le spectromètre imageur THEMIS a servi à établir une carte globale de Mars en lumière visible et en infrarouge et montré la présence de grandes concentrations d'olivine qui prouvent que la période sèche que connaît Mars a débuté il y a très longtemps. Enfin les données fournies par la sonde ont été utilisées pour sélectionner les sites d'atterrissages des rovers MER. La sonde dont la mission a été prolongée à 5 reprises, reste opérationnelle en 2012 plus de dix ans après son lancement. Elle sert également de relais de télécommunications entre la Terre et les engins se posant sur Mars tels que les rovers MER.

Objectifs

L'objectif scientifique principal de Mars Odyssey est de dresser une carte de la distribution des minéraux et des éléments chimiques à la surface de Mars. La sonde doit également :

- déterminer la quantité d'hydrogène stocké à faible profondeur essentiellement sous la forme de glace d'eau
- obtenir des images thermiques à haute résolution en infrarouge des minéraux présents
- fournir des informations sur la topologie de la surface de Mars
- Préciser l'environnement radiatif de Mars dans la perspective des futures missions habitées vers Mars.

Mars Odyssey doit par ailleurs servir de relais pour les télécommunications entre la Terre et les engins américains ou d'autres pays posés à la surface de Mars.

Caractéristiques techniques de la sonde spatiale

Mars Odyssey, qui a approximativement la forme d'un parallélépipède de $2,2 \times 1,7 \times 2,6$ mètres, pèse 725 kg au lancement dont 331,8 kg d'ergols et 44,5 kg d'instrumentation scientifique. Plusieurs équipements sont rattachés au corps de la sonde et ne sont déployés qu'une fois la sonde en orbite : les panneaux solaires, l'antenne grand gain et le mat de 6 mètres portant le capteur du spectromètre gamma. La sonde spatiale est divisée en deux modules : le module de propulsion comprend les réservoirs, les moteurs et les conduits assurant la circulation des ergols. Le module des équipements comprend les équipements assurant le fonctionnement de l'engin et les instruments scientifiques.

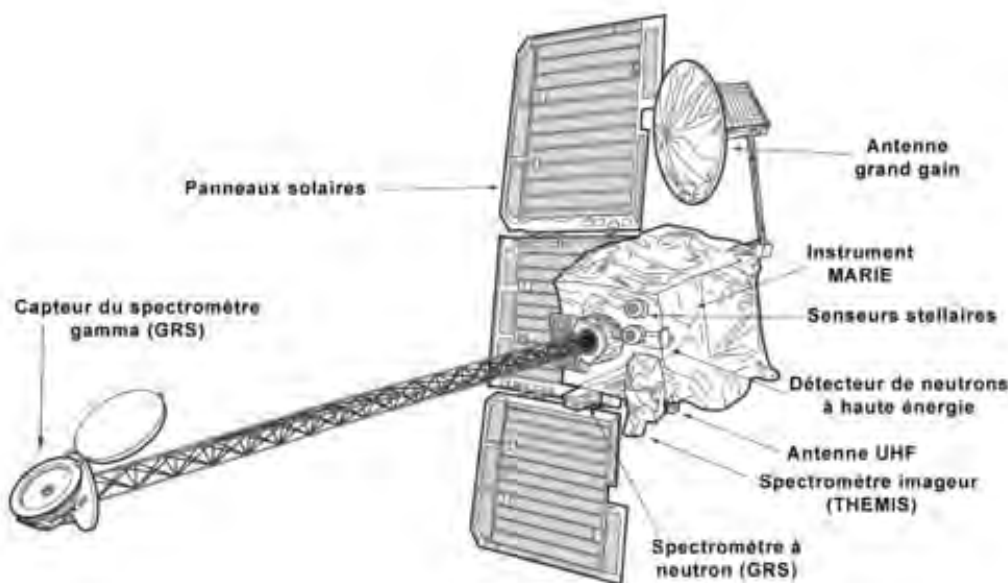


Schéma de la sonde Mars Odyssey

Plateforme

La structure de la sonde est réalisée essentiellement en aluminium avec des parties en titane pour assurer la rigidité tout en limitant l'augmentation de la masse. La masse de la structure est de 81,7 kg.

Mars Odyssey comporte plusieurs types de moteur-fusée. Le moteur le plus puissant, qui brûle un mélange hypergolique d'hydrazine et de peroxyde d'azote et a une poussée minimum de 695 Newton, est utilisé une seule fois pour l'insertion en orbite autour de Mars. Pour les corrections de trajectoire et le contrôle de l'orientation la sonde dispose de 4 moteurs de 22 N. de poussée et de 4 moteurs de 0,9 N. de poussée. Les ergols sont injectés dans les moteurs par de l'hélium sous pression stocké dans un réservoir dédié. L'ensemble du système de propulsion représente une masse de 49,7 kg sans les ergols. L'énergie électrique est fournie par trois panneaux solaires ayant une surface totale de 7 m² recouverts de cellules solaires de type AsGa dont l'énergie est si nécessaire stockée dans une batterie Nickel-Hydrogène de 16 ampères-heures. Les panneaux produisent 750 Watts au niveau de l'orbite de Mars et 1500 W au niveau de l'orbite terrestre. Les panneaux sont déployés une fois la sonde en orbite. L'ensemble du système gérant la production et la régulation de l'énergie a une masse de 86 kg. Les télécommunications sont réalisées en bande X avec la Terre et en UHF avec les atterrisseurs et rovers situés à la surface de la Mars. L'antenne parabolique grand gain de 1,3 mètres de diamètre peut être utilisée simultanément pour recevoir des instructions de la Terre et transmettre les données scientifiques recueillies. L'antenne grand gain n'est déployée qu'une fois la phase d'aérofreinage achevée. Elle peut être orientée avec deux degrés de liberté. La sonde dispose également d'une antenne rectangulaire moyen gain large de 7,1 cm située au centre de l'antenne grand gain. Enfin une antenne faible gain de 4,4 cm de diamètre peut être utilisée dans les cas d'urgence ou lorsque l'antenne grand gain n'est pas pointée vers la Terre. L'ensemble du système de télécommunications a une masse de 23,9 kg. Le contrôle d'orientation de la sonde repose sur trois paires de senseurs redondants, constituée chacune d'un viseur d'étoiles et d'un senseur solaire. Pour modifier son orientation Mars Odyssey 2001 utilise à la fois des roues de réaction et des petits propulseurs. L'ensemble du système de contrôle d'orientation a une masse de 23,4 kg.

Instrumentation scientifique

Mars Odyssey embarque trois instruments scientifiques qui sont en partie un héritage de la sonde malchanceuse Mars Observer.

Le spectromètre-imageur THEMIS

Le spectro-imageur *Thermal Emission Imaging System* (acronyme : THEMIS) réalise une cartographie des ressources géologiques de Mars à via une caméra haute définition couplée à un spectromètre travaillant dans l'infrarouge et en lumière visible. Dans l'infrarouge, l'instrument utilise 9 bandes spectrales pour identifier les minéraux tels que les carbonates, les silicates, les hydroxydes, les sulfates, les silices hydrothermaux, les oxydes et les phosphates. Cette approche multi-spectrale doit en particulier permettre d'identifier les minéraux qui se forment en présence d'eau tout en fournissant le contexte géologique. L'instrument, qui est long de 54,5 cm pour 37 cm de haut et 28,6 cm de large, a une masse de 11,2 kg et consomme 14 Watts.

Le spectromètre à rayons gamma GRS

Le spectromètre à rayons gamma *Gamma Ray Spectrometer* (acronyme : GRS) est également utilisé pour déterminer les éléments composant la surface de Mars. La surface de la planète est frappée en permanence par des rayons cosmiques qui sont par nature très énergétiques. Les éléments composant le sol réagissent (processus de spallation) en émettant des neutrons plus ou moins énergétiques. Ces derniers frappent à leur tour des noyaux atomiques en donnant naissance à deux processus : soit le neutron rebondit après avoir communiqué une partie de son énergie au noyau qui la restitue sous forme de rayons gamma soit le neutron est absorbé par le noyau qui devient instable et donc radioactif et qui se désintègre en produisant également des rayons gamma. Dans les deux cas l'énergie des rayons gamma permettent d'identifier le type d'élément (fer, silicium,...) qui l'a émis. Le spectromètre GRS, en mesurant l'énergie des rayonnements renvoyés par le sol, permet de mesurer l'abondance en éléments de la zone observée et de dresser une carte de la distribution de ceux-ci à la surface de Mars. L'instrument est complété par deux spectromètres à neutrons : le premier est capable de détecter une large gamme de neutrons, tandis que le second est spécialisé dans les neutrons à haute énergie. Ces détecteurs sont utilisés pour mesurer l'abondance des atomes d'hydrogène

présents dans le sol martien à une profondeur inférieure à un mètre et d'en déduire l'abondance en glace d'eau. Pour que le détecteur de rayons gamma de l'instrument GRS ne soit pas perturbé par le rayonnement gamma émis par la structure métallique du satellite, il est positionné à l'extrémité d'un mat de 6,2 mètres qui est déployé à l'issue de la phase de cartographie. Le cristal de germanium au cœur du détecteur doit être exposé au vide pour atteindre la température (-93°C) qui est nécessaire à son fonctionnement. Toutefois les particules qui le frappent finissent par altérer la structure du cristal et diminuer la résolution spectrale. Cette capacité est restaurée en le portant à 100°C durant quelques dizaines d'heures : pour parvenir à cette température, un couvercle positionné sur le réceptacle contenant le cristal est refermé. GRS a une masse de 30,5 kg et consomme 32 Watts.

Le détecteur de particules énergétiques MARIE

Dans l'optique d'une future mission spatiale habitée vers Mars, Mars Odyssey comprend un instrument qui doit évaluer le niveau des radiations les plus dangereuses que pourraient recevoir un équipage sur le trajet Terre-Mars et en orbite autour de Mars. Le *Mars Radiation Environment Experiment* (acronyme : MARIE) mesure les particules énergétiques ionisées (électrons, protons et noyaux d'atome) émises par le Soleil et les rayons cosmiques d'origine galactique dont l'énergie est comprise entre 15 et 500 MeV. MARIE est un spectromètre avec une ouverture de 68°. L'instrument qui a une masse de 3,3 kg consomme 7 Watts.

Déroulement de la mission

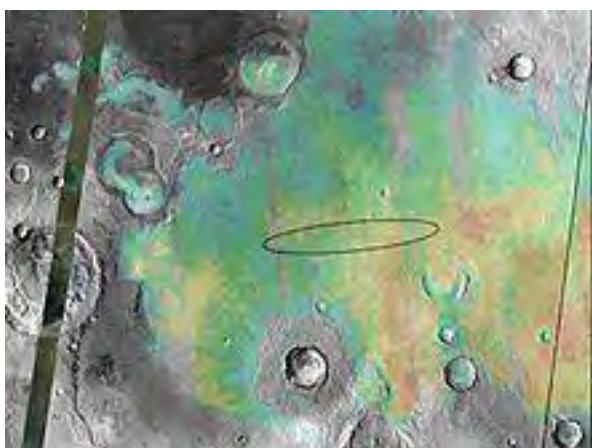
Lancement et mise en orbite autour de Mars

La sonde spatiale Mars Odyssey est lancée de Cap Canaveral, en Floride, le 7 avril 2001 par une fusée Delta II-7425 et elle atteint Mars le 24 octobre 2001, à 02 heures 30 (heure universelle). Après avoir parcouru environ 460 millions de km, la sonde passe le 24 octobre 2001 derrière la planète Mars à une altitude de 300 km (avec un écart de 1 km par rapport à l'altitude visée) et met à feu son moteur principal pour réduire sa vitesse et s'insérer ainsi en orbite autour de la planète. Le moteur-fusée de 695 Newton de poussée, qui est utilisé durant 19,7 minutes en brûlant environ 262,8 kg d'ergols, place la sonde sur une orbite polaire très elliptique ($\sim 128 \times 27\,000$ km) parcourue en 18 heures et 36 minutes. Pour arriver sur son orbite basse circulaire, la sonde modifie celle-ci au cours des trois mois suivants en utilisant la technique du freinage atmosphérique mise au point par Mars Global Surveyor. Cette technique consiste à modifier l'altitude de la sonde spatiale au périégée de manière à ce qu'elle pénètre dans les hautes couches de l'atmosphère martienne (à environ 100 km d'altitude), et soit ralentie par la traînée générée. La réduction de vitesse obtenue à chaque orbite entraîne une diminution de l'altitude de Mars Odyssey à l'apogée et permet de ramener celle-ci progressivement de 27 000 à 400 km. L'opération est délicate car si la sonde se trouve trop bas les forces de frottement peuvent entraîner sa destruction. D'autre part la densité de l'atmosphère de Mars et son épaisseur varient rapidement et il faut donc surveiller en permanence l'évolution de ces paramètres et adapter en conséquence l'altitude au périégée à chaque révolution. Cette surveillance de la météorologie martienne est assurée à la fois par Mars Global Surveyor et Mars Odyssey. Cette technique permet d'économiser plus de 200 kilogrammes de propergol. La phase de freinage atmosphérique s'achève le 11 janvier 2002. À l'aide des petits moteurs-fusées de la sonde l'altitude du périégée est relevée progressivement à 400 km tandis que l'apogée est abaissé de 500 à 400 km. Ces manœuvres s'achèvent le 30 janvier 2002. La sonde est désormais sur une orbite polaire héliosynchrone qui la fait survoler Mars à 5 heures locale de l'après-midi. L'antenne grand gain est déployée le 6 février 2002.

La mission primaire

La mission scientifique proprement dite débute le 18 février 2002 avec la mise en marche des instruments scientifiques. Les ingénieurs de la NASA parviennent le 13 mars 2002 à remettre en marche l'instrument MARIE tombé en panne en août 2001 alors que la sonde était en route pour Mars. En mai 2002 les données collectées par les spectromètres à neutron de GRS permettent de confirmer la présence d'eau dans une proportion de 50 % en volume dans la couche superficielle du pôle sud. De son côté l'instrument THEMIS fournit le même mois des données infrarouges prometteuses qui permettent d'identifier clairement des couches géologiques superposées très différenciées à la surface de Mars. En juin 2002, le détecteur du spectromètre gamma est mis en marche : le mat qui le supporte est déployé. Mi octobre 2002 la couche de dioxyde de carbone qui recouvre le pôle nord durant une partie de l'année s'évapore. L'instrument GRS permet alors de constater que le pôle nord recèle également des quantités d'eau encore plus importantes que

celles détectées au pôle sud quelques mois auparavant. Le 28 août 2003 l'instrument MARIE tombe en panne : un composant de l'électronique de MARIE a sans doute été endommagé par une particule solaire. Les ingénieurs ne parviendront pas à le remettre en marche.



Carte réalisée à l'aide de l'instrument THEMIS montrant la zone d'atterrissage du rover Opportunity (ovale noir). Les couleurs jaune et rouge indiquent des concentrations élevées d'hématite



Composition minéralogique de la région de Candor Chasm. Image prise par THEMIS

La mission étendue

Première et deuxième extension

Le 24 août 2004 la mission primaire de Mars Odyssey s'achève mais la NASA a approuvé une première extension de la mission jusqu'à septembre 2006, afin de pouvoir comparer les phénomènes climatiques affectant la planète d'une année sur l'autre. Ainsi, les scientifiques pourront observer les changements affectant la calotte polaire, ou d'autres phénomènes atmosphériques (formation de nuages ou de tempêtes de poussière). Cette mission étendue permet également d'apporter une assistance précieuse aux missions martiennes en cours ou futures : près de 85 % des données collectées par les rovers MER qui ont atterri en 2003, vont transiter vers la Terre grâce au relais de communication UHF de Mars Odyssey. En outre, les données collectées par l'orbiteur vont contribuer au choix du site d'atterrissage de la sonde Phoenix lancée en 2008. Enfin, Odyssey va guider l'orbiteur *Mars Reconnaissance Orbiter*, qui se place en orbite autour de la planète rouge en mars 2006, en analysant les conditions atmosphériques martiennes. Comme Mars Odyssey, la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* a utilisé en effet l'atmosphère ténue de Mars pour ralentir et se placer sur son orbite définitive.

Troisième et quatrième extension : le changement d'orbite

En octobre 2008 la mission de la sonde est prolongée pour la troisième fois jusqu'en septembre 2010. Pour cette nouvelle phase de la mission de la sonde spatiale, l'heure locale de survol est progressivement modifiée pour la faire passer de 5 heures de l'après midi à trois heures 45. Ce changement doit permettre d'améliorer les performances de l'instrument THEMIS mais le spectromètre gamma de GRS doit être arrêté car à cette heure de passage il chauffe trop pour fournir des résultats exploitables. La modification de l'heure de survol est très progressive et la nouvelle orbite est atteinte en juin 2009. Une quatrième extension jusqu'en août 2012 est décidée pour continuer à étudier les variations d'une année sur l'autre de phénomènes tels que les variations affectant la couverture par la glace de la calotte polaire, les tempêtes de poussière et les nuages. Cette extension doit permettre également de dresser une carte plus détaillée de la composition minéralogique de la surface de la planète. Une cinquième extension jusqu'en juillet 2014 doit permettre d'assurer la couverture de l'atterrissage de Mars Science Laboratory prévue en août 2012. Selon un porte-parole du JPL la sonde pourrait continuer à fonctionner jusqu'en 2016 et peut-être au-delà.

Relais de l'atterrissage de Mars Science Laboratory

Le 8 juin 2012 Mars Odyssey se met en mode de survie car elle a détecté un comportement anormal d'une de ses roues de réactions utilisées pour contrôler son orientation. Cet incident tombe à un mauvais moment car il est prévu que la sonde relaye les informations fournies par Mars Science Laboratory durant sa

descente vers le sol martien qui est planifiée pour le 6 août de la même année. Après avoir testé durant plus de deux semaines le fonctionnement de la roue de réaction de rechange qui n'avait pas été activée depuis le début de la mission, la sonde spatiale est déclarée en état de fonctionner et reprend sa collecte de données scientifiques. La sonde se met à nouveau brièvement en mode de survie le 11 juillet alors qu'elle effectuait une petite correction de trajectoire. Mais la situation revient à la normale et le 24 juillet une dernière manœuvre parvient à placer Mars Odyssey sur une orbite qui lui permettra de relayer en temps réel les données transmises par MSL durant son atterrissage. Les deux autres sondes en orbite, Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter, enregistreront également les données transmises par MSL mais ne seront pas en position de les retransmettre immédiatement.

Principaux résultats

Le spectromètre GRS et les spectromètres à neutron qui lui sont associés ont permis de mettre en évidence de grandes quantités de glace stockées sous les deux pôles ainsi que la présence de glaces en quantité plus modérée aux latitudes moyennes. Le même instrument a permis de dresser la première carte de la distribution des éléments chimiques à la surface de la planète. GRS a permis en particulier de mesurer la composition des éléments suivants : hydrogène, silicium, fer, potassium, thorium, chlore. La croûte de la planète contiendrait notamment deux fois plus de potassium que la croûte terrestre. L'étude a confirmé que les principaux éléments nécessaires à l'apparition de la vie étaient présents sur Mars. L'instrument THEMIS a mis en évidence de grandes concentrations d'olivine dans l'un des canyons de Valles Marineris qui démontrent que la période sèche que connaît Mars a débuté il y a très longtemps. Une couverture photographique globale de Mars en lumière visible et en infrarouge (de nuit) a été réalisée pour la première fois avec une résolution de 10 mètres. Enfin les données fournies par la sonde ont été utilisées pour sélectionner les sites d'atterrissages des rovers MER en particulier le site de Meridiani Planum retenu pour Opportunity du fait de sa richesse en hématite, un minéral formé généralement sur Terre en présence d'eau. L'instrument MARIE a déterminé que le taux de radiation sur l'orbite autour de Mars était deux à trois fois supérieurs à celui mesuré sur une orbite terrestre.

2) Les rovers MER (2003)

Lors de la fenêtre de tir suivante en 2003, l'agence spatiale américaine lance les deux missions Mars Exploration Rover : chacune emporte un rover ayant pour objectif d'étudier la géologie de la planète Mars et en particulier le rôle joué par l'eau dans l'histoire de la planète.

Mars Exploration Rover (MER) est une mission double de la NASA lancée en 2003 et composée de deux robots mobiles ayant pour objectif d'étudier la géologie de la planète Mars et en particulier le rôle joué par l'eau dans l'histoire de la planète. Les deux robots ont été lancés au début de l'été 2003 et se sont posés en janvier 2004 sur deux sites martiens susceptibles d'avoir conservé des traces de l'action de l'eau dans leur sol. Chaque rover ou astromobile, piloté par un opérateur depuis la Terre, a alors entamé un périple en utilisant une batterie d'instruments embarqués pour analyser les roches les plus intéressantes :

- **MER-A** renommé *Spirit* a atterri le 3 janvier 2004 dans le cratère Gusev, une dépression de 170 kilomètres de diamètre qui a peut-être accueilli un lac.
- **MER-B** renommé *Opportunity* s'est posé le 24 janvier 2004 sur Meridiani Planum.

Chaque rover pèse environ 185 kg et se déplace sur six roues mues par l'énergie électrique fournie par des panneaux solaires. Il est équipé de trois paires de caméras utilisées pour la navigation et de plusieurs instruments scientifiques : une caméra panoramique située sur un mat à 1,5 mètre de hauteur, un outil pour abraser la surface des roches porté par un bras articulé sur lequel se trouvent également un spectromètre à rayons X, un spectromètre Mössbauer et une caméra microscope. Enfin, un spectromètre infrarouge est utilisé pour l'analyse des roches et de l'atmosphère. La mission MER fait partie du programme d'exploration de Mars de la NASA et prend la suite de deux missions américaines sur le sol martien aux capacités scientifiques beaucoup plus limitées : le programme Viking de 1976 et Mars Pathfinder de 1997. Les objectifs scientifiques du programme ont été remplis avec la découverte par les deux robots de plusieurs formations rocheuses qui résultent probablement de l'action de l'eau dans le passé : billes d'hématite grise et silicates. Les robots ont également permis d'étudier les phénomènes météorologiques, d'observer des nuages et de caractériser les propriétés des couches de l'atmosphère martienne. Les deux véhicules MER conçus et gérés par le Jet Propulsion Laboratory ont largement dépassé les objectifs qui leur étaient fixés :

parcourir 600 mètres et rester opérationnel durant 90 jours martiens. Spirit, désormais bloqué par le sable, a pu parcourir 7,7 kilomètres et a transmis ses dernières données scientifiques le 22 mars 2010 tandis qu'Opportunity, toujours opérationnel après avoir progressé fin août 2012 de 35 kilomètres, se trouve au bord du cratère Endeavour en un lieu nommé *Cape York*.

Au début des années 2000, alors que la NASA achève le développement de la sonde 2001 Mars Odyssey, l'agence spatiale américaine décide de revoir sa stratégie d'exploration de la planète Mars. La sonde Mars Global Surveyor a envoyé des données qui confirment que la planète a eu une histoire climatique complexe et intéressante au cours de laquelle de grandes masses d'eau ont coulé sur le sol martien. Mais le déroulement de ces événements et la manière dont l'eau a interagi avec l'atmosphère et la surface martienne n'ont pu être reconstitués. Compte tenu de ce nouvel éclairage sur le passé martien, beaucoup de scientifiques souhaitent l'envoi d'une mission spatiale capable de ramener un échantillon du sol martien sur Terre qui pourrait apporter des réponses décisives à certaines de ces interrogations. Mais, la réussite de cette mission très complexe nécessite que de nombreuses conditions soient remplies : identifier un site d'atterrissage susceptible d'abriter des traces de vie, effectuer un atterrissage d'une très grande précision et disposer d'un robot capable d'atteindre le site visé pour récupérer un échantillon intéressant si nécessaire en forant. Or seule la caméra à très haute définition de Mars Reconnaissance Orbiter, dont le lancement est prévu en 2006, peut éventuellement identifier un site favorable. De plus, le risque est grand de ramener un échantillon ne fournissant aucune donnée exploitable. La NASA n'a pas à cette période de budget suffisant pour une mission aussi coûteuse.

L'agence spatiale se rabat donc sur une mission reposant sur un rover géologue qui doit explorer, analyser sur place à l'aide de ses instruments scientifiques embarqués et transmettre les résultats de ses mesures. La NASA écarte l'utilisation d'un rover dérivé de Mars Pathfinder car son autonomie trop limitée ne permettrait pas de prospecter suffisamment le sol martien. Le JPL propose de développer un rover, baptisé Mars Exploration Rover (MER), avec des dimensions nettement supérieures, doté d'une plus grande autonomie et suffisamment léger pour permettre l'utilisation de coussins gonflables (« airbags ») utilisés avec succès pour l'atterrissage de la sonde *Pathfinder*. Pour limiter les risques de la mission, la NASA décide en août 2000 d'envoyer deux engins similaires, comme cela se pratiquait couramment au début de l'ère spatiale : l'agence argumente que le coût de la construction d'un deuxième exemplaire est faible par rapport à celui du développement du MER et que par contre si les deux rovers réussissent leur mission, les gains scientifiques seront fortement accrus. L'agence spatiale renonce à sa politique des sondes bon marché : l'ensemble de la mission va coûter 850 millions de dollars. La NASA planifie le lancement pour la prochaine fenêtre de tir en direction de Mars qui doit s'ouvrir durant l'été 2003. Chaque MER est équipé de six instruments scientifiques et est conçu pour parcourir au moins 1 km durant 90 jours martiens.

Les objectifs scientifiques de la mission

La NASA assigne sept objectifs scientifiques à la mission :

- rechercher des roches et des sols témoignant de l'action passée de l'eau et déterminer leurs caractéristiques. Cette recherche porte en particulier sur les minéraux déposés par les processus liés à la présence d'eau tels que les précipitations, l'évaporation, la sédimentation et l'activité hydrothermale.
- déterminer la distribution et la composition des minéraux, rochers et sols qui entourent les sites d'atterrissage;
- déterminer les processus géologiques à l'origine de la formation des sols avoisinants et qui ont influencé leur chimie. Ces processus peuvent inclure l'érosion par l'action du vent ou par l'eau, l'activité hydrothermale, le volcanisme et l'impact de météorites.
- valider les données collectées par les sondes en orbite en les confrontant aux observations au sol. Ces vérifications doivent permettre de déterminer la précision et le bon fonctionnement des différents instruments qui effectuent des observations géologiques depuis l'orbite.
- rechercher des minéraux contenant du fer, identifier et quantifier les différents types de minéraux qui contiennent de l'eau ou ont été formés dans l'eau tels que les carbonates de fer.
- déterminer les caractéristiques des minéraux ainsi que les textures des roches et des sols et spécifier les processus qui les ont créés.

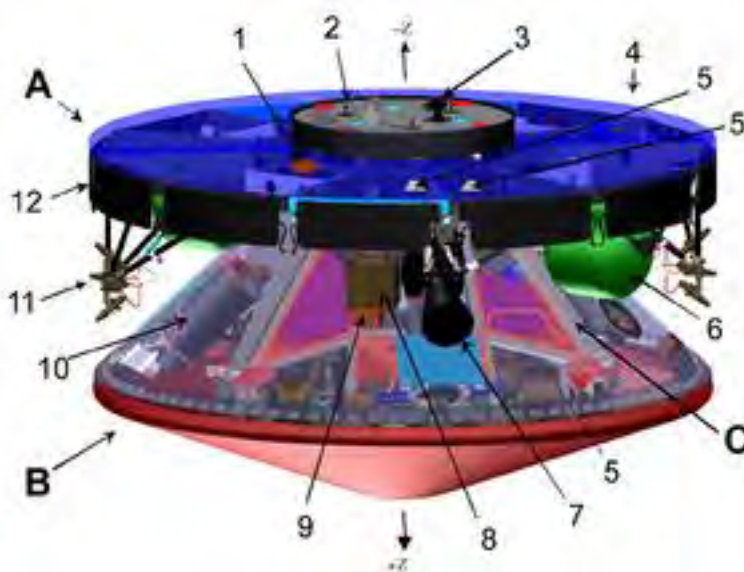
- rechercher des indices géologiques de la période où l'eau était présente sous forme liquide. Déterminer si ces environnements pouvaient être propices à la vie.

Une architecture technique fortement inspirée des missions précédentes

La conception des sondes MER repose en grande partie sur des développements réalisés pour des missions antérieures. L'architecture utilisée pour la mission Pathfinder de 1996 est reprise pour l'étage de croisière chargé de propulser les sondes entre la Terre et Mars et le véhicule de rentrée et le module d'atterrissage. Ceux-ci sont toutefois redimensionnés : le parachute est 40 % plus grand et les fusées chargées de ralentir la sonde avant l'atterrissage sont 90 % plus puissantes. Les instruments scientifiques sont un héritage du rover *Athena* qui devait constituer la charge utile de l'atterrisseur de la mission Mars Surveyor 2001 annulée.

Les principaux composants de la sonde MER

Les deux sondes MER sont identiques. Une fois sur le sol martien le rover est complètement autonome, mais pour parvenir à destination il doit franchir les 56 millions de kilomètres qui séparent Mars de la Terre puis effectuer une rentrée atmosphérique violente dans l'atmosphère martienne avant de se poser à faible vitesse. Le rover, d'une masse de 185 kg, ne représente qu'une fraction de la masse totale de la sonde MER (1 063 kg) qui comporte plusieurs éléments chargés de l'amener à bon port :



*Diagramme d'une sonde MER. **A** étage de croisière : 1 antenne moyen gain, 2 liaison avec le lanceur, 3 antenne faible gain, panneaux solaires (en transparence), 5 détecteur solaire, 6 réservoir carburant, 7 suiveur stellaire, 8 électronique détecteur solaire, 9 électronique de l'étage de croisière, 11 grappe de moteurs, 12 radiateurs; **B** bouclier thermique; **C** module d'atterrissage (sous le bouclier thermique) : 10 fusée de freinage (RAD)*



La sonde MER Opportunity : l'étage de croisière en bas est surmonté par le véhicule de rentrée en forme de cône très aplati dans lequel sont encapsulés le module d'atterrissage et le rover

L'étage de croisière

L'étage de croisière, d'une masse de 193 kg, a la forme d'une galette peu épaisse de 2,65 mètres de diamètre. Il doit permettre à la sonde MER de franchir l'espace entre la Terre et Mars. À cet effet, il est chargé de corriger la trajectoire grâce à deux grappes de petits propulseurs fonctionnant à l'hydrazine dont la sonde emporte 31 kg. Il dispose de 5 détecteurs solaires et d'un suiveur stellaire pour déterminer la position de la sonde. Deux antennes de communication, à petit et moyen gain, transmettent en bande X les données télémétriques qui permettent à l'équipe sur Terre de contrôler le fonctionnement de la sonde et reçoivent en retour des instructions. L'étage de croisière dispose de ses propres panneaux solaires d'une superficie de 4,4 m² qui fournissent 600 W d'énergie électrique (300 W près de Mars) car ceux du rover, encapsulé, ne sont pas utilisables. Par contre l'ordinateur du rover constitue le cerveau de la sonde durant ce trajet. Enfin l'étage de croisière est équipé de radiateurs pour évacuer la chaleur produite par l'électronique à bord.

Le véhicule de rentrée

Lorsque la sonde MER est sur le point de rentrer dans l'atmosphère de Mars, l'étage de croisière qui a rempli son office est largué. La traversée de l'atmosphère de MER à 5,5 km par seconde va provoquer un énorme échauffement des parties externes de la sonde qui atteignent une température de 1 500 °C. Pour protéger le rover durant cette phase, celui-ci est encapsulé entre deux boucliers qui forment dans le jargon de la NASA le *véhicule de rentrée*. Le bouclier avant, dit thermique, d'une masse de 79 kg, subit l'échauffement le plus important : il est presque plat et est recouvert d'un revêtement ablatif qui évacue la chaleur en s'évaporant progressivement. Le bouclier arrière d'une masse de 209 kg a une forme conique et est également recouvert d'un revêtement ablatif toutefois d'une épaisseur plus faible; il contient également le parachute, plusieurs propulseurs qui seront utilisés durant la phase finale de l'atterrissage ainsi que de l'électronique et un système de guidage inertiel.

Le module d'atterrissage

Le module d'atterrissage a pour rôle de protéger conjointement avec les airbags le rover lorsque celui-ci est largué à une vingtaine de mètres du sol. C'est une structure en matériaux composites constituée d'une plate-forme sur laquelle est posée le rover et de trois pétales formant en position repliée une structure pyramidale. Le module d'atterrissage qui pèse 348 kg comprend plusieurs dispositifs permettant au rover, une fois les airbags dégonflés, de débarquer sur le sol martien même lorsque la configuration d'atterrissage est défavorable (présence de rochers sous la plate-forme...). Les airbags, gonflés juste avant l'atterrissage, sont utilisés pour amortir la chute finale. Ils sont du même type que ceux utilisés pour la mission Mars Pathfinder. Le rover est entouré de 4 airbags comportant chacun 6 lobes et réalisés avec plusieurs couches de vectran, un matériau encore plus résistant que le kevlar.

Le rover

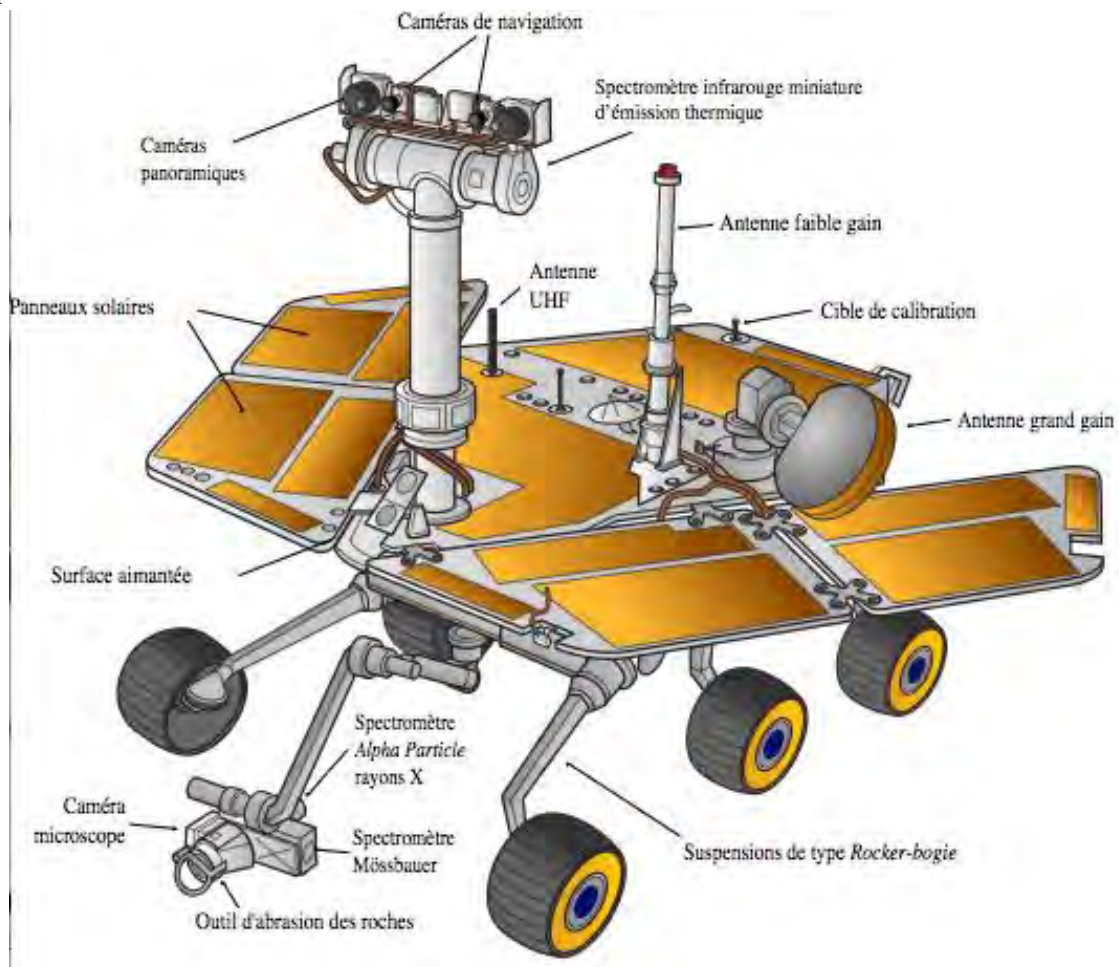


Schéma d'un rover MER.

Les deux rovers sont identiques avec une hauteur de 1,5m, une largeur de 2,3 m, une longueur de 1,6 m et une masse de 185 kg. Le cœur du rover est constitué d'un boîtier central de forme triangulaire réalisé en

matériau composite en nid d'abeille qui abrite les composants devant être mis à l'abri des variations importantes de températures qui règnent à la surface de Mars. Le dessus du boîtier est tapissé de cellules solaires et sert de support aux trois antennes de télécommunications. Un mat, qui culmine à 1,5 mètre de hauteur, porte la caméra panoramique à son extrémité supérieure, deux caméras de navigation et un spectromètre infrarouge. Trois panneaux solaires, situés de chaque côté du boîtier central sont repliés durant le voyage et se déploient après l'atterrissage. Un bras robotisé (IDD) est fixé à l'avant du boîtier au bout duquel se trouvent deux spectromètres (Mössbauer et APXR), une caméra microscope ainsi qu'une meuleuse. Le boîtier repose sur un train de 6 roues, motorisées de manière indépendantes qui permet au rover de se déplacer sur le sol inégal de Mars.

Le boîtier central

Les composants qui ne peuvent pas supporter les températures extrêmes de Mars (jusqu'à $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont placées dans le boîtier central : on y trouve ainsi le cerveau du rover (l'ordinateur), la centrale à inertie, la partie électronique du spectromètre infrarouge du système de commande des moteurs des roues ainsi que les batteries qui doivent être maintenues à une température supérieure à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en utilisation et $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en charge, etc. La température est régulée grâce à plusieurs dispositifs : radiateurs pour évacuer la chaleur, isolant constitué d'un aérogel de silice et d'une mince feuille d'or. Pour lutter contre le froid, huit pastilles contenant chacune 2,7 grammes de dioxyde de plutonium (*Radio-isotope Heater Units* ou RHU) produisent en permanence de la chaleur générée par la radioactivité. De la chaleur additionnelle est fournie à la demande par des résistances électriques. La chaleur dégagée par l'électronique embarquée contribue également à maintenir la température dans des limites tolérables.

La propulsion

Le rover utilise une suspension, baptisée rocker-bogie, mise au point par la NASA : celle-ci permet de franchir des obstacles d'une hauteur supérieure au diamètre des roues (26 cm). Le centre de masse abaissé du véhicule permet à celui-ci de rester stable sur une pente de 45° mais le programme de navigation embarqué est paramétré de manière à éviter les pentes supérieures à 30° . Les six roues sont équipées chacune d'un moteur individuel. Chacune des quatre roues d'extrémité comporte un moteur agissant sur la direction ce qui permet au rover de pivoter sur lui-même. Le véhicule peut progresser à une vitesse théorique de 5 cm par seconde (180 mètres à l'heure) mais en pratique ne peut dépasser 133 m/h quand sont pris en compte les changements de direction. Dans les cas les plus favorables le rover dispose d'énergie pour rouler durant quatre heures par jour martien.

Énergie

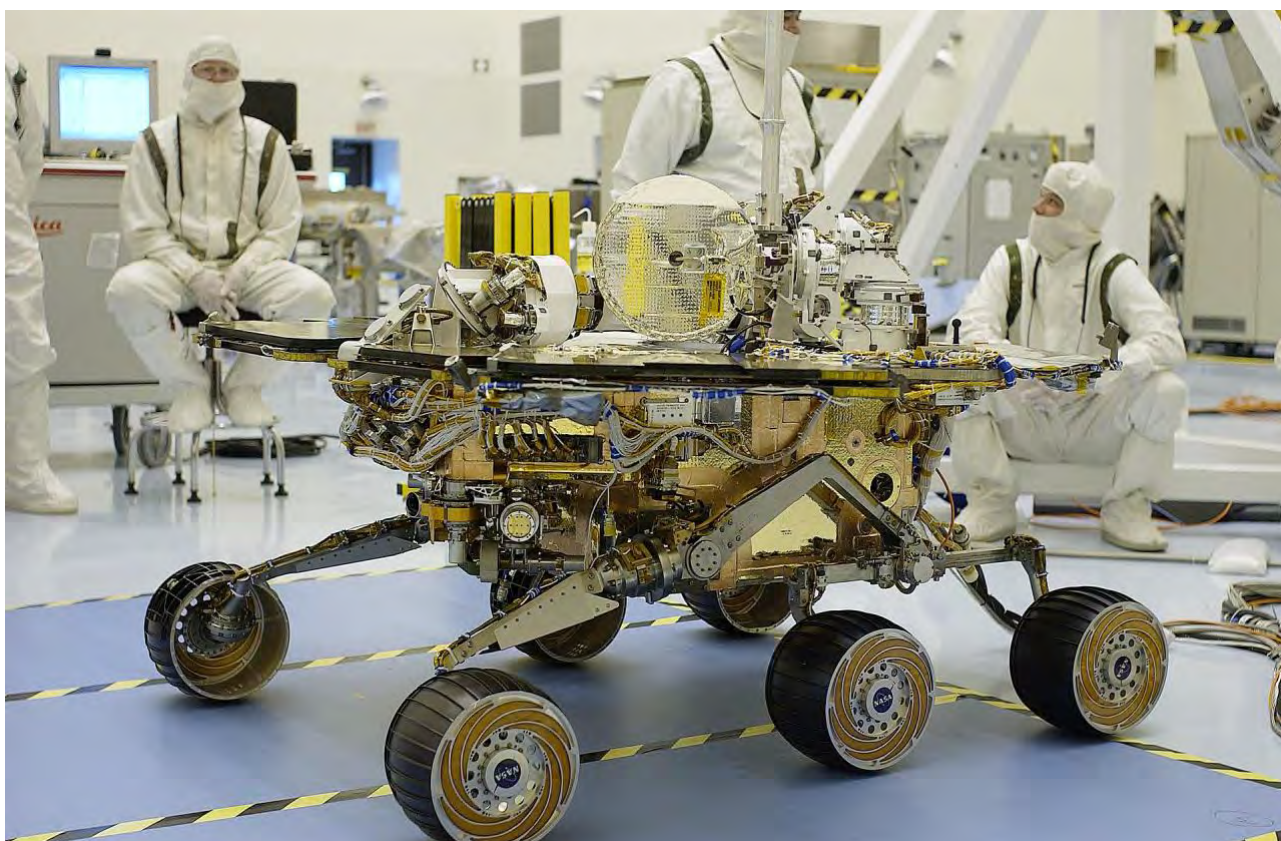
Les panneaux solaires d'une superficie de $1,3\text{ m}^2$ sont constitués de cellules photovoltaïques à triple jonctions, sélectionnées pour leur bon ratio rendement (28,3 %) sur masse ($2,06\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Ces panneaux peuvent fournir une puissance de 200 watts lorsque le Soleil culmine avec un ciel en grande partie dégagé de la poussière martienne. Dans ces conditions, les panneaux solaires peuvent fournir jusqu'à 1 kW·h au cours d'une journée martienne, mais cette quantité peut chuter à moins de 200 W·h lors d'une tempête de poussière ou durant l'hiver martien. La poussière martienne qui s'accumule au cours du temps contribue également à réduire le rendement des panneaux solaires. Deux batteries lithium-ion constituées chacune de 8 cellules qui permettent de stocker 16 A·h à la tension de 32 volts permettent de restituer l'énergie produite lorsque la demande excède ce que peuvent fournir les panneaux solaires. La technologie lithium-ion a été retenue pour son excellent rapport énergie stockée/masse et sa capacité à supporter un grand nombre de cycles de charge/décharge; par ailleurs, des développements effectués par la NASA ont permis la mise au point d'un électrolyte capable de supporter des températures de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les équipements de communication

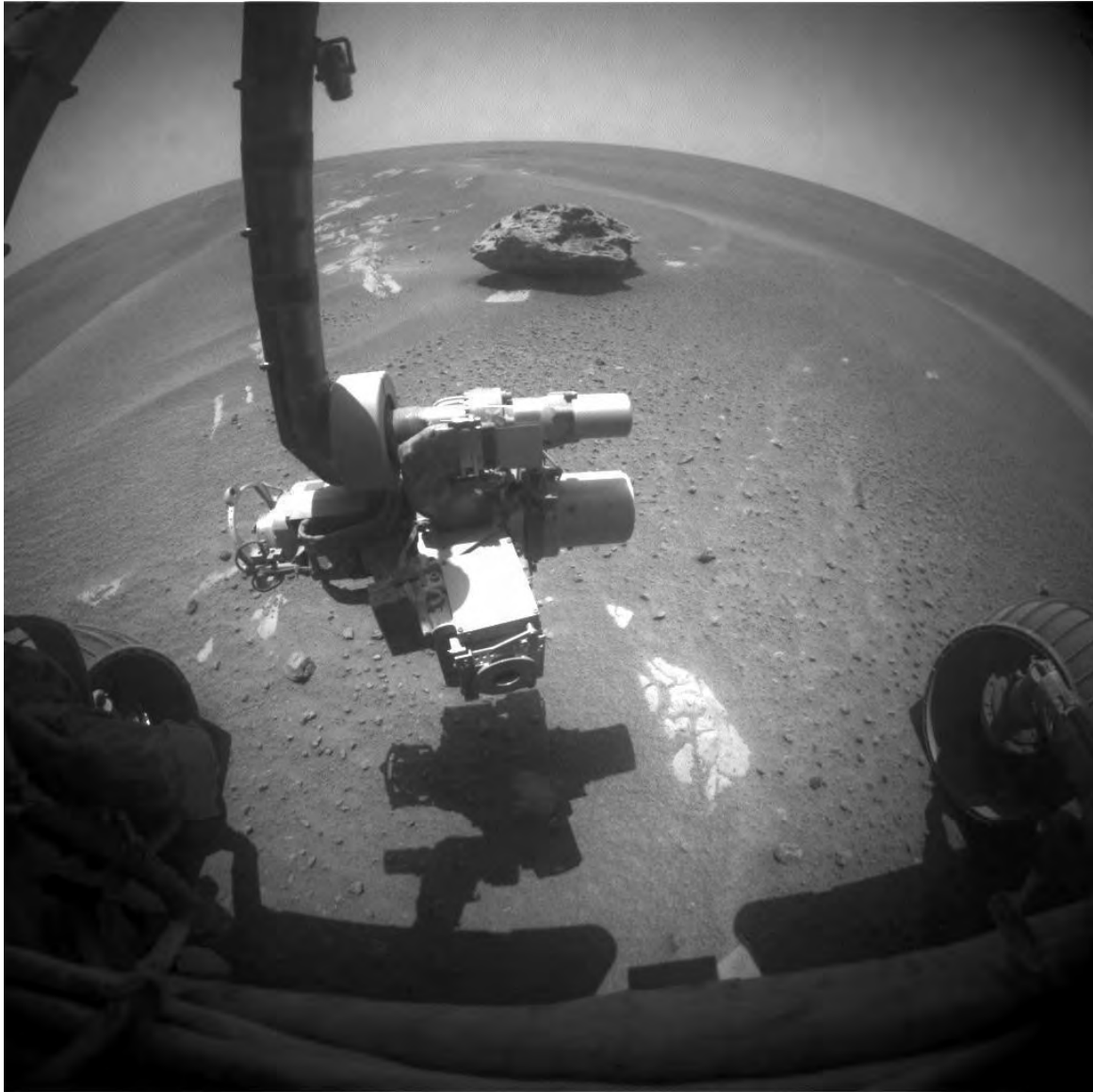
Contrairement au petit robot *Sojourner* de la mission Mars Pathfinder qui restait dépendant de son module d'atterrissage pour ses communications avec la Terre, les rovers MER disposent de leur propre système de communication. Les télécommunications jouent un rôle essentiel dans la mission MER. Comme toutes les sondes spatiales, la raison d'être des rovers est le recueil de données scientifiques qui doivent être ensuite acheminées vers la Terre. D'autre part des échanges fréquents de photos et d'instructions sont nécessaires pour guider le rover sur le terrain, même si celui-ci dispose d'une capacité à identifier et éviter les obstacles en toute autonomie. Le rover peut utiliser deux méthodes pour transmettre des données : la transmission

directe vers la Terre lorsque le rover peut pointer ses antennes vers celle-ci ou l'émission vers les sondes en orbite qui servent de relais. Ce dernier moyen permet un débit plus important et est privilégié. Il était prévu initialement que les rovers utilisent un réseau de satellites de télécommunications placés en orbite autour de Mars pour communiquer avec la Terre (Mars Network). Mais le déploiement de ces satellites ne s'est pas réalisé et les rovers utilisent les orbiteurs existants : Mars Global Surveyor jusqu'à sa fin de vie en 2006, Mars Odyssey ainsi que Mars Reconnaissance Orbiter depuis son arrivée en orbite martienne en 2006. La sonde européenne Mars Express a également servi de relai à titre expérimental.

Le transfert des données entre le rover et la Terre fait face à plusieurs contraintes. Le rover a un équipement de communication de puissance limitée. Il dispose d'une quantité d'énergie réduite par la surface de ses panneaux solaires et l'équipement de télécommunications a dû être allégé au maximum. Les orbiteurs ont par contre dans ce domaine plus de capacité grâce à la taille de leurs panneaux solaires et de leur équipement de télécommunication. Le débit de la transmission est donc généralement faible : il est compris entre quelques bits par seconde avec l'antenne faible gain du rover et 32 en utilisant l'antenne UHF et le relais des sondes qui orbitent autour de Mars. Pour que la transmission puisse avoir lieu il faut que l'émetteur et le récepteur soient visibles l'un par l'autre : l'orbiteur Mars Odyssey qui a été utilisé pour le transfert de la majeure partie des données n'est visible que durant 10 minutes à chacun de ses passages au-dessus du rover. La communication avec MRO qui orbite à plus basse altitude n'est possible que durant 5 minutes. Si le rover veut communiquer directement avec la Terre, il doit prendre en compte la rotation de la planète Mars et doit attendre si nécessaire de faire face à la Terre. Les communications directes vers la Terre sont, par ailleurs, limitées à 3 heures par jour martien pour limiter la consommation d'énergie et l'échauffement de l'électronique. Les rares antennes suffisamment puissantes sur Terre pour recevoir les émissions des sondes, dont le Deep Space Network de la NASA, doivent suivre un grand nombre de missions planétaires simultanées. Des créneaux horaires d'une heure sont alloués à chaque rover pour chaque jour martien pour les communications montantes (envoi d'instructions aux rovers, programme du jour) et descendantes (transfert de données scientifiques et de navigation). Une fois tous les deux ans la Terre et Mars se trouvent en opposition par rapport au Soleil. Il en résulte un black-out total des communications avec le rover qui dure deux semaines : durant cette période, le rover ne se déplace plus et exécute un programme d'observation au voisinage de sa position.



Le rover Opportunity au cours de tests de qualification au centre spatial Kennedy (mars 2003)

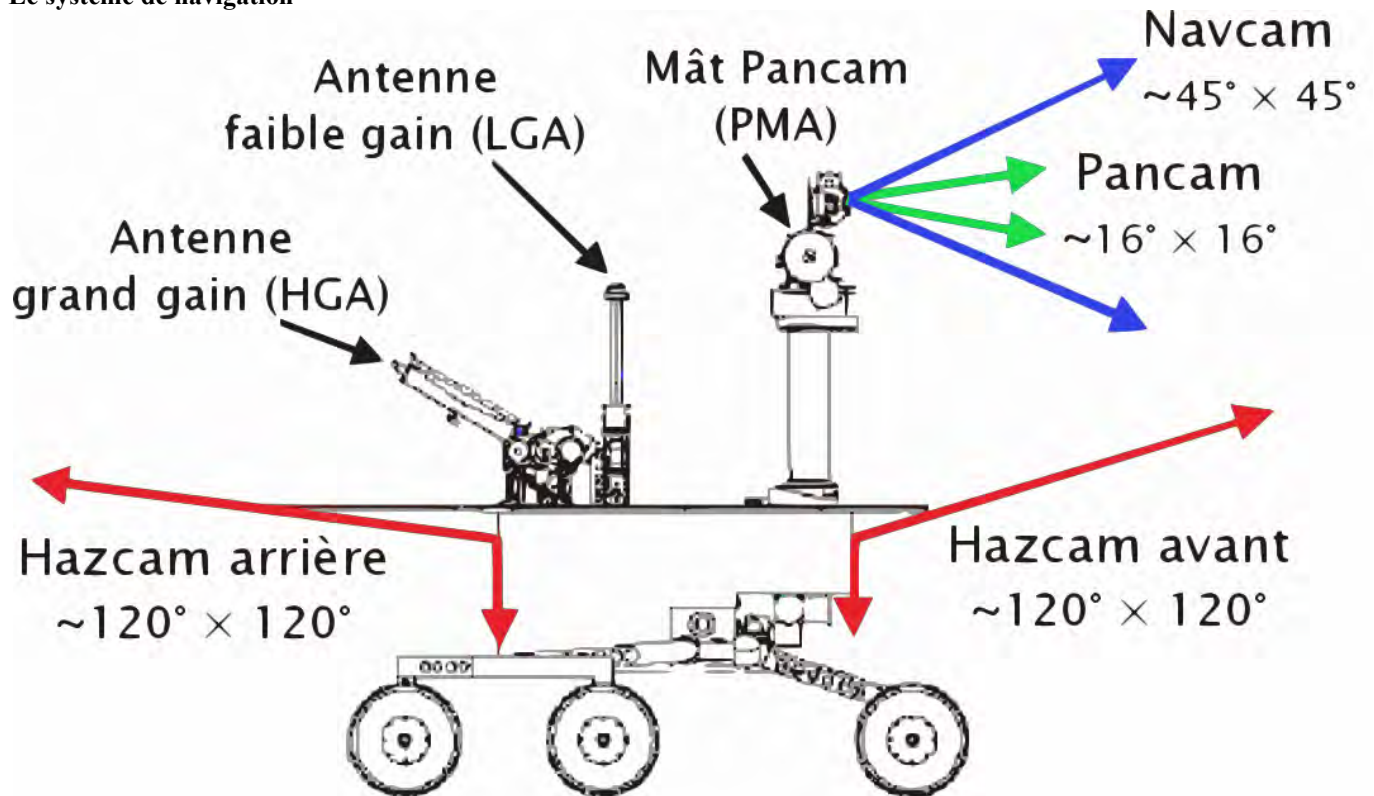


Le bras porte-instruments est mis en position pour analyser la météorite Block Island

Le rover dispose pour communiquer avec le contrôle au sol de trois antennes :

- une antenne grand gain (HGA) parabolique de 28 cm de diamètre est utilisée pour communiquer directement avec la Terre en bande X. La bande X est privilégiée sur les sondes spatiales car elle permet le transfert de volumes importants de données sans nécessiter de grandes quantités d'énergie. L'antenne peut être pointée avec précision vers la Terre grâce à deux moteurs fournissant deux degrés de liberté. Son débit est de 11 Kbit/s pendant trois heures par jour au maximum. Elle a été ajoutée à l'équipement du rover pour compenser l'abandon du réseau de satellites de télécommunications martiens. Pour que la masse du rover reste identique il a fallu supprimer le spectromètre Raman, un des instruments scientifiques prévu dans la mission initiale.
- une antenne faible gain omnidirectionnelle (LGA) fixe permet également de communiquer directement avec la Terre également en bande X mais avec un débit très faible compris entre 7 et 10.
- une antenne UHF omnidirectionnelle de portée limitée est utilisée pour communiquer avec les orbiteurs américains Mars Global Surveyor et Mars Odyssey et MRO lorsqu'ils sont à la verticale du robot. Son débit est de 32, pendant une ou deux sessions de quelques minutes par jour. Au cours d'un seul passage de 8 minutes, le rover peut transférer 7,5 Mo de données. Le transfert du même volume de données par émission directe vers la Terre durerait d'une heure et demie à cinq heures.

Les deux robots Spirit et Opportunity utilisent des fréquences différentes, de manière à éviter toute confusion à la réception de leurs signaux sur Terre.



Angles de vue des caméras : caméra panoramique (Pancam), caméra de navigation à grand angle (Navcam), caméra de détection d'obstacle avant (Front Hazcam) et arrière (Rear Hazcam)

Objectifs et contraintes

Pour remplir sa mission le rover doit se déplacer sur le sol martien en évitant les obstacles, rechercher et identifier des échantillons de sol intéressants puis positionner avec précision ses instruments chargés de recueillir les données scientifiques : certains doivent être plaqués contre la roche à analyser (spectromètre Mössbauer et APXS), d'autres doivent être simplement pointés avec précision vers leur cible (caméras et spectromètre infrarouge). Le pilotage du rover à la surface de Mars comporte de nombreuses contraintes. L'échange de données par radio entre la Terre et Mars nécessite de 8 à 42 minutes en fonction de la position respective des deux planètes. Il n'y a généralement qu'une seule vacation radio par jour martien entre le rover et les contrôleurs à Terre pour plusieurs raisons : le rover dispose d'une quantité d'énergie limitée à consacrer aux télécommunications, ces échanges utilisent comme relais un des orbiteurs martiens qui doit survoler le site du rover et le réseau d'antennes de réception sur Terre est peu disponible. De plus la navigation du rover doit être très prudente, car aucune réparation n'est possible or le terrain martien est irrégulier (la garde au sol du rover est de 30 cm) et les zones géologiques intéressantes sont souvent situées dans des lieux escarpés. Le rover dispose d'une quantité d'énergie limitée qui lui permet de rouler au plus 4 heures durant une journée martienne. Compte tenu de la durée de vie limitée du rover et de la complexité des recherches géologiques entreprises, les concepteurs du rover ont voulu que celui-ci puisse franchir 100 mètres au cours d'une journée martienne. Avec les contraintes énoncées plus haut cet objectif ne peut être atteint si un téléopérateur humain doit superviser chaque avancée du rover. Le recours à une série de commandes préparées à l'avance par le contrôle à Terre sur la base de photos prises par le rover et les orbiteurs martiens a ses limites : au-delà d'une certaine distance les informations disponibles sur les photos ne sont pas suffisamment précises, le rover peut circuler sur un terrain glissant qui fausse l'estimation de sa trajectoire réelle. Les concepteurs des rovers MER ont donc inclus dans le logiciel embarqué des fonctionnalités lui permettant de se déplacer de manière autonome vers son objectif.

Les équipements du logiciel de navigation

Le logiciel de navigation utilise, pour déterminer la trajectoire, des données fournies par plusieurs capteurs. Une centrale à inertie comportant 3 accéléromètres et trois gyromètres donne la direction (il n'y a pas de champ magnétique ni de système de navigation par satellites sur Mars). Au bout de quelques heures, un

écart de plusieurs degrés peut apparaître entre l'orientation réelle et l'orientation déterminée à l'aide de la centrale à inertie. Pour pallier cette dérive, une caméra est pointée vers le Soleil pour fournir le relèvement de celui-ci. L'orientation réelle est alors calculée en utilisant cette information, combinée avec l'heure solaire locale et la direction de la verticale locale (fournie par l'accéléromètre). Un odomètre utilise le nombre de tours de roue pour fournir la distance parcourue. Des détecteurs placés sur le châssis permettent de déterminer si le véhicule se trouve dans une position dangereuse (inclinaison importante, suspension fortement sollicitée). Un ensemble de huit caméras fournit des informations sur le terrain environnant :

- deux paires de caméras monochromes permettant d'obtenir des images en relief, destinées à détecter les obstacles sur le parcours de l'appareil : une paire située à l'avant du rover (Front Hazcam), à 52 cm de hauteur au niveau du pont du rover sert également à observer le fonctionnement du bras robotisé; l'optique est un objectif grand angle de 125°; une deuxième paire située à l'arrière du rover (Rear Hazcam) joue un rôle identique;
- une paire de caméras grand angle (Navigation Camera ou NavCam), placée en haut du mat, est utilisée pour la navigation; l'optique a un angle de vue de 45° et permet d'obtenir des images de qualité entre 2 et 20 mètres de distance;
- la paire de caméra PanCam couleur, utilisée également pour les travaux scientifiques, est dotée d'un téléobjectif (18°) et permet d'obtenir des images exploitables pour la navigation jusqu'à 50 mètres.

Le logiciel de navigation

Lorsque la trajectoire est définie par le contrôle à Terre (mode *Direct Driving*), une série d'instructions décrivant le parcours à suivre décomposé en segments (distance + direction) est téléchargée en début de journée puis exécutée de manière séquentielle. Le déplacement peut être interrompu si le rover détecte à l'aide de ses capteurs une situation à risques (inclinaison trop importante) ou si le temps alloué au déplacement est dépassé ou si l'engin a une défaillance mécanique.

Lorsque le rover circule de manière autonome, le logiciel de navigation du rover comporte trois fonctions qui optimisent le déroulement et limitent le risque associé à ce mode :

- le système de détection des obstacles (*Terrain Assessment*) utilise les caméras Hazcam pour identifier les obstacles situés sur sa trajectoire;
- le système de sélection de trajectoire (*Path Selection*) permet au rover de choisir sa trajectoire vers la cible, en tenant compte de sa position estimée à l'aide des capteurs et des données fournies par les deux autres fonctions si elles sont activées;
- le système d'odométrie visuel (*Visual Odometry*) permet au rover de déterminer avec précision sa position en comparant des photos prises à intervalle rapproché. Cette fonction est utilisée notamment lorsque le rover se trouve sur un terrain glissant (du fait de la nature du sol ou de la pente) qui entraîne des erreurs importantes sur la position calculée.

La combinaison de ces fonctions permet d'obtenir plusieurs modes de navigation autonome. Le mode est choisi en fonction de la nature du terrain et de la distance à la cible. Au cours des 18 premiers mois de la mission, les deux rovers ont utilisé essentiellement les modes de navigation suivants :

- *Blind Goto Waypoint* (~40 % de la distance franchie) : seul le système de sélection de trajectoire est activé. Ce mode est utilisé lorsque le rover doit parcourir de grandes distances en terrain plat. La vitesse de déplacement maximale est d'environ 133 mètres par heure;
- *Autonav* (~25 %) : le système de sélection de trajectoire et celui de détection d'obstacles sont activés. Ce mode est utilisé sur des terrains plus délicats lorsque la pente n'est pas trop forte. La progression se fait par pas de 50 cm mais lorsque le terrain n'est pas trop encombré, la détection d'obstacles n'est effectuée que tous les 1,5 à 2 mètres. La vitesse de progression est comprise entre 12 et 35 mètres par heure;
- *Visodom* (~9 %) : seul le système d'odométrie visuel est activé. Ce mode est utilisé pour les parcours d'approche en terrain très pentu. Le rover avance par pas de 60 cm et prend à chaque fois des photos pour recalculer sa position. La vitesse de déplacement est d'environ 12 mètres par heure;
- *Direct Driving* (~25 %) : dans ce mode, le rover n'est pas autonome et exécute les instructions du contrôle au sol. Une phase d'avancement en mode Autonav est souvent programmée à la fin de son exécution.

Le recours au mode Visodom et AutoNav est limité par la faible puissance du microprocesseur cadencé à 20 MHz qui doit exécuter en parallèle jusqu'à 90 tâches même si, en général, 75 % du temps machine peut être consacré aux fonctions de navigation. Le traitement d'une photo pour les besoins de la navigation dure de 2 à 3 minutes et nécessite un arrêt complet de la progression du rover pour que le résultat des calculs puisse être exploité avant d'être périmé.

Planification d'une journée de navigation

La planification d'une journée de navigation est effectuée par les équipes au sol du JPL qui regroupent des scientifiques qui identifient les cibles intéressantes et dépouillent les résultats et des ingénieurs chargés de préparer les instructions à exécuter par les rovers et de surveiller le déroulement des opérations. Le rover opère lorsque le Soleil est au plus haut. À l'issue de sa journée de travail, il transmet à l'équipe sur Terre des photos qui vont servir à identifier des objectifs scientifiques et à préparer la route du lendemain. Au cours du processus de préparation des arbitrages sont effectués pour prendre en compte les besoins en énergie, échanges radio et les capacités du rover (pente). Durant la première phase de la mission MER, l'ensemble de l'équipe au sol travaillait à l'heure martienne 7 jours sur 7 avec un décalage de 40 minutes chaque jour par rapport à l'heure terrestre. Ce rythme épuisant a été abandonné dès la première extension de la mission 90 jours après l'atterrissage : le temps de préparation qui nécessitait chaque jour 18 heures a été fortement réduit par la création de séquences de commandes et grâce à l'expérience acquise. Par la suite, une optimisation plus poussée du processus avec un système de distribution automatisé des tâches et une dématérialisation quasi complète des supports de communication a permis aux scientifiques de réintégrer leur entité d'origine tout en maintenant leur participation au projet.

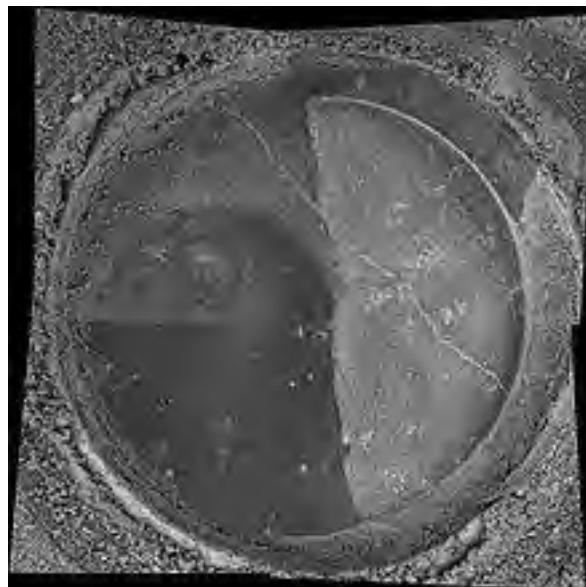
Les instruments scientifiques

Les caméras panoramiques (PanCam) de haute résolution, fixées au sommet du mat vertical porteur d'instruments. Chacun de ces instruments est équipé d'un capteur CCD de 1 024 pixels sur 1 024 pixels. Ce dispositif permet de réaliser des images en relief et de repérer les roches et les sols intéressants pour une analyse ultérieure à l'aide des autres appareils de mesure. La PanCam est équipée de :

- huit filtres montés sur une roue permettant des captures d'images à des longueurs d'onde de 0,4 à 1,1 micromètre;
- deux filtres solaires sont utilisés pour mesurer l'absorption du rayonnement solaire par les poussières présentes dans l'atmosphère de Mars;
- des filtres permettent d'étudier le spectre infrarouge avec l'objectif droit de la Pancam;
- des filtres permettent d'étudier le spectre en lumière visible avec l'objectif gauche de la Pancam.

Chaque robot transporte également trois spectromètres :

- **un spectromètre infrarouge miniature d'émission thermique (Mini-TES)**, pour étudier la composition minéralogiques des roches et des sols, en mesurant le rayonnement naturel infrarouge émis par ces objets. Cet appareil est fixé sur le mât de chaque rover, à côté de la caméra panoramique;
- **un spectromètre Alpha Particle Rayons X (APXS)**, développé par l'Institut Max-Planck de chimie de Mayence en Allemagne, employé pour des analyses rapprochées de l'abondance des éléments constitutifs des roches et du sol. Les sources radioactives de Curium 244 de cet appareil bombardent de particules alpha et de rayons X le substrat à étudier. Ensuite, il analyse soit les rayons X émis par les éléments les plus lourds, soit les particules alpha réfléchies par les éléments les plus légers (carbone, oxygène, azote mais pas hydrogène et hélium). Cet instrument est fixé au bout du bras robotisé;
- **un spectromètre Mössbauer MIMOS II**, élaboré par le Dr Göstar Klingelhöfer de l'université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, employé pour l'examen rapproché de la minéralogie des roches et des sols. Cet appareil utilise un rayon gamma pour mesurer la présence de minéraux riches en fer et leur état d'oxydation. Il est placé au bout du bras robotisé;



Vue en gros plan d'une zone abrasée du rocher Mazatzal par l'outil RAT du robot Spirit

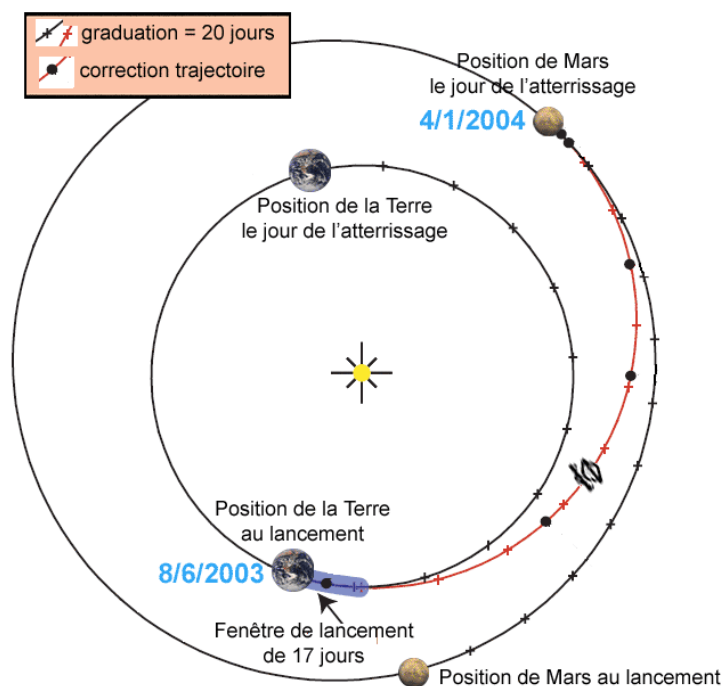
- **un outil d'abrasion des roches (RAT)**, qui permet d'enlever la poussière et la surface des roches à étudier sur un diamètre de 4,5 cm, et une profondeur de 5 mm, grâce à une meule constituée d'éclats de diamants fixés sur une résine solide. Cet instrument permet d'étudier les roches en évitant les biais liés à la poussière ou à une altération de surface. Il est disposé au bout du bras robotisé. L'image ci-contre montre une vue en gros plan prise par la caméra microscope du robot *Spirit*, d'une zone abrasée par l'outil RAT du rocher Mazatzal, le jour Sol 82 de la mission MER A sur Mars;
- **une caméra microscope (Microscopic Imager)**, placée sur le bras robotisé, permettant d'obtenir des gros plans d'une résolution de 20 à 40 micromètres par pixel. Pour que la mise au point soit correcte, le microscope est maintenu à une distance fixée de la surface photographiée grâce une petite tige métallique qui fait saillie;
- **7 aimants destinés à piéger les particules magnétiques**, et à les étudier à l'aide de la caméra panoramique, de la caméra microscope, et des spectromètres Mössbauer et APXS. Le dispositif de capture magnétique est constitué d'un cylindre central et de trois anneaux, ayant chacun une orientation magnétique alternée. L'ensemble constitue un cylindre de 4,5 cm de diamètre. Les poussières s'accumulent au fil du temps, au fil des captures des particules en suspension dans l'air martien, qui est très riche en poussières. Comme les différents aimants ont des puissances différentes, les plus faibles ne capturent que les particules plus magnétiques, alors que les plus forts les capturent presque tous. En revanche, il ne sera pas possible de savoir quelle est l'origine précise d'un ensemble donné de poussières.

L'équipement informatique

L'équipement informatique du rover est utilisé durant toutes les phases de la mission à partir du lancement de la sonde. Il gère en particulier la navigation astronomique et les corrections de trajectoire durant le voyage Terre-Mars, les opérations de séparation de l'étage de croisière et du module de rentrée, les différentes tâches qui s'enchainent durant la phase de rentrée et d'atterrissage et le déploiement du rover après l'atterrissage. Sur le sol martien, compte tenu de l'éloignement de la Terre qui nécessite une grande autonomie du rover, l'ordinateur est fortement sollicité : il doit collecter les données télémétriques sur l'état du rover, gérer les communications en jonglant avec les 3 modes existants et les fenêtres s'ouvrant au passage des orbiteurs, exécuter les instructions du sol touchant aux déplacements et à la mise en œuvre des instruments scientifiques, compresser les données recueillies pour optimiser le volume de données à transférer et lorsque le rover progresse en mode autonome effectuer les calculs déterminant la meilleure route à suivre. Le système informatique repose sur un unique microprocesseur RAD 6000 de type RISC 32 bits, qui peut traiter 20 millions d'instructions par seconde. Cette version du processeur PowerPC est durcie pour résister à l'effet néfaste des radiations. Elle utilise 128 Mo de mémoire vive de type DRAM, 256 Mo de mémoire flash et 3 Mo de mémoire morte de type EEPROM (mémoire non volatile). Le système d'exploitation est VxWorks, un système d'exploitation temps réel de la firme Wind River, déjà employé

pour les missions Mars Pathfinder et Stardust. Le logiciel est en partie hérité de la mission Mars Pathfinder et de manière marginale de Deep Space 1, Mars 98 et Mars Odyssey. Il est écrit essentiellement en langage C avec quelques modules en C++, et il représente 305 000 lignes de code occupant avec le système d'exploitation un volume de mémoire de 11 Mégaoctets. Le logiciel est décomposé en modules indépendants se répartissant en 5 couches : interfaces avec les composants physiques du rover (moteurs, antennes), pilotage de ces composants, application, gestion de la sonde, de la charge utile et de la mission, gestionnaire d'événements. Les tâches communiquent entre elles à l'aide de messages point à point transportant l'ensemble du contexte, sauf cas particulier (traitement des images).

Le trajet Terre-Mars



La trajectoire Terre-Mars parcourue par la sonde Spirit

Lanceur

Les deux sondes MER sont lancées depuis les pas de tirs 17A et 17B de la base de lancement Cape Canaveral dans l'État de Floride aux États-Unis. La NASA a choisi d'utiliser des lanceurs Delta II à trois étages qui sont fréquemment utilisées pour le lancement de sondes spatiales. La mission MER-A *Spirit* est lancée par une version 7925 de la fusée qui bénéficie d'une grande fiabilité et a, par ailleurs, contribué au succès des missions précédentes comme Mars Odyssey (2001), Mars Global Surveyor et Mars Pathfinder (1996). La mission MER-B *Opportunity* est quant à elle placée sur un modèle de fusée 7925H dit lourd (« Heavy ») car elle doit décoller quatre semaines plus tard, se trouvant donc dans une configuration Terre-Mars moins favorable, ce qui nécessite plus d'énergie pour atteindre Mars.

Le lancement et les différentes phases du vol propulsé

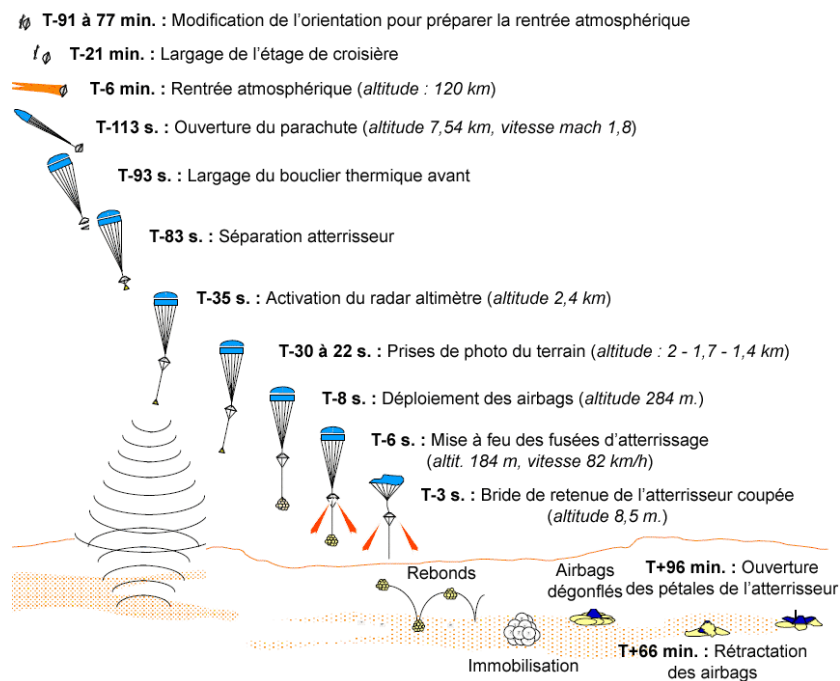
La sonde MER-A *Spirit* est lancée le 10 juin 2003 et la sonde MER-B *Opportunity* le 7 juillet 2003 de la base de lancement de Cape Canaveral. La fenêtre de lancement de chaque sonde a une durée de 3 semaines. Lors du décollage des deux fusées, le moteur du premier étage s'allume ainsi que six des propulseurs d'appoint (les trois propulseurs restants prennent la relève une fois que ceux-ci ont épuisé leur carburant). Après environ 4 min 23 s le premier étage est largué et le second étage est allumé. Peu après la coiffe de la fusée est larguée. Le moteur du second étage est arrêté une première fois, environ dix minutes après le décollage pour la sonde MER-A *Spirit* et 9 minutes pour la sonde MER-B *Opportunity*. Après une phase de vol balistique non propulsé sur une orbite à peu près circulaire, le second étage est brièvement rallumé pour allonger l'orbite. Un mouvement de rotation (63 tours par minute) est ensuite imprimé au lanceur pour accroître la stabilité de l'orientation du troisième étage durant son fonctionnement. Celui-ci, qui est chargé d'insérer la sonde sur sa trajectoire vers Mars, est alors mis à feu après que le deuxième étage a été largué.

Une fois la phase propulsive achevée la rotation est annulée à l'aide d'un yoyo et le troisième étage est largué. L'orientation de la sonde et les manœuvres de correction de trajectoire sont alors prises en charge par son étage de croisière.

Le transit Terre-Mars

Pour parvenir à leur destination les sondes MER effectuent un voyage d'environ six mois et parcourent 500 millions de kilomètres en suivant une orbite elliptique qui tangente la planète Mars (orbite de Hohmann). Cinq manœuvres de correction de trajectoire sont prévues durant ce transit dont la dernière, facultative, est exécutée le jour de l'arrivée pour améliorer la probabilité de poser l'atterrisseur près du site martien visé. Le guidage de la sonde durant son trajet vers Mars nécessite de pouvoir déterminer sa position avec une grande précision. La trajectoire n'est pas purement inertielle : celle-ci est notamment modifiée par la pression de radiation qui génère une dérive de 4 km en dix jours. Pour déterminer la position des sondes MER, la NASA utilise des techniques traditionnelles : la distance entre la sonde et la Terre est mesurée à partir du temps mis par une onde radio pour faire l'aller-retour tandis que la vitesse de la sonde par rapport à la Terre est obtenue par mesure de l'effet Doppler. Pour cette mission l'agence spatiale américaine met également en œuvre une nouvelle technique permettant de mesurer le vecteur vitesse perpendiculaire à l'axe Terre-sonde ce qui permet d'améliorer la précision de l'atterrissage des rovers sur la planète Mars. Cette technique, baptisée DDOR (*Delta Differential One-way Range* ou variation différentielle directe de la distance), fait appel à deux antennes du réseau de stations de la NASA séparées en latitude de 120°. Les antennes relèvent simultanément la position de la source de l'émission radio émise par la sonde et celle d'un quasar, dont la position est connue à quelques milliardièmes de degrés près.

L'atterrissage sur Mars



Séquence atterrissage Spirit.

Le scénario d'atterrissage

La rentrée dans l'atmosphère et l'atterrissage sur Mars durent en tout 6 minutes. Cette phase dite « Entry, Descent and Landing » ou EDL dans la terminologie de la NASA, est particulièrement complexe et délicate. Les sondes arrivent à proximité de Mars avec une vitesse relative d'environ 5,5 km/s (près de 20 000 km/h) qui doit être annulée pour réussir l'atterrissage. Le recours exclusif à des fusées pour annuler n'est pas possible car il nécessiterait qu'une grande partie de la masse de la sonde soit consacrée au carburant. Les sondes MER utilisent successivement quatre méthodes pour se freiner.

Comme pour une rentrée atmosphérique sur Terre, la sonde utilise principalement les forces de traînée, c'est-à-dire le frottement de l'atmosphère, pour faire chuter sa vitesse : 99,6 % de l'énergie cinétique accumulée est dissipée par ce moyen. La densité très faible de l'atmosphère martienne, environ cent fois

inférieure à celle de la Terre, nécessite le déploiement d'un parachute alors que la sonde se déplace encore à la vitesse supersonique de Mach 1,77 : le parachute permet d'éliminer 98 % de l'énergie cinétique restante. La vitesse ne devient inférieure à Mach 1 que lorsque le vaisseau est très près du sol; la sonde doit annuler la vitesse résiduelle en utilisant des fusées. Enfin sur les derniers mètres elle utilise des coussins gonflables. La méthode de rentrée atmosphérique et d'atterrissage employée reprend la technique utilisée pour Mars Pathfinder, avec des aménagements : il faut en effet poser 830 kg sur le sol martien contre 583 kg pour Mars Pathfinder; par ailleurs, à la suite des échecs de 1998-1999 un atterrissage de jour a été retenu car il permet à l'équipe du contrôle sur Terre de recevoir les émissions de l'atterrisseur mais cela pénalise la sonde car l'atmosphère est moins dense et les vents sont plus forts en journée. La méthode utilisée atteint ses limites avec les rovers MER : la sonde Mars Science Laboratory, 3 fois plus lourde, utilise une technique différente.

Incidence des contraintes techniques sur le choix du site d'atterrissage

Les sites d'atterrissage sont d'abord choisis pour leur intérêt géologique mais les contraintes techniques jouent un rôle essentiel dans la sélection initiale. Une grande partie de Mars, située en altitude, ne permet pas l'atterrissage, car la sonde aurait encore trop de vitesse à son arrivée au sol; l'altitude maximum pour les rovers MER est fixé à 1,3 km au-dessous du niveau moyen de Mars. Les deux sites retenus pour les sondes MER sont situés à une altitude respectivement de 1,9 km et 1,4 km au-dessous du niveau moyen de la planète soit tout de même 2 km « plus haut » que le site d'atterrissage de Mars Pathfinder (3,5 km au-dessous du niveau moyen). D'autres conditions sont requises pour que les airbags ne crèvent pas : une pente inférieure à 2 % à grande échelle (1 km) et à 15 % localement (5 m), la densité de rochers doit être inférieure à 20 %. La taille des rochers doit être limitée pour permettre le déploiement du rover au sol. Pour bénéficier d'un apport d'énergie suffisant du Soleil, les rovers doivent se poser à moins de 15° de latitude donc près de l'équateur. Enfin pour que les rovers n'utilisent pas au même moment le satellite relais pour les télécommunications avec la Terre, les deux sites d'atterrissage doivent être séparés d'au moins 37° en longitude.

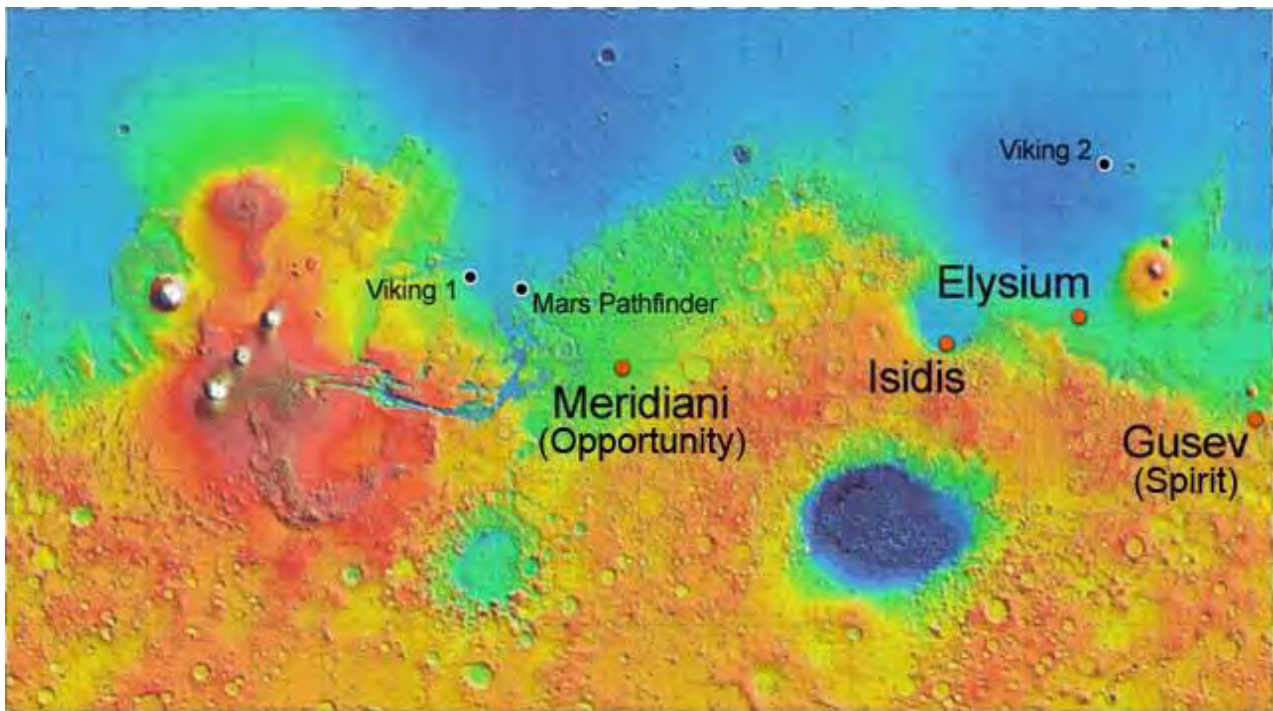
Précision de l'atterrissage

Les sondes MER effectuent une rentrée directe, sans se placer auparavant en orbite autour de Mars, ce qui nécessite une navigation particulièrement précise car aucune correction ne peut être effectuée une fois que la phase de rentrée dans l'atmosphère martienne est entamée : en effet la coquille dans laquelle est enfermée le rover et le module d'atterrissage a une portance nulle et cette phase du vol est donc purement balistique contrairement à la sonde Mars Science Laboratory qui a été lancée en août 2012. Durant les tempêtes qui touchent fréquemment Mars, la densité de l'atmosphère martienne diminue de manière importante (jusqu'à 10 %) et difficilement prévisible. Des vents qui peuvent être violents peuvent avoir une incidence importante sur la trajectoire de la sonde. Enfin, le comportement de la sonde durant la phase de freinage atmosphérique ajoute une marge d'erreur. La sonde est dépourvue de moyens de compenser ces phénomènes une fois la rentrée atmosphérique entamée. Compte tenu de tous ces facteurs d'incertitude les calculs indiquent que le module d'atterrissage doit se poser dans une ellipse de 80 × 12 km centrée sur le point visé avec une probabilité de 99 % : parmi les facteurs énumérés, le vent peut entraîner un déport longitudinal et latéral du site d'atterrissage de plus ou moins 4 km (pour une vitesse de 20 m/s), la densité de l'atmosphère de plus ou moins 12 km en longitudinal et le rebond des airbags de 1 km sur les deux axes.

Chronologie de l'atterrissage

Environ 84 minutes avant que la sonde pénètre dans l'atmosphère martienne elle manœuvre pour orienter le bouclier thermique vers l'avant. Désormais les panneaux solaires de l'étage de croisière, qui ne sont plus tournés vers le Soleil, ne fournissent plus d'énergie électrique et le fonctionnement de la sonde repose jusqu'au déploiement du rover sur cinq batteries stockées dans l'atterrisseur. L'étage de croisière, qui a rempli son office, est largué environ 15 minutes avant le début de la rentrée atmosphérique. À partir de ce moment et jusqu'au déploiement des antennes du rover après l'atterrissage, la sonde communique avec la Terre en utilisant une antenne à bas gain omnidirectionnelle au débit très faible : le statut de la sonde aux différentes phases du vol est communiqué en faisant uniquement varier la fréquence de l'émission. La sonde MER aborde l'atmosphère martienne, dont la limite est située conventionnellement à 120 km, à la vitesse de 19 000 km/h et avec un angle de pénétration de 11,5° donc presque tangent à la surface de l'atmosphère.

La forme du bouclier thermique, un cône de révolution avec un demi-angle de 70° , est un héritage du programme Viking, qui permet de maintenir l'orientation de la sonde en l'absence de système de stabilisation actif tout en évacuant la chaleur.



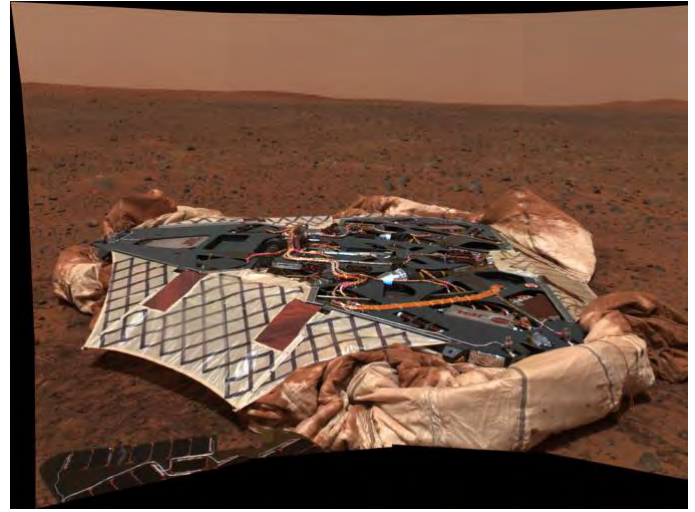
Les sites d'atterrissages des sondes MER

La trainée engendrée par le frottement de l'engin dans la couche peu dense de gaz provoque une décélération qui culmine à 7 g, correspondant à un ralentissement de plus de 4 000 km/h par minute. Le bouclier thermique est porté à une température de $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$. Le déploiement du parachute à l'aide d'un mortier est déclenché par l'ordinateur de la sonde lorsque la pression aérodynamique (déterminée par la centrale à inertie) devient inférieure à 700 N/m^2 : si le déroulement est nominal, l'ouverture a lieu environ 244 secondes après le début de la rentrée atmosphérique alors que l'engin se trouve à 9,5 km d'altitude. 20 secondes plus tard le bouclier thermique avant est largué puis, 10 secondes plus tard, le module d'atterrissage se désolidarise du bouclier arrière et est descendu le long d'un câble d'environ 20 mètres de long afin de placer les coussins gonflables hors de portée des flammes des rétrofusées qui sont chargées d'annuler à la fin de la descente la vitesse résiduelle. De plus, cette configuration pendulaire réduit le risque que les suspentes du parachute viennent s'emmêler dans le module d'atterrissage du fait des turbulences de l'atmosphère martienne.

Alors que la sonde est située à environ 2 500 m du sol, un radar altimètre, monté sous le module de descente effectue plusieurs évaluations de la distance au sol qui sont intégrées par le logiciel de navigation pour déterminer la vitesse verticale et en déduire la durée de fonctionnement des rétrofusées. Trois photos sont prises successivement à des altitudes différentes et le logiciel utilise un système de reconnaissance de forme pour en déduire la vitesse horizontale. Une demi seconde avant la mise à feu des rétrofusées, les airbags sont gonflés. Les rétrofusées (*RAD : Rocket Assisted Deceleration*) sont mises à feu alors que le module de descente est situé à environ 12 mètres du sol. Pour réduire la vitesse horizontale trois autres rétrofusées dites TIRS (*Transverse Impulse Rocket System*) peuvent être éventuellement mises à feu de manière synchronisée. Ce dernier dispositif n'existait pas sur Mars Pathfinder : il a été ajouté car, compte tenu du poids plus élevé des sondes MER, une vitesse horizontale résiduelle trop importante pourrait entraîner une déchirure des airbags. Lorsque la vitesse est pratiquement annulée, la bride qui retient le module d'atterrissage est coupée et celui-ci chute sur le sol : le choc est amorti par les airbags et le module rebondit une première fois à 15 mètres de haut; en fonction du relief le rover peut s'immobiliser au bout d'une minute et après avoir parcouru jusqu'à 1 km. Le bouclier arrière toujours propulsé par les rétrofusées reprend de l'altitude après sa séparation avec le module de descente et va s'écraser un peu plus loin. Douze minutes après le premier contact avec le sol, les airbags sont dégonflés puis rétractés à l'aide de vérins.



Coussins gonflables des rovers Spirit et Opportunity



La plate-forme et les airbags dégonflés photographiés par Spirit peu après son arrivée sur Mars

Environ une heure plus tard, Les pétales métalliques qui protègent le rover sont ouverts : à l'aide des accéléromètres du rover, l'ordinateur embarqué détermine dans quelle position se trouve le rover par rapport à l'horizontale et, si nécessaire, commande d'abord l'ouverture du pétale qui replacera l'engin dans une position adéquate. Le rover, qui était stocké replié pour occuper le moins de place possible, se met en condition opérationnelle : les panneaux solaires sont déployés à l'horizontale, les fixations qui solidarisaient le rover avec le module d'atterrissage sont défaits par de petites charges pyrotechniques, les roues sont déployées, le châssis se relève, les antennes de télécommunications et le mat qui porte la caméra panoramique sont mis en position verticale. Après avoir reçu un panoramique des environs réalisé par le rover au début de cette séquence, le contrôle sur Terre donne l'ordre à l'engin de descendre en empruntant l'une des rampes souples (*batwing*) tendues entre les pétales choisie en fonction de la configuration du terrain.

Le déroulement de l'atterrissage de Spirit et Opportunity

Les atterrissages de Spirit et d'Opportunity se sont déroulés conformément aux attentes de leurs concepteurs. L'erreur d'angle avant la rentrée atmosphérique est de $0,01^\circ$ (Spirit) et $0,02^\circ$ (Opportunity). Une tempête de poussière est en cours à l'arrivée des deux sondes : pour compenser la densité plus faible de l'atmosphère martienne liée à cet événement, le paramètre commandant le déploiement du parachute est modifié pour que celui-ci s'ouvre plus tôt. Selon les estimations, la densité de l'atmosphère est de 8 % plus faible que la normale au moment de la décélération maximale de Spirit et de 12 % pour Opportunity. Les atterrisseurs de Spirit et Opportunity se sont posés tous deux sans encombre environ 15 km en arrière du point visé comme on pouvait le prévoir avec une atmosphère de densité plus faible.

Les rovers MER sur le sol martien

1) Spirit - La mission principale (2004)

Le module d'atterrissage du robot *Spirit* se pose le 3 janvier 2004 à une latitude de 15° au sud de l'équateur dans le cratère Gusev formé par l'impact d'une météorite de grande taille il y a plusieurs milliards d'années. Le cratère d'un diamètre de 145 km, porte le nom de Matvei Gusev, un astronome russe du XIX^e siècle. Ce site d'atterrissage a été choisi parce ce qu'il se situe au débouché de la vallée Ma'adim longue de 900 km qui a sans doute été formée par l'érosion fluviale. À l'époque les flots se seraient frayés un chemin à travers la bordure du cratère et un lac aurait occupé une partie du cratère. En choisissant cet emplacement les scientifiques espèrent trouver des traces des sédiments déposés par les eaux du lac qui permettraient de déterminer les conditions qui régnaient à l'époque.

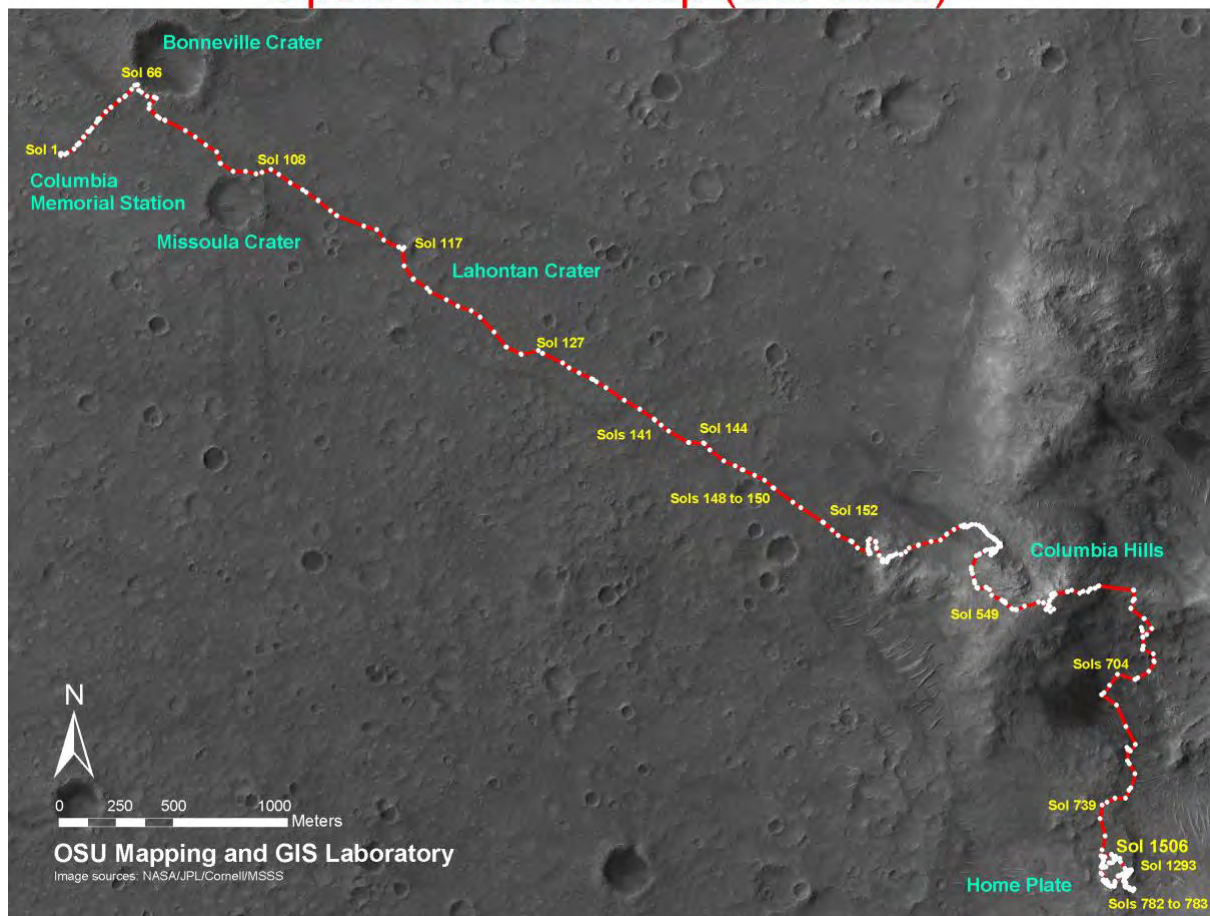


Vue à 360 degrés du site d'atterrissage sur Mars du robot Spirit prise le 12 janvier 2004

Trajet du rover Spirit (avril 2008).

L'espoir de découvrir des traces d'une sédimentation lacustre est rapidement déçu : *Spirit* détecte essentiellement du basalte d'origine volcanique. Les sédiments existent peut-être mais sont enfouis sous des matériaux plus récents. Par ailleurs, le site d'atterrissage de *Spirit* ne présente aucun affleurement rocheux qui permettrait d'étudier le sous-sol. Le 10 février, le rover est dirigé vers un cratère d'impact de 192 m de diamètre nommé Bonneville, avec l'espoir que celui-ci soit suffisamment profond pour que des affleurements de roches y apparaissent. Sur le trajet, *Spirit* est arrêté au milieu de la dépression baptisée *Laguna Hollow*. Les opérateurs sur Terre veulent tenter de faire apparaître la couche de sédiment qui est peut-être enfouie sous la couche de sable superficielle qui recouvre le site : le rover pivote sur une roue tandis que les autres roues, maintenues bloquées, creusent le sol. Mais la manœuvre ne met à jour rien d'intéressant. Après avoir parcouru 250 mètres depuis le site d'atterrissage, *Spirit* parvient au cratère Bonneville : celui n'est pas assez profond pour laisser apparaître des affleurements rocheux. L'impact de la météorite n'a pas été suffisant pour que les éjectas proviennent de la sous couche volcanique. Le rover entame ensuite un long trajet vers les collines Columbia, le relief le plus proche distant de 2,3 km toujours dans l'espoir de trouver des affleurements rocheux.

Spirit Traverse Map (Sol 1506)



Trajet du rover Spirit (avril 2008)

Les collines Columbia (2004-2006)

Spirit atteint la base des collines Columbia en juin 2004. En un peu plus d'un an et en parcourant 4,81 km *Spirit* parvient à se hisser le 21 août 2005 sur la plus haute des collines Columbia baptisée Husband Hill.

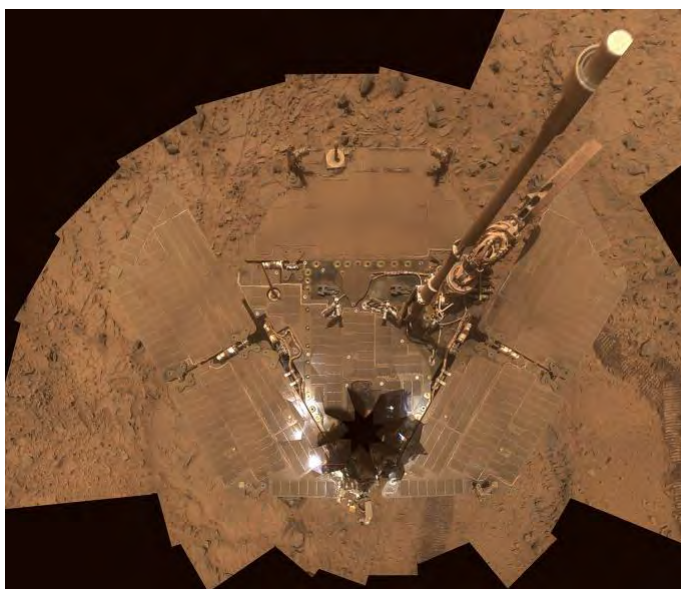
Sur son trajet, le rover étudie de nombreuses roches situées sur les flancs des collines et trouve des traces de l'action de l'eau sous forme liquide. Durant son ascension, les panneaux solaires du rover, qui se sont progressivement recouverts de poussière depuis l'atterrissage, retrouvent toute leur efficacité grâce à l'action des tourbillons de poussière martiens. Le rover entame la descente vers la plaine et atteint en février 2006 un affleurement rocheux remarquable en forme de plateau situé au pied des collines baptisé *Home Plate*. Cet ensemble semble constitué de plusieurs couches rocheuses d'origine volcanique.



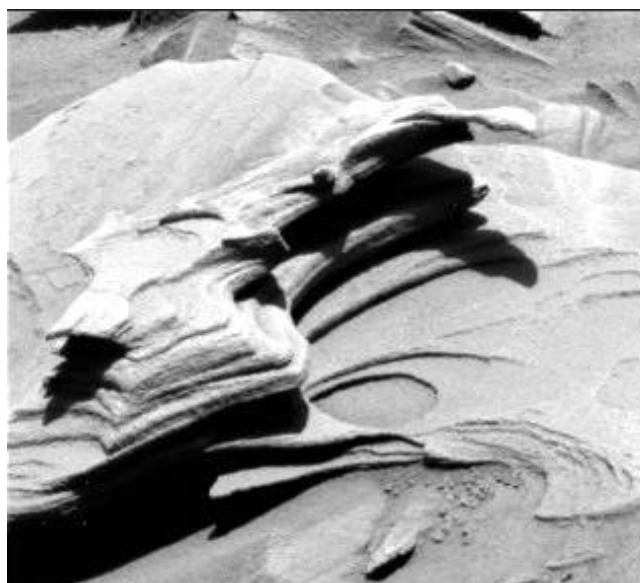
Vue panoramique au cours de la descente depuis Husband Hill

Home Plate (2006-2008)

Après avoir travaillé aux abords de Home Plate, *Spirit* est dirigé vers la colline McCool Hill mais mi-mars 2006 sa progression est ralentie par le blocage de la roue avant droite. Après avoir fait avancer le rover en marche arrière pour compenser la roue bloquée l'équipe au sol décide d'immobiliser *Spirit* le 14 avril sur une arête rocheuse baptisée *Low Ridge Haven* pour que le rover y passe l'hiver. Durant 8 mois *Spirit*, qui a jusque-là parcouru 6,9 km, reste immobile en attendant que l'ensoleillement redevienne suffisant pour recharger ses batteries et progresser à nouveau. En novembre 2006, *Spirit* est de nouveau opérationnel mais la roue avant droite est toujours coincée et le rover doit avancer à reculons. La roue bloquée freine le rover car elle creuse un sillon dans le sol martien; fin mai 2007 ce comportement handicapant permet de faire apparaître sous la couche superficielle un sol inhabituel composé de 90 % de silice : or les mécanismes de formation de ce matériau nécessitent un milieu aqueux favorable à la vie.



Les panneaux solaires de Spirit sont entièrement recouverts par la poussière martienne. Caméra panoramique (octobre 2007)



Formation rocheuse à Home Plate

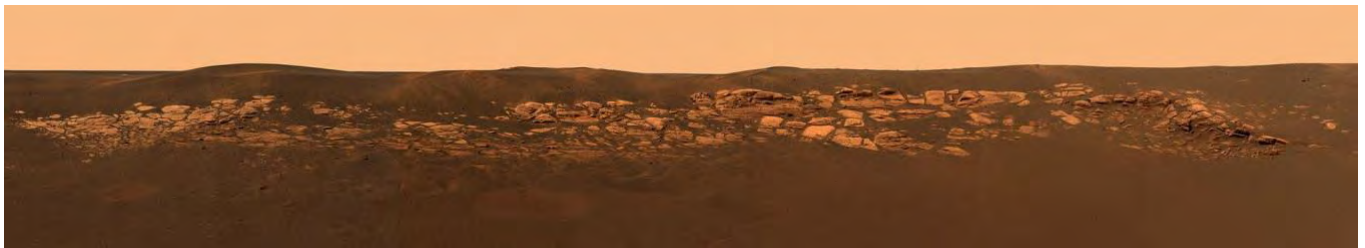
Entre juillet et août 2007, le rover affronte de violentes tempêtes de poussière qui obscurcissent le ciel mais *Spirit* survit à cet épisode. Fin 2007, le rover a franchi jusque-là 7,5 km et est immobilisé au nord de *Home Plate* pour y passer l'hiver. La position du rover est optimisée de manière à ce que l'inclinaison des panneaux solaires par rapport à l'horizontale atteigne 30° afin de permettre au rover de capter dans la position la plus favorable le rayonnement solaire déclinant. L'énergie générée ne doit pas chuter sous la valeur de 150 W·h par jour pour que le rover puisse se maintenir en état de fonctionnement (55 W·h pour les résistances du spectromètre, 29 W·h pour celles des batteries, le reste étant utilisé par l'ordinateur, etc.). En octobre 2008, *Spirit* se remet en route malgré un hiver prolongé en raison de mauvaises conditions atmosphériques.

Spirit définitivement immobilisé (2009)

En décembre 2008, *Spirit* entame un long trajet qui doit l'amener vers deux formations géologiques baptisées « Goddard » et « von Braun ». Comme la route la plus courte à travers le plateau *Home Plate* n'est pas accessible, l'équipe au sol choisit de contourner *Home Plate* par le nord puis l'ouest avant de diriger le rover vers ses nouveaux objectifs. Alors que *Spirit* est en route vers *von Braun*, début mai ses roues s'enfoncent dans une couche de sable et le rover ne parvient pas à se dégager. L'équipe du JPL essaie de trouver une solution pour libérer *Spirit* en simulant sur Terre les manœuvres à effectuer à l'aide d'un modèle du rover placé sur une reproduction du sol martien. Plusieurs tentatives sont exécutées en essayant de faire reculer ou avancer prudemment *Spirit* mais toutes échouent. Début 2010, la NASA renonce à libérer *Spirit* : le rover qui a parcouru depuis son atterrissage 7 730,5 mètres agit désormais en tant que station de mesure fixe. Mais l'hiver martien approchant (le solstice de l'hiver martien est le 12 mai 2010), la quantité d'énergie disponible chute fortement. Or *Spirit*, immobilisé, ne peut pas orienter ses panneaux solaires de manière optimale. Le 30 mars le satellite Mars Odyssey qui relaie les liaisons radio de *Spirit* signale qu'il n'a pas reçu l'émission radio programmée de *Spirit*. Le rover, qui ne recevait plus que 134 W·h par jour lors de la dernière communication réussie, s'est sans doute mis en sommeil pour ne pas descendre au-dessous d'un seuil d'énergie critique pour ses fonctions vitales. Mi-juillet 2010, malgré l'augmentation de l'énergie solaire reçue par les panneaux solaires, le rover est toujours silencieux. Le 25 mai 2011, la NASA met fin à ses tentatives pour contacter le robot.

2) Opportunity - La mission principale (2004)

Le rover *Opportunity* se pose le 24 janvier 2004 sur *Meridiani Planum*. Le nom de *Meridiani* vient de la proximité de cette zone avec le méridien « zéro » de Mars (longitude 0°), alors que *Planum* signifie « plaine ». Ce plateau a été retenu comme site d'atterrissage parce que le spectromètre embarqué à bord de l'orbiteur martien Mars Global Surveyor a détecté que cette région était particulièrement riche en une des formes d'oxyde ferreux appelée hématite grise. Or, sur Terre ce minerai se forme généralement, mais pas toujours, en présence d'eau liquide. L'objectif de la mission est de chercher des indices d'une formation de l'hématite par voie sédimentaire (dépôts laissés par un lac), ou du fait d'une activité hydrothermale. *Opportunity*, plus chanceux que *Spirit*, s'immobilise après son atterrissage au centre d'un petit cratère d'impact de 22 m de diamètre, baptisé *Eagle*, dont les bords présentent des affleurements rocheux. Cette disposition des lieux a permis de conduire rapidement des études sur la nature et l'histoire du sous-sol rocheux du site. Les instruments scientifiques recueillent de nombreux indices qui prouvent qu'une partie des roches visibles se sont formées en partie sous l'action de l'eau liquide.

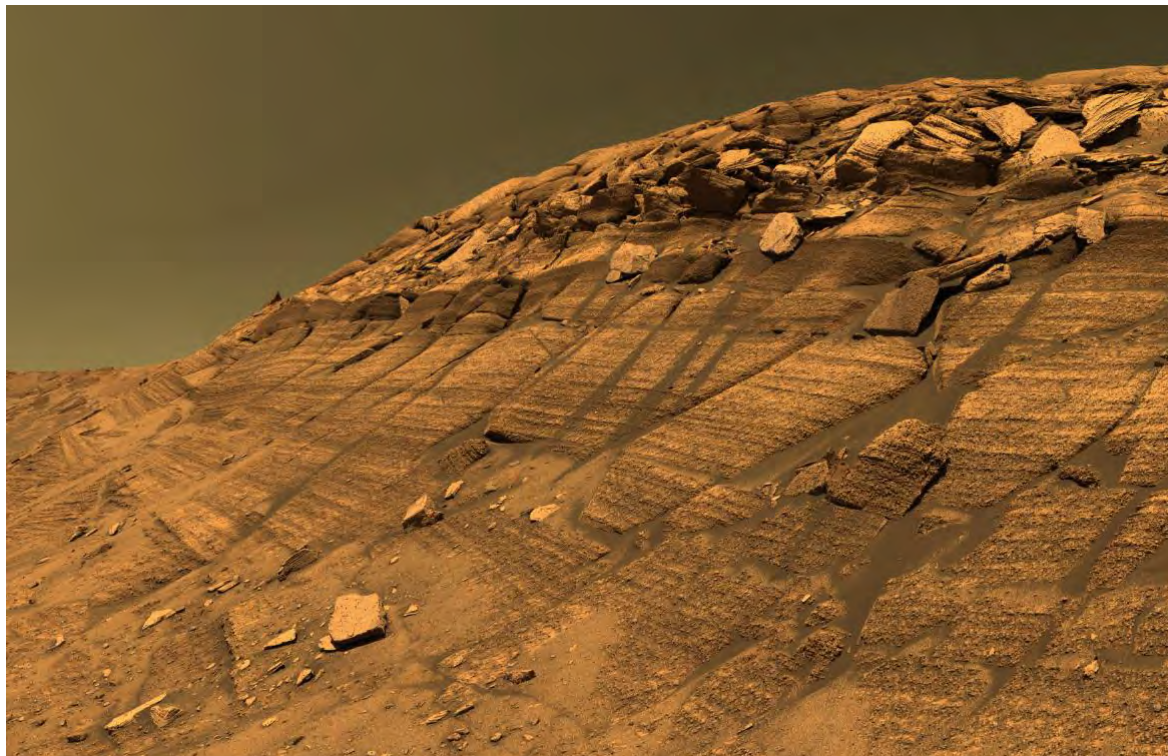


Vue à 360 degrés du site d'atterrissage sur Mars du rover Opportunity (2 février 2004)

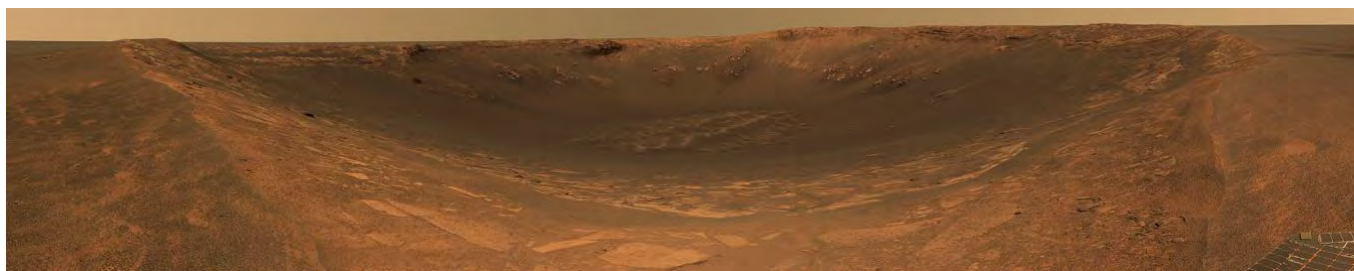
Le cratère Endurance (2004)

Après avoir quitté le cratère *Eagle*, le rover se dirige vers le cratère *Endurance* situé à 750 m. Il l'atteint le 30 avril 2004. *Opportunity* étudie dans un premier temps les bords du cratère en effectuant des relevés à l'aide de la caméra panoramique et du *Mini-TES*. Le rocher *Lion Stone* qui se trouve sur sa route a la même composition que les roches situées au fond du cratère *Eagle*. Le 4 juin 2004 les responsables de la mission décident de prendre le risque de faire descendre le rover à l'intérieur du cratère : *Opportunity* ne pourra peut-être pas remonter du fait de la pente mais les scientifiques pensent que des couches profondes du sous-sol observées à l'intérieur du cratère, sont susceptibles de fournir de nombreuses réponses⁴⁴. Le rover pénètre dans le cratère en passant par un site baptisé *Karatepe* qui montre cinq strates rocheuses aux caractéristiques, texture et composition chimique, nettement différenciées. Les géologues en concluent qu'il s'agit de strates qui se sont formées à des dates différentes. En s'enfonçant dans le cratère, le rover analyse plusieurs rochers situés sur son trajet. Les contrôleurs renoncent à étudier les formations sableuses qui

tapissent le fond du cratère de peur que le rover ne s'enlise définitivement. En remontant pour sortir du cratère, le rover analyse un rocher baptisé Wopmay qui fournit des indices ambigus sur le rôle de l'eau dans la formation des rochers situés au fond du cratère avant et après l'impact. Le rover se dirige ensuite vers une petite falaise sur la paroi interne d'*Endurance* baptisée Burns Cliff. La pente ne permet pas de s'approcher suffisamment de la formation pour utiliser les spectromètres mais de nombreuses photos sont prises avec la Pancam. Des couches de sédiments qui ont pu être déposées par l'eau sont identifiées. *Opportunity* a passé près de 180 jours martiens dans le cratère avant de remonter sans problème la pente intérieure du cratère à la fin du mois décembre 2004.



Burns cliff affleurement rocheux à l'intérieur du cratère Endurance



Vue panoramique du cratère Endurance

En route vers le cratère Victoria (2005-2006)

Désormais, *Opportunity* se dirige vers le cratère Victoria situé à plus de 9 kilomètres. Au cours de son trajet le rover passe devant le bouclier thermique qui fait l'objet de nombreuses photographies destinées à analyser son état et en déduire le déroulement de la rentrée atmosphérique. À proximité, le rover permet de découvrir la première météorite rencontrée sur une autre planète : baptisée Heat Shield Rock, celle-ci a la taille d'un ballon de basket et les spectromètres du rover indiquent qu'elle est composée de fer et de nickel. Le rover passe successivement devant les cratères *Alvin Jason*, *Naturaliste* et Vostok sans effectuer d'investigations approfondies. Le 20 mars 2005, *Opportunity* bat le record de distance parcourue en une journée martienne en progressant de 220 mètres. Le 26 avril 2005, le rover est immobilisé après avoir entièrement enfoui quatre de ses roues dans une petite dune. Après un mois et demi de manœuvres prudentes, l'équipe au sol parvient à libérer *Opportunity* le 4 juin. Entre octobre 2005 et mars 2006, le rover explore le cratère Erebus dont il étudie les nombreux affleurements rocheux. En novembre 2005, le moteur qui actionne la première articulation du bras (l'épaule) porte instruments tombe en panne. L'origine du problème est connue depuis

l'atterrissage : l'interrupteur de la résistance chauffante de l'articulation, mal assemblé, ne fonctionne pas et le moteur est soumis à des alternances de températures qui ont fini par le gripper. Le bras est débloqué mais 2 ans plus tard, en mai 2008, après un incident encore plus sérieux les contrôleurs décident de maintenir le bras étendu en permanence pour qu'il ne devienne pas définitivement inutilisable à la suite d'un nouveau blocage.



La météorite Heat Shield Rock

Le cratère Victoria (2006-2008)

Fin septembre 2006 le cratère Victoria est atteint : avec ses 800 mètres de diamètre, c'est le plus grand des cratères visités par le rover. C'est également le plus prometteur, avec ses hautes parois de roches affleurantes qui devraient livrer de nouveaux indices géologiques. Les panneaux solaires, nettoyés par des tourbillons de poussière ou un phénomène lié au gel, retrouvent brièvement en mars 2007 toute leur efficacité avec une puissance générée de 800 W·h avant que ne s'abattent des tempêtes particulièrement violentes mi-2007 qui font chuter la puissance disponible obligeant le rover à arrêter toute opération. La NASA craint à un moment que le rover épuise complètement ses ressources électriques et endommage son électronique qui n'aurait plus été protégée du froid mais le rover parvient à survivre à cet épisode. Le temps s'étant amélioré, le rover démarre en septembre 2007 une série d'études des strates rocheuses qui s'élèvent à l'intérieur du cratère Victoria avant de quitter le cratère fin août 2008.



Vue panoramique du cratère Victoria

En route vers le cratère Endeavour (2008-2011)

Le rover quitte définitivement le cratère Victoria au début du mois de septembre 2008 en direction du sud-est pour rejoindre le cratère Endeavour, un cratère d'environ 22 kilomètres de diamètre. Les programmeurs estiment alors que pour atteindre ce cratère distant de 12 km environ, un voyage de près de deux ans est nécessaire. Les scientifiques pensent pouvoir y découvrir des empilements de couches de roches bien plus importants que ceux observés dans la cratère Victoria. De plus grâce aux observations de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter en orbite, des études minéralogiques et morphologiques de roches fracturées situées sur le bord du cratère Endeavour ont permis d'identifier des phyllosilicates et ces minéraux se sont probablement formés dans un milieu humide, très tôt dans l'histoire de Mars. Entre le 29 novembre et le 13 décembre 2008, le Soleil s'interpose entre la Terre et Mars et ne permet plus la communication avec les rovers. Durant cette période, l'équipe du rover a programmé Opportunity qui doit utiliser le spectromètre Mössbauer afin d'examiner un affleurement rocheux nommé *Santorini*. Le 7 mars 2009 (Sol 1820) après avoir parcouru près de 3,2 kilomètres depuis *Victoria*, Opportunity est pour la première fois en vue du cratère Endeavour situé à 12 kilomètres. On distingue également le cratère *Iazu* situé à environ

38 kilomètres. Compte tenu du temps mis pour effectuer cette distance depuis *Victoria*, plus d'une année martienne (23 mois) devrait être nécessaire pour parvenir jusqu'à *Endeavour*. *Opportunity* bénéficie le 7 avril 2009 (Sol 1850) d'un nettoyage de ses panneaux solaires, générant ainsi 515 W·h supplémentaire soit une augmentation de la production d'énergie d'environ 40 %.

Le rover poursuit désormais sa route vers *Endeavour* qu'il doit atteindre en 2011. Fin juin 2010 alors que l'hiver martien s'éloigne, *Opportunity* est toujours opérationnel et progresse rapidement. En raison des détours effectués pour éviter les dunes de sable les plus dangereuses, le rover qui a malgré tout parcouru 21,4 km depuis son arrivée sur Mars, se situe encore à 12 km du cratère *Endeavour* mais a sans doute réalisé la partie du trajet la plus dangereuse. Le rover se trouve au 18 mai 2011 à moins de 4 km du cratère *Endeavour*.

Le cratère *Endeavour* (2011-)

Le rover *Opportunity* atteint le cratère *Endeavour* le 9 août 2011 après 3 ans de traversée depuis son départ du cratère *Victoria*. Les scientifiques de la mission ne pensent pas envoyer *Opportunity* à l'intérieur du cratère de 22 km de diamètre car les instruments de l'orbiteur MRO ont permis de déterminer que le terrain présentait là-bas une configuration géologique déjà observée par les rovers. Les instruments de MRO ont par contre détecté des dépôts d'argile en bordure du cratère qui sont retenus comme le prochain objectif d'*Opportunity*. En effet, ce type de formation géologique n'a jusqu'à présent jamais été rencontré par les rovers MER et a sans doute été créé à une époque très ancienne de Mars, où l'eau coulait à l'air libre sur Mars. L'équipement scientifique du rover, qui a dépassé depuis 6 ans la durée de fonctionnement pour laquelle il avait été construit, est aujourd'hui en partie hors service. Le spectromètre infrarouge Mini-TES ne fonctionne plus depuis la tempête qui a frappé le rover en 2007 et la capacité de détection du spectromètre Mössbauer est devenue très faible car sa source radioactive de cobalt, d'une demi-vie de 271 jours, n'émet plus qu'une faible fraction des rayons gamma qu'elle fournissait au départ. Or, sans le Mini-TES, le spectromètre Mössbauer est le seul instrument capable d'identifier les minéraux présents. Par ailleurs, la brosse RAT fonctionne encore mais son axe est tordu ce qui rend son action peu efficace. Par ailleurs, il y a de la poussière sur l'optique des caméras panoramiques.



Partie ouest du cratère Endeavour



Vue panoramique de « Greeley Haven », montrant le site environnant le rover Opportunity depuis le bord du cratère Endeavour (composée de 817 images prises par la caméra panoramique du rover entre le 21 décembre 2011 et le 8 mai 2012)

Résultats scientifiques

État des connaissances sur l'eau de Mars avant la mission MER

L'existence de l'eau sur Mars, est confirmée dès 1964 par des études spectrales et par les observations conduites par les sondes martiennes à partir de Mariner 9. L'objectif de la mission est de trouver des indices de la présence d'eau liquide à la surface de Mars dans des conditions qui auraient permis l'apparition de la vie. Dans les conditions régnant actuellement sur Mars la présence d'eau liquide à la surface de la planète est impossible en raison de la faible température (en moyenne de -50°C contre $+14^{\circ}\text{C}$ sur Terre) et de la pression atmosphérique (6 hPa contre 1 013 hPa sur Terre). L'eau est présente uniquement sous forme de glace hydrique lorsque la température est suffisamment basse et sous forme gazeuse. La glace d'eau est présente dans le sous-sol, près des pôles (la couche de glace d'eau atteint 1 km d'épaisseur au deux pôles martiens) mais également dans certains cratères. La vapeur d'eau est peu présente dans l'atmosphère martienne (0,03 % pour 95,3 % de CO_2 , et des traces d'azote et d'argon) : si elle se condensait, elle donnerait une couche de glace sur toute la surface de Mars de 12 microns d'épaisseur.



Cratère de 13 km de diamètre, situé dans Chryse Planitia qui présente un éjecta lobé (vu par Viking Orbiter)

En s'aidant des indices visibles sur le sol et en datant les terrains à l'aide de la densité observée des cratères, les scientifiques ont identifié 3 grandes périodes géologiques. Durant le Noachien, qui débute avec la formation de la planète il y a 4,6 milliards d'années et s'achève il y a 3,5-3,7 milliards d'années, Mars est très active sur le plan géologique avec des périodes caractérisées par des températures élevées et un environnement humide, un volcanisme actif et une activité tectonique. Mars bénéficie sans doute d'une atmosphère épaisse qui a pu permettre la présence d'eau liquide à la surface. Durant l'Hespérien qui s'achève selon les auteurs il y a 3,5 ou 1,8 milliard d'années l'activité géologique se ralentit, l'atmosphère de Mars s'échappe progressivement dans l'espace ou dans le sous-sol martien entraînant la disparition de l'eau à l'état liquide à la surface de Mars. C'est une période d'intense activité volcanique. Durant l'Amazonien, qui dure depuis 2 à 3 milliards d'années, l'aridité s'installe. Il subsiste des épisodes volcaniques sporadiques allant

en faiblissant, tandis que l'atmosphère continue de s'échapper avant d'atteindre le point d'équilibre actuel. Plusieurs indices semblent montrer que l'eau a occupé de manière permanente le sol martien tels que les vallées de débâcle à fond plat et rectiligne, des effondrements de relief en forme d'écoulement, les sols polygonaux, les terrains chaotiques, les réseaux fluviaux, des indices de présence de lacs ou d'océans. Toutes ces formations ont plus de 3,8 milliards d'années. Si les spécialistes sont d'accord sur les grandes lignes de l'histoire géologique martienne, il n'y a pas de consensus sur le reste : quelle quantité d'eau était présente à la surface et durant combien de temps, où cette eau s'est-elle échappée ?

L'hématite grise

De grandes concentrations d'hématite grise ont été repérées dans une zone proche à la fois de l'équateur et du méridien zéro martien, nommée pour cette raison *Terra Meridiani* (latitude 2° sud, longitude 0° à 5° ouest) par le spectromètre thermique TES de la sonde Mars Global Surveyor. L'hématite est un oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_2O_3 . L'hématite peut être comparée à de la rouille, mais sur *Terra Meridiani*, elle se présente sous forme d'hématite cristalline grise, susceptible d'avoir été créée en présence d'eau. Ce type de formation peut être formé par l'activité volcanique, ou par l'action de l'eau. C'est la raison qui explique le site d'atterrissage du rover *Opportunity* dans cette région, sur le plateau de *Meridiani Planum*.

L'intérêt des planétologues pour l'hématite grise provient du lien entre la présence de ce minerai et celle de l'eau liquide, bien que celle-ci ne soit pas forcément associée à la formation de cet oxyde de fer. En effet, l'origine de l'hématite grise sur Terre fait l'objet de plusieurs scénarios :

- formation de l'hématite en même temps que les roches environnantes :
 - Minerai de fer rubané : une roche sédimentaire comportant 15 % de fer se forme dans de vastes étendues d'eau, sous l'action de l'oxygène dégagé par des microorganismes photosynthétiques. Sur Terre ces sédiments peuvent héberger des fossiles de microorganismes,
 - Hématite hydrothermale : l'eau chaude qui circule dans les fissures de la croûte permet la précipitation de nombreux minéraux riches en fer, dont l'hématite,
 - Oxydation thermique : une activité volcanique entraîne l'oxydation thermique d'un oxyde de fer de formule Fe_3O_4 , la magnétite. Ce scénario n'implique pas la présence d'eau liquide.
- dépôt d'hématite sur des roches préexistantes :
 - Lessivage : des hydroxydes de fer sont formés à la suite du lessivage de roches riches en fer par des eaux froides et acides, puis ils sont transportés par les liquides en circulation avant d'être redéposés notamment sous forme d'hématite lorsque l'acidité du fluide (ou d'autres paramètres) change,
 - Patine désertique : sur Terre les roches des déserts peuvent être couvertes d'une patine sombre de très faible épaisseur et d'une composition chimique indépendante de la pierre support, formée par des microorganismes capables d'oxyder le fer apporté par l'eau ou le vent,
 - Hydrothermalisme : les fluides en circulation dans les fissures de la roche entraînent la précipitation de l'hématite sur des roches préexistantes.

Les données géologiques recueillies par les rovers MER

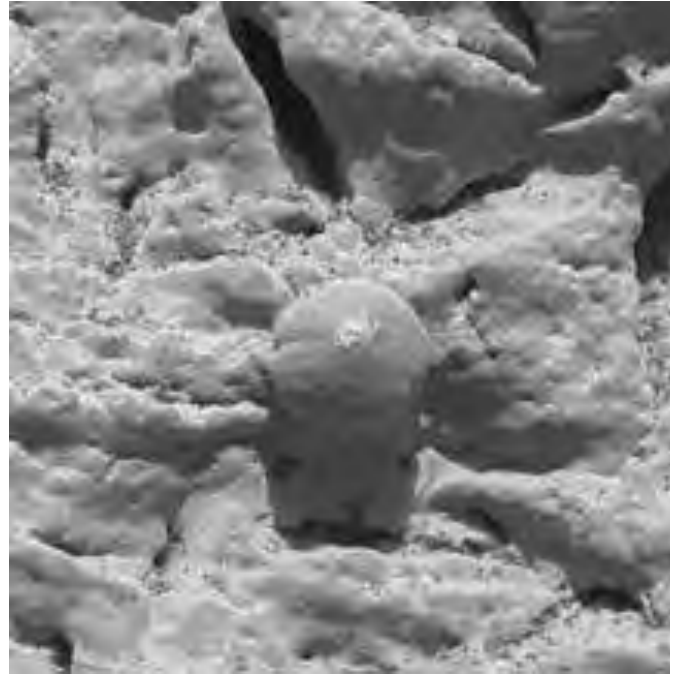
Les débuts de l'exploration du cratère Gusev par le rover *Spirit* ont été décevants car aucune preuve évidente de l'action de l'eau n'a été découverte mais une fois les collines Columbia atteintes plusieurs sites ont prouvé que l'eau avait contribué à façonner certaines formations géologiques. Mais ce rôle semble lié à une activité volcanique plutôt qu'à des dépôts marins ou lacustres. Le rover *Opportunity* a par contre découvert des minéraux probablement créés par l'eau et des indices de sédiments laissés par des plans d'eau.

Le cratère Eagle

Les flancs intérieurs du petit cratère Eagle dans lequel *Opportunity* s'est posé sont couverts d'affleurements disposés en strates sur une hauteur d'environ 75 cm. Celles-ci se présentent selon une coupe presque verticale ce qui facilite leur analyse. Les instruments du robot *Opportunity* fournissent d'excellents indices prouvant que les strates rocheuses étaient autrefois soit submergées soit se sont formées dans l'eau. Les roches analysées sont riches en sulfures. La jarosite qui est un sulfate de fer hydraté est notamment détecté, or celui-ci se forme en présence d'eau. La morphologie des roches semble également indiquer l'action de l'eau.



Vue du rocher El Capitan avec les sphérules riches en hématite



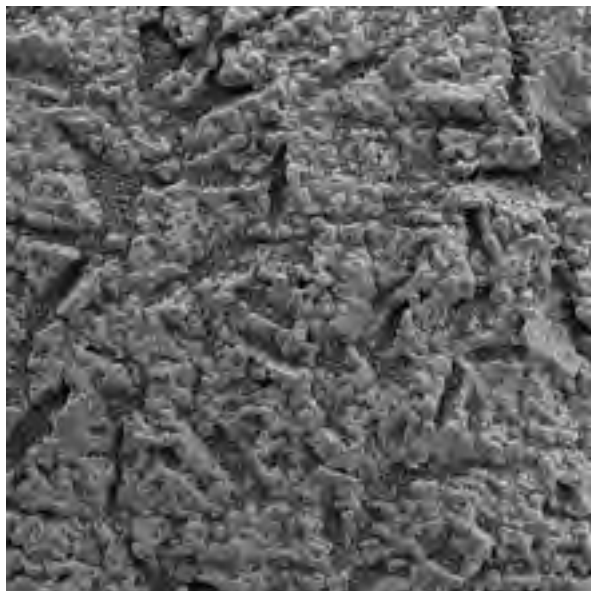
Sphérule (« myrtille ») vue à la surface du rocher El Capitan par la caméra microscope d'Opportunity

Par ailleurs des sphérules de 2 à 3 mm de diamètre sont enkystées dans ces strates. Nombre d'entre elles s'en sont détachées du fait de la désagrégation des lamelles de roches et jonchent le sol. Ces petites sphères de couleur grise nommées « myrtilles », sont très riches en hématite. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer leur origine :

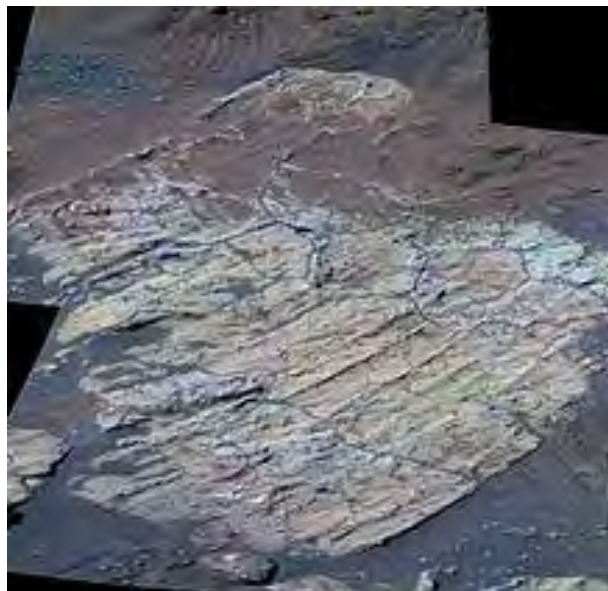
- de la roche fondue pulvérisée en l'air par un volcan. Ce scénario est abandonné car leur répartition est jugée trop uniforme;
- des tectites, formées lors d'un impact de météorite qui aurait projeté des billes de roche fondue. Cette hypothèse n'a pas été retenue en raison du nombre trop important de sphérules dans les strates rocheuses;
- des concrétions formées par le dépôt de minéraux lors du passage de l'eau dans la roche;
- des concrétions sédimentaires formées en milieu lacustre;
- des concrétions d'origine bactérienne ou même des fossiles. Cette hypothèse ne peut pas être testée directement car les rovers ne sont pas équipés d'instruments permettant de mesurer la présence de minéraux carbonatés ou de matières organiques.

Les observations par la caméra microscope ont révélé que certaines roches du cratère Eagle présentent des cavités de forme géométrique qui pourraient correspondre à l'emplacement de cristaux de gypse qui se forment par évaporation en bordure d'une mer ou d'un lac salé. La caméra microscope du rover *Opportunity* a permis d'observer des microcavités de quelques millimètres de long à la surface des rochers *El Capitan* et *Guadalupe*. La présence de ces petites cavités en forme d'aiguilles peut s'expliquer de la façon suivante :

- le matériau initial serait une argile imbibée d'eau, sachant que le plateau de *Meridiani Planum* où *Opportunity* s'est posé s'est formé il y a plus de 3,8 milliards d'années;
- une phase d'évaporation entraîne l'apparition de cristaux, qui peuvent être composés de sulfates de fer, de calcium ou de magnésium, dont la présence a été relevée par les spectroscopes des rovers;
- ces cristaux croissent en repoussant l'argile qui les entoure et en prenant la forme d'aiguilles;
- une phase de dissolution entraîne la disparition des cristaux, qui laissent en place les cavités qu'ils ont creusées, qui sont nommées sur les roches terrestres des pseudomorphoses;
- après la formation de ces pseudomorphoses, des sphérules se sont formées dans les cavités laissées libres par les cristaux. La présence de *myrtilles* dans les microcavités est un argument en faveur de l'origine par concrétion des sphérules.



Microcavités vues par la caméra microscope du rover Opportunity à la surface du rocher Guadalupe sur Mars.



Rocher Escher vu par le rover Opportunity (fausses couleurs), à l'intérieur du cratère Endurance, le 24 août 2004 (sol 208), indiquant la présence de structures polygonales pouvant être liées à l'action de l'eau

Roches comportant des structures polygonales

Des rochers présentant en surface des structures polygonales sont observés par *Opportunity* notamment sur le rocher *Escher* sur les pentes du sud-ouest du cratère *Endurance*. D'autres rochers voisins, au fond de ce cratère, présentent également ces structures polygonales. Ces roches présentent une surface plate montrant des réseaux de fissures divisant la partie supérieure en polygones. Leur apparence est quelque peu semblable à l'aspect de la boue craquelée après que l'eau s'est évaporée.

Les six premiers mois d'analyses effectuées par le rover *Opportunity* ont démontré que la zone explorée était humide par le passé. Celle-ci a ensuite séché et s'est érodée pour former une large plaine.

Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer l'origine des fissures qui divisent la surface des roches en polygones :

- elles peuvent résulter de l'impact ayant créé le cratère *Endurance*;
- une autre raison serait liée à la disparition de l'eau présente dans la roche lors de sa formation;
- les fissures ont aussi pu se créer beaucoup plus tard après la formation de la roche. La création du cratère a pu dégager la roche en la ramenant à la surface. Elle serait alors devenue de nouveau humide puis le séchage aurait fait apparaître ces fissures polygonales.

Certains résultats vont dans le sens de la dernière hypothèse.

Le spectromètre Alpha Particle Rayons X (APXS) du rover *Opportunity* a permis de faire une étude comparative de la surface des roches selon leur emplacement dans le cratère *Endurance*. Les roches les plus profondes du cratère sont chimiquement plus modifiées que des roches situées à des niveaux plus élevés. Cette différence chimique peut résulter d'un contact avec de l'eau. Le graphique ci-contre compare pour différents composants chimiques et pour différentes profondeurs de roche, le rapport des teneurs entre d'une part la roche *Escher* située en profondeur dans le cratère et la roche *Virginia* proche du bord. La ligne rouge représente les mesures à la surface des roches, la ligne bleue correspond aux mesures après brossage des roches, les lignes vertes sont liées aux teneurs mesurées après forage par l'outil *RAT*. Le rapport des teneurs entre les deux types de roches varie de façon très significative en fonction de la profondeur, pour le chlore (Cl) et le soufre (SO₃O). Ceci implique que la surface d'*Escher* a davantage varié chimiquement que la surface de *Virginia* pour ces deux éléments. Des analyses sont menées pour comprendre le rôle joué par l'eau sur cette différence chimique. Les études réalisées par les deux rovers *Spirit* et *Opportunity* respectivement dans le cratère Gusev, au sud d'Apollinaris Patera, et sur Meridiani Planum, suggèrent l'existence passée d'une hydrosphère (la partie de la planète couverte par les eaux) suffisamment importante pour avoir pu homogénéiser le taux de phosphore des minéraux analysés sur les deux sites explorés par les rovers pourtant situés de part et d'autre de la planète.

Les observations météorologiques

La vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère martienne se condense parfois en glace pour former des nuages de cristaux d'H₂O. Le dioxyde de carbone peut également se condenser en formant des cristaux de CO₂ dépassant 1 µm de diamètre, à des altitudes plus élevées que ceux constitués de glace d'eau. Les nuages qui en résultent, aux formes similaires aux cirrus terriens, ont été observés par les rovers. L'atmosphère martienne est constamment chargée en poussières, dont les grains ont un diamètre moyen de l'ordre de 1,5 µm responsable de la teinte rouge orangé du ciel martien. Cette poussière est continuellement injectée dans l'atmosphère par des tourbillons de poussière (*dust devils* en anglais), comme celui observé ci-dessous par le rover *Spirit* le 12 mars 2005; les prises de vue durent 575 s (ce qu'indique le compteur de l'angle inférieur gauche), et trois autres tourbillons sont brièvement visibles au loin dans la moitié droite de la vue, au début de la séquence, puis près du tourbillon principal, puis à la toute fin.



Nuages observés en 2008 dans le ciel de Meridiani Planum par Opportunity

Les couleurs de Mars

Les couleurs des photos prises par le robot *Spirit* ont fait l'objet de polémiques. En effet, sur certaines présentations le ciel est bleu, sur d'autres, certaines zones du robot qui étaient bleu vif sur des photographies prises sur terre, sont rouges sur celles prises sur Mars. La différence de couleurs des clichés des sondes

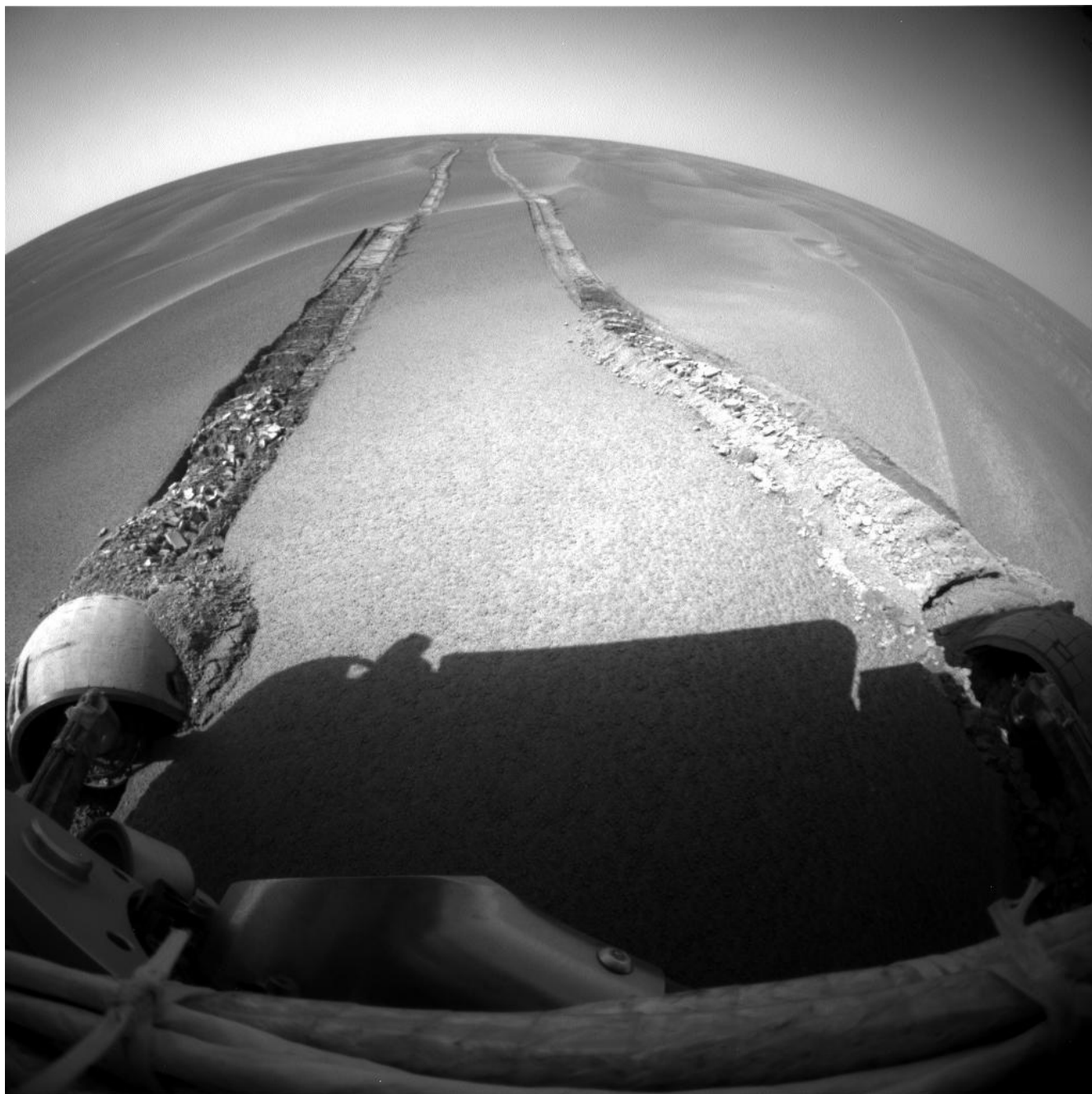
MER est explicable : il faut savoir que les équipements photographiques embarqués sur les sondes de la NASA et de l'ESA prennent des clichés en *niveaux de luminosité* au travers de filtres. Les sondes MER sont en partie équipées de plusieurs filtres décalés dans l'infrarouge. Les images finales sont reconstituées par synthèse additive de trois clichés filtrés différents, pris comme composantes RVB de l'image finale. L'imagerie en fausses couleurs est une technique pour représenter ce qui n'est pas visible ordinairement (généralement un déplacement spectral). La plupart des clichés effectués par les télescopes (comme ceux d'Hubble), ou des caméras infrarouges utilisent ce procédé. Si nous voyons ces zones du spectre non visibles, c'est qu'il s'agit par définition de fausses couleurs. La NASA a par ailleurs publié, fin janvier 2004, un article sur la coloration des images des sondes MER. Par ailleurs, les cadrans solaires placés sur les rovers portent des carrés de peinture servant à l'étalonnage des couleurs des photographies.

Le comportement des rovers

Les rovers ont été conçus pour fonctionner au minimum durant 90 jours martiens et parcourir 600 m à la surface de Mars. Ces objectifs atteints par le robot *Spirit* le 5 avril 2004 ont été dépassés au-delà des espérances de leurs concepteurs. Il n'était pas prévu que les rovers survivent au premier hiver martien caractérisé par une forte diminution de l'intensité lumineuse d'autant que l'accumulation progressive de la poussière devait diminuer le rendement des panneaux solaires. Or *Opportunity* a survécu en mai 2012 à cinq hivers martiens. Au cours du premier hiver l'énergie disponible est passée pour *Spirit* de 900 Watt-heure par jour à 400 Wh/j. *Opportunity* est descendu à 500 Wh/j, mais il est revenu à 900 Wh/j à la surprise de l'équipe de contrôle sur Terre. Ce retour de la puissance électrique est lié à une situation géographique plus favorable pour l'ensoleillement, mais aussi à un dépoussiérage des panneaux solaires selon un mécanisme mal compris. Le nettoyage des panneaux solaires semble s'être déroulé pendant la nuit martienne, car une augmentation de 5 % de la puissance disponible a été constatée à quatre reprises sur une période de 6 mois. Les hypothèses évoquées pour expliquer ce dépoussiérage font appel au vent, au gel, et au fait qu'*Opportunity* est resté en position inclinée durant une longue période au cours de son exploration des parois du cratère *Endurance*. Les deux rovers ont été confrontés très tôt au grippage de certaines de leurs roues. À partir de juin 2004, la roue avant droite de *Spirit* a présenté une résistance interne accrue, qui a provoqué une consommation d'énergie électrique de plus en plus importante de son moteur. Après avoir tenté de redistribuer du lubrifiant vers cette roue, la stratégie adoptée a consisté à faire progresser *Spirit* en marche arrière, et à n'utiliser le moteur de cette roue qu'en cas de besoin.

Les instruments scientifiques ont fait preuve d'une longévité remarquable malgré quelques incidents. En avril 2005, la NASA a constaté que les capteurs des spectromètres APXS ont été intervertis durant l'assemblage des deux rovers et utilisaient les données de calibrage l'un de l'autre. Les données obtenues par les spectromètres ont dû être corrigées. Selon la NASA, l'erreur causée par l'inversion serait inférieure aux incertitudes de mesure, et aucune conclusion scientifique n'est remise en cause.

Le 26 avril 2005, alors qu'il progressait en direction du cratère Erebus, *Opportunity* s'est retrouvé enlisé à 200 m de ce dernier, dans un monticule de sable, avec ses six roues enfouies à 80 % dans un matériau sombre très fin, ayant la consistance du talc et déposé par les vents. Le monticule ne faisait que 30 cm de haut, et il ne présentait pas de particularité par rapport aux autres ondulations parcourant la plaine. Les techniciens du *Jet Propulsion Laboratory* ont dû manœuvrer durant cinq semaines pour faire reculer *Opportunity* centimètre après centimètre. Le 4 juin 2005, la roue avant droite parvient à mordre dans un sol plus ferme se trouvant sous la couche de poussière. Le rover peut se dégager suffisamment pour que les autres roues reprennent contact avec un terrain solide et stable. Au fil des années d'expériences passées sur Mars et des mises à jour de son logiciel de navigation, *Opportunity* devient de plus en plus autonome. En 2010, il est ainsi capable de contourner des obstacles sans aucune intervention des opérateurs sur Terre ou encore de sélectionner de lui-même des roches pour analyses en fonction de critères précis comme la taille, la forme et la luminosité. Fin juin 2010, après 2 294 jours passés sur le sol martien, *Opportunity* a dépassé les 21,7 kilomètres parcourus sur Mars soit 36 fois la distance prévue et plus de 25 fois la durée nominale de la mission. **Le 18 juin 2018, Opportunity avait parcouru 45,16 km sur Mars en près de 14,5 ans, soit 75 fois plus de distance que celle prévue, sur une durée 58 fois plus longue que prévue !**



Opportunity enlisé dans une dune à la surface de Mars, avec ses six roues enfouies à 80 %

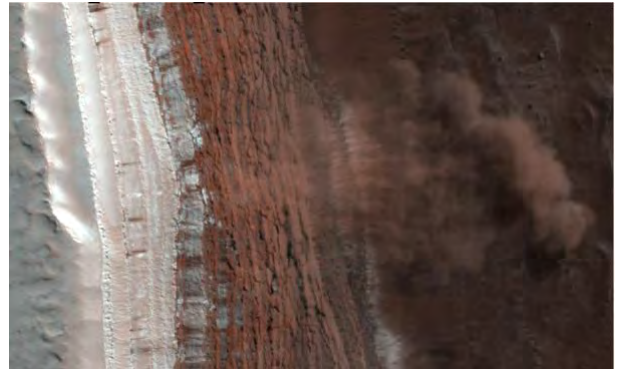
3) L'orbiteur MRO

Lancé le 12 août 2005, l'orbiteur Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) de la NASA a pour objectif principal de cartographier de manière très détaillée la surface de Mars. Elle dispose à cet effet d'un télescope associé à une caméra HIRISE permettant d'obtenir des images avec une résolution inégalée de 20 à 30 cm. La sonde spatiale complétée par un spectromètre et un radiomètre fonctionnant en lumière visible et infrarouge ainsi que par un radar qui permettent de déterminer la composition minéralogique du sol, sa géologie ainsi que de rechercher l'eau piégée sous forme de glace. Enfin MRO est équipé d'un système de télécommunications qui doit lui permettre de transférer des volumes de données très importants vers la Terre et de jouer le rôle de relais pour les données collectées par les atterrisseurs et rovers posés à la surface de Mars tels que Mars Science Laboratory. En arrivant en orbite autour de Mars, MRO prend la suite de Mars Global Surveyor et devient le quatrième satellite artificiel opérationnel en orbite la planète rouge avec la sonde européenne Mars Express, et les deux sondes de la NASA Mars Odyssey et Mars Global Surveyor. Les instruments de MRO ont permis notamment d'estimer le volume de la calotte polaire de Mars, de détecter de la glace dans des cratères situés à une latitude relativement basse, d'observer des avalanches et de détecter plusieurs types de minéraux.

Images prises par MRO :



Le cratère Victoria et le rover Opportunity



Une avalanche photographiée par MRO



Glissement de terrain en fausses couleurs

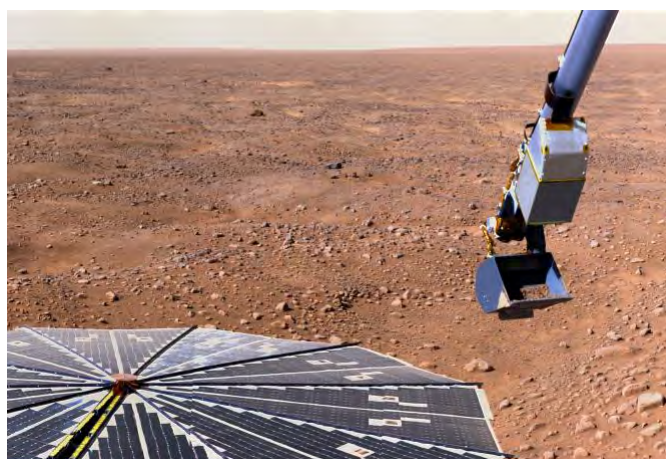


Calotte du pôle sud : la glace d'eau échauffée par le Soleil traverse la couche de dioxyde de carbone

4) L'étude in situ de la calotte polaire par Phoenix

Le 4 août 2007 l'atterrisseur Phoenix est lancé. Comme 2001 Mars Odyssey il s'agit d'un rescapé du programme « better, faster, cheaper », Mars Surveyor 2001 rééquipé en partie avec des instruments récents. Il se pose à la surface de Mars le 25 mai 2008 à proximité de la calotte polaire Nord, dans la région de Vastitas Borealis où d'importants stocks de glace ont été détectés juste au-dessous de la surface. L'objectif de la mission est l'étude de l'eau liquide à la surface de Mars dans un passé récent ainsi que l'observation du climat de la planète. Les instruments de Phoenix confirment la présence de glace d'eau sur le site et fournissent des informations détaillées sur la composition du sol et la météorologie locale. La sonde ne survit pas à son premier hiver martien. Les ingénieurs ayant vérifié que tous les systèmes répondent normalement, le 2 juin (sol 5), le bras robotisé creuse une tranchée pour amener des échantillons dans les mini-laboratoires. On peut constater qu'une partie du sable reste accrochée à la pelle, ce qui laisse supposer

qu'il est légèrement humide. Le 6 (sol 9), Phoenix approfondit cette première tranchée (baptisée d'abord *Knave of Hearts* puis *Dodo*) et observe, au fond, une substance très claire. Une deuxième tranchée (*Baby bear*) est ensuite creusée à droite de la première. Du 8 au 11 (sols 11 à 14), l'un des huit mini-four, couplé à l'analyseur TEGA (Thermal and Evolved-Gas Analyzer) est rempli. Le 11, le bras robotisé livre au microscope des particules. Elles ont été extraites du sol grâce à un adhésif au silicone sur lequel elles restent collées. Les premiers résultats sont publiés le 12. Le 13 (sol 16), Phoenix creuse une nouvelle tranchée près des deux précédentes, de 35 cm de long, 22 cm de large et 8 cm de profondeur. L'ensemble sera appelé *Dodo-Goldilocks*. La substance blanche qui affleure sous le sol pulvérulent orange est toujours présente. le 17 (sol 20), Phoenix creuse une nouvelle tranchée, *Snow White*, au centre de l'un de ces polygones qui caractérisent le sol. Les 18 et 19, des problèmes de saturation de la mémoire informatique font perdre des données d'imagerie : celles concernant les résultats de la première analyse, grâce au mini-four TEGA, sont perdues. Le 20, La NASA publie deux images de *Dodo-Goldilocks* prises exactement avec le même angle de prise de vue et le même éclairage. Elles ont été prises respectivement les 15 et 19 juin. La substance blanche visible au fond de cette triple tranchée semble avoir légèrement diminué. Le fait qu'elle se soit sublimée au fil de ces quatre jours exclut une nature saline. Les scientifiques en concluent qu'il s'agit de glace carbonique. Le 31 juillet (sol 34), cette hypothèse est confirmée grâce à l'analyse d'un échantillon prélevé et qui émet de la vapeur au contact de la chaleur. Durant toute sa période de vie, Phoenix creuse d'autres tranchées (*La Mancha*, *Neverland*, *Cupboard*, *Pet Donkey*...) (cf. la photo de *Cupboard* au sol 79), ce qui l'oblige à déplacer plusieurs quantités de terre (cf. la photo prise au sol 134 montrant un tas de cailloux résultant de la tranchée *Pet Donkey*). Ses activités se poursuivent durant plusieurs semaines, révélant la venue d'un hiver qui va mettre fin à ses activités (cf. par exemple une photo prise au sol 144 montrant le givre recouvrir la tranchée *Snow White*). La sonde transmet sa dernière image durant le sol 151 : on y voit une fine couche de givre recouvrir l'ensemble du paysage.



Panneau solaire de la sonde Phoenix et bras robotique de l'atterrisseur avec un échantillon dans le godet



Version en couleur des photos montrant la sublimation de la glace

L'hiver martien est très rigoureux, principalement à cause d'une importante baisse du niveau d'éclairage reçu à la surface de la planète. Les panneaux solaires ne pouvant plus fournir assez d'énergie à la sonde pour lui permettre de fonctionner et d'alimenter ses systèmes de préservation (chauffage pour protéger les instruments du froid), ses jours sont comptés. Le 2 novembre, elle envoie un dernier signal à la Terre. Elle est depuis considérée officiellement comme perdue, bien qu'un « mode Lazare », permettant de redémarrer

l'électronique de la sonde au terme de l'hiver martien, ait été prévu. Courant 2010, la sonde spatiale Mars Reconnaissance Orbiter prend depuis l'orbite une photo du site d'atterrissage de Phoenix qui montre que celle-ci a perdu un panneau solaire. Celui-ci s'est probablement détaché sous le poids de la glace. La sonde spatiale est totalement sombre et est donc probablement recouverte de poussière.

Résultats scientifiques

Différentes photographies réalisées par Phoenix ont montré la disparition d'une matière blanche contenue dans une tranchée creusée par le bras robotisé de la sonde. La NASA a affirmé que cette matière est de la glace d'eau qui s'est sublimée à la suite de son exposition au soleil. Le 31 juillet 2008, la présence d'eau gelée dans le sol martien du pôle nord est confirmée, grâce à l'analyse d'un échantillon prélevé par le bras robotique de Phoenix, relevant des vapeurs dégagées par la chaleur. L'existence de cette glace d'eau était déjà connue grâce aux observations de Mars Odyssey et de Phoenix réalisées en juin 2008.

Le matériau brillant découvert dans la tranchée disparut au bout de quatre jours : il s'agissait de glace qui s'est évaporée par sublimation après avoir été exposée. Sur le plan météorologique, Phoenix a permis d'observer qu'à chaque printemps, une masse importante de glace polaire se sublime et forme des nuages de glace. L'atterrisseur a fourni des données sur la formation, la durée et le mouvement des nuages, du brouillard et autres tempêtes de poussières. Il a également fourni des informations précieuses sur la vitesse du vent en surface. En revanche, les analyses des échantillons de sol n'ont pas retourné de résultat positif concernant la présence de matière organique.

5) La sonde Phobos-Grunt

Phobos-Grunt, lancé fin 2011, devait marquer, dans le domaine de l'exploration du système solaire, le retour de la Russie héritière du programme spatial de l'Union soviétique après un hiatus de 15 ans. L'objectif de la mission est d'étudier la lune Phobos après s'être posé sur son sol et de ramener sur Terre un échantillon de son sol. La sonde emporte une vingtaine d'instruments scientifiques, dont certains développés par l'Allemagne, la France, l'Italie et la Suisse. Elle emporte également le petit orbiteur chinois Yinghuo 1, qui devait être placé en orbite autour de Mars pour étudier les interactions entre l'atmosphère de la planète et le vent solaire. Mais la sonde spatiale une fois en orbite terrestre ne parvient pas à rejoindre son orbite de transit vers Mars et est détruite en rentrant dans l'atmosphère terrestre en mars 2012.

6) Le rover Mars Science Laboratory (2011)

Mars Science Laboratory (MSL, en français « Laboratoire scientifique pour Mars ») est une mission d'exploration de la planète Mars à l'aide d'une astromobile (*rover*) développée par le centre JPL de l'agence spatiale américaine de la NASA. La sonde spatiale a été lancée le 26 novembre 2011 par une fusée Atlas V. Le site d'atterrissage, sur lequel la sonde spatiale s'est posée le 6 août 2012 à 5 h 31 UTC, se situe dans le cratère Gale. Celui-ci présente dans un périmètre restreint donc compatible avec l'autonomie du rover, des formations reflétant les principales périodes géologiques de la planète dont celle (le Noachien) qui aurait pu permettre l'apparition d'organismes vivants. Au cours de sa mission, le rover, baptisé **Curiosity**, va rechercher si un environnement favorable à l'apparition de la vie a existé, analyser la composition minéralogique, étudier la géologie de la zone explorée et collecter des données sur la météorologie et les radiations qui atteignent le sol de la planète. La durée de la mission est fixée initialement à une année martienne soit environ 669 sols (jours solaires martiens) ou 687 jours (solaires) terrestres. Le rover *Curiosity* est cinq fois plus lourd que ses prédécesseurs, les *Mars Exploration Rovers* (MER), ce qui lui permet d'emporter 75 kg de matériel scientifique, dont deux mini-laboratoires permettant d'analyser les composants organiques et minéraux ainsi qu'un système d'identification à distance de la composition des roches reposant sur l'action d'un laser. Les laboratoires embarqués sont alimentés par un système sophistiqué de prélèvement et de conditionnement d'échantillons comprenant une foreuse. Pour répondre aux besoins accrus d'énergie et s'affranchir des contraintes de l'hiver martien et des périodes nocturnes, le rover utilise un générateur thermoélectrique à radioisotope qui remplace les panneaux solaires mis en œuvre par les précédentes missions. Enfin, il bénéficie de logiciels évolués pour naviguer sur le sol martien et exécuter les tâches complexes qui l'attendent. Le rover est conçu pour parcourir 20 km et peut gravir des pentes de 45°. La sonde spatiale au départ de la Terre a une masse de 3,9 tonnes et comprend un étage de croisière chargé d'amener la sonde jusqu'à proximité de la planète Mars, un véhicule de rentrée qui assure la traversée de l'atmosphère martienne à grande vitesse et un étage de descente chargé de la dernière phase aboutissant à l'atterrissage. Pour parvenir à poser le rover de 899 kg sur le sol martien avec la précision

demandée par les objectifs scientifiques, la technique d'atterrissage utilisée par ses prédécesseurs a été profondément modifiée : la phase de rentrée atmosphérique est en partie pilotée pour restreindre la zone d'atterrissage à une ellipse longue de 20 km et large de 7 km. Le rover est déposé en douceur sur le sol par un étage de descente fonctionnant à la manière d'un hélicoptère-grue, seule méthode compatible avec sa masse. MSL constitue la mission interplanétaire de la NASA la plus ambitieuse de la décennie. La complexité de la sonde et du rover ainsi que la nécessité de mettre au point de nouvelles technologies spatiales ont entraîné des modifications importantes du concept de départ durant le développement : les dépassements de coût qui en ont résulté ont failli entraîner l'annulation de tout le projet. Le lancement prévu initialement en 2009 a dû être repoussé à la fenêtre de lancement suivante, 26 mois plus tard, en 2011. Le coût total du projet est évalué en 2011 à 2,5 milliards de dollars. L'un des objectifs majeurs des planétologues spécialistes de Mars est de pouvoir analyser un échantillon du sol martien dans des laboratoires sur Terre. En 1988, un projet de retour d'échantillon est élaboré mais son coût, évalué à l'époque à sept milliards de dollars américains, est jugé beaucoup trop élevé par les décideurs. Au cours des années 1990, le projet est réactivé par la NASA en partenariat avec le CNES : le scénario est élaboré en s'appuyant sur la « doctrine » des missions à bas coûts (*better, faster, cheaper*, en français « mieux, plus vite, moins cher ») promulguée par l'administrateur de la NASA de l'époque Daniel Goldin. Mais l'échec des deux missions martiennes de 1999, Mars Polar Lander et Mars Climate Orbiter, produits de cette politique, ainsi qu'une approche plus réaliste des coûts mettent fin au projet de retour d'échantillon au début des années 2000. La communauté scientifique poursuivait un autre objectif majeur, consistant à mettre en place un réseau géophysique constitué de stations automatiques statiques, disposées à la surface de Mars et chargées de collecter des données météorologiques, sismologiques et géologiques. Au cours des années 1990, plusieurs projets (*MarsNet*, *InterMarsNet*) sont élaborés dans le cadre d'une coopération internationale pour mettre sur pied ce réseau de stations mais tous échouent pour des raisons financières. Au début des années 2000, les projets martiens d'envergure ne sont plus à l'ordre du jour au sein de la NASA, comme dans le cadre d'une coopération internationale, faute d'appuis financiers. L'agence spatiale américaine développe les rovers MER aux capacités limitées tandis que l'Agence spatiale européenne réalise son premier orbiteur martien Mars Express⁷. Pour disposer d'une stratégie à moyen terme, la NASA demande à un groupe de travail représentant la communauté scientifique internationale, le *Mars Science Program Synthesis Group*, de définir les orientations à donner à l'exploration martienne pour la décennie 2010-2020. Le livre blanc qui résulte des travaux de cette commission est produit en 2003. La recherche de l'eau qui avait servi de fil conducteur aux missions des années 1990 est remplacée par celle des composants permettant l'apparition de la vie. Quatre axes d'exploration sont identifiés avec des priorités qui pourront évoluer au fil des découvertes d'indices par les missions existantes (notamment MRO, dont le lancement est prévu en 2005) ou futures :

1. S'il est prouvé que Mars a connu une période chaude et humide, analyser les couches de sédiments et rechercher la présence de signes du vivant dans le passé de Mars;
2. Si des indices d'activités hydrothermales actuelles ou passées sont identifiés, explorer les sites en recherchant des signes de vie présente ou passée;
3. S'il existe des indices de présence de vie sur Mars et si un soutien politique existe, lancer une mission de retour d'échantillon s'appuyant sur un rover pour la collecte du sol;
4. S'il s'avère que Mars n'a pas connu de période chaude et humide, étudier l'histoire des gaz volatils sur Mars, déterminer les conditions régnant initialement sur Mars et l'évolution qu'a connue la planète afin d'aboutir à une compréhension globale des évolutions de Mars, Vénus et de la Terre.

La décision de lancer le développement du rover lourd et polyvalent *Mars Science Laboratory* est prise en 2003 et découle directement de ces travaux. Son instrumentation lui permet d'étudier la chimie du carbone sur Mars, de fournir des données dépourvues d'ambiguïté sur la géologie martienne et d'analyser les dépôts hydrothermaux, c'est-à-dire de constituer un instrument adapté pour trois des axes de recherche envisagés. La précision de son atterrissage (marge d'erreur de moins de 20 km) et son autonomie garantie (au moins 20 km) permettent pour la première fois, dans une mission impliquant d'atterrir à la surface de Mars, de cibler les sites martiens les plus intéressants, caractérisés généralement par la présence de reliefs tourmentés ou par une surface peu étendue. Compte tenu de son coût, Mars Science Laboratory est rattaché au programme Flagship qui regroupe les missions interplanétaires les plus ambitieuses de la NASA dont le budget peut atteindre plusieurs milliards de dollars et qui sont lancées tous les dix ans environ.

Comparaison des rovers MSL et MER		
Caractéristique	Mars Science Laboratory	Mars Exploration Rover
Taille	3 × 2,7 m 2,2 m de haut	1,6 × 1,6 m 1,5 m de haut
Masse	899 kg	170 kg
Charge utile	75 kg (10 instruments)	5 kg (5 instruments)
Bras télécommandé	2,1 mètres de long, 2 instruments, préparation d'échantillon	0,8 mètre de long, 3 instruments
Énergie	2 700 watts-heures par sol	1 000 watts-heures par sol
Autonomie	20 km	700 m
Durée de vie	98 semaines	13 semaines

Le choix du site d'atterrissage de Mars Science Laboratory est crucial pour le succès de la mission. Le site doit présenter un environnement géologique ou un ensemble d'environnements propices à la vie. Il doit permettre de réaliser la plus grande variété d'expériences afin de maximiser le nombre d'axes de recherche pouvant être explorés. Dans l'idéal, la région accessible depuis le site d'atterrissage doit présenter des spectres indiquant la présence simultanée de plusieurs minéraux hydratés, par exemple des argiles avec des sulfates hydratés. L'hématite, d'autres oxydes de fer, les sulfates, les silicates, ainsi peut-être que certains chlorures, pourraient avoir permis la fossilisation d'éventuelles formes de vie martiennes. Le 22 juillet 2011, le site du cratère Gale est finalement retenu comme cible de la mission *Mars Science Laboratory*.

L'équipement scientifique

Le rover embarque 10 instruments scientifiques qui doivent lui permettre de détecter d'éventuelles traces d'eau, analyser précisément les roches, d'étudier les minéraux présents à la surface de Mars, mesurer la chiralité des molécules détectées, et effectuer des photographies à haute résolution. Certains de ces instruments sont développés avec la participation de laboratoires étrangers. Ces équipements se rangent dans quatre catégories :

- deux instruments permettant de faire des analyses à distance et situés dans le mât du rover : la caméra MASTCAM et le Laser CHEMCAM qui détermine la composition des roches à l'aide d'un laser, fournissent une première analyse chimique et géologique de l'environnement,
- deux instruments fonctionnant au contact de l'objet à analyser dont les senseurs sont situés au bout du bras du robot : le spectromètre à rayons X APXS et la caméra microscope MAHLI fournissent la composition chimique et des images détaillées facilitant la sélection des échantillons à analyser,
- deux laboratoires d'analyse logés dans le corps du rover et alimentés en échantillon de sol ou de roche martienne par la foreuse et la mini pelleuse situés au bout du bras du rover : CheMin qui effectue l'analyse minéralogique et SAM qui effectue l'analyse des éléments organiques et volatils,
- quatre instruments caractérisant l'environnement martien : la station météorologique REMS, le détecteur de particules énergétiques RAD qui mesure les radiations qui parviennent jusqu'au sol, le détecteur de neutrons DAN chargé d'identifier la présence d'eau dans le proche sous-sol et la caméra de l'étage de descente MARDI qui réalise avant l'atterrissage des photos de la zone environnante.

MAHLI

MAHLI (*Mars Hand Lens Imager*) est une caméra microscope montée sur le porte-outils situé au bout du bras du rover. Elle doit permettre de caractériser la composition et la microstructure des roches, du sol, du givre et de la glace identifiables à une échelle comprise entre le micron et le centimètre. Elle fournit des images en couleurs en lumière visible. La tête de la caméra est équipée de 4 LED en lumière blanche pour éclairer la cible lorsque celle-ci est plongée dans l'ombre ou de nuit et 2 LED en ultraviolet pour produire de la fluorescence et détecter ainsi les minéraux carbonatés et les évaporites. La caméra peut faire une mise au point de 20,5 mm à l'infini, son champ optique étant compris entre 34 et 39,4°. Au plus près de l'objet photographié le champ couvert est de 18x24 mm et la résolution maximale de 15 micromètres par pixel

grâce à un capteur CCD de 1600x1200 pixels. Deux capteurs permettent au système d'éviter un contact direct de l'optique avec l'objet photographié. Mahli dispose d'un autofocus mais l'équipe au sol peut lui demander d'acquérir une séquence de 8 images du même objet avec des mises au point différentes pour obtenir une image tridimensionnelle car la profondeur de champ au plus près est de 1,6 mm (et pourra ainsi réaliser une image avec une grande profondeur de champ grâce à un logiciel de focus stacking embarqué). MAHLI peut être également utilisée pour inspecter le rover ou la configuration du terrain : sa position en bout de bras lui permet d'être placée dans une position plus haute que les caméras MASTCAM. Le spectre lumineux couvert va de 380 à 680 nm. La caméra a une capacité vidéo de 7 images par seconde au format 720p (1280x720 pixels).



Caméra microscope MAHLI, un couteau suisse de 88,9 mm donne l'échelle



Les caméras MASTCAM

MASTCAM

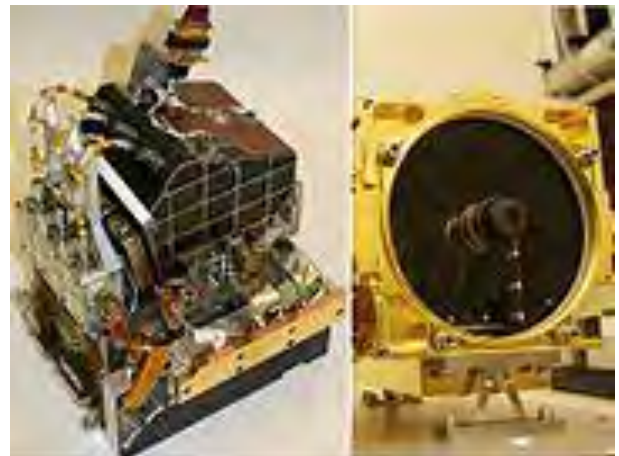
MASTCAM (*Mast Camera*) est un ensemble de deux caméras fixées au sommet du mât du rover MSL à une hauteur d'environ 1,97 mètre au-dessus du sol pouvant fournir des images en couleurs, en lumière visible et en proche infrarouge. Elles sont utilisées pour identifier les caractéristiques géologiques des terrains environnants et reconstituer la topographie du site. Elles doivent également enregistrer les phénomènes météorologiques (nuages, givre, poussières soulevées par le vent) et apporter leur contribution dans les tâches de navigation. Elles peuvent observer des détails d'une taille allant jusqu'à 0,15 mm. Selon les plans initiaux, les deux caméras devaient être identiques et munies d'un zoom avec une focale allant de 6,5 à 100 mm (rapport de 15). À la suite d'arbitrages budgétaires et après plusieurs rebondissements, deux caméras à focale fixes ont été finalement sélectionnées : à gauche, une caméra « grand angle » de focale de 34 mm (baptisée Mastcam 34) ouvrant à f/8 et couvrant un champ de 15°x15°, et à droite, une caméra dotée d'un téléobjectif de 100 mm (baptisée Mastcam 100) ouvrant à f/10 et couvrant un champ de 5,1°x5,1°. La caméra grand angle peut réaliser un panorama de 360° en 25 minutes par superposition de 150 photos. Huit filtres avec une bande passante s'étageant entre 440 nm et 1035 nm peuvent être placés devant l'objectif. Seuls trois de ces filtres sont communs aux deux caméras. Contrairement aux modèles embarqués jusque-là sur les atterrisseurs et les rovers, une image en couleur est obtenue sans avoir à superposer 3 photos prises avec des filtres bleu-vert-rouge. L'image est enregistrée par un capteur de 1 200×1 600 pixels au format compressé JPEG ou au format brut RAW. Les images prises sont stockées dans une mémoire flash de 8 gigaoctets qui peut conserver 5 500 photos. Cette capacité de stockage est toutefois juste suffisante pour enregistrer un panorama en utilisant l'ensemble des filtres disponibles. La mise au point se fait de 2,1 m à l'infini : celle-ci peut être fixée par l'équipe sur Terre ou être déterminée par un autofocus. La durée d'exposition peut être également calculée automatiquement ou imposée par les contrôleurs au sol. Les caméras peuvent enregistrer des vidéos au format 720p (1280x720 pixels) à la cadence de 10 images par seconde ou de 5 images par seconde en utilisant toute la surface du capteur.

MARDI

MARDI (*MARs Descent Imager*) est une caméra en couleur montée sous le châssis du rover et chargée de cartographier le site d'atterrissage durant la descente vers le sol martien. Elle couvre un champ de $70^\circ \times 55^\circ$. La caméra doit prendre environ 500 photos (5 photos par seconde) à partir d'une altitude de 3,7 km (zone photographiée de 3×4 km) jusqu'à l'atterrissage (zone photographiée de $1 \times 0,75$ mètre) avec une résolution croissante de 2,5 mètres par pixel à 1,5 mm par pixel, soit sur une période de 2 minutes. La caméra comporte une mémoire de 8 gigabits qui permet théoriquement de stocker 4 000 photos en mode RAW. Les photos doivent être enregistrées dans ce mode et compressées avant leur transmission à Terre bien que la caméra puisse réaliser cette compression en temps réel. Ces photos seront utilisées par l'équipe au sol pour situer le site d'atterrissage et identifier les sites intéressants sur le plan géologique se trouvant à proximité du lieu d'atterrissage. Il est prévu que les mouvements de giration à grande vitesse angulaire qui animeront la sonde durant la descente sous parachute et les vibrations générées par les moteurs-fusées de l'étage de descente rendent un grand nombre de photos floues malgré un temps d'exposition de 1,3 milliseconde. La caméra a une résolution utile de 1600×1200 pixels. MARDI avait été éliminée de la charge utile de MSL lors des premiers arbitrages financiers en 2007 avant d'être réintégrée par la suite.



Caméra MARDI



CHEMCAM

CHEMCAM

CHEMCAM (« *CHEMistry CAMera* ») est un instrument qui permet d'analyser à distance la nature, la composition et l'état d'altération des roches. Il utilise pour la première fois sur un engin spatial la technique d'analyse spectroscopique induite par ablation laser : un laser pulsé tire sur la roche à analyser provoquant la fusion de sa couche superficielle et générant un plasma. La lumière de désexcitation émise dans le visible et l'ultraviolet est collectée par un télescope et envoyée à des spectromètres qui établissent la composition chimique élémentaire de la roche. Avec une portée de 7 mètres, cet instrument permet d'analyser rapidement plusieurs échantillons de sol ou de roche et de déterminer s'il y a lieu de poursuivre l'analyse avec d'autres instruments. De plus son utilisation consomme relativement peu d'énergie. CHEMCAM est composé d'une partie optique montée au sommet du mât du rover et de trois spectromètres abrités dans le corps du rover avec la majorité de l'électronique. La partie optique comprend le laser qui envoie des impulsions venant frapper la cible sur un diamètre de 0,3 à 0,6 mm durant 55 nanosecondes pour effectuer des mesures par le procédé LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectrometer*). De 50 à 70 impulsions successives sont nécessaires pour obtenir une analyse spectrale correcte de la roche. L'optique de 110 mm utilisée pour viser la cible avec le laser permet de recueillir l'image renvoyée et de la transmettre par fibre optique aux spectromètres. Les spectromètres analysent la lumière sur une bande allant de 240 à 850 nm avec une résolution de 0,09 à 0,3 nm. La partie optique comprend également une caméra (*Remote Micro-Imager* ou RMI) fournissant une image du contexte de l'échantillon analysé. Commandé au CNES par la NASA, la réalisation de CHEMCAM a été confiée au CESR/Observatoire de Toulouse. Celui-ci a demandé au CEA (Plateforme Laser Nanoseconde pour applications Industrielles du Département de Physique et Chimie) de réaliser les études préliminaires et la mise au point. La partie optique de l'instrument a été développée par l'IRAP à Toulouse sur la base d'un laser développé par Thales, sous financement CNES, tandis que les spectromètres et l'intégration de l'instrument sont placés sous la responsabilité du Laboratoire national de Los Alamos.



APXS

Composants du spectromètre APXS

APXS (*Alpha-Particle-X-ray-Spectrometer*) est un spectromètre à rayons X qui doit mesurer l'abondance des éléments chimiques lourds dans les roches et le sol. Il combine les techniques de la spectrométrie de fluorescence X et de la sonde nucléaire PIXE. L'instrument utilise du curium 244 comme source de rayons X. Il peut déterminer l'abondance relative des éléments allant du sodium au brome. Le capteur est monté sur le porte-outils situé au bout du bras du rover tandis que l'électronique se trouve

dans le corps central du rover. La tête de l'instrument, dont la partie active a un diamètre de 1,7 cm, est placée à moins de 2 cm de l'échantillon à analyser durant une période allant de 15 minutes à 3 heures et restitue dans ce dernier cas jusqu'à 13 spectres électromagnétiques. Il s'agit d'une version améliorée d'un instrument qui a équipé les rovers Mars Pathfinder et MER. La demi-vie du curium 244 (18,1 ans) garantit qu'il sera opérationnel même si la mission est prolongée à plusieurs reprises. Contrairement à l'instrument de MER il peut être utilisé de jour grâce à un système de refroidissement électrique. Il est de 3 à 6 fois plus sensible que l'instrument équipant les rovers MER et le spectre analysé va jusqu'à 25 keV au lieu de 15 keV. Une analyse de trois heures permet de détecter une quantité de nickel de 100 parties par million et de 20 ppm de brome. La détection de certains éléments comme le sodium, le magnésium, l'aluminium, le silicium, le calcium, le fer et le soufre peut être obtenue au bout de 10 minutes si leur abondance est supérieure à 0,5 %. Un échantillon de roche basaltique monté sur le bras est utilisé pour calibrer périodiquement l'instrument. APXS est fourni par l'université de Guelph au Canada.

CheMin

CheMin (*Chemistry & Mineralogy*) est un instrument qui effectue l'analyse minéralogique d'échantillons de roches par diffraction X et par fluorescence des rayons X. La première technique permet d'identifier la structure cristalline des composants de l'échantillon tandis que la deuxième méthode fournit la composition en éléments et la concentration massique des différents éléments. Durant la phase de développement la capacité de l'instrument dans le domaine de la fluorescence des rayons X qui devait être fournie par une diode PIN a été réduite avec l'abandon de ce composant. L'objectif est de détecter la présence de minéraux formés en présence d'eau. CheMin est logé comme SAM dans la partie avant du corps du rover avec des ouvertures débouchant sur le pont supérieur permettant au bras d'introduire l'échantillon à analyser qui a été préparé auparavant. L'échantillon est introduit dans une capsule d'analyse situé sur une batterie (un carrousel) comprenant 26 autres capsules utilisables. Une analyse complète dure généralement 10 heures et est effectuée de nuit pour permettre le refroidissement du capteur CCD à -60 °C.

SAM (Sample Analysis at Mars)

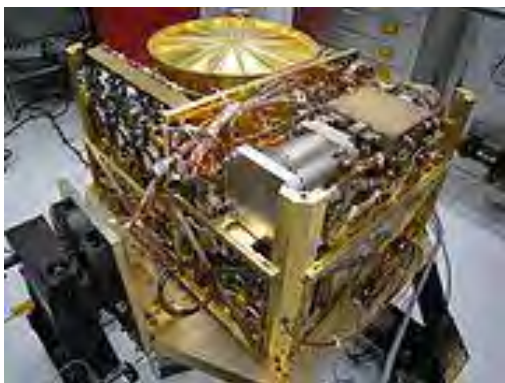
SAM (Sample Analysis at Mars) est un mini laboratoire qui doit contribuer à déterminer l'habitabilité présente et passée de la planète. SAM est composé de trois instruments qui sont destinés à fournir la composition chimique (moléculaire, élémentaire et isotopique) de l'atmosphère et de la surface de Mars. Cette suite d'instruments est essentiellement dédiée à la recherche d'indices possibles de vie passée sur Mars, ou d'une activité prébiotique, principalement par la recherche et la caractérisation des molécules organiques qui peuvent se trouver dans le sol martien. SAM comprend les éléments suivants⁴¹ :

- un chromatographe en phase gazeuse (**GC** Gas Chromatograph). Celui-ci sépare les composants organiques des échantillons martiens sous forme gazeuse. Les échantillons gazeux peuvent provenir de l'atmosphère de Mars, ou du traitement thermique et chimique des échantillons solides collectés par le rover Curiosity. Les composés ainsi séparés peuvent être identifiés et envoyés vers l'instrument scientifique QMS pour obtenir une information sur la structure des molécules. La séparation est effectuée à l'aide de 6 colonnes chromatographiques, chaque colonne étant dédiée à une famille de composés chimiques. Le GC de SAM a été développé conjointement par le Laboratoire atmosphères, milieux observations spatiales (LATMOS) et le Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA), deux laboratoires mixtes de recherche de l'université de Paris et du Centre national de recherche

scientifique (CNRS) faisant partie de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), sous l'égide de l'agence spatiale française (CNES);

- un spectromètre de masse à quadrupôle (**QMS** (Quadrupole Mass Spectrometer)) utilisé pour analyser les gaz de l'atmosphère ou les produits obtenus par échauffement d'un échantillon du sol martien. (développé par les centres de la NASA/GSFC);
- un spectromètre laser réglable (**TLS** Tunable Laser Spectrometer) qui permet d'obtenir des ratios précis des isotopes de carbone et d'oxygène dans le dioxyde de carbone et de mesurer les traces de méthane et ses isotopes du carbone. (développé par le centre de la NASA Jet Propulsion Laboratory);
- un système de préparation d'échantillons réalisant pyrolyse, derivatization, combustion et enrichissement (**CSPL**);
- un système de manipulation d'échantillons (**SMS**);
- un ensemble de pompes et un système de purge (**WRP**).

SAM est situé, comme CheMin, dans la partie avant du corps du rover, avec des ouvertures débouchant sur le pont supérieur pour introduire les échantillons solides, et d'autres sur l'avant du rover pour les échantillons gazeux.



Mini laboratoire SAM chargé d'analyser les échantillons recueillis par MSL



Détecteur de radiations RAD

RAD

RAD (*Radiation Assessment Detector*) caractérise l'ensemble des particules élémentaires chargées (protons, électrons, noyaux d'hélium...) ou non (neutrons) qui atteignent le sol martien : ces particules sont émises par le Soleil ou sont d'origine plus lointaine (rayon cosmique). L'instrument doit identifier la nature des particules ainsi que mesurer leur fréquence et leur énergie. Les données recueillies doivent permettre de :

- déterminer le niveau de protection nécessaire pour une éventuelle exploration humaine de Mars;
- déterminer l'impact passé et présent sur la chimie martienne;
- mesurer les effets isotopiques;
- évaluer les conditions permettant à d'éventuels organismes vivants de pouvoir survivre dans le sol martien (à quelle profondeur dans le sol). Les données collectées par l'instrument sur le rayonnement ultraviolet seront également utilisées dans cet objectif;
- contribuer à enrichir les modèles relatifs au transport de ces particules par l'atmosphère martienne.

Les particules étudiées par RAD sont les ions d'une masse atomique allant jusqu'à 26, les neutrons énergétiques et les rayons gamma ayant une énergie comprise entre 10 et 100 MeV par noyau. L'instrument comprend un télescope à particules chargées comportant trois détecteurs plans utilisant des diodes PIN sur support silicium, un calorimètre à base d'iodure de césium et un scintillateur plastique sensible aux neutrons. Un système anti-coïncidence fournit un blindage au calorimètre et au scintillateur.

DAN

DAN (*Dynamic of Albedo Neutrons*) est un détecteur actif et passif de neutrons qui doit mesurer l'hydrogène présent dans la couche superficielle du sol martien (moins de 1 mètre de profondeur) le long de la trajectoire suivie par le rover. Ces données doivent permettre de déduire l'abondance de l'eau sous forme libre ou dans des minéraux hydratés. Cet instrument est développé par l'Institut de recherche spatiale de l'Académie des sciences de Russie.

REMS

REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*) est une station météorologique qui mesure la pression atmosphérique, l'humidité, les radiations ultraviolettes, la vitesse du vent, la température du sol et de l'air. Les capteurs sont répartis sur plusieurs emplacements : deux grappes d'instruments sont attachés au mât de la caméra (Remote Sensing Mast RSM), à 1,5 mètre au-dessus du sol, et pointent dans deux directions écartées de 120° pour obtenir une bonne mesure de la direction et de la force des vents locaux; six photodiodes sont situées sur le pont supérieur du rover et mesurent le rayonnement ultraviolet dans différentes longueurs d'ondes. Enfin l'électronique de l'instrument située au sein du corps du rover est reliée à l'extérieur par un canal afin de mesurer la pression ambiante. L'instrument REMS est fourni par le Centro de Astrobiologia (CAB) espagnol.

MEDLI

Le véhicule de rentrée comprend un ensemble, baptisé MEDLI (*MSL EDL Instrument*) qui permet aux équipes au sol un suivi des paramètres atmosphériques et du comportement de la sonde MSL durant la rentrée atmosphérique. Les informations recueillies doivent permettre d'améliorer la conception des futurs sondes spatiales martiennes. MEDLI comprend :

- 7 sondes de type MISP (*MEDLI Integrated Sensor Plugs*) mesurent à des points stratégiques du bouclier thermique la température à différentes profondeurs du matériau ablatif.
- 7 sondes MEADS (*Mars Entry Atmospheric Data System*) mesurent la pression en 7 points du bouclier thermique grâce à des capteurs placés à l'extrémité de trous de faible diamètre forés dans celui-ci.

Le recueil des données démarre 10 minutes avant la rentrée atmosphérique avec une fréquence d'échantillonnage de 8 Hertz et s'achève après le déploiement du parachute soit 4 minutes après la rentrée atmosphérique. Pour des raisons de volumes seule une faible partie des données recueillies est transmise en temps réel, le reste étant envoyé au cours du premier mois de la mission au sol.

Le véhicule de rentrée

La traversée de l'atmosphère martienne à une vitesse initiale atteignant 6 km par seconde provoque un échauffement important des parties externes de la sonde qui atteignent une température de 2 100 °C. Pour protéger le rover durant cette phase, il est encapsulé dans un véhicule de rentrée. Celui-ci est composé d'un bouclier thermique avant, conçu pour résister à la forte chaleur que subit cette partie de la sonde, et d'un bouclier arrière, qui notamment contient le parachute. Le véhicule de rentrée a la forme d'une sphère-cône de demi-angle de 70° héritage du programme Viking repris sur tous les engins de la NASA envoyés à la surface de Mars par la suite. Par contre, la sonde innove avec des moteurs-fusées qui permettent de contrôler de manière active et non plus passive l'orientation du véhicule de rentrée jusqu'au déploiement du parachute afin de corriger les écarts par rapport à la trajectoire nominale et permettre un atterrissage de précision. Le bouclier encapsule l'étage de descente et le rover et est solidaire de l'étage de croisière durant le transit Terre-Mars.

L'étage de descente prend en charge la dernière phase de la descente et dépose en douceur le rover sur le sol martien. Il met en œuvre une architecture complètement différente de celle retenue pour les atterrisseurs martiens qui l'ont précédé⁵⁷ :

- Les rovers MER et Mars Pathfinder ont utilisé des coussins gonflables pour la phase finale de l'atterrissage. Dans un tel système les vitesses horizontale et verticale résiduelles au moment du contact avec le sol sont importantes (plus de 10 m/s) tandis qu'un système complexe, donc lourd, est mis en œuvre pour que le rover puisse se dégager de l'étage de descente après l'atterrissage.
- les sondes Viking et Phoenix se sont posées grâce à des moteurs-fusées. Pour ne pas creuser la zone d'atterrissage et asperger de poussière la sonde, les moteurs sont coupés avant le contact avec le sol et la vitesse résiduelle à l'atterrissage (verticale 2,5 m/s et horizontale 1,5 m/s) doit être annulée grâce à des pieds dotés d'amortisseurs de choc.

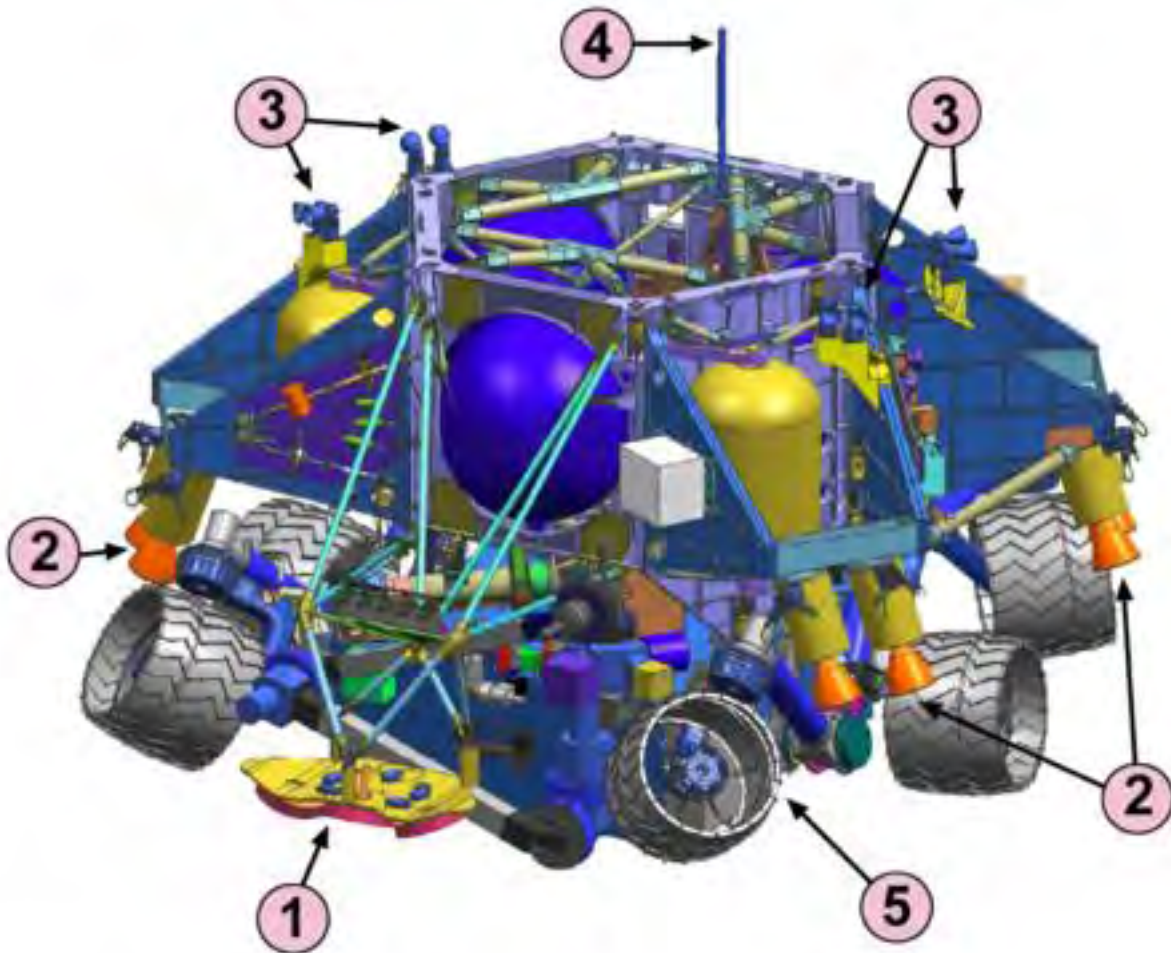


Schéma 3. *Étage de descente : 1 - Radar Doppler, 2 Moteurs principaux (x8), 3 - Moteurs de contrôle d'orientation (x8), 4 - Antenne UHF, 5 – Rover*

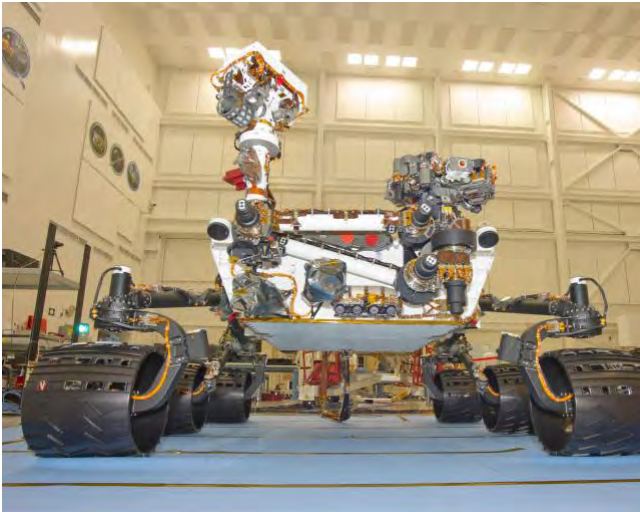
La masse de Curiosity exclut le recours aux coussins gonflables. Les concepteurs de MSL n'ont pas voulu reprendre le concept développé pour Viking et Phoenix car il comporte des risques importants de perte du rover si l'atterrissage s'effectue dans une zone parsemée de rochers, en pente ou en présence de vents forts. Le rover Curiosity est descendu au bout de 3 câbles longs de 7,5 mètres par l'étage de descente, qui reste en position fixe au-dessus du sol à la manière d'un hélicoptère-grue grâce à ses moteurs-fusées : le rover est ainsi posé à très faible vitesse (0,75 m/s) sur le sol martien. Cette technique permet tout à la fois de poser le rover sur un sol pentu ou comportant des rochers, d'éviter que le souffle des moteurs ne soulève la poussière du sol et supprime le recours à un système de débarquement depuis l'étage de descente. Il se traduit par contre par une grande complexité de la phase de développement en particulier du système de guidage, navigation et pilotage.

Pour réaliser sa mission, l'étage de descente comprend :

- Huit moteurs-fusées (MLE Mars Lander Engines) d'une poussée unitaire modulable entre 400 et 3 060 newtons (de 13 à 100 %) chargés d'annuler la vitesse résiduelle de descente à partir de l'altitude de 1 km. Ils disposent à cet effet de 400 kg de carburant. Ces moteurs dérivent de ceux utilisés par l'étage de descente des sondes Viking;
- Huit petits moteurs-fusées chargés du contrôle de l'orientation (attitude) de la sonde;
- Un radar doppler en bande Ka (TDS Terminal Descent Sensor) comportant 6 antennes émettant autant de faisceaux sous différents angles, développé par le JPL. Dès que le bouclier thermique est largué le radar est chargé de déterminer l'altitude de la sonde et sa vitesse par rapport au sol martien;
- Trois câbles reliés à un enrouleur (Bridle Umbilical Device BUD) et un cordon ombilical qui relie le rover et l'étage de descente lorsque celui-ci dépose le rover sur le sol martien.

Le rover Curiosity

Le rover Curiosity est un engin particulièrement imposant avec une masse de 899 kg à comparer aux 174 kg pour les rovers Spirit et Opportunity, et à peine 10,6 kg pour Sojourner. Sa taille lui permet d'embarquer 75 kg d'instruments contre 6,8 kg pour les rovers MER. Le rover est long de 2,7 m. La partie centrale du rover montée sur roues, la « boîte électronique chaude » (*warm electronics box* ou WEB) renferme l'électronique et les deux instruments scientifiques qui doivent analyser les échantillons de sol et de roche. Un mât, qui est implanté sur l'avant de ce boîtier et qui culmine à 2,13 mètres, porte plusieurs caméras, des sondes atmosphériques, ainsi que le spectromètre laser. Le bras télécommandé est articulé à l'avant du rover et supporte à son extrémité les équipements de prélèvement d'échantillon ainsi que deux instruments scientifiques. L'arrière du boîtier est occupé par le générateur thermoélectrique à radioisotope que surplombent les antennes de télécommunications.



Face avant du rover; le bras est en position repliée.



Curiosity utilise la suspension rocker bogie des rovers MER avec des roues d'un diamètre sensiblement accru

La suspension et les roues

Le rover doit parcourir des terrains présentant des irrégularités (rochers), des pentes fortes et un sol dont la consistance, parfois sableuse, peut conduire à l'enlèvement du véhicule et entraîner sa perte comme ce fut le cas pour Spirit. Toutefois plusieurs caractéristiques permettent au rover de mieux faire face à ces difficultés que ses prédécesseurs. Curiosity peut s'aventurer sur des pentes à 45° sans se retourner. Il peut escalader des rochers ou franchir des trous d'une hauteur supérieure au diamètre de ses roues (50 cm). Pour y parvenir il utilise une suspension, baptisée *rocker-bogie*, mise au point par la NASA pour les rovers MER : celle-ci limite l'inclinaison de la caisse du rover lorsque celui-ci franchit un obstacle qui ne soulève qu'un seul des deux côtés. Les 6 roues, qui comportent à leur surface des cannelures pour une meilleure prise dans un sol mou ou sur des rochers présentant une face abrupte, sont équipées chacune d'un moteur individuel. Chacune des 4 roues d'extrémité comporte un moteur agissant sur la direction ce qui permet au rover de pivoter sur place.

La production d'énergie

Le rover Curiosity dispose d'une source d'énergie indépendante de l'éclairage. L'électricité est générée par un générateur thermoélectrique à radio-isotope (GTR) de nouvelle génération, le MMRTG développé par le DOE et produit par Boeing, utilisant une charge de 4,8 kg de dioxyde de plutonium PuO_2 enrichi en plutonium 238 générant une puissance initiale d'environ 2 000 W thermiques convertis nominalement en 120 W électriques par des thermocouples à base de nouveaux matériaux thermoélectriques, à savoir PbTe/TAGS au lieu des anciens composants silicium-germanium. Le rover dispose de 2,7 kWh/j au lieu de 0,6 à 1 kWh/j sur *Opportunity*, dont la puissance résiduelle, le 12 mai 2009 (après 1884 sols) n'était plus que de 460 Wh/j. De surcroît, cette puissance sera indépendante de l'intensité du rayonnement reçu du Soleil et n'imposera donc pas d'arrêter la mission pendant l'hiver martien, contrairement au cas de Spirit et d'Opportunity. MSL dispose d'une autonomie nominale d'une année martienne, soit près de deux années terrestres, mais sa source d'énergie devrait encore fournir 100 W électriques après 14 années terrestres de

fonctionnement. L'électricité est stockée dans deux batteries rechargeables au lithium ion ayant chacune une capacité de 42 Ah. Un système de radiateurs comportant près de cinquante mètres de tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur permet de rejeter la chaleur excédentaire.

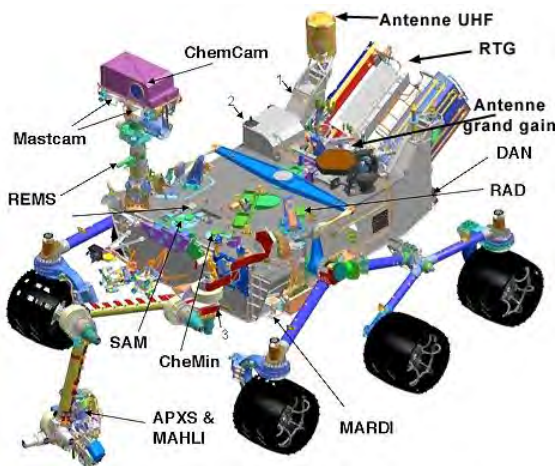


Schéma 4 : principaux équipements et instruments du rover

L'informatique embarquée

Le rover dispose de deux ordinateurs identiques « radiodurcis » pour résister aux rayons cosmiques. Ils utilisent tous deux un microprocesseur RAD750 fournissant une puissance de 400 MIPS à 200 MHz, successeur du RAD6000 utilisé par les Mars Exploration Rovers. Chaque ordinateur comporte 256 Ko d'EEPROM, 256 Mo de mémoire DRAM et 2 Go de mémoire flash. L'ordinateur de bord de Curiosity a une capacité dix fois supérieure à celle des rovers MER. Il pilote les activités du rover à la surface de Mars mais il joue également le rôle d'ordinateur de bord pour l'ensemble de la sonde durant toutes les phases allant du lancement jusqu'à l'arrivée sur le sol martien.

Le bras porte-outils

Comme les rovers MER, le rover MSL dispose d'un bras (*Robot Arm RA*) portant à son extrémité un ensemble d'outils utilisés pour analyser *in situ* des échantillons de sol et de roche; le bras permet également de recueillir des échantillons qui sont analysés par les mini laboratoires SAM et CHEMIN. Le bras est fixé sur la face avant du rover et, lorsqu'il est à son extension maximale, permet de positionner le porte-outils à 1,9 mètre de celle-ci. Les outils situés au bout du bras peuvent être positionnés face à la zone à analyser, sans que le rover se déplace, grâce à plusieurs articulations motorisées qui fournissent 5 degrés de liberté. Le volume d'espace accessible forme un cylindre vertical de 80 cm de diamètre, 100 cm de haut positionné à 1,05 mètre de la face avant du rover et dont la base peut se situer, sur un terrain plat, à 20 cm au-dessous du niveau du sol.

Le porte-outils, dont le diamètre extérieur est de 60 cm, comprend cinq outils :

- Deux instruments scientifiques
 - Le spectromètre à rayons X APXS,
 - La caméra microscope MAHLI,
- Trois instruments qui permettent de prélever et de conditionner des échantillons du sol et des roches martiennes pour analyse par l'équipement scientifique :
 - La foreuse PADS (*Powder Acquisition Drill System*) permet de forer un trou de 5 cm de profondeur et d'un diamètre de 1,6 cm. Le matériau broyé est recueilli à partir d'une profondeur de 2 cm et transféré au système de préparation des échantillons CHIMRA. Une force de 240 à 300 newtons peut être exercée par le foret qui peut tourner à une vitesse comprise entre 0 et 150 tours par minute ou fonctionner en percussion à raison de 1 800 coups par minute avec une énergie de 0,4 à 0,8 joule. Au cas où le foret reste coincé dans la roche, la foreuse dispose de deux forets de rechange stockés sur la face avant du rover.
 - La brosse DRT (*Dust Removal Tool*) d'un diamètre efficace de 4,5 cm permet d'enlever la couche superficielle de poussière qui recouvre la zone à examiner.
 - Le système de préparation des échantillons CHIMRA (*Collection and Handling for Interior Martian Rock Analysis*) comprend une mini pelleuse et un système de préparation des

échantillons. La mini pelleuse permet de recueillir des échantillons du sol jusqu'à une profondeur de 3,5 cm et peut être abaissée dans une tranchée jusqu'à 20 cm au-dessous du niveau du sol.



Le fonctionnement du bras porte-outils est testé en salle d'assemblage

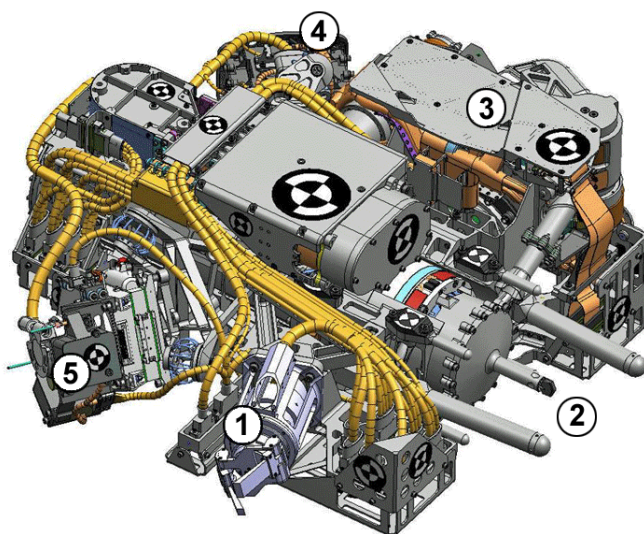
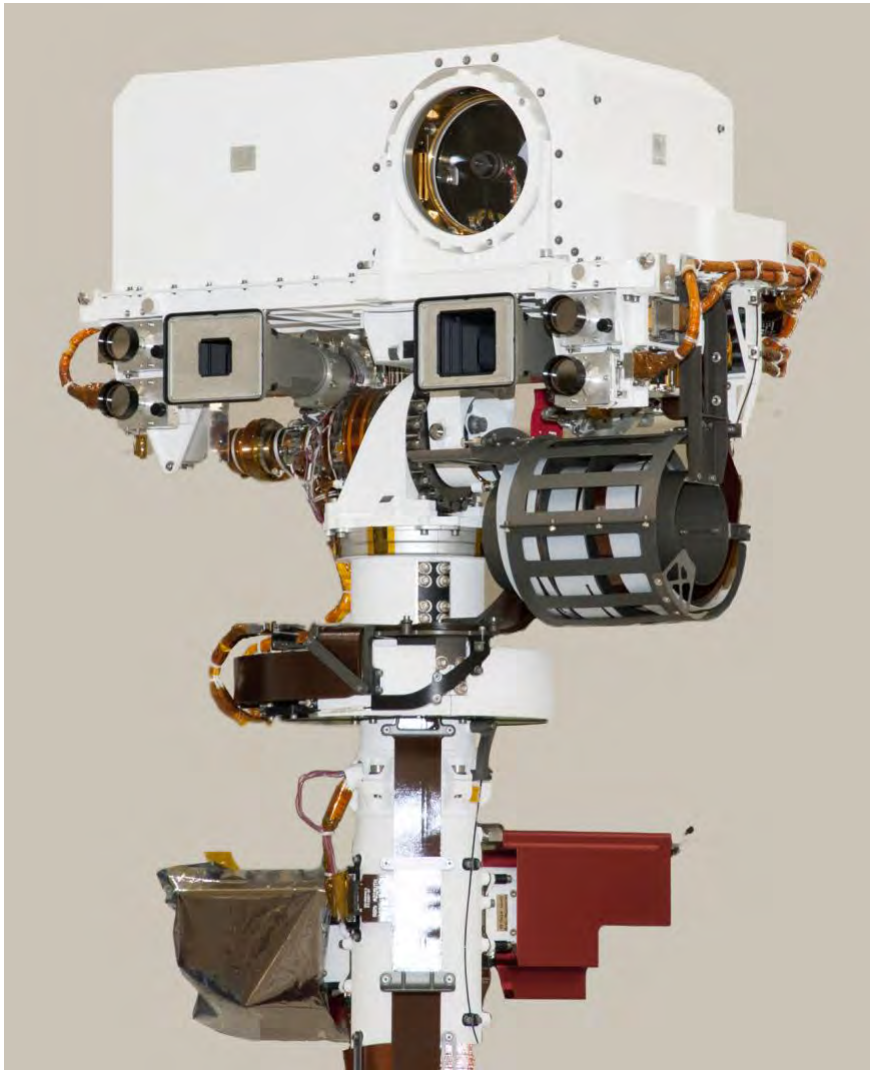


Schéma 5. Le porte outils : 1 - Brosse DRT 2 - Foreuse PADS 3 - Système de préparation des échantillons CHIMRA 4 - Spectromètre à rayons X APXS 5 - Caméra microscope MAHLI

La manipulation des échantillons du sol martien

Les échantillons du sol martien peuvent être recueillis à l'aide de la foreuse qui comporte un système de collecte de la roche broyée; celui-ci est relié par une canalisation au système de préparation d'échantillons CHIMRA. L'échantillon peut être également recueilli par la pelleuse incluse dans ce dernier équipement. En utilisant des mouvements de vibration imprimés à CHIMRA, en faisant marcher le système de percussion de la foreuse et à l'aide de mouvements de rotation du porte-outils exploitant la gravité martienne, l'échantillon est transféré au sein de CHIMRA dans des chambres de stockage puis, en passant par des tamis aux mailles plus ou moins fines, dirigé vers l'un des deux compartiments dont le contenu sera analysé : l'un d'une capacité de 45 à 65 mm³ ne peut accueillir que des composants solides d'un diamètre inférieur à 150 microns à destination de CHEMIN, l'autre, d'une capacité de 45 à 130 mm³, peut recevoir des composants solides d'un diamètre allant jusqu'à 1 mm. Le bras de MSL positionne alors l'ouverture du compartiment choisi au-dessus de l'ouverture d'un des deux instruments scientifiques (CHEMIN ou SAM) située sur le pont supérieur du rover : le contenu du compartiment à échantillon est alors déversé dans l'instrument scientifique après ouverture de portes en imprimant des vibrations à CHIMRA. L'échantillon peut être également déversé sur un petit plateau d'observation situé à l'avant du rover et étudié à l'aide de la caméra microscope et du APXS situés à l'extrémité du bras. Pour nettoyer le contenu de CHIMRA entre deux prélèvements d'échantillon, les différentes chambres de cet équipement sont ouvertes, mises en vibration pour évacuer complètement leur contenu et peuvent être examinées à l'aide des caméras du rover. Pour s'assurer que les échantillons de sol martien analysés par SAM ou CHEMIN ne sont pas contaminés par des composants venus de la Terre qui auraient résisté aux procédures de stérilisation effectuées avant le départ, des vérifications peuvent être effectuées à cinq reprises au cours du séjour sur Mars : à cet effet cinq échantillons de référence dits *Organic Check Material* (OCM) ont été fixés sur le devant du rover dans des boîtiers scellés. Ces OCM contiennent du dioxysilicium amorphe dopés avec de petites quantités de produits organiques qui n'existent ni sur Terre ni *a priori* sur Mars. La foreuse est utilisée pour prélever un échantillon qui est ensuite analysé par SAM pour s'assurer qu'il ne détecte pas d'autres composants d'origine terrestre.



Les caméras de navigation sont installées en tête de mât de part et d'autre des caméras MASTCAM

Télécommunications

Pour transmettre les données scientifiques recueillies, les données de navigation et les données télémétriques sur son fonctionnement ainsi que pour recevoir les instructions mises au point par l'équipe à Terre, le rover dispose de plusieurs antennes. Une antenne hélice quadrifilaire fonctionnant en bande UHF est utilisée pour les communications à courte portée avec les sondes en orbite autour de Mars. Le débit maximum est de 1,35 mégabit par seconde dans le sens rover-satellite et 256 kilobits dans le sens inverse. C'est ce mode de communication qui est privilégié car les satellites sont fréquemment à portée d'antenne du rover : Odyssey et MRO stockent les données et les transmettent vers la Terre lorsque les stations terrestres sont en vue. Les deux antennes en bande X sont utilisées pour les communications à longue distance directement avec la Terre. L'antenne à faible gain omnidirectionnelle n'a pas besoin d'être orientée mais son débit est limité. L'antenne à grand gain en forme d'hexagone plat permet des débits importants mais doit être orientée avec précision vers la Terre. Elle a été développée par l'Espagne (EADS CASA ESPACIO) et dispose de deux degrés de liberté ce qui permet de la tourner vers sa cible sans déplacer le rover. Ces antennes sont fixées sur l'arrière du pont supérieur du rover. La NASA a estimé le volume moyen de données scientifiques qui doit être transféré vers la Terre chaque jour à 250 mégabits tandis que les données utilisées pour établir le plan de travail représentent 100 mégabits par jour. L'essentiel de ce transfert devrait être assuré par MRO qui collectera les données en UHF durant son survol quotidien du site d'atterrissage de MSL aux alentours de 3 heures du matin. En moyenne MRO peut collecter chaque jour 687 mégabits de données avec un plus bas de 125 mégabits. La réception par le rover des instructions de la Terre se fera au début de la journée de travail en bande X à l'aide de l'antenne grand gain tandis que le compte rendu de la journée envoyé par le rover passera par la bande UHF.

La navigation sur le sol martien

Pour que le rover puisse se déplacer, il est nécessaire d'étudier au préalable le terrain sur lequel il doit avancer. Curiosity dispose de plusieurs caméras dédiées au repérage de son environnement. Quatre paires redondantes, dites Hazcam (Hazard Avoidance Cameras), sont montées deux par deux à l'avant et à l'arrière du corps du rover et sont utilisées pour détecter les obstacles qui se présentent sur la trajectoire du rover. Ces appareils dotés d'un objectif fisheye avec un champ optique de 124° fournissent des images en noir et blanc permettant de reconstituer une image tridimensionnelle de ce qui se situe devant et derrière le rover jusqu'à 3 mètres de distance et sur une largeur de 4 mètres. Pour protéger les objectifs de la poussière soulevée par l'atterrissage, ceux-ci sont couverts par un cache qui est largué par un dispositif pyrotechnique une fois le rover sur le sol martien. Deux autres paires de caméras (Navigation Cameras ou Navcams) montées au sommet du mât du rover de part et d'autre des caméras à usage scientifique MASTCAM, permettent d'obtenir des panoramiques en relief sur un champ de 45°. Elles sont utilisées avec les caméras Hazcam pour déterminer la configuration du terrain et planifier les déplacements du rover^{70,71}. Une centrale à inertie à trois axes doit faciliter la navigation sur le terrain. Le rover peut se déplacer à une vitesse de 4 cm par seconde en navigation automatique sans détection d'obstacles soit 150 m/h, mais si la détection d'obstacle est activée sa vitesse chute à 2 cm par seconde soit 75 m/h en moyenne compte tenu des irrégularités du terrain ou des problèmes de visibilité. Le rover Curiosity est conçu pour parcourir au moins une vingtaine de kilomètres au cours des 22 mois terrestres que doit durer au minimum sa mission primaire.

Le scénario de la mission

Le lancement



Le lanceur Atlas V 541 de MSL à Cap Canaveral peu avant son lancement

Le lanceur Delta II utilisé habituellement par la NASA pour le lancement de ses sondes interplanétaires n'a pu être retenu pour MSL compte tenu de sa masse et de son diamètre. La sonde doit être lancée par une fusée Atlas V 541; cette version du lanceur, de la classe de puissance de la fusée Ariane V, dispose d'une coiffe d'un diamètre de 5 mètres et peut placer une sonde de 4 tonnes sur une trajectoire interplanétaire. La distance entre la Terre et Mars évolue constamment et cette dernière ne devient accessible que durant une période de quelques mois tous les deux ans. Par ailleurs, le lancement doit permettre à la sonde spatiale d'arriver à proximité de Mars dans des conditions très précises :

- le Soleil doit être levé sur le site d'atterrissage,
- les sondes Odyssey et MRO, en orbite autour de Mars, doivent pouvoir relayer les liaisons radio durant l'ensemble de la descente vers le sol martien,

- la zone de l'atterrissage doit être si possible couverte par les antennes de réception sur Terre sous un angle pas trop défavorable,
- la vitesse d'arrivée dans l'atmosphère martienne doit être inférieure ou égale à 5,9 km/s.

Toutes ces conditions ainsi que les capacités du lanceur retenu ont abouti à la sélection de deux fenêtres de lancement de 24 jours. La première située entre le 22 octobre et le 14 novembre est plus favorable, car elle permet une entrée à une vitesse inférieure à 5,6 km/s mais est toutefois conditionnée par le respect du planning de lancement de la sonde jovienne Juno planifié en août 2011 et qui utilise les mêmes installations de lancement de la base de Cap Canaveral en Floride; la seconde fenêtre de lancement, finalement retenue, se situe entre le 25 novembre et le 18 décembre 2011. En fonction du jour de lancement, le lanceur doit imprimer une vitesse de libération C_3 comprise entre 11,2 km/s et 19,9 km/s. Pour répondre à la réglementation imposée pour les lancements emportant du matériel radioactif, le lancement doit avoir lieu de jour. La fenêtre de lancement résultante est d'environ 2 heures par jour. Le lancement se déroule en deux phases. Le deuxième étage Centaur du lanceur place la sonde MSL sur une orbite basse terrestre de 165 km $\times$ 271 km avec une inclinaison de 29°. Puis, après avoir accompli un nombre variable d'orbites autour de la Terre, lorsque la position de l'ensemble permet d'obtenir des conditions optimales d'arrivée sur Mars le deuxième étage Centaur est remis à feu et celui-ci injecte MSL sur une trajectoire interplanétaire vers Mars qui doit lui permettre d'atteindre Mars sur son inertie en décrivant une orbite de Hohmann. Après l'extinction de l'étage Centaur, celui-ci met en rotation lente (2 tours par minute) la sonde pour stabiliser sa trajectoire puis la séparation de la sonde et du lanceur est déclenchée.

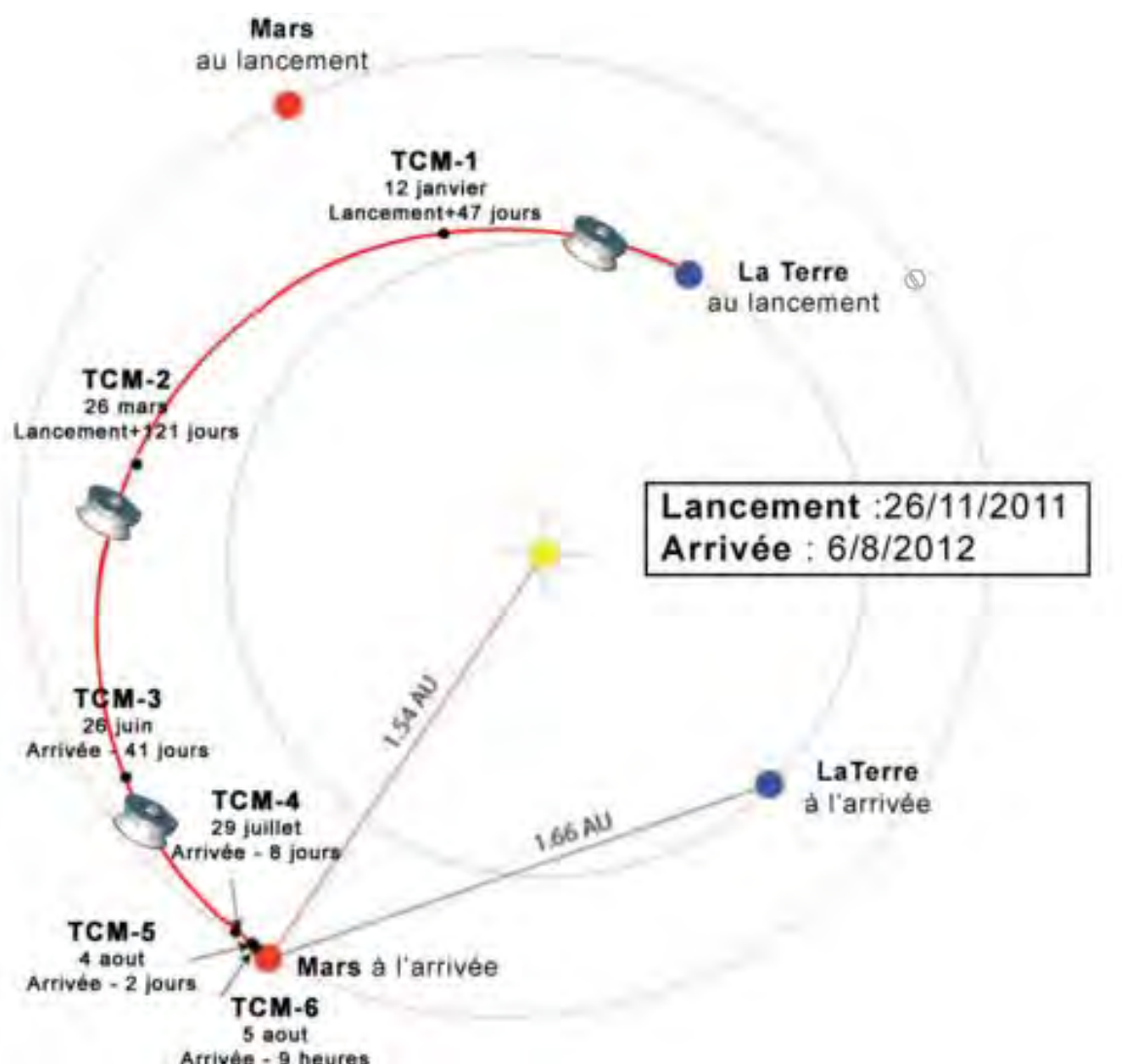


Schéma 6 : déroulement du transit entre la Terre et Mars avec les corrections de trajectoire intermédiaires (TCM)

Le transit entre la Terre et Mars

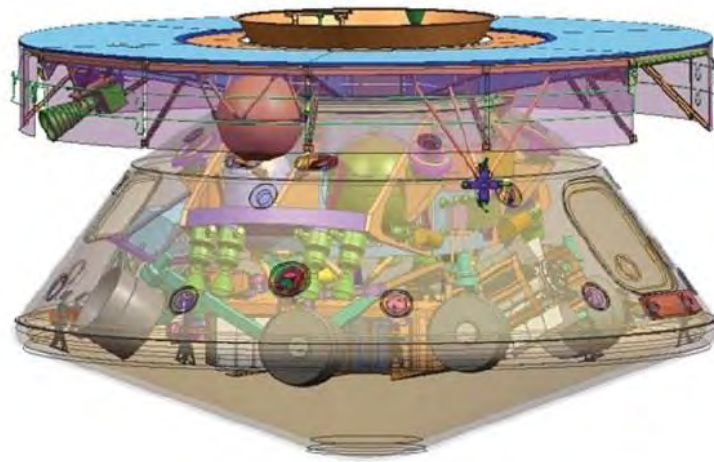


Schéma 7 : la sonde dans sa configuration lors du transit vers Mars

Après sa séparation avec son lanceur, la sonde spatiale entame la phase de croisière, d'une durée d'environ sept mois, durant laquelle elle se rapproche de Mars uniquement grâce à sa vitesse acquise. Durant cette phase le rôle actif est joué par l'étage de croisière :

- La sonde durant ce transit est stabilisée par mise en rotation autour de son axe à la vitesse de 2 tours par minute.
- L'étage de croisière maintient l'orientation de la sonde pour que ses panneaux solaires et son antenne de télécommunications soient pointés respectivement vers le Soleil et la Terre.
- L'étage de croisière effectue si nécessaire des petites corrections d'attitude en utilisant son viseur d'étoiles pour détecter les écarts. Sept corrections de trajectoire (*Trajectory correction manoeuvre* TCM) sont programmées durant le transit Terre-Mars dont deux facultatives. Les deux premières, 15 jours et 120 jours après la date de lancement, permettent de corriger les erreurs d'injection sur la trajectoire interplanétaire et de supprimer le biais introduit volontairement pour éviter une retombée de l'étage Centaur sur Mars qui pourrait contaminer la planète. La troisième correction TCM-3 doit permettre à la sonde de se présenter exactement au point voulu pour entamer une descente optimale sur le sol martien. Enfin 4 manœuvres de correction sont prévues dans les 8 jours qui précèdent l'arrivée à j-8, J-2, J-1 et J-9 heures. Toutes ces corrections sont effectuées soit en alignant l'orientation de manière à optimiser la consommation de carburant soit en maintenant l'orientation.
- L'étage de croisière contrôle les paramètres de la sonde et les transmet aux équipes sur Terre.

La date d'arrivée sur le sol martien, qui dépend de la date de lancement, doit avoir lieu entre le 6 et le 20 août 2012. La sonde entame les préparatifs pour l'atterrissage, qui est la partie la plus délicate de la mission, 45 jours avant celui-ci. D'ultimes corrections de trajectoire sont effectuées après des mesures très précises depuis la Terre de la position et du déplacement de MSL. Les dernières instructions pour la phase de rentrée et la séquence des opérations au sol pour les premiers jours sont actualisées.

La descente vers le sol martien et l'atterrissage

Nouvelles techniques de descente

Pour pouvoir poser la masse du rover cinq fois supérieure à celle de ses prédécesseurs et effectuer un atterrissage de précision qui permette au rover Curiosity d'atteindre la zone d'étude choisie par les scientifiques sans avoir à faire un nombre de kilomètres supérieur à ce que lui permet son autonomie, MSL inaugure de nouvelles techniques de descente vers le sol martien : La première partie de la descente se déroule à une vitesse hypersonique. Alors que ses prédécesseurs ont durant cette phase un comportement passif, MSL adapte en permanence à l'aide de petits moteurs-fusées son angle d'attaque. Cela lui permet d'une part de prolonger la phase de descente : la trajectoire de la sonde décrit des S en jouant sur l'inclinaison latérale. Le gain de temps obtenu permet à MSL de diminuer plus tôt sa vitesse et donc se poser à une altitude supérieure. D'autre part les moteurs-fusées permettent de corriger les écarts par rapport à la

trajectoire conduisant au site visé en jouant également sur l'angle d'attaque. Cette technique permet de restreindre la zone d'atterrissage probable à une ellipse de 10 km sur 5 km de large contre 80 km sur 12 km pour les rovers MER. Le site sélectionné peut comporter une zone d'atterrissage dégagée de taille beaucoup plus réduite et met à portée du rover des sites d'un grand intérêt géologique qui seraient inaccessibles avec une précision plus faible.

Le rover inaugure une nouvelle technique d'atterrissage final :

- Pour se poser sur le sol de Mars, le recours au système des coussins gonflables mis en œuvre par les rovers MER (Spirit et Opportunity) n'est pas adapté à la masse de MSL 5 fois plus lourd : en effet cette technique impose une enveloppe protectrice qui représentait pratiquement 2 fois la masse du rover MER (348 kg pour un rover de 185 kg). Transposé à MSL on aboutit à une masse d'environ 1,7 tonne alors que la solution retenue permet d'avoir un étage de descente de 1,2 tonne.
- La solution alternative mise en œuvre par les atterrisseurs Viking, qui ont eu recours à des moteurs-fusées pour se poser, n'est pas non plus transposable. En effet le rover Curiosity, contrairement aux atterrisseurs Viking fixes, doit pouvoir se dégager de son étage porteur.

La solution retenue est un atterrissage ayant recours à des fusées fixées sur un étage de descente qui se désolidarise du rover dans les derniers mètres pour déposer celui-ci au-dessus du sol avant de s'élever à nouveau pour s'écraser à distance de sécurité.

Comparaison des performances des différents atterrisseurs martiens américains				
Caractéristiques	Viking (1975)	Mars Pathfinder (1996)	MER (2003)	MSL (2011)
Masse au début de la rentrée atmosphérique	992 kg	584 kg	827 kg	3 299 kg
Masse à l'atterrissage	590 kg	360 kg	539 kg	1 541 kg
Masse du rover	-	10,5 kg	185 kg	899 kg
Contrôle durant la rentrée atmosphérique	Orientation uniquement	Non	Non	Angle d'attaque
Ratio portance/trainée	0,18	0	0	0,22
Diamètre du parachute	16 m	12,5 m	14 m	21,5 m
Vitesse à l'ouverture du parachute	Mach 1,1	Mach 1,57	Mach 1,77	Mach 2
Vitesse verticale et horizontale à l'atterrissage	V _v < 2,4 m/s V _h < 1 m/s	V _v < 12,5 m/s V _h < 20 m/s	V _v < 8 m/s V _h < 11,5 m/s	V _v < 0,75 m/s V _h < 0,5 m/s
Méthode d'atterrissage	Rétrofusées	Coussins gonflables	Coussins gonflables	Grutage
Précision de l'atterrissage	280×180 km	200×100 km	80×12 km	7×20 km

L'atterrissage sur Mars se décompose en cinq phases :

- La phase d'approche,
- La rentrée atmosphérique pilotée qui fait tomber la vitesse à Mach 2 tout en corrigeant de manière active les écarts par rapport à la trajectoire idéale,
- La descente sous parachute lorsque la vitesse a chuté sous Mach 2,
- La descente propulsée à partir de 1 500 mètres d'altitude grâce à des moteurs chargés d'annuler la vitesse résiduelle,
- La dépose par l'étage de descente fonctionnant à la manière d'un hélicoptère grue du rover sur le sol martien.

La phase d'approche

L'objectif principal de la phase d'approche est que la sonde spatiale arrive au point d'entrée dans l'atmosphère martienne et à l'heure planifiée. À cet effet une dernière correction de trajectoire (TSCM-6) est effectuée, si nécessaire, 9 heures avant la rentrée atmosphérique après analyse de la position et du vecteur vitesse de la sonde. L'équipe du JPL estime que l'erreur de positionnement à l'entrée dans l'atmosphère devrait être au plus de 2 km et l'écart de la vitesse réelle par rapport à celle prévue de 1,5 m/s. Plusieurs manœuvres sont alors effectuées :

- Les moteurs de contrôle d'orientation du véhicule de rentrée sont préchauffés et le circuit de régulation thermique est purgé tandis que la sonde recalcule son orientation en utilisant son viseur d'étoiles.
- Le véhicule de rentrée qui encapsule le reste de la sonde largue l'étage de croisière 10 minutes avant le début de la rentrée atmosphérique.
- La vitesse de rotation de la sonde sur son axe est annulée : désormais la sonde est stabilisée 3 axes.
- Puis la sonde modifie son orientation qui privilégiait les télécommunications avec la Terre et l'éclairage des panneaux solaires pour adopter la position qu'elle maintiendra durant la rentrée atmosphérique avec son bouclier thermique tourné vers l'avant.
- Cinq minutes avant la rentrée atmosphérique deux lests de 75 kg sont éjectés pour déplacer le barycentre jusque-là situé dans l'axe de la sonde : le déséquilibre généré permet par la suite de maintenir un angle d'attaque non nul générant une portance qui prolonge la descente et donne le temps à la sonde de réduire suffisamment sa vitesse avant d'atteindre le sol.

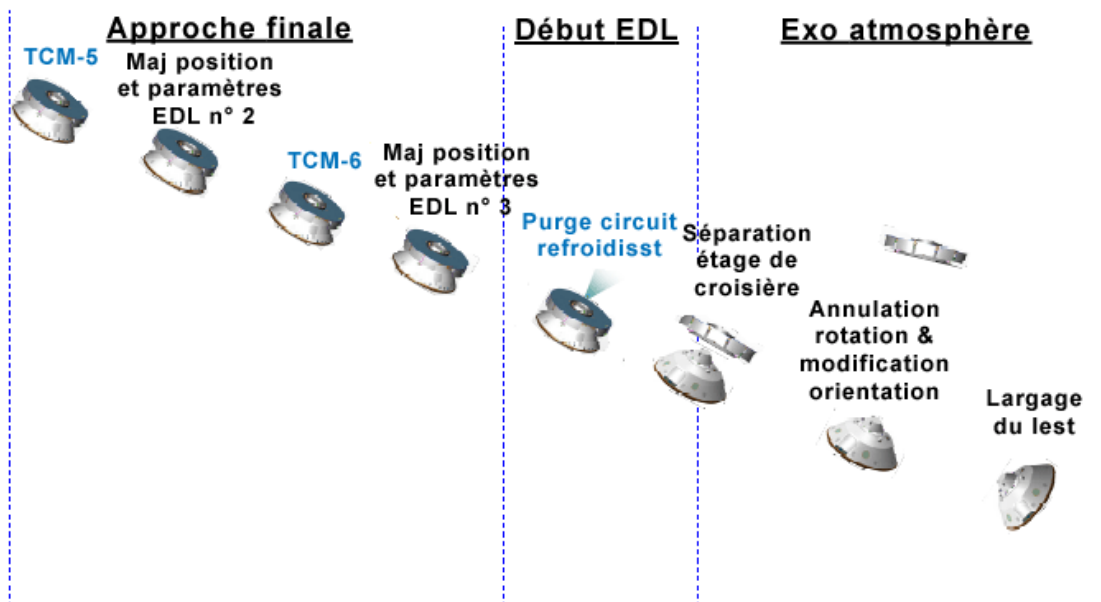
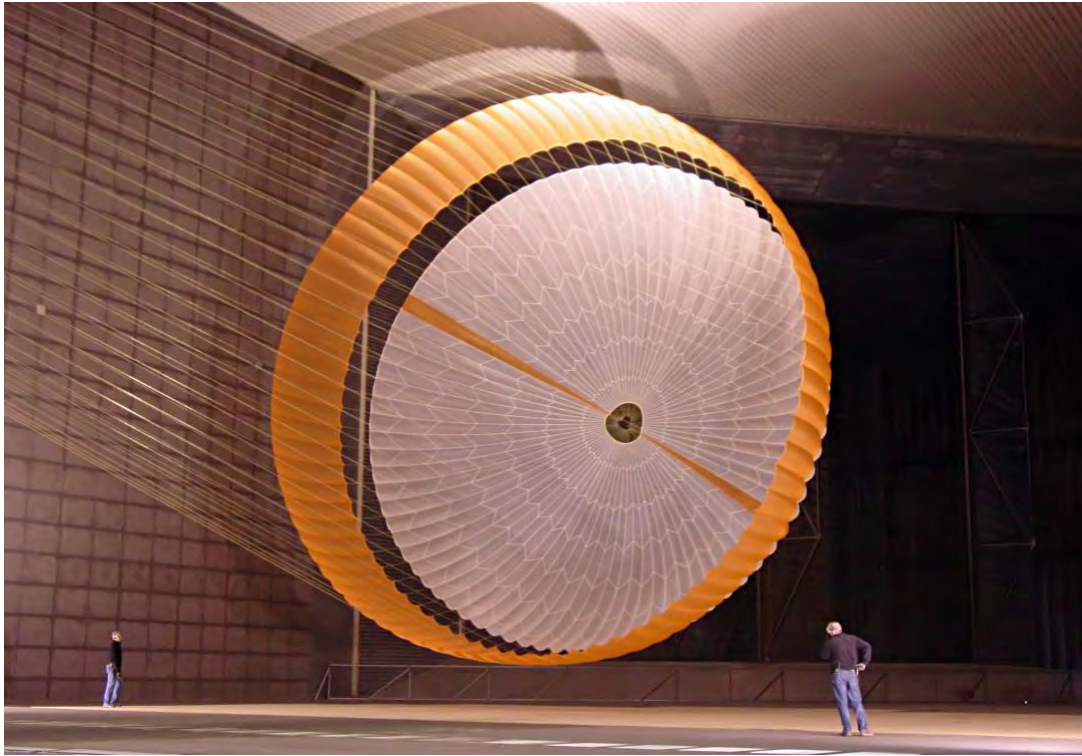


Schéma 10 : phase initiale de la descente de MSL vers le sol martien

Une rentrée atmosphérique pilotée

La descente vers Mars débute lorsque la sonde spatiale aborde les couches supérieures de l'atmosphère martienne dont l'altitude est fixée arbitrairement à 226 km au-dessus du sol. MSL entame alors une descente qui va durer environ 7 minutes. Lorsqu'elle débute sa rentrée atmosphérique la vitesse de MSL est alors comprise entre 5,5 et 6 km/s (Mach 24). Le véhicule de rentrée constitué de deux boucliers jointifs joue deux rôles : alors que le freinage atmosphérique porte la température du bouclier avant à une température atteignant en pic 1 450 °C, il maintient une température normale dans le corps de la sonde. Par ailleurs, le bouclier arrière dispose de 4 petits moteurs-fusées émettant des jets de gaz, qui permettent à la sonde d'ajuster de manière continue son angle d'attaque; celui-ci, maintenu normalement à 18°, est ajusté pour compenser les écarts par rapport à la trajectoire cible engendrés par les perturbations atmosphériques et le comportement aérodynamique du véhicule de rentrée. Lorsque la vitesse de l'engin est tombée en dessous de 900 mètres par seconde, l'angle d'attaque est réduit à 0 par éjection de 6 lests de 25 kg qui replace le barycentre dans l'axe de la sonde. Il s'agit de limiter les oscillations créées par le déploiement du parachute. La sortie de celui-ci est déclenchée lorsque la vitesse est tombée en dessous de 450 mètres par seconde (presque Mach 2).

La descente sous parachute



Le parachute du MSL - Curiosity

Le parachute d'un diamètre de 21,5 mètres est, à un facteur d'échelle près, un héritage du parachute développé pour le programme Viking. Durant sa descente sous parachute qui dure entre 50 et 90 secondes, la vitesse de MSL est ramenée à 100 m/s (360 km/h) et environ 95 % de l'énergie cinétique qui subsistait avant son ouverture est dissipée. Le bouclier thermique est éjecté dès que la vitesse tombe en dessous de Mach 0,8 ce qui dégage l'antenne du radar Doppler de l'étage de descente qui peut fournir une première estimation de l'altitude et de la vitesse en utilisant les réflexions de ses émissions sur le sol martien. Durant cette phase, la sonde doit limiter la rotation de la capsule sous le parachute, un phénomène difficile à modéliser et dangereux qui découle des oscillations à vitesse supersonique; les moteurs de contrôle d'orientation du bouclier arrière sont utilisés pour contrecarrer ces mouvements. La caméra MARDI commence à prendre des photos du sol martien sous le rover au rythme de 5 images par seconde dès que le bouclier thermique avant n'obstrue plus le champ de son optique jusqu'à l'atterrissage environ 2 minutes plus tard : les images seront exploitées par les scientifiques pour situer la future zone d'atterrissage et identifier les formations géologiques intéressantes à explorer situées à moins de 2 km de celui-ci; elles permettent également de vérifier les performances de la centrale à inertie du rover. À une altitude comprise entre 1 500 et 2 000 mètres le bouclier arrière et le parachute sont largués afin d'entamer la descente propulsée. Juste avant ce largage, les 8 moteurs de l'étage de descente sont mis en marche à 1 % de leur poussée nominale.

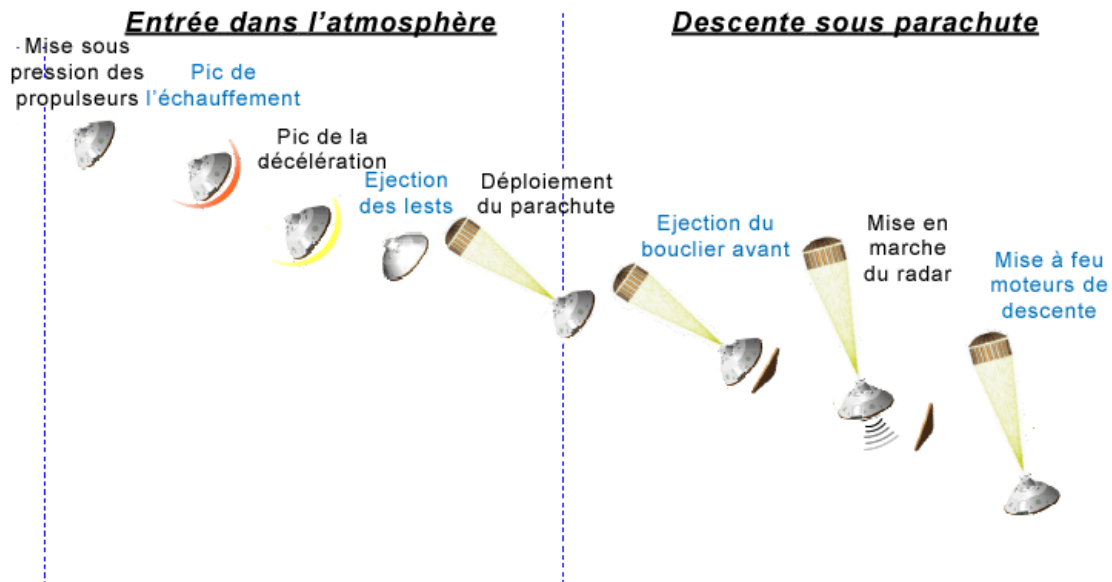
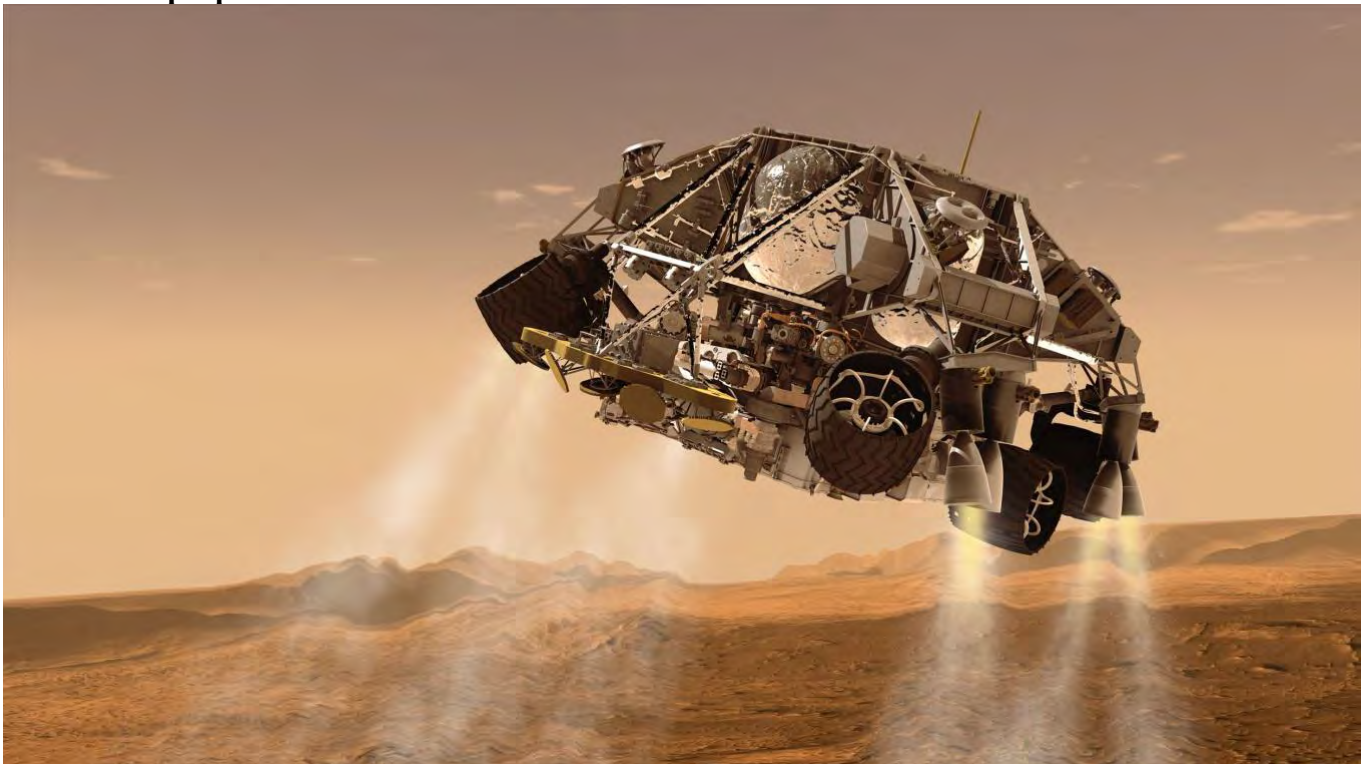


Schéma 11 : La descente sous parachute

La descente propulsée



La descente propulsée

La descente propulsée a deux objectifs : amener la sonde jusqu'à l'altitude de 18,6 m avec une vitesse verticale résiduelle de 0,75 m/s et une vitesse horizontale nulle, tout en modifiant la trajectoire de la sonde, de manière à ce que le rover n'atterrisse pas au même endroit que le bouclier arrière ou le parachute. Au début de cette phase le bouclier arrière et le parachute qui lui est attaché sont largués par déclenchement de charges pyrotechniques. L'étage de descente tombe durant une seconde en chute libre pour s'éloigner suffisamment, puis les 8 moteurs augmentent leur poussée pour parvenir, à une altitude de 100 mètres, à réduire la vitesse verticale à 20 m/s et à annuler la vitesse horizontale. Parallèlement, la sonde est écartée de 300 mètres de la trajectoire suivie par le bouclier et le parachute. La descente se poursuit à la verticale pour disposer d'une mesure de l'altitude précise et corriger une estimation antérieure qui peut être erronée de 50 mètres du fait du relief et du déplacement en partie horizontal de la sonde. À partir de 50 mètres d'altitude, la vitesse verticale est ramenée à 0,75 m/s lorsque l'altitude de 21 mètres est atteinte. La sonde fait alors quasiment du surplace.

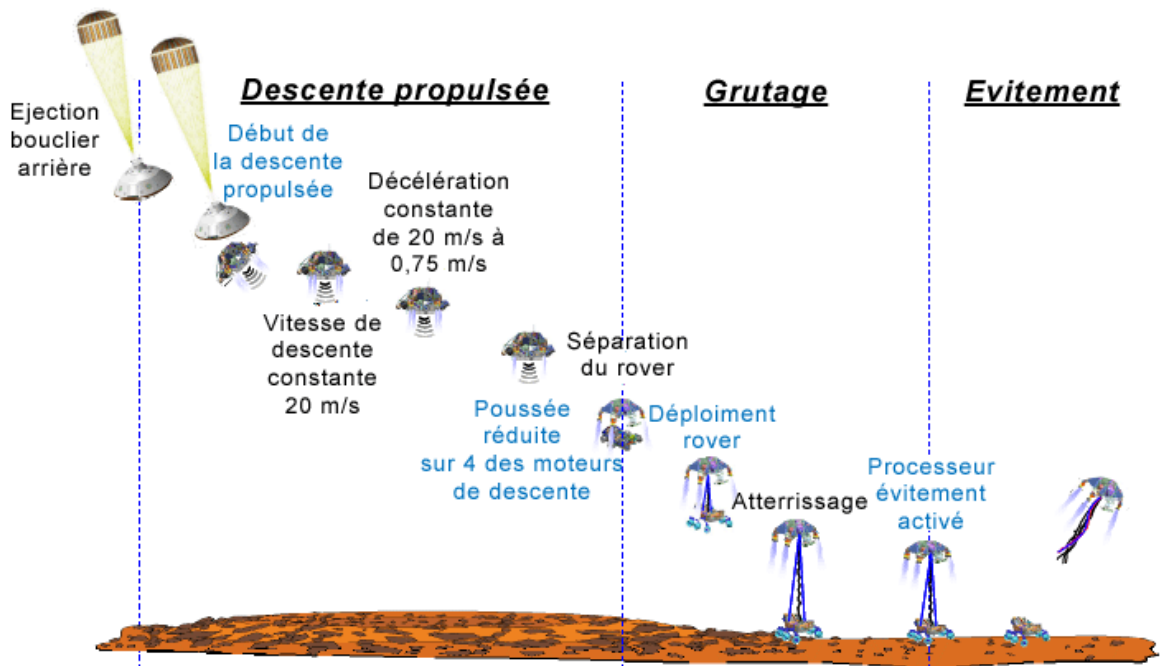
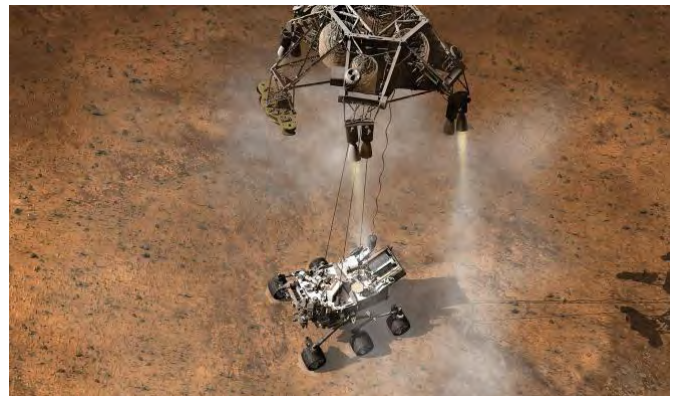


Schéma 12 : Phase finale de la descente et atterrissage

La dépose sur le sol



L'étage de descente, en vol statique, grute le rover jusqu'au sol



Le rover touche le sol, les câbles vont être cisailés et l'étage de descente reprendra la hauteur pour aller s'écraser plus loin

La dernière phase de la descente met en œuvre une technique complètement nouvelle. Alors que la sonde se trouve à 21 mètres au-dessus du sol avec une vitesse horizontale nulle et une vitesse verticale descendante constante limitée à 0,75 m/s, le rover est descendu au bout de trois câbles longs de 7,50 mètres tout en déployant ses roues puis est libéré dès que le système qui pilote la descente détecte que les forces de traction exercées sur les câbles se sont affaiblies conséquence de la dépose effective du rover. Ceci permet une prise de contact à faible vitesse du rover qui est placé au sol sur ses roues en configuration opérationnelle. Les amortisseurs du véhicule sont utilisés pour amortir le contact. La séquence détaillée est la suivante. Un système pyrotechnique désolidarise le rover de l'étage de descente alors que l'altitude est de 17,6 mètres. Le rover descend suspendu au bout des 3 câbles qui exercent leur traction près du barycentre de l'étage de descente pour éviter de perturber l'équilibre de celui-ci. En parallèle, les roues du rover sont déployées. Un cordon ombilical relie par ailleurs le rover dont l'ordinateur contrôle le déroulement de l'opération et l'étage de descente. Sept secondes après le début de cette séquence, les câbles sont complètement déroulés. Durant les 2 secondes qui suivent, le système a pour objectif d'amortir les mouvements provoqués par l'interruption du déroulement des câbles. Le système est alors prêt pour la prise du contact avec le sol. Celle-ci est détectée lorsque la traction sur les câbles diminue imposant une réduction importante de la poussée exercée par les moteurs pour maintenir une vitesse de descente constante.

L'ordinateur de bord étudie sur une période d'une seconde l'évolution du comportement de l'étage de descente (valeur de la poussée des moteurs et variation de celle-ci) avant de décider que le rover est correctement posé sur le sol. Lorsque le contact avec le sol est confirmé, l'ordre de couper les suspentes au niveau du rover est donné. Puis l'étage de descente qui est désormais piloté par son propre processeur, après avoir coupé le cordon ombilical, entame une manœuvre qui doit l'écarter de la zone d'atterrissage : la poussée des moteurs est augmentée durant un certain laps de temps pour que l'étage de descente reprenne de l'altitude puis celui-ci modifie son orientation de 45° et ensuite augmente la poussée de ses moteurs jusqu'à 100 % et maintient ce mode de fonctionnement jusqu'à épuisement du carburant. Il est prévu que dans tous les cas de figure l'étage de descente s'écrasera à au moins 150 mètres du lieu d'atterrissage du rover.

Les opérations au sol

Activation du rover

Du fait de son système de dépose au sol, Curiosity est pratiquement opérationnel dès son arrivée sur le sol martien : ses roues sont déployées et il n'a pas à débarquer d'une plateforme comme les rovers MER qui l'ont précédé. Toutefois, immédiatement après son arrivée au sol, les ingénieurs au sol doivent s'assurer grâce aux capteurs embarqués sur le rover que celui-ci n'est pas dans une position périlleuse avant tout mouvement. Bien que sa garde au sol soit de 60 cm et qu'il puisse monter des pentes de 50°, les premières manœuvres peuvent être délicates si la zone d'atterrissage s'avère peu propice. Le rover entame une séquence de tâches automatiques : le mât ainsi que l'antenne grand gain sont mis en position verticale, les télécommunications avec la Terre sont testées, des images sont envoyées pour permettre aux contrôleurs au sol d'identifier précisément le site d'atterrissage et la position du rover. Le premier déplacement du rover n'intervient qu'au bout d'une semaine.

Planning

Au bout d'environ une semaine, Curiosity entame sa mission opérationnelle. La durée initiale de celle-ci est d'une année martienne soit 687 jours terrestres ou 669 jours martiens (sols). Durant cette période, le rover aura une activité réduite une vingtaine de jours durant la conjonction solaire du 18 avril 2013 (télécommunications interrompues car le Soleil s'interpose entre Mars et la Terre) et environ 10 jours pour permettre des mises à jour des logiciels. Le rover devrait parcourir durant ces 22 mois terrestres de 5 à 20 km. Au cours de ses déplacements, il est prévu qu'il collecte et analyse environ 70 échantillons de roche et de sol martien.

Date	Jour de la mission	Activité
6 août 2012 5h24 UTC	Sol 0	Début de la rentrée atmosphérique. La vitesse de MSL est de 5,9 km/s (~Mach 17).
6 août 2012 5h31 UTC	Sol 0	Atterrissage dans le cratère Gale après une descente de 7 minutes. Pour le rover, il est 15 heures (heure solaire locale)
6 août	Sol 0	Transmission d'informations sur le statut du rover. Premières photos au format vignette prises par les caméras Hazcam.
7 août	Sol 1	Déploiement de l'antenne à grand gain, collecte de données scientifiques sur la météorologie (instrument REMS) et le niveau de radiation (RAD), prises de photos complémentaires. Vérification du fonctionnement des systèmes et des instruments. Contrôle comportement thermique.
8 août	Sol 2	Déploiement du mât, panorama 360° avec la caméra Navcam, Photo de la mire de calibrage avec la caméra Mastcam, deuxième tentative de liaison directe avec la Terre.
9 août	Sol 3	Préparation de la mise à jour du logiciel embarqué, tests de plusieurs instruments scientifiques tels que APXS, CHEMIN, DAN, et SAM, réalisation d'un panorama en couleurs avec la MASTCAM.
10 août	Sol 4	Préparation de la mise à jour du logiciel embarqué (suite), utilisation des instruments RAD et DAN en mode passif.
11 au ~14 août	Sol 5 à ~Sol 8	Mise à jour du logiciel embarqué. La version 9 conçue pour la phase de vol est remplacée par la version 10. Celle-ci a été préchargée durant le vol mais elle doit être testée avant mise en application.

22 août	Sol 16	Premiers déplacements du rover (3 mètres en avant, rotation de 90° puis 2 mètres en arrière)
20 août	-	Première utilisation du bras porte-outils
29 août	Sol 22	Le rover se dirige vers le premier site étudié Glenelg à 400 m du point d'atterrissage.
24 juin 2014	Sol 669	Fin de la mission au bout d'une année martienne (687 jours terrestres, 669 jours martiens)

Les activités du rover

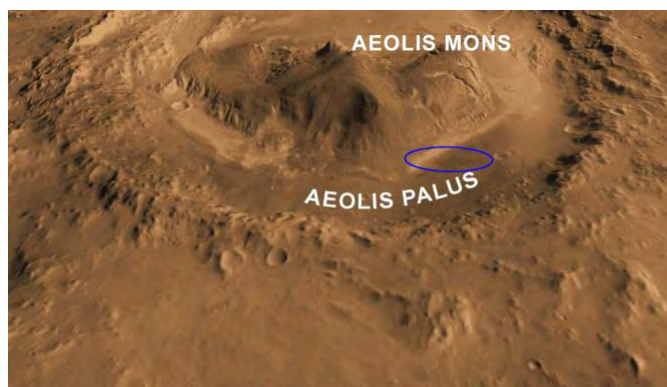
L'exploration du cratère Gale

Caractéristiques du cratère Gale

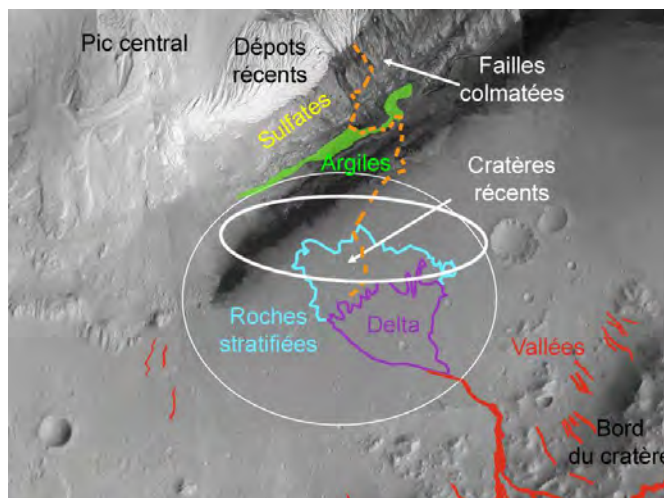
Le rover doit être déposé à l'intérieur du cratère Gale par 4,6° de latitude sud et 137,4° de longitude Est. Ce cratère de 154 km de diamètre comporte en son centre l'Aeolis Mons, un pic qui culmine à 5 kilomètres au-dessus de son plancher. Les pentes de cette montagne sont suffisamment douces pour que le rover puisse l'escalader mais Curiosity ne devrait gravir que ses contreforts durant sa mission nominale dont la durée est fixée à deux ans (soit une année martienne). Plusieurs indices, fournis par les instruments des satellites en orbite autour de Mars donnent à penser que l'eau a circulé autrefois dans le cratère :

- la faible altitude du plancher du cratère (4,45 km au-dessous du niveau moyen) : si de l'eau a circulé à la surface de Mars, elle s'est concentrée dans les parties les plus basses.
- la présence de sulfates et d'argiles dans les parties les plus basses du pic central,
- dans des zones plus élevées l'existence de terrains fracturés comblés par des eaux saturées en minéraux.

Les strates visibles sur le mont central permettent de penser que celui-ci constitue un témoin de l'histoire géologique de la planète depuis l'impact qui a créé le cratère il y a environ 3 milliards d'années. On devrait y retrouver superposés les dépôts laissés par chaque période : les couches les plus anciennes devraient se situer à la base de la montagne. Les processus ayant abouti aux différentes formations observées ne sont toutefois pas identifiés de manière certaine.



La zone d'atterrissage dans le cratère de Gale est une ellipse (20x8 km) située dans une zone de plaine baptisée Aeolis Palus au pied du pic central Aeolis Mons qui culmine à 5 km au-dessus du plancher du cratère



Vue détaillée avec éléments géologiques identifiés et en pointillés orange une trajectoire possible pour le rover. Le cercle blanc est le contour de la zone d'atterrissage envisagée initialement et l'ovale en trait blanc épais, la zone d'atterrissage réduite résultant d'une optimisation de la technique d'atterrissage mise au point par la suite

Déroulement

Les zones du cratère qui intéressent en premier lieu les scientifiques sont situées sur les flancs du mont central à l'extérieur de la zone d'atterrissage du rover; celui-ci ne pouvait pas y atterrir directement car la pente est trop importante. Mais Curiosity dispose, de manière nominale, d'une autonomie de 20 km suffisante pour lui permettre d'atteindre ces lieux. Par ailleurs des sites géologiques intéressants ont

également été identifiés à l'intérieur de la zone d'atterrissage. L'équipe scientifique a planifié l'exploration détaillée des formations suivantes (cf carte ci-dessus) :

- Le delta alluvial situé dans la zone d'atterrissage et qui s'étend entre les parois du cratère et le nord de la zone. On devrait y trouver des matériaux en provenance des flancs du cratère transportés à l'époque par les eaux de surface.
- Une zone en pente, située au sud du delta alluvial, et composée de roches dures aux tonalités claires. Il pourrait s'agir de roches sédimentaires créées par l'action des eaux de surface tels que des sels déposés par un lac durant son assèchement.
- Les parties basses du mont central qui comportent des strates contenant des argiles, des sulfates ou un mélange des deux. Les variations observées entre les différentes strates fourniront des informations sur les changements intervenus dans l'environnement martien à cette époque humide et chaude. Les analyses effectuées par les instruments du rover doivent également contribuer à valider l'interprétation des observations effectuées par les orbiteurs sur la distribution et l'abondance des minéraux. Les sels de sulfate contiennent des traces d'eau au sein de la structure minérale et une partie de cette eau est libérée dans l'atmosphère aux heures les plus chaudes de la journée puis est absorbée durant les heures les plus froides; les mesures que le rover effectuera, devraient fournir des informations sur le cycle de l'eau actuel de la planète.
- Les canyons qui entaillent le flanc nord du mont central résultent de l'écoulement passé de l'eau de surface à travers les strates inférieures. Ces canyons constituent un environnement habitable distinct et postérieur à ceux associés à l'époque de la formation des argiles et des sulfates. L'analyse des dépôts au débouché des canyons nous renseignera sur les conditions régnant sur Mars à cette époque.
- Le réseau de fractures situé dans la partie supérieure des strates riches en sulfates est comblé par des matériaux minéraux résultant de l'action des eaux de surface. Il s'agit des vestiges d'un troisième environnement distinct des deux précédents. Le rover recherchera des composants organiques dans ces dépôts.

La vitesse de progression du rover dépendra des découvertes effectuées sur chaque site. Si le rover est toujours opérationnel après avoir exploré ces différentes formations, il est prévu de l'envoyer étudier les strates supérieures (situées plus haut sur le pic central) correspondant à des époques plus récentes de l'histoire de Mars.

Les contraintes

Les opérations sur le sol de Mars doivent prendre en compte plusieurs contraintes :

Énergie disponible et contrainte sur le volume de données scientifiques générées

Le rover ne peut consacrer que 250 watts d'énergie aux équipements scientifiques. Durant l'hiver martien, lorsque la température chute, la puissance disponible est encore inférieure car il faut consacrer plus d'énergie pour maintenir les équipements sensibles à une température suffisante. Toutefois la latitude du site retenu (le cratère Gale), proche de l'équateur, permet au rover de bénéficier d'une température relativement clémente comprise entre -100 °C et 0 °C⁴⁹. Durant une journée martienne, le temps d'activité du rover est limité à 6 heures. La quantité de données scientifiques qui peut être transmise a été limitée en moyenne à 250 mégabits par jour martien pour tenir compte de la disponibilité des satellites chargés des liaisons avec la Terre.

Autonomie

Le rover n'est généralement pas capable d'enchaîner les opérations et doit recevoir des instructions des opérateurs sur Terre pour entamer une nouvelle tâche :

- Les activités scientifiques à mener sont conditionnées par plusieurs observations préalables effectuées à l'aide de différents instruments (par exemple caméra de navigation puis caméra scientifique puis ChemCam) entre lesquelles s'intercalent une analyse par les scientifiques sur Terre pour identifier les cibles intéressantes et définir en conséquence l'étape suivante.
- Lorsque le rover est en route pour un autre site, il dispose de logiciels lui permettant de progresser de manière autonome en interprétant les images fournies par ses caméras de navigation. Mais sa progression doit être très prudente, car la capacité d'identifier les obstacles est limitée et en cas

d'enlèvement, retournement ou choc endommageant un des mécanismes ou instruments aucune réparation n'est possible. Or, le terrain martien est irrégulier et les zones géologiques intéressantes sont souvent situées dans des lieux escarpés.

Temps de réponse des équipes sur Terre

Le rover dépend donc fortement des échanges avec les équipes au sol pour mener ses activités. Or plusieurs facteurs freinent ces échanges :

- Les communications radio mettent de 8 à 42 minutes pour arriver à leur destination en fonction de la position respective des deux planètes.
- Il n'est prévu que deux vacations radio par jour martien entre le rover et les contrôleurs à Terre pour plusieurs raisons : le rover dispose d'une quantité d'énergie limitée à consacrer aux télécommunications, ces échanges utilisent comme relais un des orbiteurs martiens qui doit survoler le site du rover et le réseau d'antennes de réception sur Terre a une disponibilité limitée.
- Les positions respectives de la Terre, de Mars et du Soleil ne sont pas toujours favorables à ces échanges.
- Au-delà des 180 premiers jours de la mission, la réactivité des opérateurs et des scientifiques sur Terre est limitée car les équipes ne sont plus disponibles 24h sur 24 et 7 jours sur 7 mais reviennent à des horaires normaux.

Les types d'activité

Les contraintes énumérées ci-dessus imposent un déroulement plutôt lent des activités. Les tâches à enchaîner au cours d'une journée martienne sont définies sur la base des éléments transmis par le rover la veille, ce qui aboutit à la définition de journée type dédiée à un objectif principal : transit entre deux sites, reconnaissance, approche d'une cible, étude *in situ*, analyse d'un échantillon dans le mini-laboratoire.

Déplacement entre deux sites à étudier

Le rover consacre un nombre de jours important à se déplacer pour aller d'un site sélectionné par l'équipe scientifique au site suivant. Selon le scénario élaboré par l'équipe projet, la distance moyenne entre deux sites étudiés en profondeur par le rover est de 1,5 km. Pour se rendre sur un site, le rover se déplace à une vitesse moyenne estimée à 50 mètres par sol (jour martien). Cette distance dépend de la nature des terrains rencontrés. Durant les journées consacrées au déplacement, le rover commence par examiner les roches avoisinantes avec l'instrument CHEMCAM puis prend des images en relief de certains échantillons avec la caméra microscope MAHLI ce qui nécessite de déployer le bras du rover et donc d'avoir pris des images la veille avec les caméras de navigation pour s'assurer qu'il n'y a aucun obstacle sur la trajectoire du bras. Puis des panoramas sont réalisés avec les caméras de navigation et les caméras MASTCAM. Le reste de la période d'activité est consacrée au déplacement.

Reconnaissance d'un site

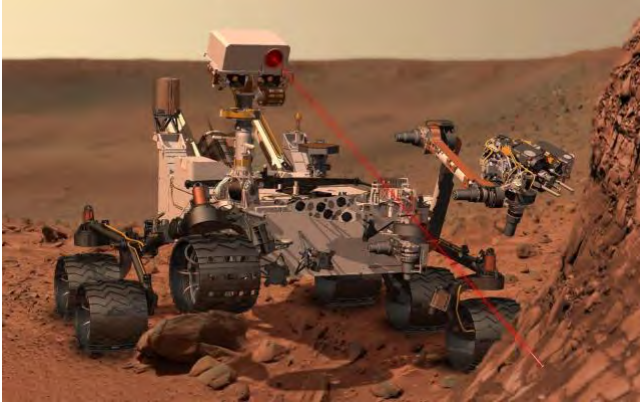
L'activité de reconnaissance d'un site sélectionné est une journée consacrée à des tâches de préparation. L'objectif est d'obtenir des informations qui permettent à l'équipe scientifique de planifier les prochaines étapes. Le rover examine avec CHEMCAM des cibles désignées puis après déploiement du rover prend des images en relief avec la caméra microscope MAHLI ce qui nécessite de déployer le bras du rover et donc d'avoir pris des images la veille avec les caméras de navigation pour s'assurer qu'il n'y a aucun obstacle sur la trajectoire du bras. Puis des panoramas sont réalisés avec les caméras de navigation et les caméras MASTCAM. L'instrument APXS est déployé et analyse durant toute la nuit un échantillon.

Positionnement près d'un échantillon de sol

Durant une journée consacrée au positionnement près d'un échantillon du sol ou d'une roche, le rover se déplace de manière à ce que son bras soit, à l'issue de la journée, en position d'appliquer un outil ou instrument scientifique sur cette cible. Celle-ci doit avoir été identifiée la veille et se trouver à moins de 10 mètres du rover. Celui-ci démarre la journée en utilisant successivement ChemCam, APXS durant un laps de temps bref et MAHLI pour une image tridimensionnelle avant de se mettre en mouvement. À l'issue de son déplacement, les caméras de navigation et MASTCAM prennent des images qui sont transmises à Terre. L'instrument DAN effectue des mesures actives durant le déplacement et sur la position finale.

Étude d'un échantillon au contact

Une journée d'analyse d'un échantillon de sol ou de roche au contact consiste à effectuer des observations avec les instruments du bras sur la cible du rover (APXS et MAHLI) qui doit être à portée depuis la veille. La roche est ensuite brossée pour être débarrassée de la couche superficielle puis des mesures sont de nouveau effectuées avec les instruments scientifiques du bras mais cette fois avec un temps de pose plus long d'APXS. Chemcam et Mastcam prennent des images du spectre électromagnétique pour préciser le contexte dans lequel se situe la cible tandis que les caméras de navigation documentent ces activités.



Le rover utilise le laser de ChemCam pour analyser à distance la composition d'une roche (vue d'artiste)



Le rover utilise les outils au bout de son bras pour étudier une roche (vue d'artiste)

Collecte et analyse d'un échantillon du sol

Une journée consacrée à l'analyse d'un échantillon du sol regroupe l'ensemble des tâches aboutissant à l'insertion de cet échantillon dans les mini laboratoires du rover CheMin et SAM. Pour éviter une contamination d'une analyse par l'analyse précédente, un premier échantillon est prélevé sur une roche proche de la cible par la foreuse et conditionné. L'échantillon qu'on souhaite effectivement analyser est ensuite à son tour prélevé, conditionné puis mis à disposition des instruments CheMin et SAM. La partie de l'échantillon qui n'est pas utilisée est déversée sur le plateau d'observation situé sur l'avant du rover et examinée par les instruments MAHLI et APXS. Cette activité se prolonge durant 3 à 5 jours pour disposer d'une quantité d'énergie suffisante pour les équipements scientifiques et compte tenu du volume de données scientifiques à transférer et du temps nécessaire aux analyses.

Déroulement de la mission

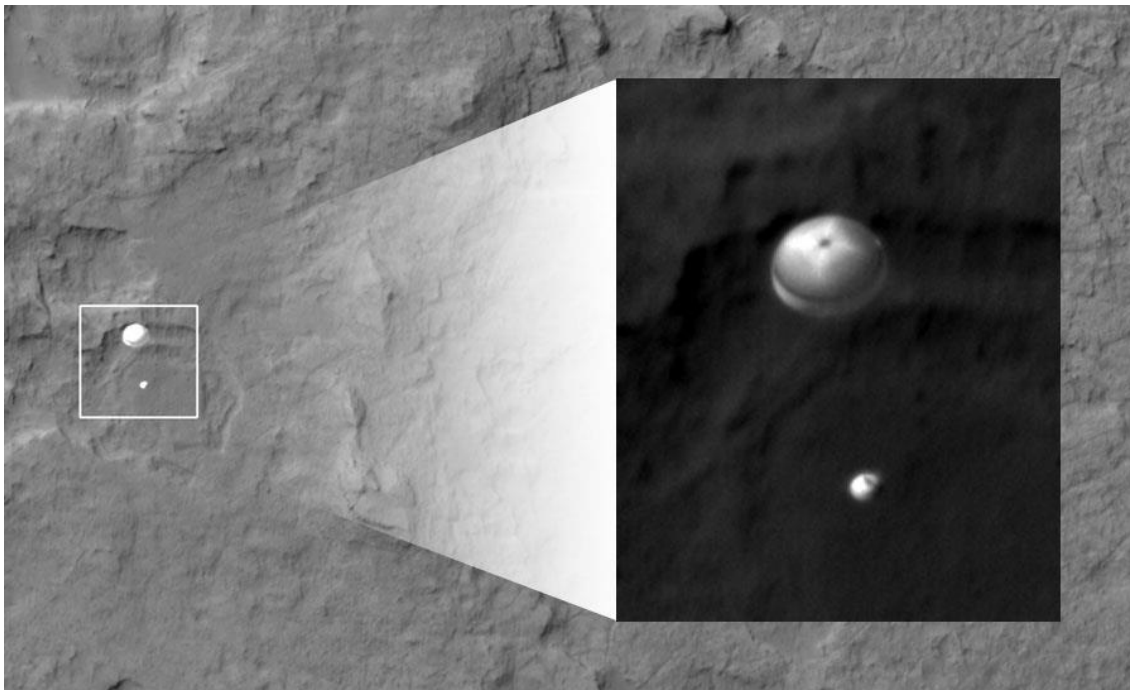
Le lancement et le transit vers Mars (26 novembre 2011 – 6 août 2012)

Le 26 novembre 2011 à 15h02 UTC, soit un jour après l'ouverture de fenêtre, la sonde est lancée par une fusée Atlas V. Après la mise à feu de l'étage Centaur, elle est directement placée sur sa trajectoire vers Mars. Le lanceur place la sonde dans une direction "décalée", de façon à ce que le deuxième étage n'aille pas s'écraser sur Mars et contaminer la planète avec des micro-organismes terrestres. C'est pourquoi le 11 janvier 2012, se déroule une première correction de trajectoire représentant un changement de vitesse de 5,5 m/s pour se placer dans la direction qu'occupera Mars à l'arrivée à 5 000 km près. Ainsi les petits moteurs-fusées de la sonde fonctionnent-ils durant 59 minutes. Le 26 mars, une deuxième correction de 0,9 m/s place la sonde exactement dans la direction de Mars. La troisième correction effectuée le 26 juin permet à la sonde d'aborder l'atmosphère martienne à la fois au bon endroit, et au bon moment : grâce à une brève impulsion des moteurs de 40 secondes, le point d'entrée dans l'atmosphère martienne est corrigé d'environ 200 km et l'heure de la rentrée atmosphérique est avancée d'environ 70 secondes. La quatrième correction de trajectoire (changement de vitesse de 1 cm/s) est effectuée le 29 juillet et permet de corriger le point d'entrée dans l'atmosphère martienne de 21 km. Les cinquième et sixième corrections de trajectoire, planifiées les 3 et 5 août, sont annulées car jugées finalement non nécessaires.

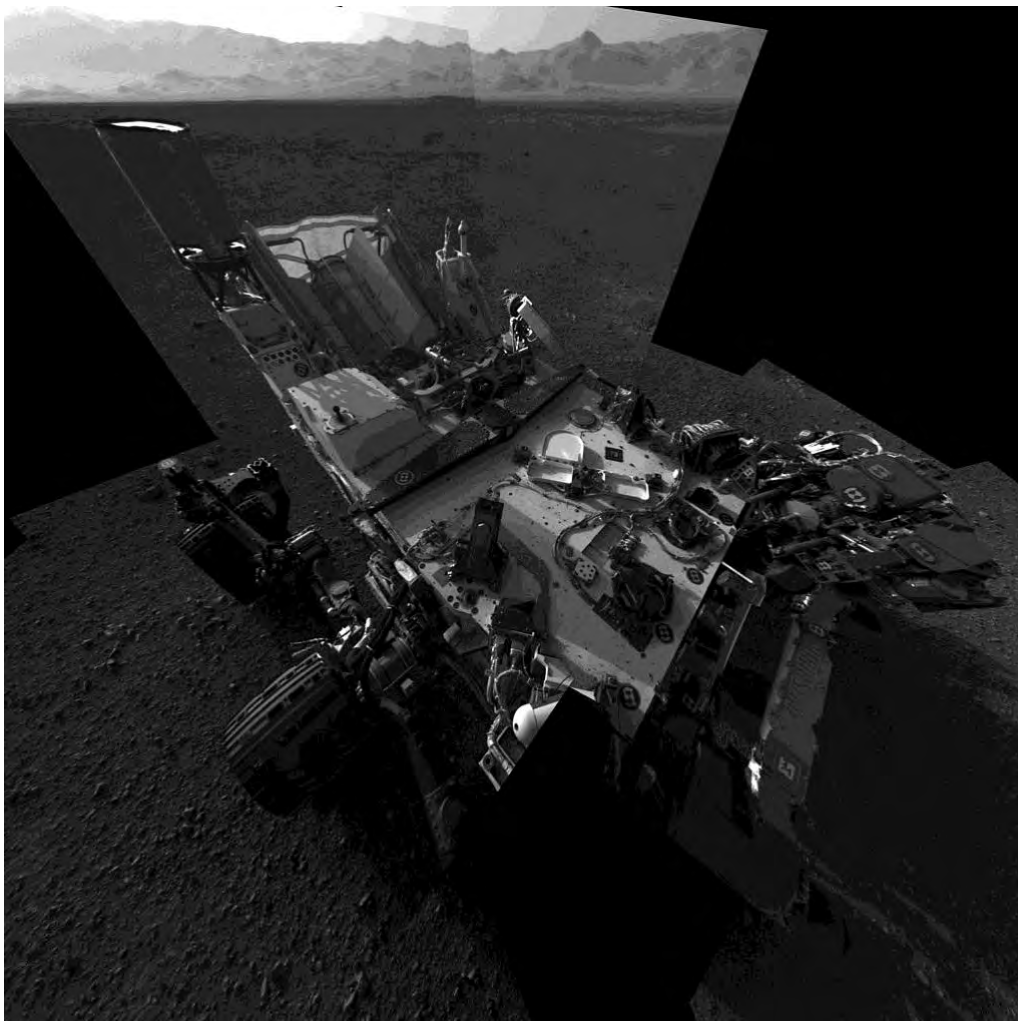
La descente et l'atterrissage (6 août 2012)

Le 6 août, la sonde entame son entrée dans l'atmosphère de Mars. Durant la traversée de celle-ci, elle transmet en permanence des informations sur son fonctionnement, pour permettre par la suite un diagnostic en cas d'échec. La descente a été programmée de manière à ce que les orbiteurs 2001 Mars Odyssey et Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) puissent l'observer et en retransmettre des images. Mars Odyssey relaie immédiatement les données reçues vers les stations terrestres tandis que MRO écoute sur une plage d'ondes plus étendue, au cas où le signal émis serait perturbé. Les données transmises par la sonde sont limitées par le débit très faible. L'orbiteur européen Mars Express est également utilisé pour relayer ses émissions. Finalement, le 6 août 2012 à 5 h 31 UTC, Curiosity atterrit comme prévu à l'intérieur de l'ellipse à 2,25 km à l'est de son centre. Le lieu d'atterrissage se trouve à 6 km du Mont Sharp (Aeolis Mons) et 28 km des rebords du cratère (ses coordonnées sont -4.5895 S, 137.4417 E). Le terrain sur lequel il s'est posé est dégagé de tout obstacle, incliné de quelques degrés, et l'avant du rover est tourné vers l'est/sud-est (112,7° plus ou moins 5°).

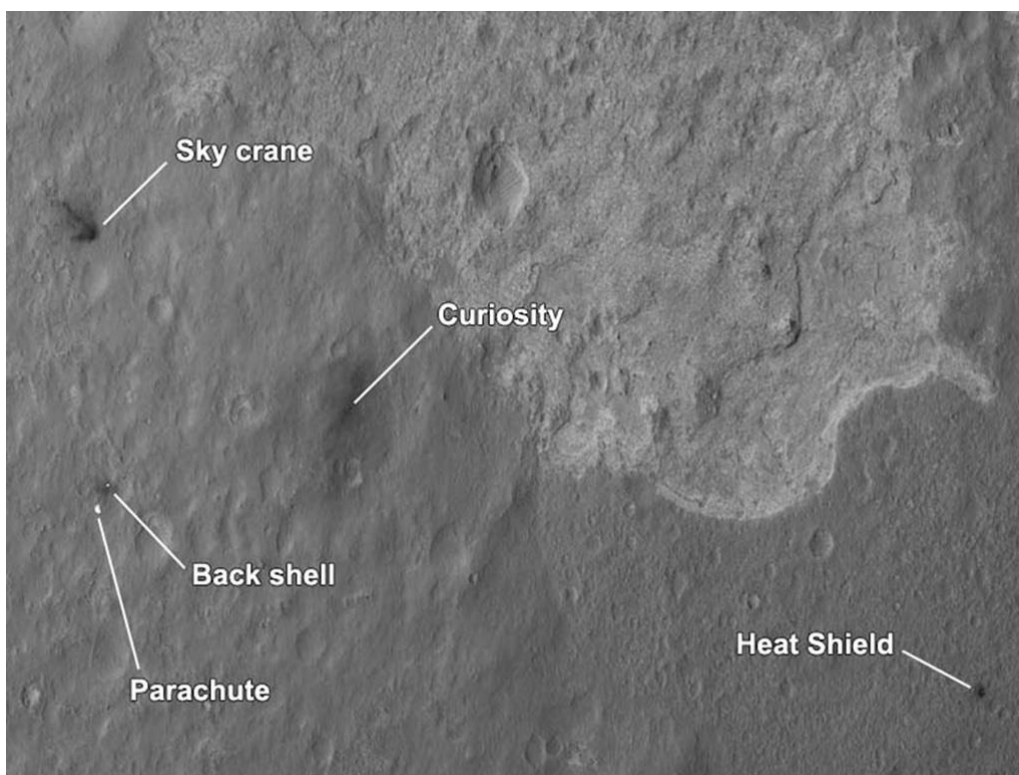
Ci-dessous: Une des premières photos prises par une des caméras Hazcam (caméra utilisée pour éviter les obstacles) du rover Curiosity après son atterrissage. Elle montre l'ombre de Curiosity et à l'horizon le Mont Sharp (Aeolis Mons) qui culmine à plus de 5 km d'altitude



MRO a réussi à photographier la sonde MSL durant sa descente en parachute



Autoportrait de Curiosity réalisé avec une des caméras NAVCAM



Les trois composants de l'étage de descente sont tous tombés sur le sol martien à faible distance de Curiosity



Cette photo prise avec le téléobjectif Mastcam montre des reliefs du Mont Sharp situés à environ 10 km

Depuis que Curiosity a entrepris son grand déplacement vers le pied du Mont Sharp dans le cratère Gale, ses roues se détériorent de manière accélérée d'où le souci maintenant de le faire progresser sur les parties de terrain les moins accidentées possible de la part de ses pilotes au JPL.



Depuis son atterrissage le 6 août 2012, Curiosity avait parcouru environ 28 km en août 2022, malgré de gros ennuis de roues.

2) Les orbiteurs de 2013 à 2016

a) MAVEN

Maven (acronyme de *Mars Atmosphere and Volatile Evolution*) est une sonde spatiale d'exploration de la planète Mars développée dans le cadre du programme Mars Scout de l'agence spatiale américaine, la NASA. Mars est aujourd'hui désertique, sèche, froide (température au sol moyenne de -53°C) et dotée d'une atmosphère très ténue (pression atmosphérique 170 fois plus faible que sur Terre). Pourtant les indices géologiques recueillis par les engins spatiaux placés en orbite comme MRO (traces de vallées fluviales, bassins lacustres...) ou au sol comme les rovers *MER* et *Curiosity* (détection d'argiles formés en présence d'eau liquide...) démontrent que la planète Mars était autrefois (il y a environ 4 milliards d'années) chaude et dotée d'une atmosphère suffisamment dense pour permettre à l'eau de couler à l'état liquide à sa surface. L'état actuel de l'atmosphère de Mars est probablement le résultat de l'action du vent solaire, flot de particules ionisées émis en permanence par le Soleil, qui en bombardant l'atmosphère de Mars, a progressivement conduit à son échappement. La disparition du champ magnétique martien au début de l'histoire de la planète a sans doute contribué à ce processus. *MAVEN*, qui circule sur une orbite elliptique autour de Mars, a pour mission de déterminer les mécanismes à l'origine de la quasi disparition de son atmosphère. À cet effet ses instruments doivent étudier les caractéristiques de la partie supérieure de l'atmosphère de la planète exposée au bombardement solaire notamment en déterminant sa composition, mesurant le flux d'énergie solaire ainsi que le taux d'échappement actuel des différents gaz. *MAVEN* est un orbiteur de grande taille (2,55 tonnes, 11 mètres d'envergure) qui emporte une charge utile constituée de huit instruments scientifiques. Pour atteindre ses objectifs, la sonde spatiale est placée sur une orbite basse elliptique qui lui permet de traverser toutes les régions de l'atmosphère martienne résiduelle. Au cours de sa mission primaire d'une durée d'un an, *MAVEN* doit effectuer cinq « plongées » dans l'atmosphère basse relativement dense. Une fois sa mission primaire achevée, il est prévu que la sonde puisse jouer le rôle de relais de télécommunications entre les engins spatiaux posés sur le sol martien (rover *Curiosity*...) et la Terre tout en poursuivant ses mesures scientifiques. *MAVEN* a été lancé le 18 novembre 2013 par une fusée Atlas V 401 depuis la base de lancement de Cap Canaveral et s'est placé en orbite autour de Mars le 21 septembre 2014. Le projet a un coût évalué à 671 millions de dollars américains en incluant le lancement et la gestion des opérations durant la mission primaire.

b) Mars Orbiter Mission (Inde)

Mars Orbiter Mission (abrégé en **MOM**), ou de manière informelle *Mangalyaan* (en sanskrit मंगलयान / *Maṅgalyān*, littéralement « véhicule martien »), est une sonde spatiale indienne de type orbiteur chargée d'étudier la planète Mars. Elle a été lancée le 5 novembre 2013 et s'est placée en orbite autour de Mars le 24 septembre 2014. Il s'agit de la première sonde spatiale martienne développée par l'agence spatiale indienne, l'ISRO. MOM emporte des instruments scientifiques permettant d'étudier l'échappement de l'atmosphère martienne, de détecter les traces de méthane et de rechercher les vestiges de la présence d'eau à la surface de la planète. L'Inde est la quatrième puissance spatiale à disposer d'un engin spatial martien, devançant ainsi la Chine et le Japon. La sonde a achevé sa mission primaire en octobre 2016 en remplissant tous ses objectifs techniques et scientifiques. La mission qui devait durer six mois s'est finalement achevée en avril 2022 soit huit ans plus tard sans doute à la suite de l'épuisement des ergols.

c) ExoMars 2016

De l'Agence Spatiale Européenne. ExoMars Trace Orbiter - *ExoMars Trace Gas Orbiter* (TGO) est un orbiteur placé sous la responsabilité de l'ESA qui remplit d'une part une mission scientifique et d'autre part joue un rôle essentiel pour les autres missions du programme en servant de relais pour les télécommunications entre les engins déposés au sol et la Terre. Sa mission scientifique consiste à identifier l'origine du méthane et d'autres gaz rares présents dans l'atmosphère martienne. Les précédentes missions martiennes ont détecté que du méthane était présent dans l'atmosphère avec des concentrations variant dans le temps et selon le lieu. Le méthane est un gaz dont la durée de vie est brève à l'échelle géologique et sa présence nécessite une source active qui pourrait être biologique. Le satellite dispose d'une antenne parabolique grand gain de 2,2 mètres de diamètre orientable avec deux degrés de liberté pour retransmettre

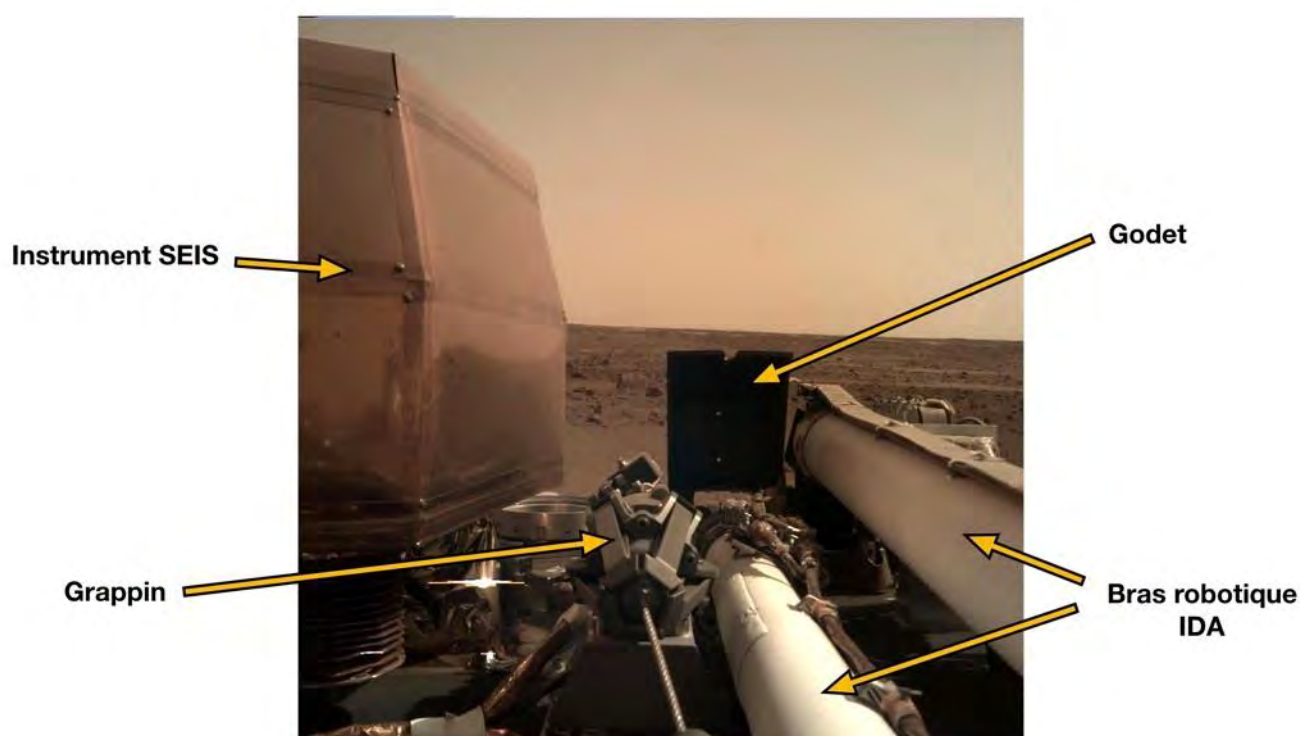
en bande X les données scientifiques vers la Terre. Le tube à ondes progressives utilisé a une puissance de 65 watts. Les échanges avec les engins situés sur le sol de Mars se font en bande UHF via une antenne hélice axiale. La charge utile embarquée, d'une masse évaluée à environ 135 kg est composée de plusieurs instruments scientifiques. L'orbiteur a été lancé le 14 mars 2016 avec ExoMars EDM (*Entry, Descent and Landing Demonstrator Module*). L'orbiteur est parfaitement mis en orbite autour de la planète Mars le 19 octobre 2016. Cette mission devait donc déposer sur Mars un Rover, l'atterrisseur *Schiaparelli*. Une erreur d'altitude a fait que le rover s'est écrasé à 300 km/h sur la planète rouge. Une Mission ExoMars 2018 devait voir le jour par la suite, mais elle a été décalée, notamment parce que le NASA s'était retirée de cette mission. L'ESA devait ensuite collaborer avec l'agence russe Rocosmos, mais l'invasion russe en Ukraine a définitivement mis fin à ce partenariat.

La mission ExoMars s'est ensuite appelée ExoMars 2020, puis 2022, avec un rover qui est déjà opérationnel et qui s'appelle Rosalind Franklin en l'honneur de la physico-chimiste à l'origine de la compréhension de la structure de l'ADN. Le prochain envoi possible pourrait avoir lieu en 2024 ou 2026.

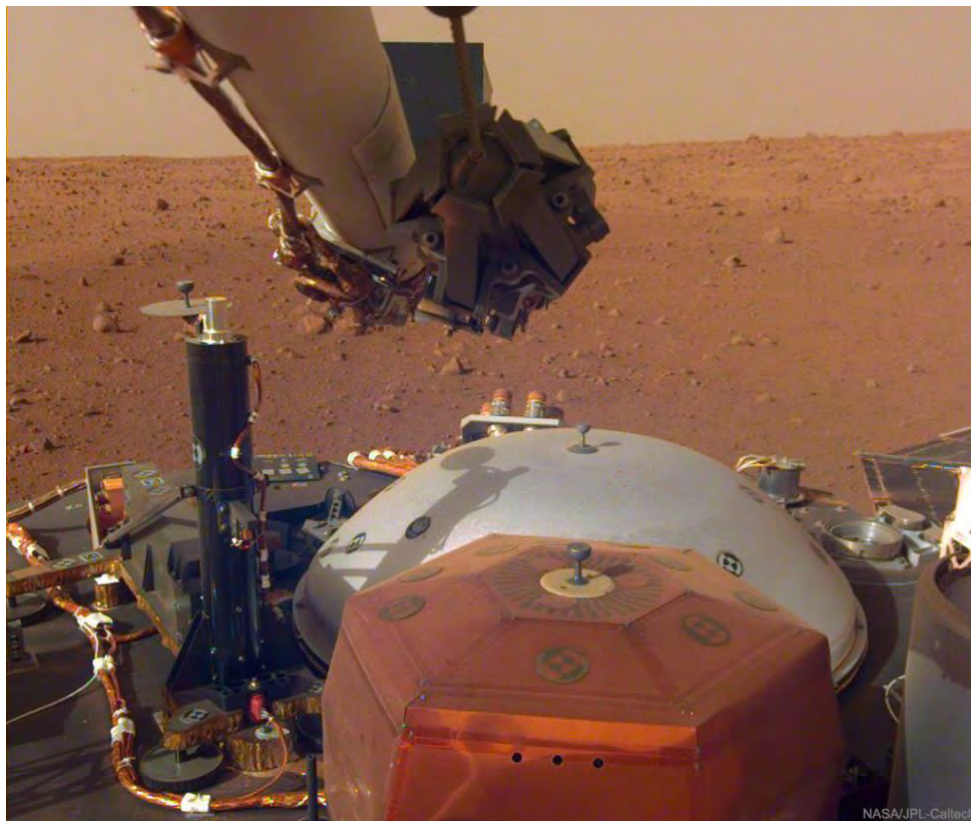
3) Les missions à partir de 2018

a) InSight

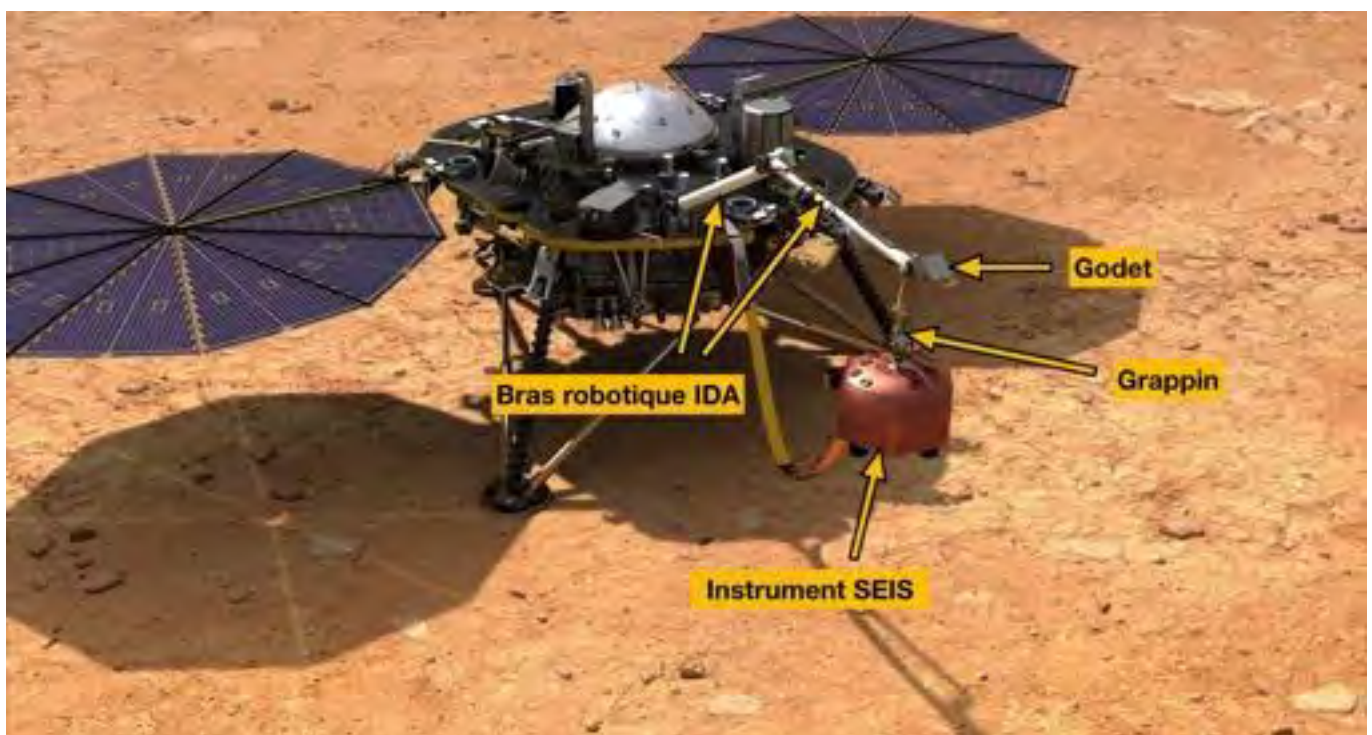
InSight (acronyme de l'anglais *Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport* ; en français : « Exploration interne par les sondages sismiques, la géodésie et les flux thermiques ») est une mission d'exploration de la planète Mars développée par l'agence spatiale américaine, la NASA, et qui a décollé le 5 mai 2018 pour atterrir à la surface de la planète le 26 novembre 2018.



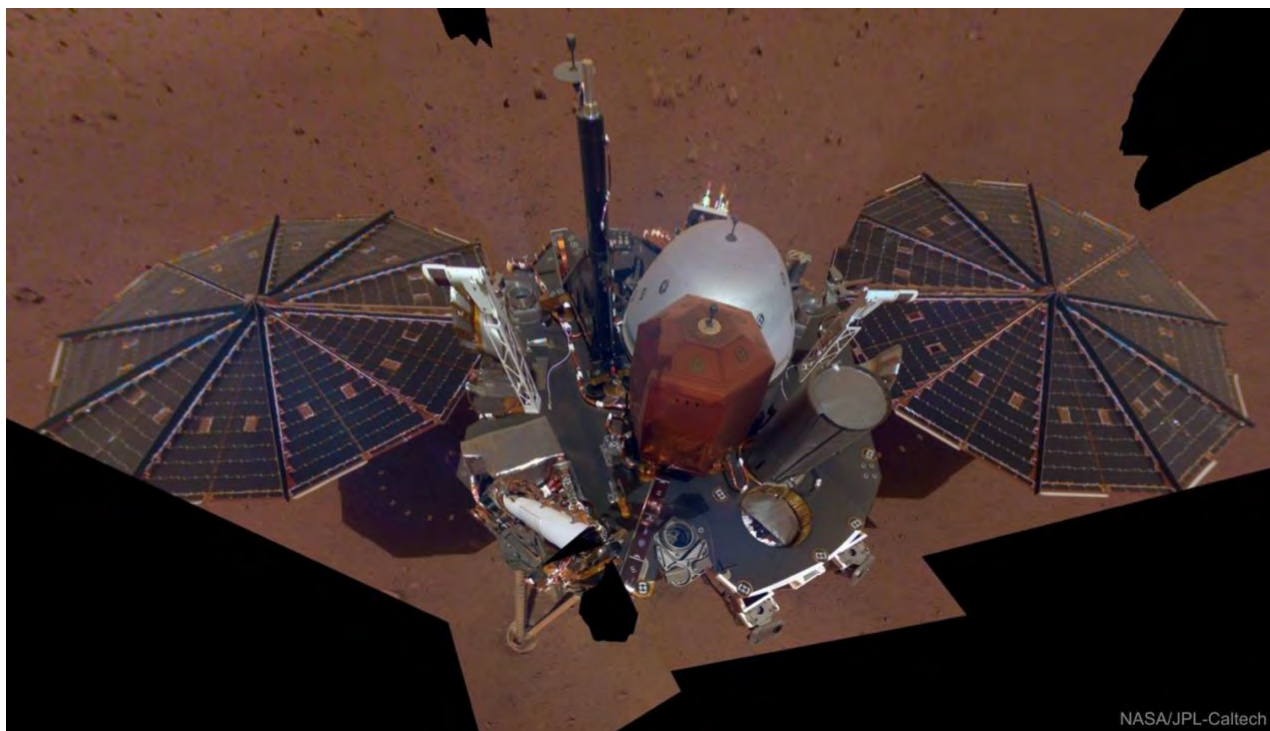
La mission *InSight* est la première entièrement consacrée à l'étude de la structure interne de cette planète. Pour y parvenir, elle emporte deux instruments scientifiques : le sismomètre SEIS et HP3, instrument de mesure des flux de chaleur en provenance du cœur de la planète. L'objectif scientifique principal de la mission est de disposer d'une meilleure connaissance de la structure interne de la planète, dont les caractéristiques sont mal connues, dans le but de reconstituer l'histoire de Mars. Les données collectées permettront également d'améliorer les modèles de formation et d'évolution des planètes rocheuses du Système solaire : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, ainsi que de la Lune.



Cette photo prise par la caméra IDC peu après l'atterrissage sur Mars (4 décembre 2018) montre le sismomètre (rouge), la cloche qui doit le recouvrir (blanche), le capteur de flux de chaleur (noir) et l'extrémité du bras sur lequel est installée la caméra avec, en arrière plan, la surface de Mars.



Lorsque la mission *InSight* est sélectionnée en 2012, dans le cadre du programme Discovery de la NASA, elle constitue l'aboutissement de plusieurs projets proposés sans succès au cours des deux décennies qui ont précédé. Le programme Discovery regroupe des projets spatiaux américains caractérisés par un coût modéré et un cycle de développement court. Pour rentrer dans cette contrainte budgétaire, la mission repose sur l'envoi d'une station au sol unique contrairement aux projets précédents. La sonde spatiale réutilise l'architecture de la mission *Phoenix*, qui s'était posée en 2007 dans la région polaire de Mars. C'est un engin de relativement petite taille (moins de 700 kilogrammes, au lancement). La charge utile est fournie par des partenaires européens. L'instrument principal, le sismomètre SEIS est conçu par l'Institut de physique du globe de Paris et fourni sous maîtrise d'œuvre de l'agence spatiale française (CNES), tandis que HP3 est développé par l'Allemagne.



Selfie de la sonde InSight

Un problème de mise au point sur l'instrument SEIS repousse le lancement de la mission, prévu initialement en 2016, à la fenêtre de lancement suivante vers Mars en 2018. *InSight* se pose à la surface de Mars le 26 novembre 2018 dans une région de plaine baptisée Elysium Planitia et située près de l'équateur de cette planète. La phase d'étude scientifique doit durer deux années terrestres. Le sismomètre SEIS entre en service début février 2019 et pour la première fois dans l'histoire de l'exploration de Mars, un séisme est détecté le 7 avril 2019. L'instrument HP3, qui nécessite l'enfoncement d'une sonde dans le sol, rencontre un problème lié à la nature du sol, que l'équipe sur Terre tente de résoudre avant de renoncer à faire fonctionner l'instrument en janvier 2021. La mission est prolongée de deux ans pour durer théoriquement jusqu'à fin 2022, et l'accumulation de la poussière sur les panneaux solaires fait que la NASA annonce effectivement la fin de la mission le 21 décembre 2022, après deux tentatives infructueuses d'entrer en contact avec la sonde.

Les séismes détectés par l'instrument SEIS se révèlent plus nombreux que prévu mais d'une intensité plus faible (magnitude de 4 au maximum). Malgré la faiblesse des signaux sismiques, les scientifiques déterminent que la croûte de la planète a une épaisseur comprise entre 24 et 72 kilomètres et que le rayon du noyau métallique, évalué à 1 830 kilomètres, se situe à la limite supérieure des prévisions. La mission révèle ainsi une caractéristique importante, la minceur de la couche située entre le noyau et la croûte (le manteau), qui a dû entraîner le refroidissement rapide de la planète.

L'objectif principal d'*InSight* est d'étudier la structure interne de la planète Mars, qui partage de nombreuses caractéristiques avec les trois autres planètes telluriques (c'est-à-dire rocheuses) de notre Système solaire. Comme la Terre, Mars résulte de l'accrétion initiale de nombreux corps rocheux, qui a été suivie, lorsque la masse du corps en formation a dépassé une taille suffisante, d'un échauffement interne, entretenu par la chaleur dégagée du fait de la radioactivité naturelle de certains éléments. Cet échauffement a déclenché un processus de différenciation planétaire : les matériaux les plus denses se sont enfoncés vers le centre, tandis que les matériaux moins denses migraient vers la surface. Il en est résulté la formation d'un noyau planétaire, entouré d'un manteau et d'une croûte. Mars présente l'avantage par rapport à la Terre d'être géologiquement moins active (notamment absence de plaques tectoniques). Sa structure interne doit donc avoir conservé les traces de ce processus initial de formation. En étudiant la taille, l'épaisseur, la densité et l'ensemble de la structure de la planète Mars (noyau, manteau et croûte), ainsi qu'en permettant d'estimer la vitesse à laquelle la chaleur s'échappe de l'intérieur de la planète, *InSight* fournira un aperçu original des processus évolutifs de toutes les planètes rocheuses, qui ont débuté il y a plus de quatre milliards d'années.

L'objectif secondaire de la mission est de mener une étude approfondie de l'activité tectonique, mais aussi des impacts de météorites sur Mars, ce qui pourrait accroître nos connaissances sur les processus similaires sur Terre.

Pour remplir sa mission, *InSight* doit collecter des données qui permettront d'effectuer six types de mesure :

- déterminer la taille, la composition et l'état (solide ou liquide) du noyau planétaire ;
- déterminer l'épaisseur et la structure de la croûte ;
- déterminer la composition et la structure du manteau ;
- déterminer l'état thermique des structures internes de Mars ;
- mesurer la force, la fréquence et la distribution géographique de l'activité sismique interne de la planète ;
- mesurer la fréquence des impacts de météorites à la surface de Mars.

Les principales caractéristiques de la structure interne de Mars ont fait l'objet d'estimations, mais souvent de manière indirecte. La mission *InSight* devrait apporter des précisions très importantes, comme le montre le tableau ci-dessous.

Évaluation de l'activité sismique de Mars

Aucune des deux missions martiennes dotées de sismomètres ayant précédé *InSight* n'a pu fournir d'informations sur l'activité sismique de Mars, du fait de la défaillance des instruments (*Viking*) ou de l'échec du lancement (*Mars 96*). L'activité sismique a fait néanmoins l'objet, pour la mission *InSight*, d'une évaluation basée sur plusieurs éléments : la masse de la planète, ses oscillations autour de son axe, l'observation des failles et des impacts de météorites à sa surface, ainsi que des modélisations du processus ayant donné naissance à la planète et qui a conduit à son refroidissement progressif. La source principale de l'activité sismique est la contraction de la planète liée au refroidissement de son noyau (séisme tectonique). Le moment cinétique libéré chaque année par ce processus aurait une valeur comprise entre 10^{17} et 10^{19} N m, qui situe Mars entre la Terre (10^{22} N m) et la Lune (10^{15} N m). Une large incertitude entoure également le nombre de séismes, il n'y a pas de modèle unique de distribution des séismes en fonction de leur intensité. À partir de plusieurs hypothèses, les spécialistes du domaine estiment qu'environ 100 séismes par an sont détectables au niveau du site d'atterrissage, c'est-à-dire caractérisés par un moment cinétique supérieur à 10^{13} N m, et par un épicycle situé à moins de 60 degrés d'écart sur la surface. Des sources secondaires de séismes sont les impacts de météorites. Ce type d'événement présente un grand intérêt scientifique car, contrairement aux séismes tectoniques, leur épicycle devrait pouvoir être localisé par les observations des engins spatiaux en orbite autour de Mars. Cette localisation permet de réduire l'incertitude concernant les déductions faites sur la structure interne de Mars à partir de ces ondes sismiques relevées. Le nombre d'impacts qui seront détectables chaque année présente de grandes incertitudes. Le responsable scientifique de l'instrument SEIS a proposé le chiffre de 10 événements détectables par an.

Détection des impacts météoritiques

Une des applications secondaires d'*InSight* est la détection des impacts de météorites, appliquée à l'étude de la structure interne de la planète. Le 24 décembre 2021, *InSight* a enregistré un séisme de magnitude 4, qui s'est révélé causé par un impact de météorite, identifié visuellement seulement deux mois plus tard, sur des images de *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO). L'impact, situé dans la région Amazonis Planitia, a créé un cratère de 150 m de diamètres et 20 m de profondeur, pour une météorite estimée à 5 à 12 mètres de diamètre.

Parmi le millier de séismes enregistré par *InSight*, quatre sont pour l'instant attribués à des impacts météoritiques et celui du 24 décembre 2021 est considéré comme le plus important, mais surtout le seul à avoir créé des ondes de surface dans la partie supérieure de la croûte, dont l'exploitation des données a permis d'étudier mieux encore la structure de la croûte

Précision des mesures d' <i>InSight</i>			
Caractéristique	Valeur connue / imprécision	Précision attendue d' <i>InSight</i>	Facteur d'amélioration
Épaisseur de la croûte	65 ± 35 km (déduit)	±5 km	7×
Couches composant la croûte	pas d'information	identification des couches d'une épaisseur > 5 km	nouvelles données
Vitesse de déplacement du manteau	8 ± 1 km/s (déduit)	±0,13 km/s	7,5×
Noyau liquide ou solide	sans doute liquide (déduit)	déterminé avec certitude	nouvelles données
Rayon du noyau	1 700 ± 300 km	précision portée à ±75 km	4×
Densité du noyau	6,1 ± 1,0 g/cm ³	précision portée à ±0,3 g/cm ³	3×
Flux thermique	30 ± 25 mW/m ³ (déduit)	précision portée à ±0,3 mW/m ³	8×
Activité sismique	imprécision d'un facteur 100	facteur 10	10×
Localisation des séismes	pas d'information	localisés avec une précision inférieure ou égale à 10°	nouvelles données
Taux d'impact des météorites	imprécision d'un facteur 6	facteur 2	3×

Détection des impacts météoritiques

Une des applications secondaires d'*InSight* est la détection des impacts de météorites, appliquée à l'étude de la structure interne de la planète. Le 24 décembre 2021, *InSight* a enregistré un séisme de magnitude 4, qui s'est révélé causé par un impact de météorite, identifié visuellement seulement deux mois plus tard, sur des images de *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO). L'impact, situé dans la région Amazonis Planitia, a créé un cratère de 150 m de diamètres et 20 m de profondeur, pour une météorite estimée à 5 à 12 mètres de diamètre.

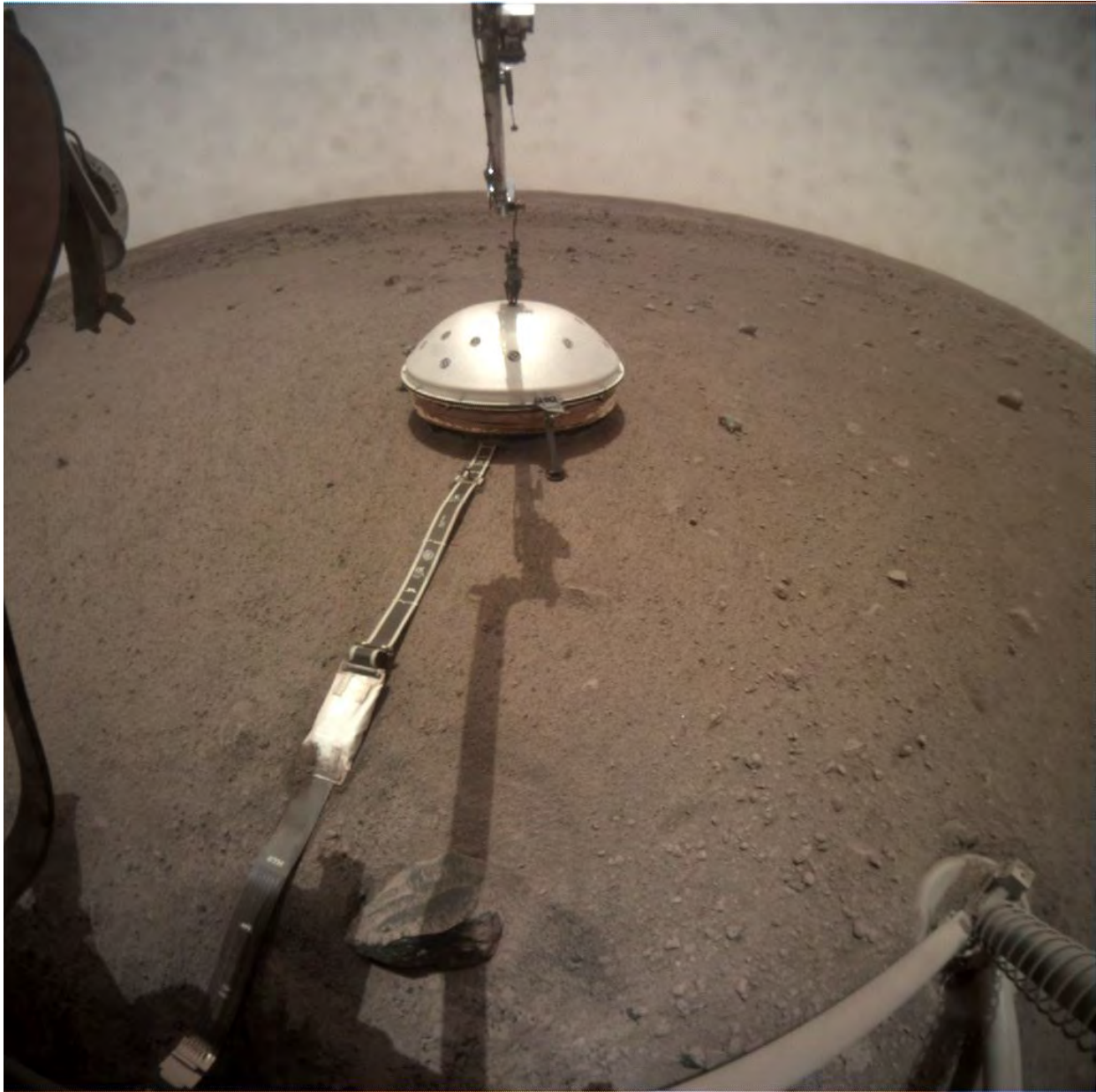
Parmi le millier de séismes enregistré par *InSight*, quatre sont pour l'instant attribués à des impacts météoritiques et celui du 24 décembre 2021 est considéré comme le plus important, mais surtout le seul à avoir créé des ondes de surface dans la partie supérieure de la croûte, dont l'exploitation des données a permis d'étudier mieux encore la structure de la croûte

Résultats scientifiques

Les principaux résultats acquis au cours de la première année d'*InSight* sur Mars, publiés fin février 2020 dans six articles scientifiques, sont les suivants. Une estimation de la structure interne de la planète, un des principaux objectifs de la mission, fait l'objet de deux publications en juillet 2021.

Sismologie

Les séismes martiens sont plus faibles mais plus fréquents que ne le préoyaient les modèles théoriques. En 13 mois, SEIS a enregistré près de 460 événements, essentiellement des microséismes. Parmi ceux-ci, 40 sont des signaux de basse fréquence, correspondant à des séismes relativement profonds ; les autres sont des événements de haute fréquence, beaucoup plus superficiels et proches, d'origine encore imprécise (plausiblement de petits séismes superficiels, des glissements de terrain ou des micro-ébranlements de falaises). La magnitude des deux séismes les plus puissants est de 3,6, pas tout à fait assez pour atteindre le manteau inférieur ni le noyau. Leur épocentre est situé 1 600 km à l'est d'*InSight*, dans un secteur appelé *Cerberus Fossae*, l'une des régions volcaniques potentiellement actives de Mars (certaines coulées de lave montrent des signes de fractures dues à des séismes datant de moins de 2 millions d'années).



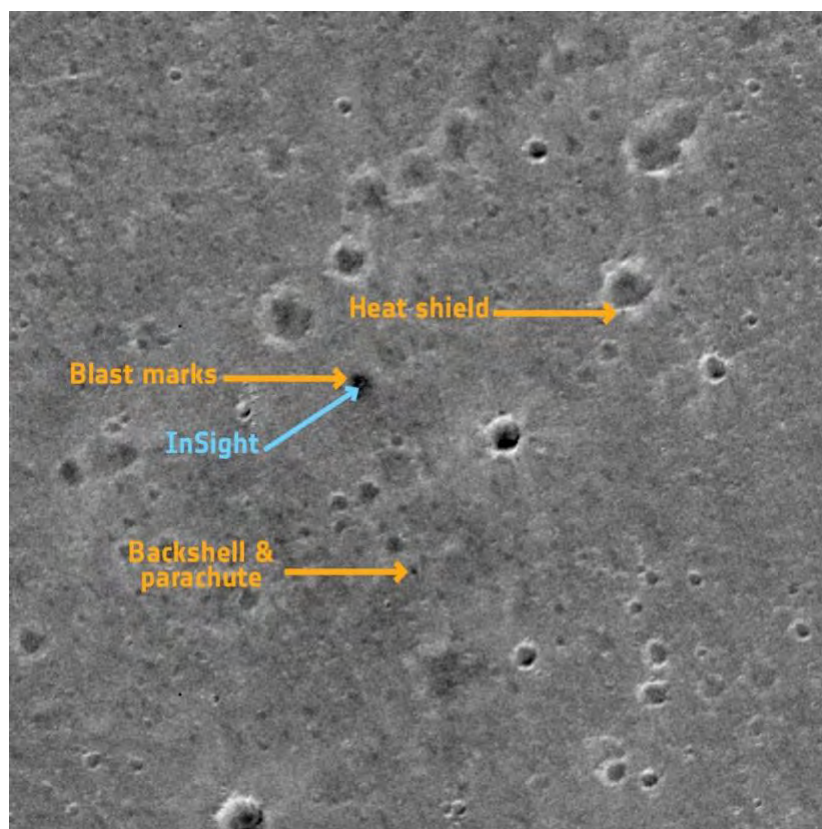
Le sismomètre SEIS déployé dans sa configuration finale sur le sol martien.

Trois séismes, les plus puissants enregistrés jusque-là par InSight, sont détectés sur un laps de temps d'un mois au cours de l'été 2021 : deux d'entre eux le 18 août (magnitudes de 4,2 et 4,1 sur l'échelle de Richter) et le troisième le 18 septembre (magnitude de 4,2). Ces tremblements sont détectés malgré la faible puissance fournie par les panneaux solaires du fait de la poussière accumulée et de l'éloignement du Soleil au moment de ces événements (Mars circule sur une orbite fortement elliptique). (Pour nettoyer en partie les panneaux solaires les opérateurs de la sonde spatiale avaient eu recours à une technique peu orthodoxe en accumulant près des panneaux solaires du régolithe avec le bras télécommandé de l'atterrisseur . Les grains de régolithe, soulevés par le vent ont balayé une partie de la poussière accumulée permettant aux panneaux solaires de recouvrer une partie de leur puissance). Le 4 mai 2022, *InSight* détecte un événement qui pourrait être un séisme de magnitude 5.

Géologie

En analysant les ondes sismiques d'une poignée de séismes, les plus intenses observés sur deux années, les scientifiques ont pu affiner nos connaissances sur la structure interne de Mars. La croûte de la planète a une épaisseur qui est comprise entre 20 ou 39 kilomètres immédiatement sous l'instrument SEIS (la valeur dépend de la composition précise des sous-couches qui n'est pas connue). À partir des données géologiques de surface, on peut en déduire que l'épaisseur de la croûte pour le reste de la planète est comprise entre 24 et 72 kilomètres. Le noyau métallique, sur lequel les ondes sismiques rebondissent, se situe à une

profondeur de 1 560 kilomètres, ce qui implique que son rayon est de 1 830 kilomètres (avec une incertitude de 40 kilomètres). Cette valeur le situe à la limite supérieure des prévisions. La masse de la planète étant déjà connue, la densité de ce noyau de grande taille est relativement faible (5,7 à 6,3), ce qui implique qu'il doit comprendre, outre du fer et du nickel, une quantité notable d'éléments légers comme le soufre. Une autre conséquence importante est la minceur de la couche située entre le noyau et la croûte (le manteau). Ce dernier est sans doute une simple couche de roches sans stratification contrairement à la Terre. La pression trop faible n'a en effet pas permis à la bridgmanite de se former. Ce minéral dans le cas de la Terre contribue à ralentir la convection et donc la vitesse de déperdition de la chaleur interne. Mars a dû donc connaître un refroidissement rapide.



Cette image panchromatique montre le site d'atterrissage d'InSight sur Mars. Elle a été prise par l'instrument CaSSIS (Colour and Stereo Surface Imaging System) du satellite ExoMars Trace Gas Orbiter, issu de la collaboration entre l'ESA et Roscosmos, le 2 mars 2019. L'image montre une surface de plus ou moins 2,25 km x 2,25 km dans la zone Elysium Planitia.

Les enregistrements sismiques ont permis de distinguer trois couches dans le sous-sol : la *duricrust*, une couche indurée de quelques centimètres ; le régolithe, une strate superficielle formée de matériaux concassés par les impacts pendant des milliards d'années ; une couche altérée d'une dizaine de kilomètres d'épaisseur. Au-dessous se trouve une croûte profonde consolidée, où la diffusion et l'atténuation des ondes sont semblables à celles des massifs cristallins terrestres.

Météorologie

Les capteurs météorologiques mesurent presque continûment la vitesse et la direction des vents, ainsi que la pression atmosphérique. Ils ont détecté des centaines de turbulences, dont certaines sont à l'origine de tourbillons de poussière (*dust devils*) ;

Magnétisme

Le magnétomètre a détecté un champ magnétique dix fois supérieur à ce qui était prévu sur la base des données satellitaires et des valeurs moyennes calculées sur quelques centaines de kilomètres (les mesures d'*InSight* concernent une zone beaucoup plus locale). Les roches voisines du lieu d'atterrissage étant trop jeunes pour avoir été aimantées par l'ancien champ global de Mars, le champ mesuré doit provenir de roches plus profondes. *InSight* a également détecté des impulsions magnétiques en milieu de nuit, dont l'origine est encore inconnue ;

b) Émirats Arabes Unis

La Sonde Al Amal (ou Hope), orbiteur lancé par une fusée japonaise le 20 juillet, mise en orbite réalisée le 9 février 2021. Mission de 2 ans. Elaborée avec la coopération d'un laboratoire du Colorado (USA). La **Mission martienne des Émirats** ou **Al-Amal** (arabe : أمل, « l'espoir », d'où parfois son appellation anglophone *Mars Hope*) ou **EMM** (sigle de l'anglais *Emirates Mars Mission*) est une sonde spatiale développée par les Émirats arabes unis (EAU) placée en orbite martienne pour étudier l'atmosphère et le climat de cette planète. Avec cette mission les Émirats entrent dans le cercle très fermé des pays ayant envoyé une sonde spatiale vers une autre planète du système solaire (États-Unis, Union soviétique/Russie, Europe, Japon, Inde, Chine). La sonde spatiale est développée avec la collaboration de plusieurs instituts américains dont le LASP qui réalise sa construction. EMM est lancée par une fusée japonaise H-IIA le 19 juillet 2020 depuis le centre spatial de Tanegashima. La sonde spatiale de 1 500 kg emporte trois instruments dont une caméra et deux spectromètres. Le 9 février 2021, la sonde Al-Amal réussit son insertion en orbite martienne, faisant des EAU la cinquième nation à s'installer autour de Mars.

Objectifs de la mission

Le développement d'un orbiteur martien est un objectif ambitieux, à ce jour seuls les États-Unis, l'URSS, l'Agence spatiale européenne et l'Inde ont réussi à insérer un engin spatial en orbite autour de Mars. Il faut parvenir à maîtriser des technologies pointues comme la navigation dans l'espace interplanétaire ou l'insertion en orbite en mode automatique. Aussi cette mission est-elle avant tout un projet technologique. Les objectifs scientifiques portent sur l'étude de l'atmosphère martienne et du climat de Mars et visent à disposer d'une vue complète de la météorologie de Mars et de l'évolution historique de l'atmosphère de la planète. Par rapport aux missions martiennes existantes, l'orbite de EMM est relativement haute ; ce qui limite la résolution spatiale des mesures effectuées, mais elle permet à la sonde spatiale d'observer la même zone de Mars durant une dizaine d'heures ; ce qui présente l'avantage de pouvoir étudier les phénomènes météorologiques qui varient sur une courte durée tels que les mouvements des nuages, la sublimation du sol et, plus généralement, de fournir des données intéressantes sur la météorologie de Mars. Les objectifs de la mission sont :

- rechercher les corrélations entre la météorologie actuelle et le climat qu'a connu la planète dans son passé ;
- déterminer comment la météorologie modifie l'échappement atmosphérique de l'hydrogène et de l'oxygène en mesurant son influence sur les échanges entre les couches inférieure et supérieure de l'atmosphère martienne ;
- déterminer la structure et la variabilité de l'hydrogène et de l'oxygène dans la couche supérieure de l'atmosphère et déterminer les processus entraînant la perte de l'atmosphère de Mars dans l'espace ;
- observer les changements de l'atmosphère martienne au cours d'une journée et à travers les saisons.

Les objectifs de la mission viennent compléter ceux des orbiteurs martiens MAVEN (NASA) et ExoMars Trace Gas Orbiter (Agence spatiale européenne) déjà sur place. Au-delà des objectifs scientifiques, EMM constitue un symbole fort, car c'est la première mission spatiale lancée vers une autre planète par un pays arabe. Elle constitue un succès important pour les Émirats arabes unis dont le premier astronaute Hazza Al Mansouri a volé en 2019.

c) Sonde chinoise Tianwen-1

Tianwen 1 (chinois : 天问一号 ; pinyin : *tiānwèn yīhào* ; litt. « question au ciel 1 ») est la première sonde spatiale martienne de l'Administration spatiale nationale chinoise (CNSA), développée et construite par la Société de sciences et technologies aérospatiales de Chine (CASC), le principal industriel chinois du secteur spatial. La sonde consiste en un orbiteur, un atterrisseur et un astromobile (rover) qui doit explorer la surface de la planète. Après l'échec en 2011 de la mission russe Phobos-Grunt qui emportait le petit satellite chinois Yinghuo 1, il est finalement décidé de conduire la prochaine mission chinoise de façon indépendante. Les succès du programme d'exploration lunaire Chang'e, en particulier la réussite de la mise en œuvre du système d'atterrissage de Chang'e 3 et 4, permettent à la Chine d'entreprendre une mission ambitieuse. Le projet, qui constitue la première sonde interplanétaire de la Chine, est approuvé en 2016.

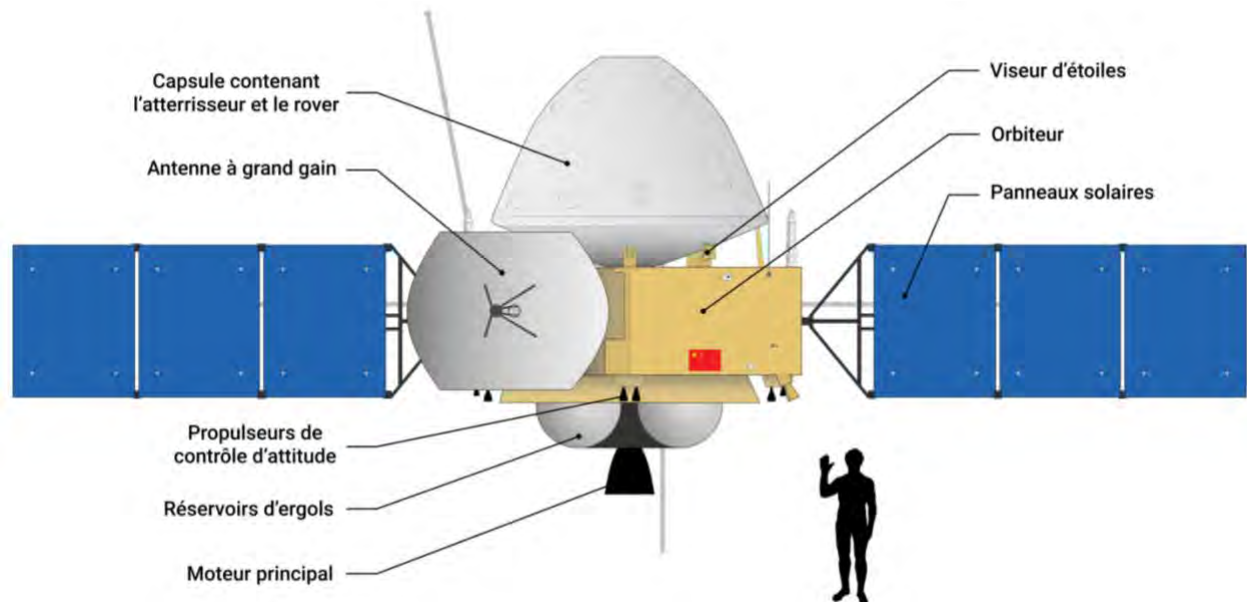


Schéma de la sonde Tianwen 1 avant le largage de la capsule.

L'engin spatial, **d'une masse totale de près de cinq tonnes**, est l'une des sondes les plus lourdes lancées vers Mars et emporte un total de treize instruments scientifiques. L'orbiteur qui doit recueillir des données sur Mars durant au moins 2 ans est chargé des manœuvres orbitales. Il est équipé de deux caméras de moyenne (MoRIC) et haute résolution (HiRIC), d'un radar à pénétration de sol (MOSIR), d'un spectromètre infrarouge (MMS), d'un magnétomètre (MOMAG) ainsi que de deux détecteurs de particules (MINPA et MEPA). L'astromobile de 240 kg doit circuler à la surface de Mars durant au moins 3 mois. Son équipement comprend une caméra stéréoscopique de navigation (NaTeCam), une caméra multispectrale (MSCam), un radar à pénétration de sol (RoSPR), un magnétomètre (RoMAG), un spectromètre imageur (MarsCoDe) et une station météorologique (MCS). Les objectifs scientifiques de la mission portent sur la géologie de Mars, la présence actuelle et passée d'eau, la structure interne de la planète, l'identification des minéraux et des différents types de roches à la surface, ainsi que la caractérisation de l'environnement spatial et de l'atmosphère de Mars.

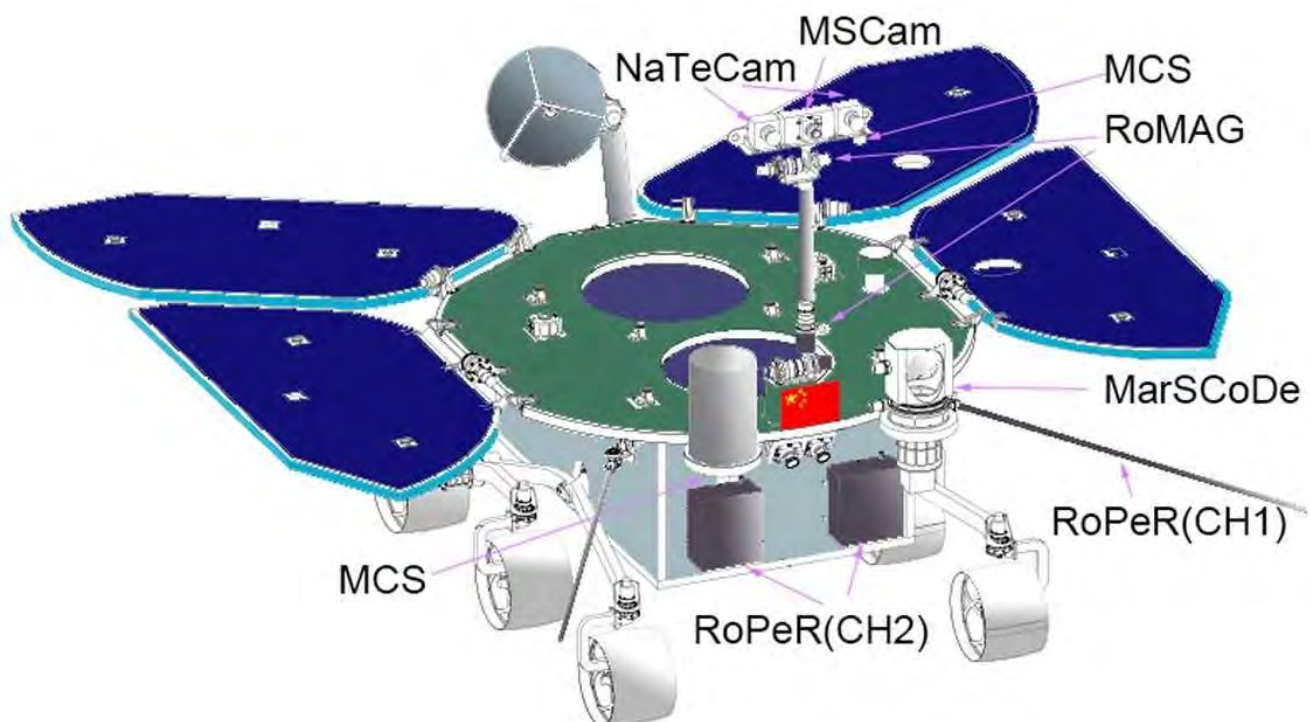


Schéma du rover Zhurong de Tianwen 1 en configuration déployée ainsi que de l'emplacement de ses instruments scientifiques.

La mission décolle avec succès le 23 juillet 2020 depuis le centre spatial de Wenchang situé sur l'île d'Hainan à bord du lanceur lourd Longue Marche 5, et après sept mois de transit elle s'insère en orbite autour de Mars le 10 février 2021. La sonde étudie durant trois mois le site d'atterrissage depuis une orbite de reconnaissance, puis le 15 mai 2021 l'atterrisseur se pose avec succès dans la région d'Utopia Planitia. Le 22 mai 2021, le rover Zhurong débarque de la plateforme d'atterrissage pour rejoindre la surface de Mars et entamer son périple d'exploration de la planète rouge.

La Chine devient la troisième puissance spatiale à parvenir à se poser sur Mars après l'Union Soviétique et les États-Unis, et la seconde à y opérer un rover, après les États-Unis. Le rover est conçu pour explorer la surface durant 90 jours martiens. L'orbiteur doit servir de relais de télécommunications pendant la mission primaire du rover, puis se placer dans une orbite plus propice aux observations tout en conservant son rôle de relais.

Phase de reconnaissance (10 février 2021 – mai/juin 2021)

Alors que la sonde spatiale était au plus proche de la planète, le 10 février 2021 à 11h52 UTC le moteur principal de l'orbiteur d'une poussée de 3 000 newtons a été mis à feu durant 15 minutes afin de ralentir la sonde et de la placer dans une orbite martienne très elliptique de $400 \times 180\,000$ kilomètres avec une inclinaison d'environ 10° qu'elle parcourt en 10 jours. Le 12 février à l'occasion du Nouvel An lunaire la CNSA publie deux vidéos filmées par des caméras de surveillance à bord de l'orbiteur durant l'insertion en orbite martienne. La sonde survolant Mars, plusieurs caractéristiques topographiques (volcans...) ainsi que la fine atmosphère de la planète sont visibles, de même que les panneaux solaires et l'antenne grand gain de l'orbiteur qui oscillent lors de l'allumage du moteur principal. Une fois à l'apoapside 5 jours après l'insertion en orbite martienne, la sonde réalise le 15 février à environ 9h00 UTC une nouvelle manœuvre pour se placer dans une orbite polaire, modifiant l'inclinaison orbitale de 10° à $86,9^\circ$. C'est une nouvelle fois le moteur principal de l'orbiteur qui est chargée de la manœuvre tandis que le périapside est en même temps abaissé de 265 km à $86,9^\circ$. Désormais dans son orbite de reconnaissance la sonde commence le 26 février ses observations scientifiques en mettant en service un à un ses instruments. La CNSA publie le 4 mars trois photos de Mars prises par les caméras à bord de l'orbiteur. L'une prise par MoRIC est en couleur et montre le pôle Nord de la planète, les deux autres ont été prises à une altitude comprise entre 330 et 350 kilomètres par HiRIC en mode panchromatique. Ces dernières atteignent une résolution de 0,7 mètre, on y distingue des cratères, des crêtes et des dunes de sable.

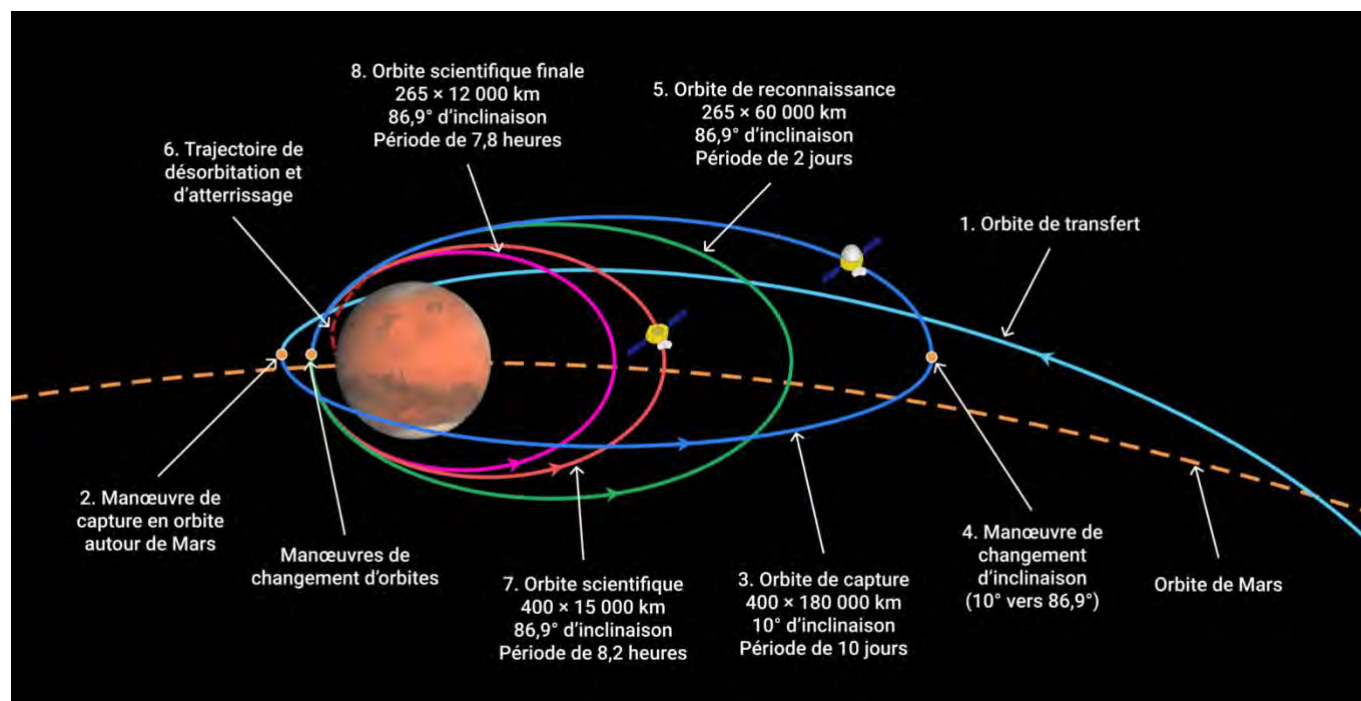


Schéma des différentes orbites parcourues par Tianwen 1 autour de Mars au cours de sa mission.

Atterrissage (15 mai 2021)

Afin d'atterrir sur Mars la sonde doit décélérer d'un total de 4,8 km/s. La précision de l'atterrissage limite l'incertitude à une ellipse de 100 kilomètres de long pour 20 kilomètres de large. Cette phase se décompose en quatre étapes :

- la rentrée atmosphérique qui commence à environ 125 kilomètres d'altitude,
- la descente sous parachute lorsque la vitesse a chuté sous Mach 2,
- le freinage final par rétropropulsion à partir de 1,5 kilomètre d'altitude à l'aide du moteur principal de l'atterrisseur,
- l'amortissement du choc avec le sol par les pieds de l'atterrisseur.

Comme l'illustre le tableau, ci-dessous, c'est la rentrée atmosphérique et le bouclier thermique qui freinent le plus l'atterrisseur au cours de sa descente.

Vitesse de l'atterrisseur au cours des 3 premières phases de descente

Phase \ Vitesse (Unité)	Vitesse initiale (m/s)	Vitesse finale (m/s)	Δv (%)
Rentrée atmosphérique	4 800	460	90,4
Descente sous parachute	460	95	7,6
Freinage final par rétropropulsion	95	3,6	1,9

Δv (%) par rapport à la vitesse orbitale initiale de 4,8 km/s.

Rentrée atmosphérique

L'orbiteur met à feu son moteur principal afin de placer la capsule contenant l'atterrisseur et l'astromobile dans sa trajectoire de rentrée. La séparation a lieu 5 heures avant l'atterrissage, lorsque la sonde se trouve non loin du périapside. L'orbiteur manœuvre ensuite pour se placer dans une orbite de $265 \times 15\,000$ kilomètres qu'il parcourt en 8,2 heures. Il sert alors de relai de télécommunication pour l'astromobile tout en poursuivant ses observations scientifiques. La rentrée atmosphérique de la capsule se fait selon une trajectoire balistique, c'est-à-dire qu'elle n'est pas pilotée. Elle commence à environ 125 km d'altitude, la trajectoire suivant un angle de $11,2^\circ$ (avec une tolérance de $\pm 0,2^\circ$) par rapport à la surface de Mars et durera 300 secondes. Durant la rentrée atmosphérique la vitesse diminue de 4,8 km/s à 460 m/s et chute de 90,4 % par rapport à la vitesse orbitale initiale.

Descente sous parachute

Le parachute d'un diamètre de 15,96 m est déployé une fois que la vitesse de la sonde sera inférieure à 460 m/s soit Mach 2. La sonde est alors à 10 km d'altitude au-dessus de la surface de Mars. L'éjection du parachute crée un choc proche de la fréquence fondamentale de la sonde, il s'agit du choc le plus violent subi durant la mission. Cette phase de la descente dure 90 secondes, la vitesse de l'atterrisseur diminuant de 460 m/s à 95 m/s, le parachute permettant de réduire la vitesse de 7,6 % par rapport à la vitesse orbitale initiale. Durant cette phase de la descente le bouclier thermique avant est éjecté, permettant à un télémètre laser d'évaluer la distance avec le sol et à un capteur à micro-onde de calculer la vitesse.

Freinage final par rétropropulsion

Lorsque la vitesse n'est plus que de 95 m/s et l'altitude de 1,5 km, l'atterrisseur se sépare du bouclier arrière et du parachute puis met à feu son moteur principal à poussée variable. Cette phase de la descente dure 90 secondes et ralentit la capsule de 95 m/s à 3,6 m/s, soit 1,9 % de la vitesse initiale de la sonde à sa rentrée dans l'atmosphère. L'atterrisseur stationne brièvement lors de sa descente à 100 m d'altitude au-dessus du sol afin d'analyser le terrain. Pour ce faire, il emploie un capteur laser chargé d'imager le sol en trois dimensions, ainsi qu'une caméra qui compare les images prises avec sa base de données pour éviter les obstacles et repérer un site d'atterrissage dégagé.

Atterrissage

L'impact final avec le sol est amorti à l'aide des 4 pieds de l'atterrisseur, ces derniers peuvent supporter une vitesse verticale de 3,6 m/s et horizontale de 0,9 m/s. L'atterrisseur se pose finalement avec succès dans la région d'Utopia Planitia, le 15 mai 2021 à 1h18 UTC, l'information prend 17 minutes à arriver sur Terre en raison des 320 millions de kilomètres la séparant de Mars au moment de l'atterrissage.

Déploiement et débarquement du rover (22 mai 2021)

Le rover déploie ensuite automatiquement son mât sur lequel sont installés les caméras de navigation, puis ses panneaux solaires et son antenne grand gain. Durant 3 jours martiens ou sols, le rover oriente son antenne grand gain de sorte à établir le lien de télécommunication afin de communiquer son statut. L'atterrisseur déploie deux rails qui servent de rampe au rover pour qu'il descende jusqu'à la surface. Le 19 mai 2021, l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA) publie pour la première fois des images montrant le sol martien et la préparation de la descente finale du rover Zhurong de l'atterrisseur vers le sol. Zhurong est encore perché sur la plate-forme de l'atterrisseur. Les photographies montrent les deux rampes de descente déjà mises en place et les panneaux solaires du rover déjà déployés. Le 22 mai 2021, le rover Zhurong emprunte les rampes de descente de la plate-forme d'atterrissage pour rejoindre la surface de Mars et commencer son périple sur le sol de la planète rouge. Les premières images renvoyées vers la Terre montrent l'atterrisseur seul sans le rover. Après 9 sols, le rover s'éloigne du site d'atterrissage, 15 sont nécessaires pour compléter le téléchargement initial des données.

Phase d'opération (15 mai 2021 -)

La mission primaire du rover à la surface de Mars doit durer 3 mois, durée pendant laquelle l'orbiteur lui sert de relais de télécommunications depuis son orbite de parking. L'orbiteur Mars Express de l'Agence spatiale européenne est également mis à contribution en tant que relais de soutien des données du rover. L'astromobile est équipée de 6 instruments scientifiques afin d'étudier son environnement dont une station météorologique, un radar qui sonde les couches souterraines de la surface, une caméra multispectrale ou encore un spectromètre laser. L'orbiteur est alors dans une orbite de $265 \times 15\,000$ kilomètres avec une inclinaison de $86,9^\circ$ et une périodicité de 8,2 heures. Après la phase d'opération primaire de 3 mois du rover, l'orbiteur modifie une dernière fois son orbite pour en abaisser l'apoapside à 12 000 km, ce qui diminue la période orbitale à 7,8 heures, afin de conduire des analyses plus poussées de la planète tout en maintenant son rôle de relai des données de l'astromobile. Il conduit tout au long de sa mission des relevés scientifiques à l'aide de 7 instruments, dont un magnétomètre, un spectromètre, un radar sondant la surface ou encore une caméra haute résolution aux capacités similaires à celle embarquée sur la sonde Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA.

Au sol

Antenne principale de la station de contrôle chinoise de Las Lajas en Argentine. Plusieurs stations au sol sont utilisées pour communiquer avec la mission. On trouve notamment une antenne parabolique de 50 mètres de diamètre à Pékin, quatre de 35 mètres à Kashi, une de 25 mètres à Ürümqi, une de 66 mètres à Jiamusi, une de 40 mètres à Kunming et deux antennes de 25 et 65 mètres à Shanghai. Une autre de 70 mètres de diamètre a été installée le 25 avril 2020 à Tianjin. L'Agence spatiale européenne apporte sa contribution durant les premières phases du lancement via son réseau de stations de contrôle ESTRACK, puis via ses antennes présentes à Cebreros (Espagne) et à New Norcia (Australie), qui permettront de localiser et de calculer avec précision la trajectoire de la sonde durant son trajet entre la Terre et Mars. Une station de contrôle chinoise avec une antenne de 35 mètres de diamètre est également installée à Las Lajas en Argentine, en collaboration avec l'agence spatiale argentine CONAE.



Antenne principale de la station de contrôle chinoise de Las Lajas en Argentine.



Lancement de Tianwen 1 à bord de la cinquième Longue Marche 5.

d) La mission Mars 2020 de la NASA

Mars 2020 est une mission spatiale qui consiste à déployer l'astromobile (rover) *Perseverance* sur le sol martien pour étudier sa surface et collecter des échantillons du sol. Cette mission d'exploration de la planète Mars est développée par le JPL, établissement de la NASA, l'agence spatiale américaine. Elle constitue la première d'une série de trois missions dont l'objectif final est de ramener ces échantillons sur Terre pour permettre leur analyse.

Les missions martiennes précédentes de la NASA ayant confirmé que l'eau liquide a coulé à la surface de la planète par le passé, les scientifiques en ont déduit que des organismes vivants ont pu se développer à cette époque. L'astromobile *Perseverance* doit rechercher des terrains ayant pu préserver des indices de cette vie passée. Le retour de ces échantillons sur Terre, une entreprise complexe, risquée et coûteuse, est considéré comme un projet prioritaire par la communauté scientifique.

Pour remplir ses objectifs, l'astromobile doit prélever une quarantaine de carottes de sol et de roches sur des sites sélectionnés à l'aide de ses instruments embarqués. Le résultat de ces prélèvements doit être déposé par l'astromobile sur des emplacements soigneusement repérés avant d'être ramenés sur Terre par une future mission étudiée conjointement par la NASA et l'Agence spatiale européenne. Selon le planning élaboré par les deux agences, le retour sur Terre est prévu pour 2031 sous réserve de son financement. Le but est de pouvoir effectuer sur Terre une analyse fine des échantillons du sol martien, notamment d'identifier d'éventuelles formes de vie anciennes. En effet, les capacités des instruments terrestres, contrairement à ceux embarqués sur les engins spatiaux, ne sont pas limitées par les contraintes de masse.

La sonde spatiale *Mars 2020* et l'astromobile *Perseverance* reprennent l'architecture de *Mars Science Laboratory* et de son rover *Curiosity* qui explore depuis 2012 la surface de Mars. *Perseverance* est un engin de plus d'une tonne qui dispose d'une palette d'instruments scientifiques (caméras, spectromètres de différents types) qui sont utilisés pour identifier les sites les plus intéressants, fournir le contexte du prélèvement effectué (caractéristiques géologiques, conditions climatiques à la formation) et effectuer une première analyse chimique : ce sont le spectromètre de fluorescence des rayons X PIXL, le spectromètre Raman SHERLOC, le spectromètre imageur SuperCam et la caméra Mastcam-Z. L'astromobile emporte également une station météorologique (MEDA) et un radar destiné à sonder les couches superficielles du sol martien (RIMFAX). Deux expériences doivent tester sur le terrain des technologies avant leur mise en œuvre de manière opérationnelle dans de prochaines missions : MOXIE produit de l'oxygène à partir de l'atmosphère martienne (ISRU) et MHS (*Ingenuity*), un petit hélicoptère de moins de deux kilogrammes, teste les capacités d'un engin aérien dans l'atmosphère très ténue de Mars.

Mars 2020 décolle le 30 juillet 2020 en profitant de la fenêtre de lancement vers Mars qui s'ouvre tous les 24 à 28 mois. L'astromobile atterrit le 18 février 2021 dans le cratère Jezero. Ce site, emplacement d'un ancien lac permanent qui conserve les traces de plusieurs deltas de rivière, a été retenu parce qu'il a pu constituer un lieu favorable à l'apparition de la vie et parce qu'il présente une grande diversité géologique. Le coût de la mission *Mars 2020* est estimé à 2,5 milliards de dollars en incluant le lancement et la conduite des opérations durant la mission primaire, qui doit durer deux années terrestres.

Déroulement de la mission

La sonde spatiale *Mars 2020* développée par la NASA et transportant l'astromobile martien *Perseverance* est lancée le 30 juillet 2020 par une fusée Atlas V. Après une longue phase de transit, elle pénètre dans l'atmosphère martienne à grande vitesse le 18 février 2021. Grâce à des techniques mises en œuvre pour la première fois, elle effectue un atterrissage de grande précision sur le terrain accidenté du cratère Jezero. Après une phase de recette au sol des équipements et des instruments scientifiques ainsi qu'une phase d'expérimentation du petit hélicoptère embarqué *Ingenuity*, l'astromobile se déplacera vers les sites sélectionnés par l'équipe scientifique. Durant sa mission primaire d'une durée de 18 mois, qui devrait être prolongée, il recueillera plusieurs carottes de sol sur différents sites choisis pour leurs caractéristiques géologiques.

Descente et atterrissage sur Mars

L'atterrissage sur Mars se décompose en cinq phases :

- l'approche,
- la rentrée atmosphérique pilotée qui fait tomber la vitesse à Mach 2 tout en corrigeant de manière active les écarts par rapport à la trajectoire idéale,
- la descente sous parachute lorsque la vitesse a chuté sous Mach 2,
- la descente propulsée à partir de 2 000 mètres d'altitude grâce à des moteurs chargés d'annuler la vitesse résiduelle,
- et la dépose par l'étage de descente (*Sky Crane*) fonctionnant à la manière d'un [hélicoptère-grue](#) de l'astromobile sur le sol martien.

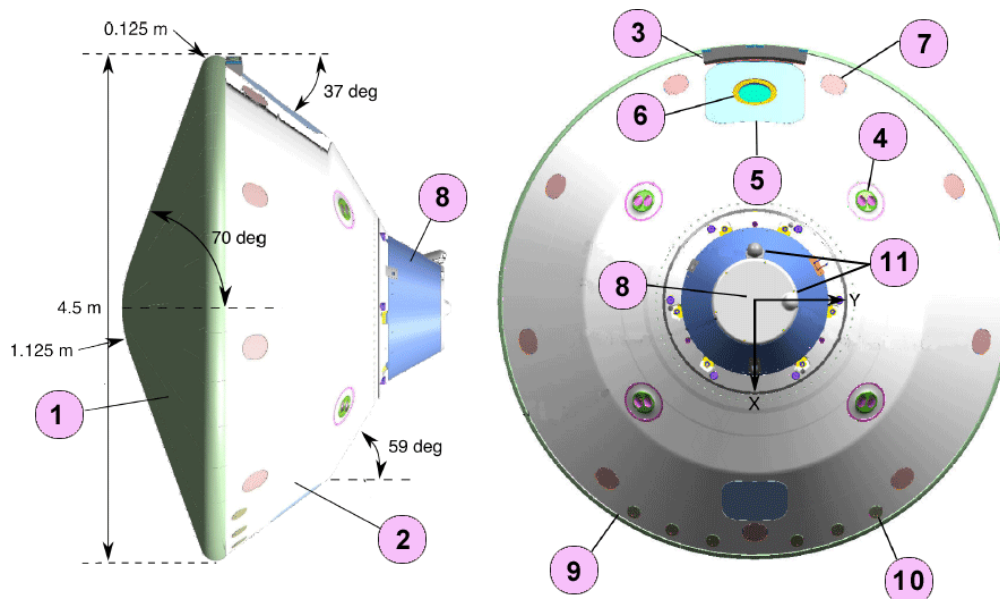
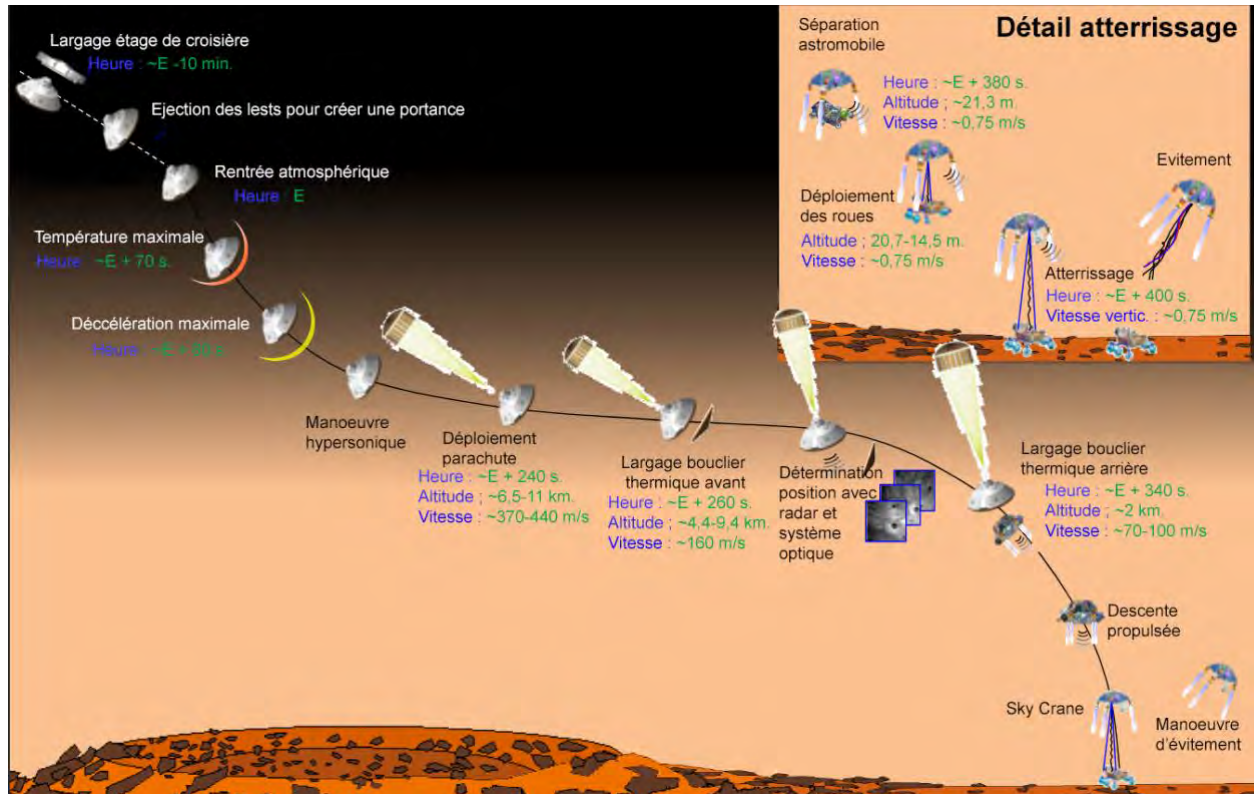


Schéma 2 : Véhicule de rentrée. 1 - Bouclier thermique avant 2 - Bouclier arrière 3 - Lests largués avant l'entrée atmosphérique (x2) 4 - Moteurs contrôle orientation (x4) 5 - Panneau d'accès (x2) 6 - Évent 7 - Système séparation du bouclier thermique (x9) 8 - Logement du parachute 9 - Joint entre les 2 boucliers 10 - Lests largués avant ouverture du parachute (x6) 11 - Radomes des 2 antennes à faible gain.

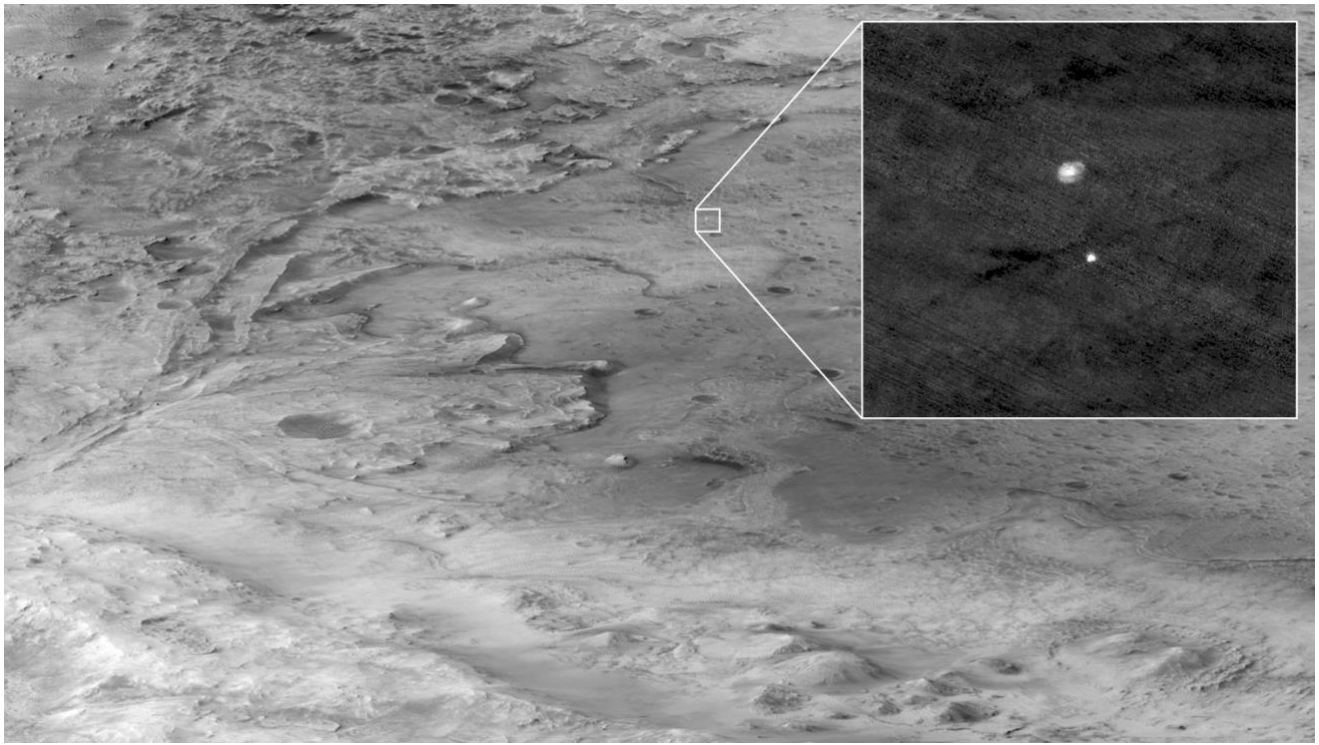


Photo de la sonde spatiale suspendue sous son parachute, prise par la caméra HIRISE de l'orbiteur de la NASA MRO à une distance de 700 kilomètres, alors que ce satellite martien défile à une vitesse de trois kilomètres par seconde. On distingue à gauche le delta qui doit être exploré par Perseverance.



Photo prise par le skycrane alors que celui-ci est en train de déposer Perseverance sur le sol martien.



La première photo de la surface de Mars en couleurs prise par Perseverance après l'atterrissage.

Opérations au sol

La mission primaire a une durée de deux années martiennes à compter de l'atterrissage (687 jours terrestres, un jour martien, ou sol, durant 24 heures 39 minutes terrestres) qui sera sans aucun doute prolongée car sa durée ne permet pas d'atteindre tous les objectifs. Le déroulement prévu des opérations comprend trois phases :

- vérification des systèmes et déploiement des équipements : durée de 60 jours martiens, soit environ 62 jours terrestres ;
- test de l'hélicoptère : durée de 30 jours martiens ;
- réalisation de la mission scientifique.

Phase I : vérification des systèmes et déploiement des équipements

La première phase après l'atterrissage, qui a eu lieu le 18 février 2021, consiste à réaliser le déploiement des équipements de l'astromobile qui étaient en position repliée pour les protéger, ou pour des raisons d'encombrement, puis à vérifier ces équipements ainsi que les instruments scientifiques. Cette phase doit durer 60 jours martiens (sols).

Durant les 30 premiers jours, tous les systèmes de l'astromobile et ses instruments seront vérifiés et leur fonctionnement sera testé. Les opérations suivantes sont prévues :

- prise d'images immédiatement après l'atterrissage une fois que la poussière est retombée ;
- déploiement du mât et de l'antenne grand gain ;
- images du site d'atterrissage et du pont supérieur de l'astromobile ;
- installation de mises à jour des logiciels installés dans les ordinateurs de l'astromobile ;
- vérification du fonctionnement des instruments scientifiques ;
- test de mobilité avec un déplacement d'environ cinq mètres ;
- déploiement du bras et vérification de sa mobilité ;
- éjection du couvercle protégeant le système de stockage d'échantillon durant l'atterrissage ;
- prise d'images des cibles d'étalonnage par les instruments PIXL et SHERLOC ;
- déploiement du bras qui sera utilisé pour manipuler les tubes devant contenir les carottes de sol et vérification de son fonctionnement.

Les 30 jours suivants sont réservés à des opérations principalement liées à la préparation des tests de l'hélicoptère *Ingenuity*. Parmi les activités prévues durant cette période figurent la recherche d'une zone propice au test de fonctionnement de l'hélicoptère et l'éjection du couvercle protégeant l'hélicoptère sous le châssis.

Phase II : mise en œuvre de l'hélicoptère expérimental

L'aérobot martien embarqué *Ingenuity* est fixé sous l'astromobile. Une fois ce dernier posé à la surface de Mars, l'hélicoptère est déployé puis déposé sur le sol. Après une phase de vérification d'une dizaine de jours, trente jours sont consacrés à tester ses capacités. À cet effet l'astromobile se place à une distance de sécurité (50 à 100 mètres) puis l'hélicoptère s'élève à la verticale jusqu'à une hauteur de trois mètres avant d'exécuter un vol stationnaire durant 30 secondes. Quatre autres vols de quelques centaines de mètres sont prévus. Leur durée peut atteindre 90 secondes. Le premier vol a lieu le 19 avril 2021. Une fois la phase d'expérimentation achevée, l'hélicoptère devait être abandonné sur place mais sa mission est prolongée à la suite des succès obtenus.

Phase III : Opérations en surface

La mission primaire débute une fois la période de mise en service achevée. Durant cette période, l'astromobile doit parvenir à prélever 20 carottes de sol. Il est prévu qu'il parcoure une quinzaine de kilomètres. Pour remplir ses objectifs l'astromobile se déplace afin de trouver des roches formées dans un milieu aqueux ou modifiées par l'action de l'eau et d'en prélever des échantillons. Les roches susceptibles d'avoir préservé des traces chimiques de la vie durant plusieurs milliards d'années sont particulièrement visées. D'autres échantillons sont prélevés sur des roches volcaniques ou d'une nature permettant d'identifier les changements intervenus sur l'environnement du site au cours du temps. Lorsqu'une roche a été sélectionnée, une carotte de celle-ci de 5 centimètres de profondeur est prélevée, broyée et un échantillon de 15 grammes est stocké dans un tube qui est scellé de manière hermétique. Le tube est stocké à bord de l'astromobile. L'équipe projet sur Terre définit le ou les sites dans lesquels les 43 tubes d'échantillons doivent être déposés. Les coordonnées des différents dépôts sont relevés par les orbiteurs martiens avec une précision d'environ 1 mètre.

Programmation des opérations

L'astromobile n'est que partiellement autonome et le déroulement des opérations doit être établi quotidiennement par les équipes de techniciens et de scientifiques sur Terre. Les échanges entre l'astromobile et la Terre doivent prendre en compte des contraintes importantes : la communication directe nécessite que la surface de Mars soit tournée vers la Terre, la communication via les orbiteurs suppose que le site d'atterrissage soit survolé par celui-ci. Enfin les périodes de jour sur Terre durant laquelle le support (techniciens et scientifiques) est actif ne coïncident pas avec les journées martiennes. Le déroulement des échanges est généralement le suivant :

- les opérations de l'astromobile débutent avec le lever du jour sur Mars ;
- le fichier des commandes à exécuter est transmis depuis la Terre directement à l'astromobile ;
- l'astromobile exécute les opérations programmées ;

- au cours de l'après-midi une partie des données collectées sont transmises à un des orbiteurs lors du survol du site d'atterrissage. Les données à transmettre sont déterminées par un ordre de priorité. Les données sont enregistrées par l'orbiteur puis transmises vers la Terre lorsque celle-ci est en vue ;
- lorsque la nuit tombe, l'astromobile peut continuer à réaliser certaines opérations mais il doit se mettre en veille au moins durant une partie de la nuit pour recharger ses batteries ;
- le matin, l'astromobile se réveille pour transmettre des données à un orbiteur.

Pour préparer les opérations du jour, l'équipe au sol doit commencer par analyser les données transmises la veille en fin de journée par l'astromobile. Grâce à celles-ci, elle s'assure que l'astromobile fonctionne normalement, étudie l'avancement et les résultats obtenus et programme les instructions du jour suivant en tenant compte des objectifs scientifiques fixés et des contraintes qui sont formulées par les ingénieurs. Les nouvelles instructions sont codées puis transmises directement à l'astromobile. Au début des opérations sur Mars, l'équipe au sol vit à l'heure martienne pour optimiser l'enchaînement des opérations : les données sont analysées et les nouvelles instructions sont transmises durant la nuit martienne. Ce mode de fonctionnement impose un décalage de 40 minutes des heures de veille du fait de la longueur du jour martien. Ce rythme épuisant n'est maintenu que durant les 90 premiers jours.

Contexte de la mission Mars 2020

Mars est la planète du Système solaire qui présente les caractéristiques les plus proches de celles de la Terre. Elle est pour cette raison la destination favorite des missions d'exploration du Système solaire depuis le début de l'ère spatiale. Les sondes spatiales lancées vers cette destination ont cherché à déterminer les principales caractéristiques physiques de la planète et à reconstituer son histoire. Menées principalement par l'agence spatiale américaine, la NASA, ces missions ont pu démontrer, au cours des vingt dernières années, la présence d'eau à la surface de Mars ainsi que, dans le passé, celle d'eau à l'état liquide. L'existence de molécules organiques, briques nécessaires à la formation de la vie, a été plus récemment prouvée à l'aide du mini-laboratoire de l'astromobile *Curiosity* de la mission Mars Science Laboratory (MSL). *Mars 2020* constitue la première des trois missions qui se sont donné pour but de ramener sur Terre des échantillons du sol martien. Il s'agit, grâce aux instruments puissants disponibles dans les laboratoires terrestres, de reconstituer de manière plus précise l'histoire de la planète et d'identifier d'éventuelles traces de vie passée par une analyse poussée à l'échelle moléculaire et atomique.

Mars, destination privilégiée de l'exploration spatiale

L'exploration de la planète Mars tient une place particulièrement importante dans les programmes scientifiques d'exploration spatiale du Système solaire. Mars constitue d'abord une destination proche, ce qui permet d'y envoyer relativement facilement des engins spatiaux. De plus, contrairement aux autres planètes du Système solaire et bien qu'elle soit aujourd'hui probablement stérile, Mars a sans aucun doute connu par le passé des conditions assez proches de celles régnant sur Terre qui ont pu, mais cela reste à confirmer, permettre l'apparition de la vie.

Sur le plan scientifique l'exploration de Mars répond à trois objectifs :

- comprendre la genèse de la planète et son évolution ;
- reconstituer l'histoire de son climat ;
- savoir si Mars peut abriter la vie ou si elle l'a abritée par le passé.

Les réponses à ces trois questions sont susceptibles de nous aider à comprendre notre propre planète.

Exploration de Mars par les missions robotiques

Pour des raisons à la fois de faisabilité technique et de coût, aucun projet d'exploration par un équipage d'astronautes n'a jusque dans les années 2010 été mis en œuvre. Aussi, depuis le début de l'ère spatiale, l'exploration de Mars est-elle confiée à des missions robotiques et elle le restera sans doute pour les vingt années qui suivent. Ces missions ont permis progressivement de mieux connaître cette planète sans pour autant apporter des réponses définitives aux principales interrogations scientifiques. Les engins spatiaux qui ont fait le plus progresser notre connaissance sont des orbiteurs (sondes spatiales placées en orbite autour de Mars) capables, grâce à des instruments d'une sophistication croissante, de collecter des données sur la surface de l'ensemble de la planète, son atmosphère ainsi que dans une certaine mesure son sous-sol.

Découverte de la stérilité de Mars

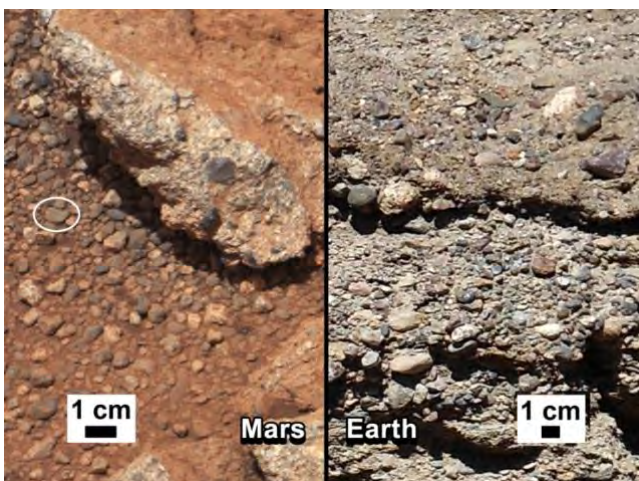
Des sondes spatiales ont été lancées vers Mars pratiquement dès le début de l'ère spatiale. La première à atteindre cette planète avec une instrumentation opérationnelle, *Mariner 4* (1965), réduit à néant les spéculations sur la présence d'une vie analogue à celle de la Terre en confirmant l'absence d'une atmosphère dense et donc d'eau liquide à la surface ainsi que l'absence de champ magnétique pouvant protéger les organismes vivants complexes des rayonnements solaires (ultraviolet) et galactiques (rayons cosmiques). Les sondes spatiales *Viking*, qui se posent à la surface de la planète en 1975, procèdent à des analyses d'échantillons du sol sans pouvoir découvrir d'indices d'une vie présente ou passée. Les instruments démontrent la nature très oxydante du sol martien, qui ne permet pas à des bactéries de se développer. Ces résultats décevants entraînent une pause de 20 ans dans le programme d'exploration mené quasi exclusivement par l'agence spatiale américaine, la NASA.

À la recherche de l'eau

La sonde spatiale Mars Global Surveyor de la NASA (1996) relance l'intérêt pour Mars en découvrant depuis son orbite des dépôts sédimentaires qui démontrent que Mars a connu une période chaude durant laquelle l'eau était liquide à sa surface. Les années 2000 sont des années très fructueuses. Les instruments de l'orbiteur européen Mars Express (2003) permettent de confirmer la présence de grandes quantités d'eau stockée sous forme de glace au niveau des calottes polaires, détectent la présence de traces de méthane d'apparition récente dans l'atmosphère de la planète dont l'origine pourrait être soit biologique soit volcanique, et enfin découvre des sédiments argileux qui n'ont pu apparaître qu'en présence d'eau restée liquide et faiblement acide sur de longues périodes donc propice à la vie. Mars Reconnaissance Orbiter (2006), doté de caméras particulièrement puissantes, affine toutes ces découvertes en effectuant un inventaire systématique des terrains reflétant la présence d'eau : plus de 100 000 dépôts sédimentaires (argiles, de carbonates) sont détectés toutefois ceux-ci ne représentent que 1% de la surface de Mars. L'orbiteur détecte également la présence d'eau à des latitudes relativement basses confirmant que l'atmosphère martienne conserve les traces d'un changement récent d'inclinaison de l'axe de la planète

Missions d'exploration de la surface

Les atterrisseurs (fixes) et les astromobiles, capables de circuler sur le sol, jouent un rôle de plus en plus important dans l'exploration de Mars à compter du début des années 2000 : leur principal rôle est de valider sur le terrain les déductions tirées des observations des orbiteurs. Les rovers MER (2003) de 174 kg sont les premiers à effectuer un travail de géologue avec toutefois une palette d'instruments limitée par les contraintes de poids. L'atterrisseur statique *Phoenix* (2008) aux ambitions relativement modestes se pose dans la région du pôle Nord martien. Il confirme la présence de glace d'eau à la surface de la planète mais découvre que le sol contient une proportion importante de perchlorates peu propice à la vie.



L'astromobile *Curiosity* a découvert (à gauche) des cailloux arrondis, comme ceux sur Terre (à droite), preuve de l'action passée d'un cours d'eau.



Anciens chenaux de rivières dans Nanedi Valles photographiés par l'orbiter Mars Express.

L'objectif principal de la NASA - la détection de la présence d'eau et de son action passée ou présente à la surface - étant désormais pratiquement atteint, la stratégie d'exploration se tourne vers la recherche de molécules prébiotiques indispensables à l'apparition de la vie ou de molécules produites par des formes de vie identifiables par leur signature isotopique. Cet objectif est confié à l'astromobile lourd *Curiosity* (environ une tonne) de la mission *Mars Science Laboratory* (MSL). Celui-ci est équipé de mini-laboratoires capables d'analyser à l'échelle atomique et moléculaire des échantillons de sol. Il se pose en 2012 dans le cratère Gale à proximité d'un dépôt argileux prometteur qu'il atteint en 2019. Les premiers résultats indiquent que le sol de Mars contient des molécules organiques complexes, un indice important, toutefois en très faibles quantités. Aucune biosignature, indice direct de présence de vie présente ou passée, n'est toutefois détectée mais ce résultat pourrait s'expliquer par l'action des rayons cosmiques qui dans la durée ont cassé les molécules complexes présentes dans les couches superficielles du sol. D'autres résultats, nécessitant des travaux complexes sur Terre, sont toujours attendus courant 2020.

Retour d'échantillons martiens sur Terre comme objectif

La communauté scientifique internationale considère depuis plusieurs décennies que seule une analyse d'échantillons de sol martien ramenés sur Terre peut permettre de trancher la question de la présence de la vie passée ou présente sur Mars²⁶. En effet, les indices d'une éventuelle vie martienne sont complexes à détecter, car se mesurés au niveau atomique ou moléculaires, et les instruments envoyés sur le sol martien sont limités par leur masse (quelques dizaines de kilogrammes). Les équipements disponibles sur Terre ont des capacités de mesure sans commune mesure. De plus, certaines analyses ne peuvent être automatisées et ne peuvent donc être effectuées par des robots envoyés à la surface de Mars. Enfin, une fois les échantillons de sol rapportés sur Terre, les analyses peuvent être recommencées avec plusieurs types d'instrument et bénéficier de futurs progrès des outils d'investigation.

Envisagée dès les années 1980, une mission ramenant des échantillons de sol martien a fait l'objet de dizaines d'études qui n'ont toutefois jamais abouti. Son coût (jusqu'à 10 milliards de dollars américains) la range dans la même catégorie que les missions spatiales les plus complexes menées jusque-là dans le système solaire et le risque est particulièrement important : enchaînement complexe d'opérations, premières technologiques (aller-retour Terre-Mars, atterrissage de très grande précision, décollage depuis le sol martien). Mais en 2013 la mission Mars Science Laboratory a levé une importante barrière en validant une technique d'atterrissage de précision ce qui permet d'envisager le passage à la phase suivante de l'exploration de Mars. Selon le scénario mis au point par la NASA pour ramener les échantillons sur Terre trois missions distinctes doivent être enchaînées : la première identifie les sites propices puis collecte et stocke les carottes du sol martien, la deuxième ramène les échantillons en orbite martienne et la dernière ramène ceux-ci sur Terre. *Mars 2020* est chargée de réaliser la première étape de cette mission.

Bilan de l'exploration : des questions toujours en suspens

Les données collectées par les différentes missions spatiales ont permis de reconstituer une grande partie l'histoire de Mars mais de nombreuses questions restent en suspens :

- Mars a connu une période chaude avec une atmosphère dense durant ses 500 premiers millions d'années d'existence. Mais, il y a 3,9 à 4 milliards d'années, le noyau métallique (fer et nickel) de la planète s'est tellement refroidi que les mouvements de convection au sein du métal liquide ont cessé. Le champ magnétique généré par cette dynamo naturelle a alors disparu. L'atmosphère, qui n'était plus protégée du vent solaire, s'est progressivement échappée dans l'espace en mettant fin à l'effet de serre et en entraînant un refroidissement progressif de la surface. Il y a 3,5 milliards d'années la surface de Mars est devenu le désert glacé actuel ;
- l'eau a coulé à la surface de Mars durant deux périodes distinctes de son histoire. Il y a environ 4,1 milliards d'années des fleuves relativement courts (quelques centaines de kilomètres) et larges (quelques kilomètres) ont laissé des traces sur les parties les plus anciennes de la surface sous forme de vallées ramifiées comme Nanedi Vallis. Certains indices donnent à penser que l'origine des eaux était souterraine. Ces écoulements ont duré entre quelques centaines et quelques milliers d'années. Le deuxième épisode aqueux se situe entre 3 et 3,7 milliards d'années. D'énormes écoulements (débits allant jusqu'à 1 km³/s soit des milliers de fois le débit du fleuve Amazone) se sont produits sur des périodes très brèves (quelques jours à quelques semaines) en creusant des vallées relativement rectilignes larges de 10 à 100 kilomètres

et dont la longueur peut atteindre 2 000 kilomètres. Ces vallées de débâcle auraient eu pour origine la fonte de la glace stockée dans le sous-sol provoquée notamment par des éruptions volcaniques ;

- le sous-sol de Mars conserve une épaisse couche de glace d'eau (jusqu'à 450 mètres d'épaisseur selon certaines estimations) enfouie plus ou moins profondément : celle-ci se situe à 150 mètres de profondeur au niveau de l'équateur et vient affleurer la surface au niveau des pôles ;
- des deltas de rivière et donc des lacs associés aux vallées ramifiées ont laissé leurs traces à la surface de Mars ce qui implique que l'eau a pu subsister à l'état liquide sur des périodes plus ou moins longues (la durée de ces lacs fait partie des questions qui font débat) faisant de ces sites, tel que le cratère Jezero site d'atterrissage de *Mars 2020*, des lieux propices à la formation de la vie. Des argiles hydratées datant de la période d'apparition des vallées ramifiées (4,1 milliards d'années) et des sulfates hydratés correspondant au deuxième épisode aqueux témoignent de l'action de l'eau à la surface de Mars ;
- aucune trace de vie présente n'a été détectée à la surface. Si elle subsiste c'est à de grandes profondeurs là où la pression et la température peuvent lui être favorables. La détection par les orbiteurs martiens, notamment ExoMars Trace Gas Orbiter, de traces de méthane très ténues et fluctuantes pourraient en être la manifestation mais beaucoup d'autres explications, basées sur des sources non biologiques, sont envisageables. En ce qui concerne les indices de vie passée, aucune donnée prouvant son existence n'a jusqu'à présent été découverte avec les instruments aux capacités limitées utilisés jusque-là à la surface de Mars.

Le prototype Ingenuity de la mission Mars 2020 (2021)

Les études d'aérobots plus lourds que l'air menés au JPL dans les années 2010 débouchent en 2018 sur le développement d'un projet concret. *Ingenuity* est un petit hélicoptère expérimental d'un peu moins de deux kilogrammes développé par le Jet Propulsion Laboratory qui doit être testé sur le sol de la planète Mars au cours de la mission Mars 2020 lancée le 30 juillet 2020 à bord d'une fusée Atlas V. L'engin, fixé au châssis de l'astromobile *Perseverance*, sera libéré une fois celui-ci arrivé sur le sol martien. Pour la première fois dans l'histoire de l'ère spatiale, un engin plus lourd que l'air effectuera un vol sur une autre planète. L'objectif est de tester les capacités d'un tel appareil dans le domaine de la reconnaissance optique du terrain dans cet environnement caractérisé par une atmosphère très ténue limitant la portance et des délais de communication qui interdisent tout contrôle direct du vol par un opérateur humain.

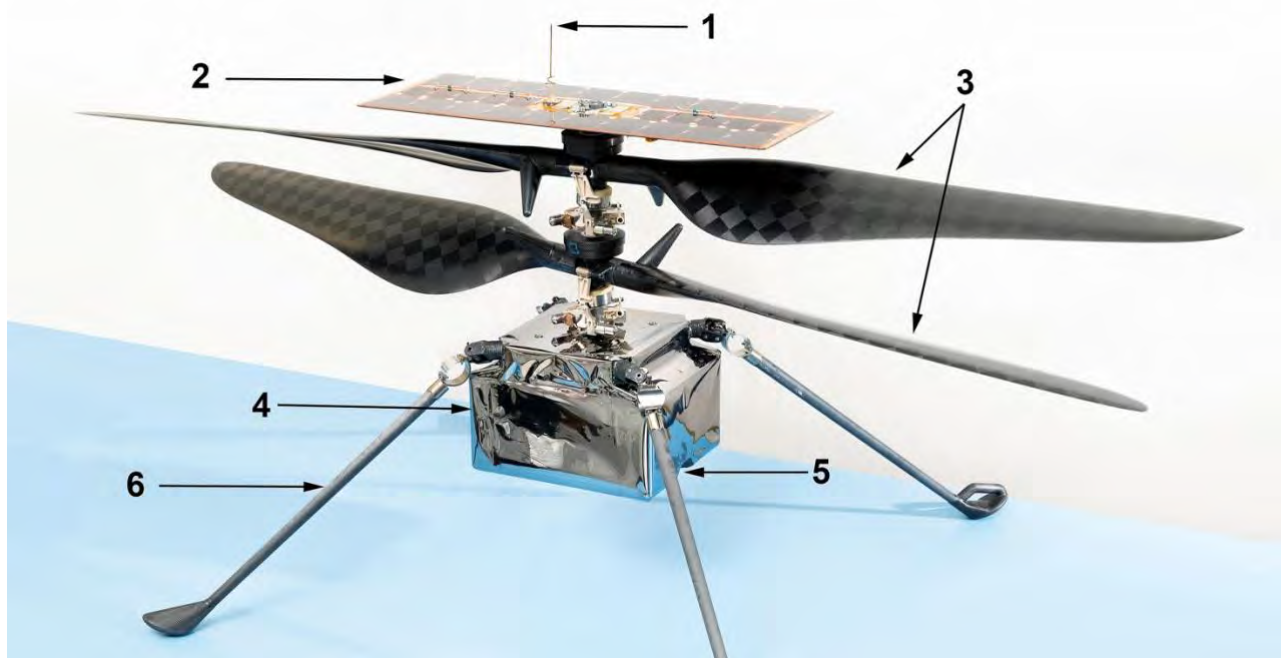


Schéma de l'hélicoptère martien Ingenuity. 1. Antenne de l'émetteur-récepteur radio bande UHF - 2. Cellules solaires fournissant l'énergie qui alimente la batterie - 3. Rotors conçus pour pouvoir voler dans l'atmosphère ténue de Mars - 4. Fuselage isolé thermiquement contenant principalement les batteries, l'avionique et les processeurs - 5. Caméra couleur haute résolution permettant de réaliser des photos des sites survolés - 6. Pieds du train d'atterrissage souples.

Architecture de l'aérobot

Le choix de la formule hélicoptère par opposition à celle du quadrirotor s'explique par la masse importante du rotor liée à sa grande taille pour les raisons vues plus haut. La stabilisation d'un quadrirotor est effectuée en agissant sur la vitesse de rotation des rotors mais la vitesse de modulation est fonction de la masse de ceux-ci (inertie). Dans le contexte martien, la stabilisation d'un quadrirotor devient problématique comme sur Terre à haute altitude. L'utilisation de rotors contrarotatifs coaxiaux permet de gagner en encombrement par rapport au recours à un rotor anticouple.

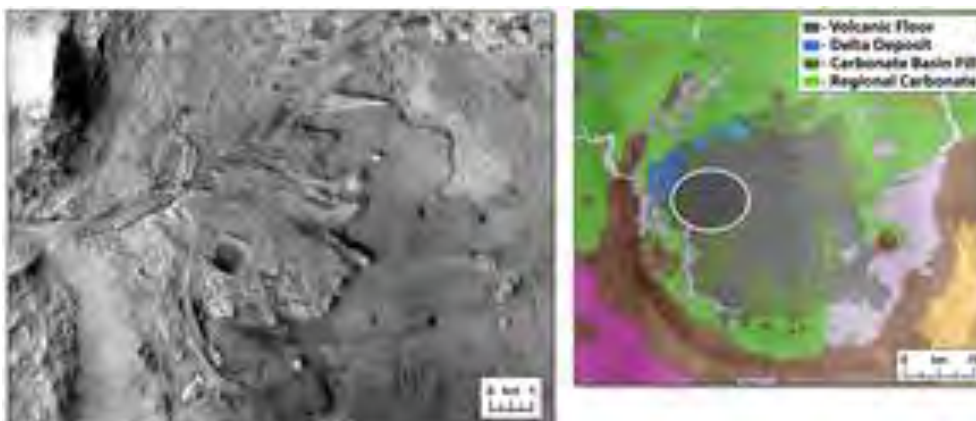
Pour parvenir à faire voler l'hélicoptère dans l'atmosphère de Mars, il fallait concevoir un engin suffisamment léger, ce qui n'a été rendu possible que récemment grâce aux avancées réalisées dans le domaine des accumulateurs (liées au développement des téléphones portables), des cellules photovoltaïques (rendement), des systèmes inertiels et des ordinateurs embarqués. Ainsi, il est conçu pour que sa masse ne dépasse pas 1,8 kg. (soit un poids de 6,69 newtons sur le sol martien).

La phase la plus délicate du vol de l'hélicoptère est l'atterrissage, du fait des turbulences qui peuvent déséquilibrer l'engin. La solution retenue est d'arrêter la propulsion à un mètre au-dessus du sol et de laisser l'hélicoptère atteindre le sol en chute libre. La vitesse verticale à l'atterrissage est en conséquence de plus d' 1 m s^{-1} . Le train d'atterrissage est conçu pour encaisser cette vitesse sur un sol qui peut présenter une pente importante.

Cratère Jezero

Mars 2020 doit explorer le cratère Jezero, autrefois emplacement d'un lac permanent et qui conserve les traces de plusieurs deltas de rivière. Le site est sélectionné par la communauté scientifique parmi soixante candidats. Le cratère (18.4°N , 77.7°E [archive]) est situé dans la région de Nili Fossae. Il se trouve, comme le cratère Gale exploré par l'astromobile *Curiosity*, à la limite qui sépare la plaine qui recouvre l'hémisphère nord de la planète et les plateaux élevés et souvent accidentés recouvrant l'hémisphère sud. Le cratère Jezero se situe sur la bordure nord-ouest du bassin Isidis Planitia dernier épisode sur Mars du grand bombardement et qui remonte à plus de 3,9 milliards d'années. Le choc de l'impact est à l'origine du réseau de failles Nili Fossae situé à l'ouest du cratère Jezero. Ce dernier est formé par un impact postérieur. Par la suite deux réseaux de rivières alimentées par des précipitations neigeuses drainent la région en déversant leurs eaux dans le cratère Jezero. Un lac d'une profondeur d'au moins 250 mètres est alors formé dans le cratère. Une brèche dans la bordure nord-est du cratère a permis aux eaux de s'écouler vers l'extérieur⁶⁹. Le cône de déjection est visible sur Google Maps.

Selon les observations effectuées par les instruments de l'orbiteur *Mars Reconnaissance Orbiter*, les terrains situés dans ce cratère de 45 kilomètres de diamètre comportent cinq différents types de roches dont des argiles et des carbonates. Le site, très prometteur du fait de cette diversité géologique, constitue un terrain d'atterrissage difficile car on y trouve à l'est de nombreux rochers, des falaises à l'ouest et des dépressions remplies de dunes de sable à différents emplacements. Mais les améliorations apportées par la NASA dans les techniques de guidage durant la descente de l'astromobile vers le sol, se traduisent par une réduction de la taille de l'ellipse d'atterrissage de 50 % par rapport à la mission de *Curiosity* en 2012 et permettent désormais d'accéder à ce type de site.



Le cratère Jezero est le site d'atterrissage le mieux classé par les scientifiques.



Depuis l'endroit de son atterrissage dans le cratère Jezero, voici le panoramique de la NASA, fait par le rover Perseverance sur Mars, réalisé via une succession de photos sur 360 degrés a été modifié et adapté par Philippe, l'un de nos membres, pour en faire un panorama interactif : on peut se déplacer de droite à gauche (avec les flèches ou bien en gardant appuyé le clic de la souris et en se déplaçant), enclencher une rotation latérale et l'on peut également zoomer dans l'image (roulette souris ou bouton zoom + ou -).

Pour voir le panoramique interactif : <https://gout-nature.fr/SITES/GAP47/Nasa-Mission-Mars-2021/>

4) Les missions en développement

ExoMars

Le **programme ExoMars** regroupe deux missions spatiales à destination de la planète Mars développées par l'Agence spatiale européenne (ESA) avec une participation importante de l'agence spatiale russe Roscosmos : l'orbiteur *ExoMars Trace Gas Orbiter* (TGO) et son atterrisseur *Schiaparelli*, lancés le 14 mars 2016, et l'astromobile *Rosalind Franklin*, dont le lancement, initialement planifié pour mai 2018, n'est actuellement pas prévu avant 2026. L'objectif scientifique du programme est l'étude de l'atmosphère de Mars, en particulier la détermination de l'origine du méthane trouvé à l'état de trace ainsi que la recherche d'indices d'une vie passée ou présente sur la planète. Sur le plan technique, le programme doit permettre à l'agence spatiale de développer pour la première fois un atterrisseur et un *rover* martien et d'expérimenter les techniques d'aérofreinage et d'atterrissage.

Le programme a une genèse complexe du fait de son coût très important (1,2 milliard € en 2012) rapporté au budget scientifique de l'ESA et de la nécessité de disposer des connaissances techniques pointues (atterrissage sur Mars) maîtrisées jusque-là uniquement par la NASA. Au début des années 2000, l'ESA étudie dans le cadre du programme *Aurora* l'envoi à la surface de Mars d'un astromobile automatisé équipé d'instruments de mesures scientifiques avec pour objectif de déterminer si la planète abrite ou a abrité une vie biologique. En 2008, le projet a évolué et comprend un atterrisseur, un orbiteur et un rover. Fin 2009, le programme est refondu dans le cadre d'un partenariat mis en place avec la NASA qui prévoit la réalisation de quatre engins spatiaux : en 2016 devaient être lancés un orbiteur, *ExoMars Trace Gas Orbiter* (TGO), chargé de détecter l'origine du méthane et d'autres gaz présents dans l'atmosphère martienne et de servir de relais pour les communications ainsi qu'un atterrisseur Schiaparelli devant démontrer la capacité européenne à faire atterrir un engin sur Mars : un deuxième lancement en 2018 devait envoyer vers Mars l'astromobile européen d'ExoMars et un rover de la NASA, MAX-C. Dans ce scénario, la NASA fournissait les lanceurs, la majorité des instruments de TGO (*Trace Gas Orbiter*) et le véhicule de rentrée et de descente embarquant les astromobiles. En 2011-2012, les difficultés financières de la NASA entraînent la réduction puis l'annulation de sa participation. L'ESA sollicite alors l'agence spatiale russe Roscosmos, qui devient

officiellement en mars 2012 le nouveau partenaire du programme. Dans le nouveau scénario, Roscosmos fournit deux lanceurs Proton, une partie de l'instrumentation scientifique de l'orbiteur *ExoMars TGO* ainsi que le véhicule de rentrée et de descente utilisé par le rover européen qui doit être lancé en 2022. En 2019, l'astromobile est baptisé Rosalind Franklin en l'honneur de la physico-chimiste à l'origine de la compréhension de la structure de l'ADN.

Le 17 mars 2022, l'Agence spatiale européenne (ESA) a suspendu la mission jusqu'à nouvel ordre en raison de l'invasion de l'Ukraine par la Russie.

Historique

Au début des années 2000, un projet de *rover* martien européen *ExoMars* est mis à l'étude. Ce projet ambitieux est repoussé à plusieurs reprises car il nécessite à la fois des moyens financiers importants et la maîtrise des techniques d'atterrissage sur Mars. Il est inscrit en 2005 comme mission majeure (*flagship mission*) du programme *Aurora* et le conseil de l'Agence spatiale européenne (ESA) s'engage à lui consacrer 690 millions €. En 2008, le projet est refondu : il comprend désormais, en plus du *rover*, un atterrisseur qui doit permettre de valider les techniques d'arrivée sur le sol martien et un orbiteur chargé notamment de relayer les communications entre le sol martien et la Terre. Les gouvernements des pays membres de l'ESA s'engagent sur un budget de 850 millions €. Celui-ci ne couvre toutefois pas les coûts qui sont estimés à 1 milliard €. En octobre 2009, la NASA et l'Agence spatiale européenne associent leurs projets respectifs d'exploration de la planète Mars dans le cadre de l'Initiative conjointe d'exploration de Mars : le *rover* américain MAX-C s'ajoute aux trois engins spatiaux précédents. Les robots doivent être lancés par des fusées Atlas fournies par la NASA en deux temps : 2016 pour l'orbiteur *ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)* et l'atterrisseur *ExoMars EDM (Entry, Descent and Landing Demonstrator Module)*, 2018 pour le *rover* européen *ExoMars* et MAX-C (*Mars Astrobiology Explorer-Cacher*). Par ailleurs, l'agence spatiale américaine fournit la majorité des instruments scientifiques de l'orbiteur.

Mais en 2011, la NASA subit à la fois des restrictions budgétaires liées à la crise économique en cours et un énorme dépassement de budget de son projet de télescope spatial *James-Webb*. Pour faire face à ses problèmes de financement, l'agence spatiale américaine se dégage d'abord en partie du programme *ExoMars* avant d'abandonner complètement sa participation. L'ESA ne peut supporter seule le coût du programme et elle fait appel à l'agence spatiale russe Roscosmos qui vient de subir l'échec de sa sonde spatiale martienne *Phobos-Grunt*. En mars 2012, l'ESA officialise son partenariat avec Roscosmos. Les termes de l'accord prévoient que l'agence spatiale russe fournit des fusées Proton pour les lancements de 2016 et 2018. Les instruments scientifiques russes remplacent les instruments américains à bord de l'orbiteur *ExoMars TGO*. Enfin, la Russie fournit le véhicule de rentrée et de descente qui doit amener le *rover ExoMars* sur le sol martien en 2018. Le *rover* américain MAX-C n'a pas d'équivalent dans ce nouveau scénario. Le financement du projet, qui atteint environ 1,2 milliard €, doit être bouclé en novembre 2012. En mai 2016, les équipes européennes et russes constatent qu'elles ne sont pas prêtes. Le lancement est alors repoussé à la fenêtre de lancement suivante, en juillet 2020. Un nouveau report a lieu à cette date, notamment en raison du manque de fiabilité du système de déploiement des parachutes de d'équipements électroniques à bord du module de descente russe, la prochaine fenêtre s'ouvrant en 2022. Néanmoins, l'ESA et Roscosmos, dans un communiqué de presse commun, ne considèrent pas les parachutes comme une des causes du report en 2022.

Le 17 mars 2022, la mission est suspendue du fait de l'arrêt de la coopération entre l'ESA et l'agence spatiale russe Roscosmos, en conséquence de l'invasion russe en Ukraine puis définitivement interrompue en juillet 2022.

Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques du programme sont :

- rechercher des indices d'une vie biologique présente ou passée sur la planète Mars ;
- étudier comment l'environnement géochimique de Mars varie ;
- détecter les gaz présents à l'état de trace dans l'atmosphère martienne et identifier leur origine.

Objectifs technologiques

Les engins développés dans le cadre du programme *ExoMars* doivent permettre la mise en œuvre de techniques utilisées pour la première fois par l'Agence spatiale européenne :

- atterrissage d'une charge lourde sur le sol de Mars ;
- mise en œuvre d'un robot mobile (rover) à la surface d'une autre planète ;
- prélèvement d'une carotte du sol d'une autre planète à l'aide d'un engin de forage ;
- acquisition, préparation, distribution et analyse d'un échantillon de sol d'une autre planète in situ.

Engins spatiaux du programme *ExoMars*

Le programme *ExoMars* comprend trois engins spatiaux qui devaient être lancés vers la planète Mars dans le cadre de deux missions : *ExoMars 2016* lancée en mars 2016 et *ExoMars 2022* qui aurait dû être lancée en 2022.

ExoMars 2016 - Orbiteur *ExoMars Trace Gas Orbiter*

ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) est un orbiteur placé sous la responsabilité de l'ESA qui remplit d'une part une mission scientifique et d'autre part joue un rôle essentiel pour les autres missions du programme en servant de relais pour les télécommunications entre les engins déposés au sol et la Terre. Sa mission scientifique consiste à identifier l'origine du méthane et d'autres gaz rares présents dans l'atmosphère martienne. Les précédentes missions martiennes ont détecté que du méthane était présent dans l'atmosphère avec des concentrations variant dans le temps et selon le lieu. Le méthane est un gaz dont la durée de vie est brève à l'échelle géologique et sa présence nécessite une source active qui pourrait être biologique. Le satellite dispose d'une antenne parabolique grand gain de 2,2 mètres de diamètre orientable avec deux degrés de liberté pour retransmettre en bande X les données scientifiques vers la Terre. Le tube à ondes progressives utilisé a une puissance de 65 watts. Les échanges avec les engins situés sur le sol de Mars se font en bande UHF via une antenne hélice axiale. La charge utile embarquée, d'une masse évaluée à environ 135 kg est composée de plusieurs instruments scientifiques. L'orbiteur a été lancé le 14 mars 2016 avec *ExoMars EDM* (*Entry, Descent and Landing Demonstrator Module*). L'orbiteur est parfaitement mis en orbite autour de la planète Mars le 19 octobre 2016.

Atterrisseur expérimental *Schiaparelli*

Schiaparelli est un atterrisseur expérimental de 577 kg (*Phoenix* en faisait 670 kg, *Viking* 600 kg) développé par l'ESA qui doit se poser en 2016 sur la planète Mars. *ExoMars EDM* doit permettre de valider les techniques de rentrée atmosphérique et d'atterrissage qui seront mises en œuvre par de futures missions martiennes européennes. Il comporte un véhicule de rentrée chargé de protéger l'engin spatial de la chaleur générée par la rentrée atmosphérique, d'un parachute déployé alors que la vitesse de l'engin est tombée à Mach 2 et de moteurs-fusées à ergols liquides (hydrazine) chargées de déposer en douceur l'atterrisseur. Durant sa descente vers le sol martien, il retransmet les paramètres de vol pour permettre l'analyse de son fonctionnement. Sur le sol martien, sa durée de vie est limitée car l'énergie est fournie par des batteries qui ne sont pas rechargées. Il emporte une petite charge utile. Il est lancé avec TGO en 2016. Le module EDM a été largué par l'orbiteur TGO le 16 octobre à 14 h 42 TU. Le 19 octobre, la télémétrie est perdue durant la séquence d'atterrissage automatique. L'analyse révèle que le bouclier thermique a correctement réalisé sa fonction de freinage aérodynamique. Le parachute s'est ensuite correctement déployé, mais les dynamiques induites ont brièvement saturé la centrale inertielle avec pour effet une erreur d'estimation d'attitude de *Schiaparelli* par l'ordinateur de bord et subséquemment une erreur d'estimation d'altitude des données du radar Doppler, entraînant l'éjection prématurée du parachute et le fonctionnement des 3 × 3 rétrofusées pendant seulement quelques secondes à 3,7 km au-dessus du sol. En conséquence, *Schiaparelli* a effectué une chute libre de trois à quatre kilomètres de hauteur dans l'atmosphère martienne, avant de venir percuter le sol à la vitesse substantielle de plus de 300 kilomètres par heure. Le 20 octobre, le parachute de 12 mètres de diamètre est photographié, étendu à la surface de la planète rouge. Le cliché provient du satellite *Mars Reconnaissance Orbiter* de la NASA qui opère en orbite et a été spécialement programmé. Un kilomètre plus au nord dans cette même région (de coordonnées 353,79 degrés de longitude est et 2,07 degrés de latitude sud), une tache noire de 15 × 40 mètres est visible. Il s'agit de la trace laissée par l'impact du module d'atterrissage, de sable, de poussières et débris de roches expulsés. Le carburant résiduel présent à bord de la sonde a également pu exploser.

ExoMars 2022

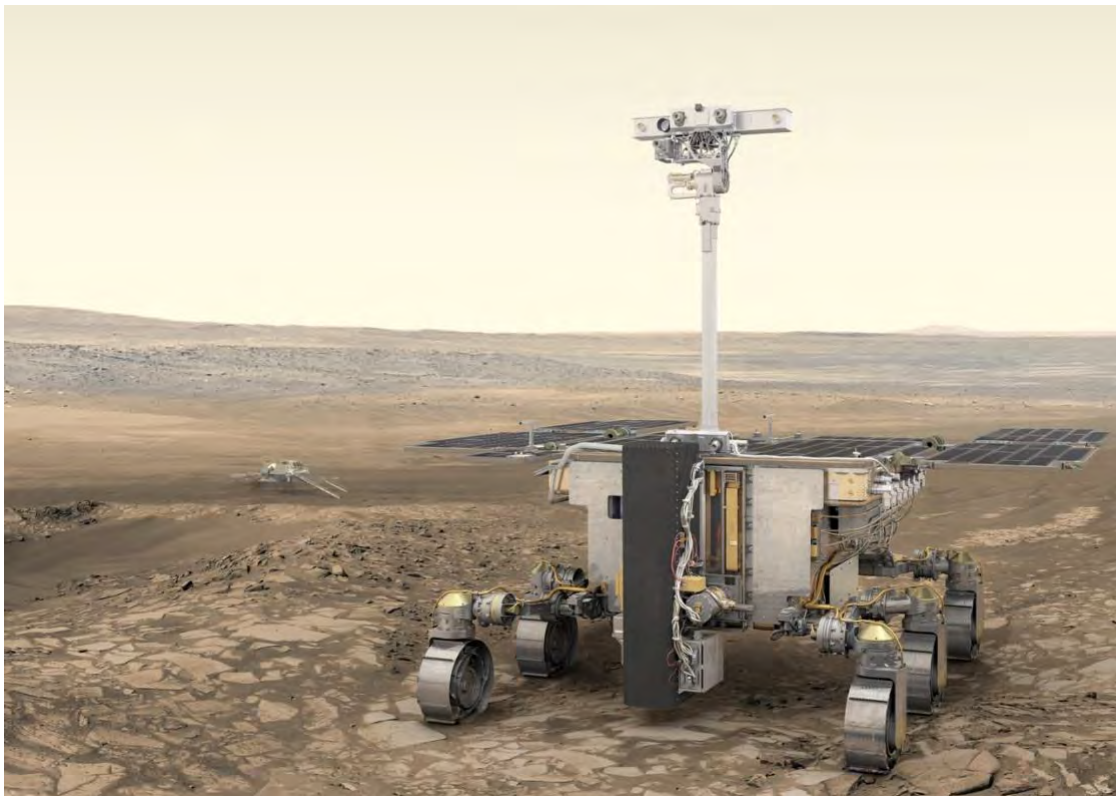
Initialement nommée *ExoMars 2018* puis *ExoMars 2020*, la mission *ExoMars 2022* devait être lancée en 2022 car la sonde n'était techniquement pas prête pour les précédentes fenêtres de lancement, qui n'ont lieu que tous les 26 mois. Le site d'atterrissage, choisi en novembre 2018 (à l'aide notamment des observations du spectromètre OMEGA, à bord de la sonde européenne *Mars Express*) sera Oxia Planum, près de l'équateur. Par suite des sanctions contre la Russie, l'Agence spatiale européenne fait savoir le 17 mars 2022 à Roscosmos qu'elle suspend sa collaboration concernant cette mission. Au mieux, le directeur de l'ASE estime qu'elle pourrait avoir lieu en 2026.

Module d'atterrissage

La Russie, à travers un partenariat avec Roscosmos, fournit le module de descente et d'atterrissage de l'astromobile *ExoMars*. Cette plateforme d'atterrissage, dont descendra l'appareil une fois qu'elle sera posée sur Mars, est baptisée *Kazatchok (en)* (en russe : Казачок, « petit cosaque » et aussi une danse traditionnelle cosaque). Elle doit, après avoir déposé le rover, fonctionner comme sonde spatiale fixe, étant équipée de ses propres instruments. Cette plateforme a quitté les installations de Lavotchkine le 19 mars 2019 pour Turin (Italie) pour l'assemblage final et des tests chez Thales Alenia Space, le tout en collaboration avec l'Agence spatiale européenne.

Astromobile ExoMars

Le rover *ExoMars* est un astromobile de 300 kg développé par l'Agence spatiale européenne qui emporte une foreuse capable de ramener une carotte prélevée jusqu'à 2 mètres de profondeur, au maximum, et un laboratoire capable d'analyser l'échantillon et d'identifier des marqueurs biochimiques. Le rover embarque également des instruments pour identifier la présence d'eau ou de matériaux hydratés, des caméras et des spectromètres. Le véhicule de rentrée et de descente jusqu'au sol martien est fourni par Roscosmos. Le rover *Exomars* devait être lancé en 2020. Le 7 février 2019, l'ESA officialise son nom. Il s'appelle désormais *Rosalind Franklin* en l'honneur de cette physico-chimiste britannique qui a œuvré à la découverte de la structure de l'ADN. Un quatrième engin, le rover *MAX-C* de la NASA, a été annulé à la suite de l'abandon de la participation de l'agence spatiale américaine en 2011. Il devait rechercher des indices de la vie, prélever des carottes dans le sous-sol martien et les stocker pour une future mission de retour d'échantillons sur Terre qui restait à définir.

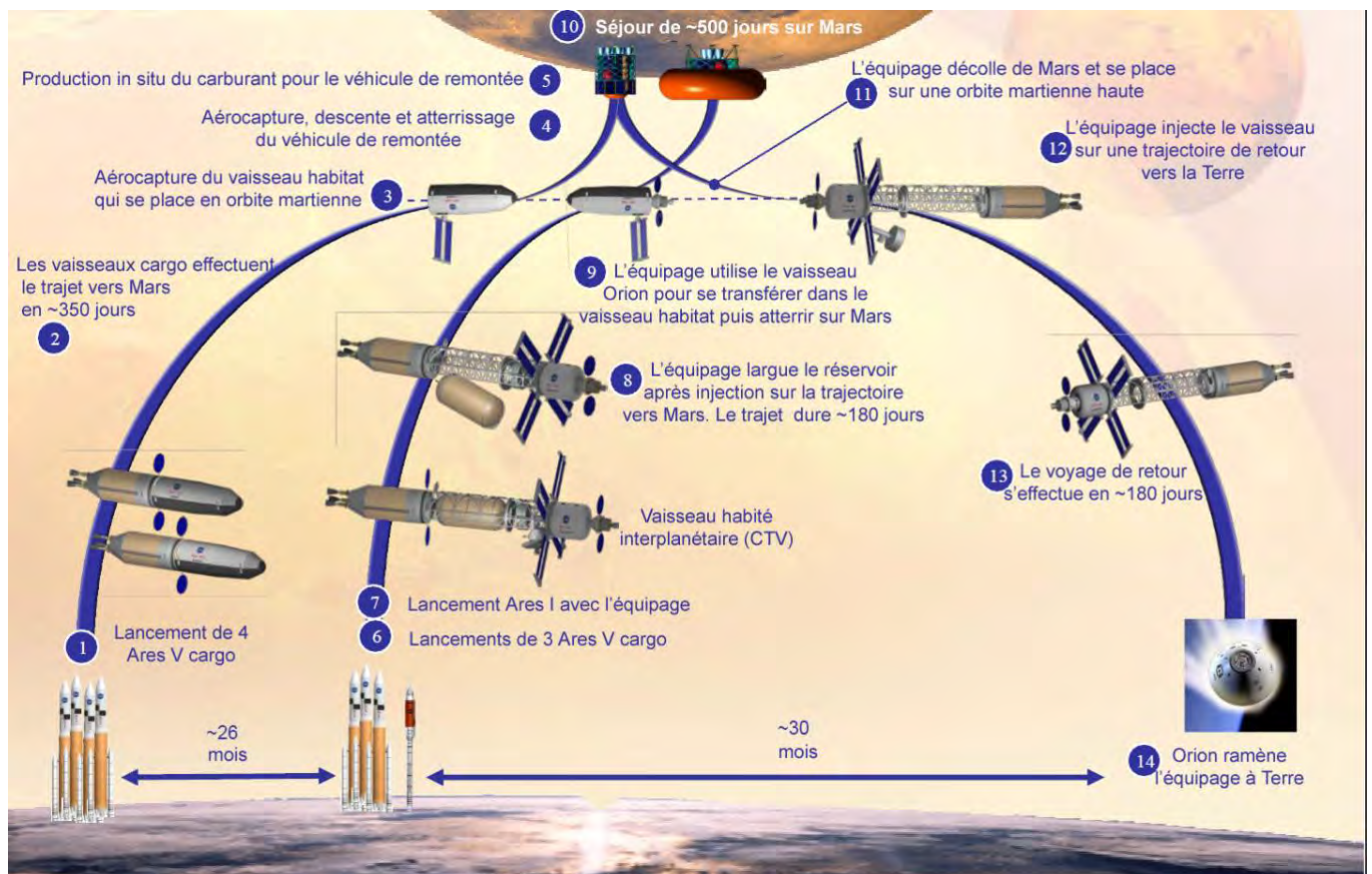


Le Rover Rosalind Franklin

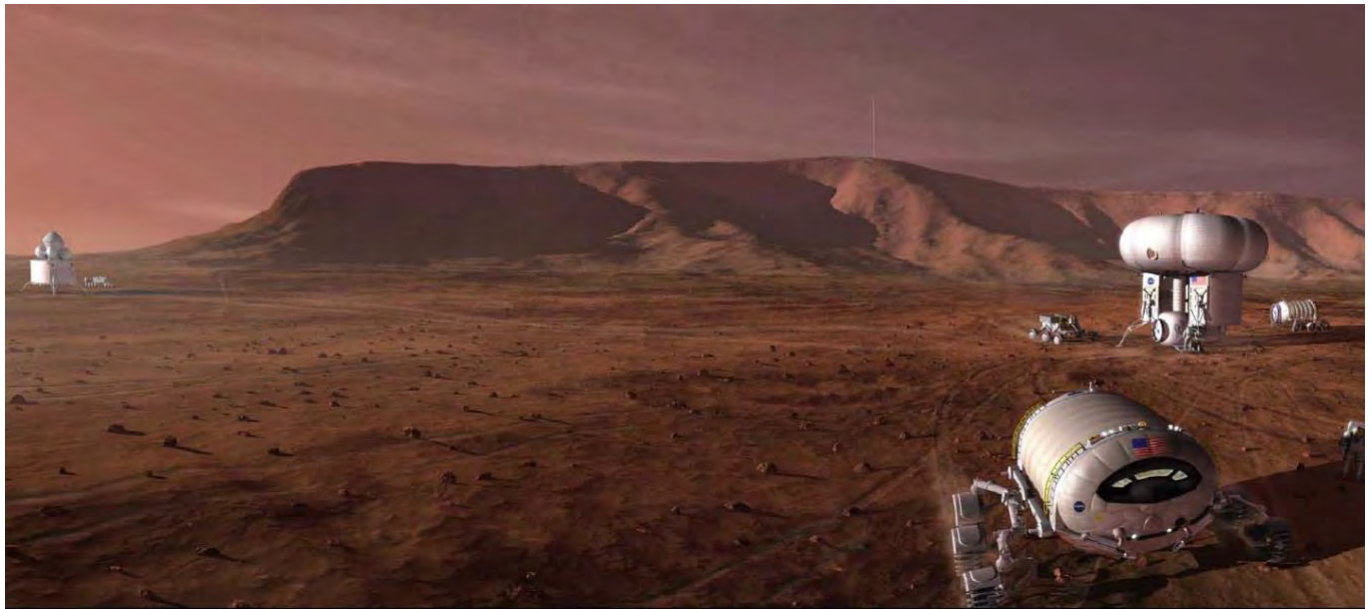
10) Les projets de missions habitées

Certaines sondes spatiales incluent dans leurs objectifs la préparation d'éventuelles missions habitées vers Mars notamment à travers la mesure de l'environnement radiatif sur le trajet vers Mars et en surface. Mais une mission habitée vers Mars, au-delà de son coût gigantesque qui nécessitera un appui politique sans faille et de longue durée, constitue un défi technique et humain sans commune mesure avec le programme Apollo qui avait mobilisé à son époque des moyens sans précédents :

- Taille des vaisseaux nécessitant la réalisation de lanceurs géants et sans doute une avancée majeure dans le domaine de la propulsion
- Mise au point de techniques d'atterrissage permettant de faire atterrir avec une extrême précision (quelques mètres) des masses de plusieurs dizaines de tonnes. En 2012 la précision obtenue avec les techniques les plus élaborées est d'environ 10 km et la masse maximale pouvant être posée est de 1 tonne.
- Système de support-vie fonctionnant en circuit fermé sur de longues durées (au minimum 640 jours avec un séjour très court sur le sol martien),
- Fiabilité des équipements qui ne peuvent être réparés ou dont la redondance ne peut être systématiquement assurée
- Gestion des problèmes psychologiques d'un équipage confiné dans un espace restreint dans un contexte particulièrement stressant : pas de retour possible avant la date programmée en cas d'accident, niveau de risque élevé.
- Problèmes physiologiques découlant de l'absence de gravité sur des périodes prolongées ainsi que l'effet des rayonnements cosmique et des éruptions solaires.



Le scénario de référence de la NASA (2009) pour une mission vers Mars (2009) : scénario de conjonction, 7 fusées Ares V et 1 Ares I, propulsion nucléaire, fabrication de carburant sur place, pré positionnement de vaisseaux



Véhicule pressurisé, habitat et vaisseau de retour (scénario NASA)

Historique

Wernher von Braun est le premier à faire une étude technique détaillée d'une mission vers Mars. Le projet de Von Braun consistait à envoyer près d'un millier de fusées à trois étages qui mettaient en orbite les éléments de la mission vers Mars; ceux-ci étaient assemblés depuis une station spatiale en orbite terrestre. À la suite du succès du Programme Apollo, Von Braun se fit l'avocat d'une mission habitée martienne qui devait être l'objectif du programme des missions habitées de la NASA. Dans le scénario proposé des lanceurs Saturn V étaient utilisés pour mettre en orbite des étages à propulsion nucléaire (NERVA) : ceux-ci étaient utilisés pour propulser deux vaisseaux avec des équipages de 6 hommes. La mission devait être lancée au début des années 1980. La proposition fut étudiée par le président Richard Nixon et repoussée en faveur de la navette spatiale.

À la suite du succès des sondes martiennes Viking, une série de conférences furent données entre 1981 et 1996 sous le titre *The Case for Mars* à l'Université du Colorado à Boulder. Ces conférences défendaient le principe de l'exploration de Mars par des missions habitées en présentant les concepts et les technologies nécessaires et étaient suivis d'ateliers de travail destinés à détailler le déroulement des missions. L'un des concepts de base était la réutilisation des ressources martiennes pour fabriquer le carburant nécessaire au voyage de retour. L'étude fut publiée dans une série de volumes publiés par l'American Astronautical Society. Des conférences ultérieures présentèrent un certain nombre de concepts alternatifs dont celui de « Mars Direct » préconisé par Robert Zubrin et David Baker; les « Footsteps to Mars » proposition de Geoffrey A. Landis, qui proposait de réaliser des missions intermédiaires avant d'atterrir sur Mars, dont celle de poser un équipage sur Phobos et le *Great Exploration* proposé par le Lawrence Livermore National Laboratory entre autres.

En 1989 et réponse à une demande du président des États-Unis, la NASA réalisa une étude sur les projets d'exploration habitée de la Lune et de Mars qui devaient prendre la suite de la Station spatiale internationale. Le rapport qui en résulta appelé le *90-day study*, proposait un plan à long terme consistant à compléter la station spatiale internationale jugée une étape incontournable puis de retourner sur la Lune pour y établir une base permanente et enfin envoyer des hommes sur Mars. Ce rapport fut largement critiqué comme trop ambitieux et trop coûteux et tous les fonds destinés à l'exploration habitée au-delà de l'orbite terrestre furent supprimés par le Congrès.

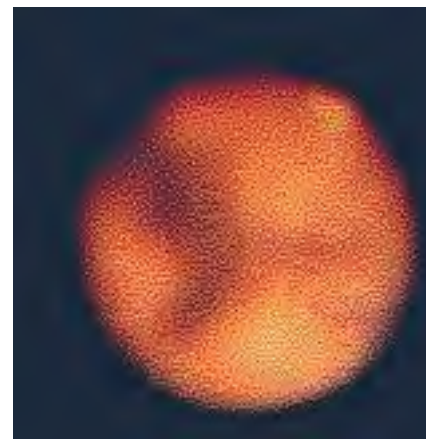
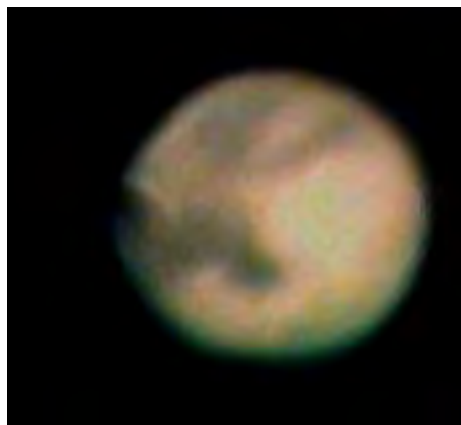
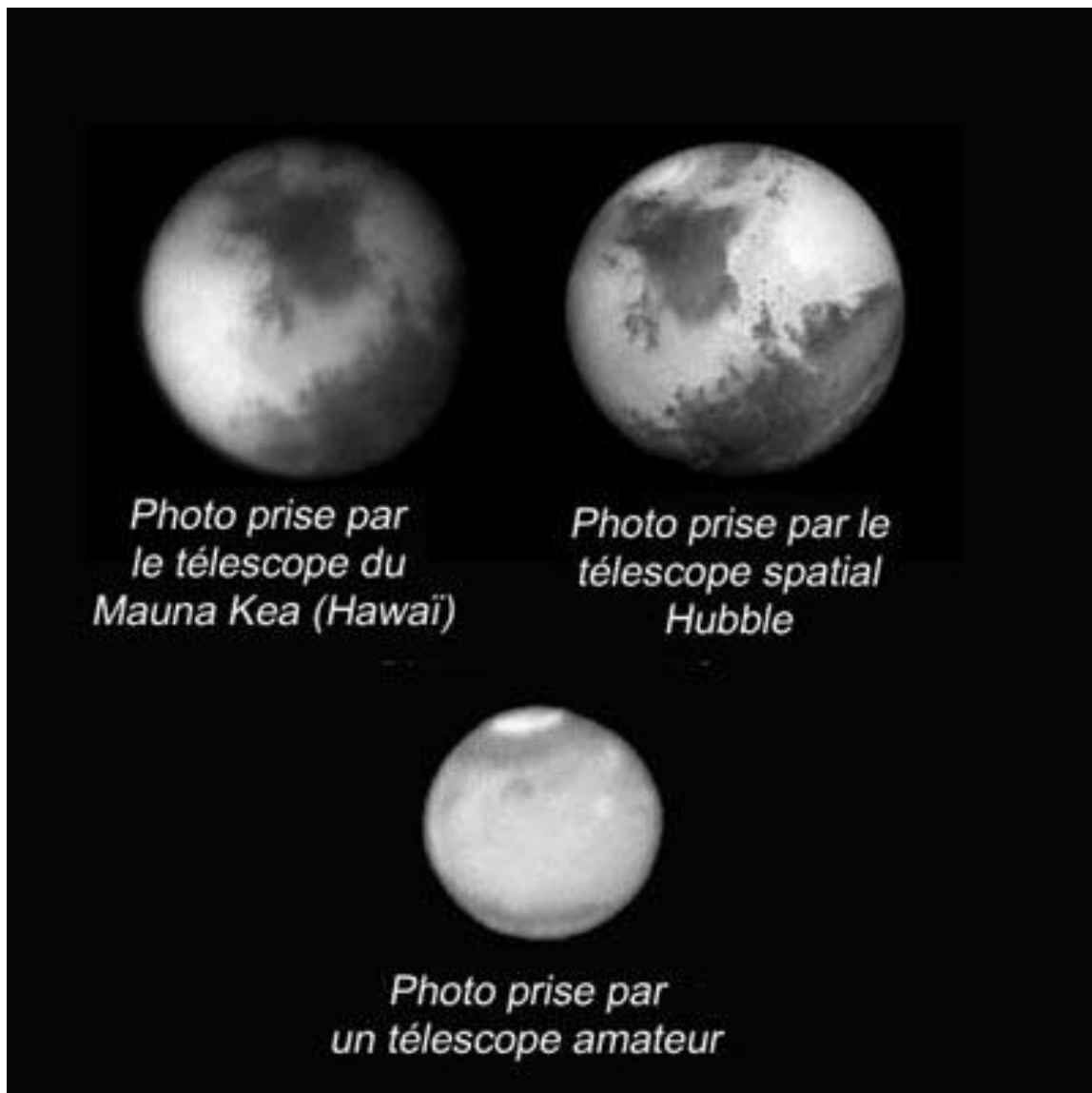
À la fin des années 1990 la NASA définit plusieurs scénarios d'exploration habitée de Mars. L'un des plus remarquables, souvent cité, est le Design reference mission 3.0 (DRM 3.0). L'étude a été réalisée par l'équipe d'exploration de Mars du Centre Spatial Johnson (JSC). Des personnes représentant les différents centres de recherche de la NASA ont défini un scénario de référence d'exploration par l'homme de Mars. Le plan décrit les premières missions sur Mars en développant les concepts utilisés et les technologies mises

en œuvre. Cette étude repose sur des études précédentes principalement sur les travaux du Groupe de Synthèse (1991) et de Zubrin (1991) pour l'utilisation de carburants produits à partir de l'atmosphère martienne. L'objectif principal de cette étude était de stimuler la réflexion et la découverte d'approches alternatives pouvant améliorer la faisabilité ainsi que réduire les risques et les coûts.

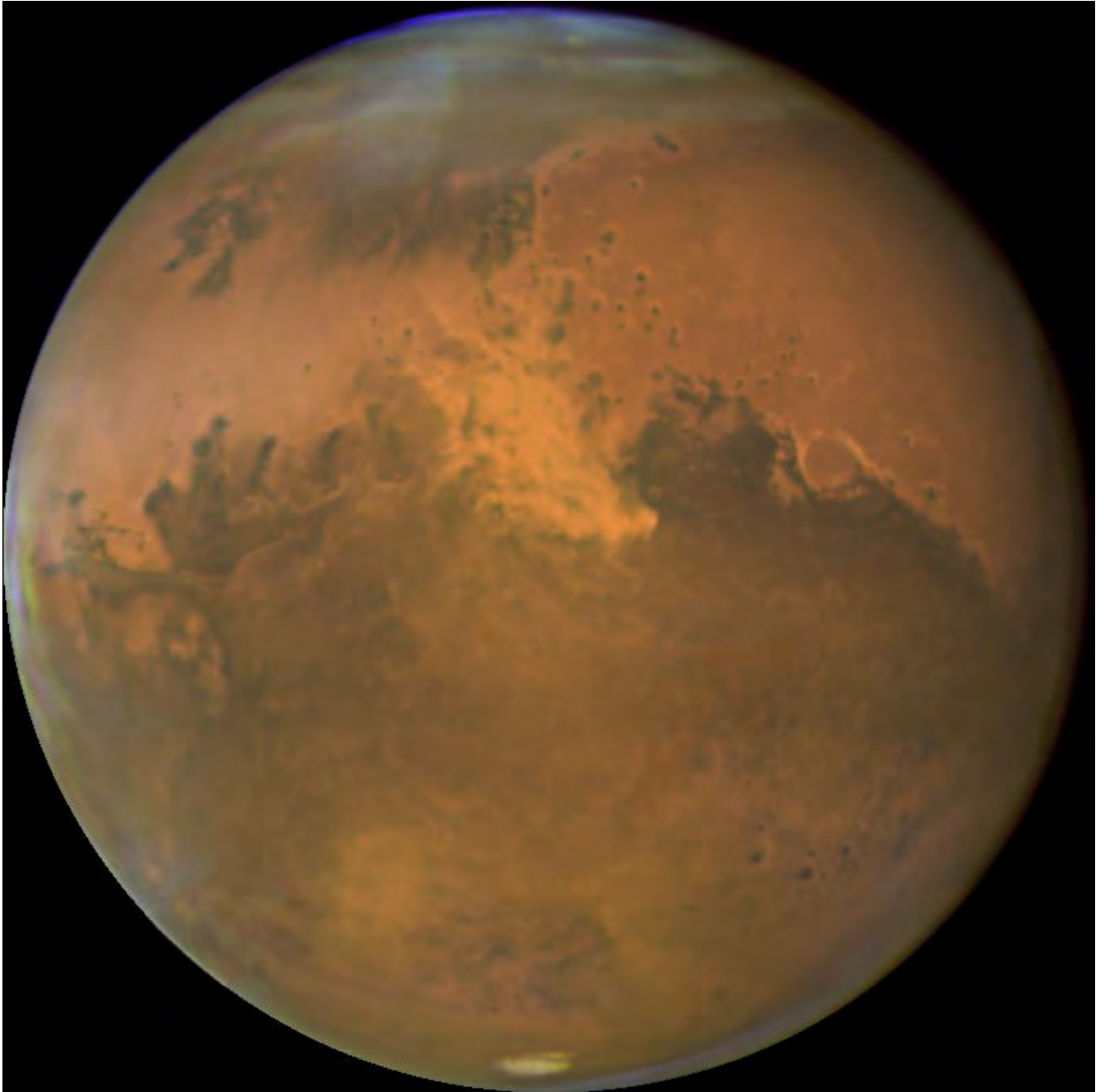
Le président américain George W. Bush est à l'origine d'un document programme publié le 14 janvier 2004 et intitulé Vision for Space Exploration. Ce document prévoit la mise en place d'un avant-poste sur la Lune vers 2020. Des missions préalables durant la décade 2010-2020 doivent permettre la mise au point des techniques nécessaires. Le 24 septembre 2007 Michael Griffin, alors administrateur de la NASA, a suggéré qu'une mission habitée vers Mars pourrait être lancée vers 2037. La NASA a également envisagé de lancer des missions vers Mars depuis la Lune. Cette option n'a toutefois pas été retenue car elle nécessiterait l'installation d'un véritable complexe industriel sur la Lune qui serait difficile à exploiter et à maintenir. L'ESA prévoit également la possibilité de missions habitées vers Mars sans fixer de date précise.

VII Iconographie martienne

A) A partir de télescopes terrestres ou en orbite terrestre



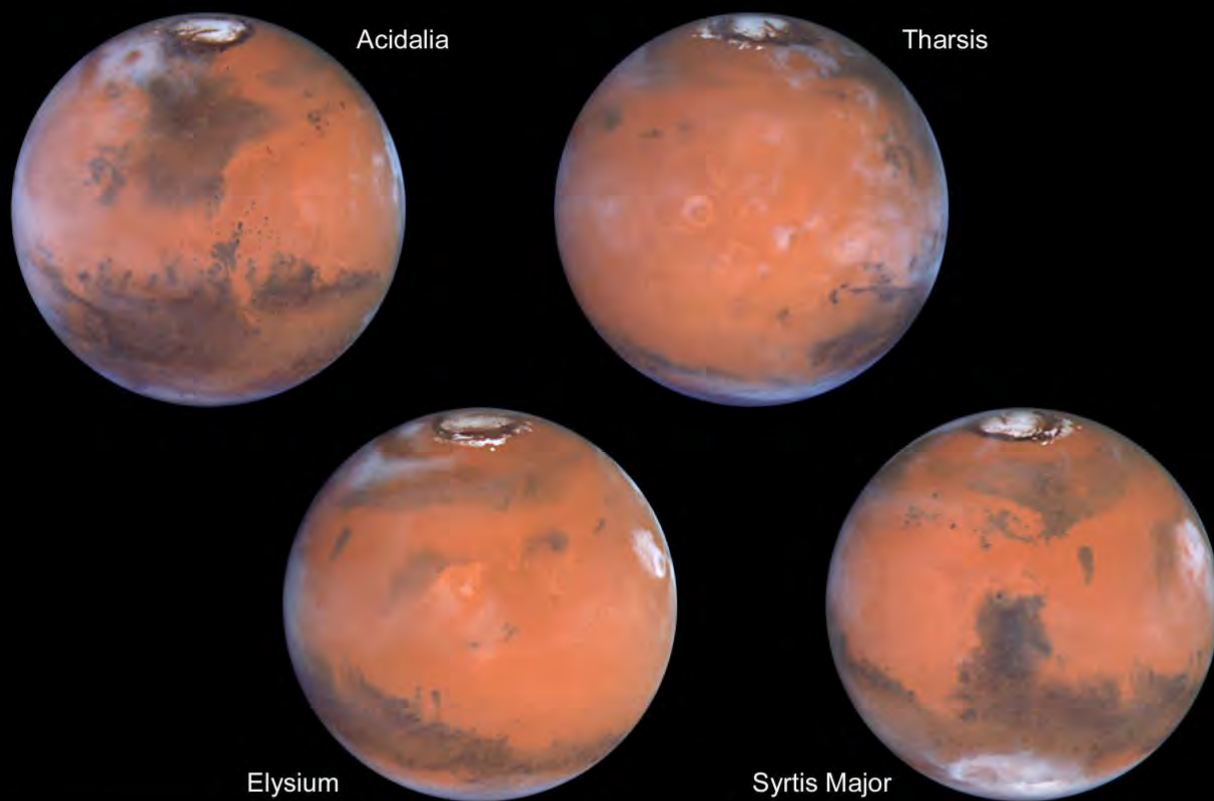
Photos de Mars par des télescopes amateurs



Le télescope spatial Hubble a pris ce cliché de Mars le 28 octobre 2005 lors de sa plus proche opposition avec la Terre. On voit une importante tempête régionale qui apparaît plus claire au milieu de la planète. Cette tempête mesure 1 500 km de large faisait rage depuis plusieurs semaines et est probablement responsable de cette brume. Hubble a pris cette image alors que la planète rouge était à 69 millions de kilomètres de la Terre. Mars ne sera pas si proche de nous avant 2018



Photo de Hubble prise le 26 Juin 2001 et peut voir des détails de 16 km de large. Une grande tempête fait rage au-dessus de la calotte polaire boréale en haut de l'image. Une autre tempête est visible à côté du très grand bassin Hellas (à droite)

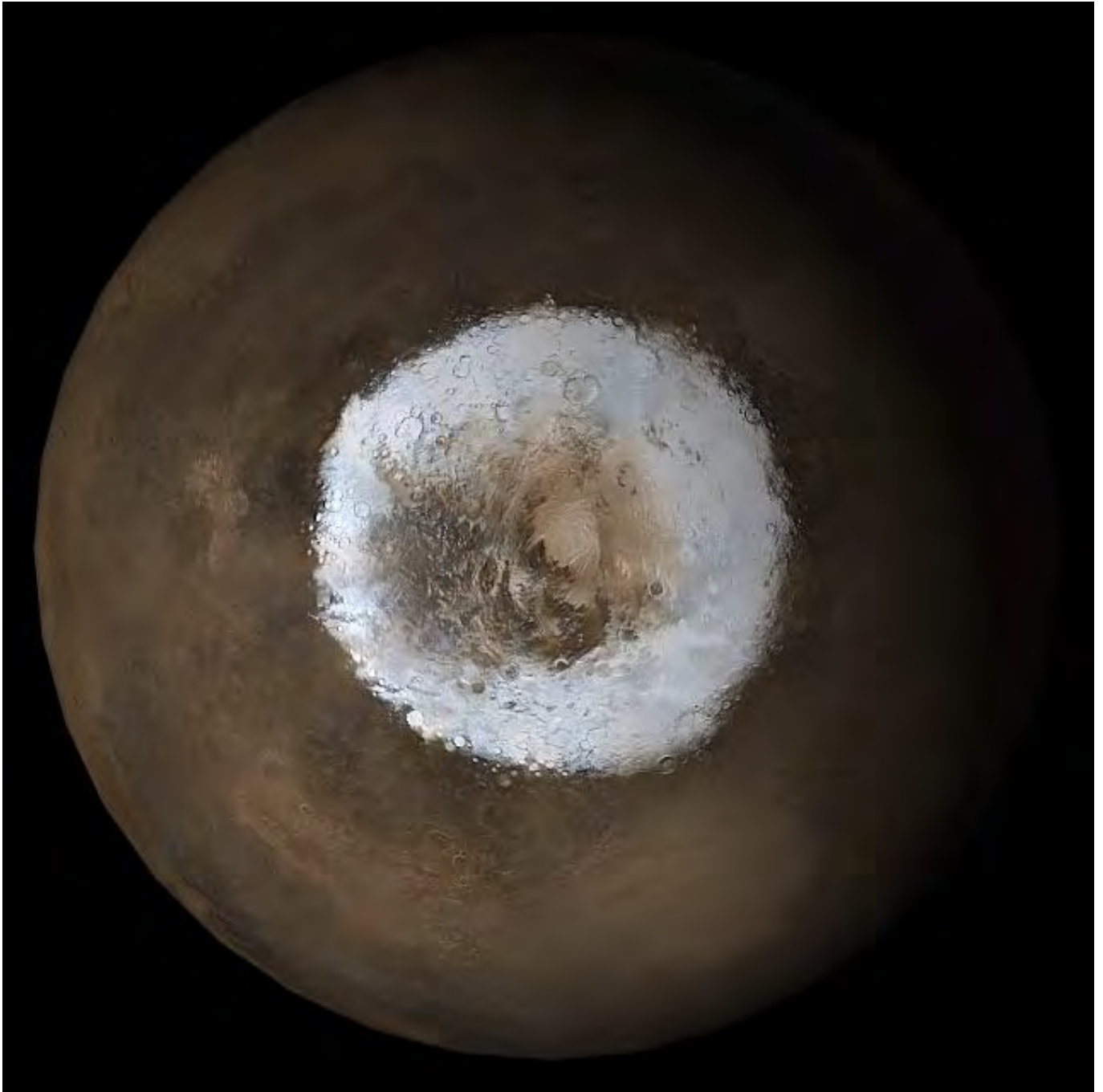


Mars at Opposition • April-May 1999
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

PRC99-27 • STScI OPO • S. Lee (University of Colorado), J. Bell (Cornell University), M. Wolff (Space Science Institute) and NASA

Le télescope Hubble a pris ces images entre le 27 avril et le 6 mai 1999 alors que Mars était à 87 millions de kilomètres de la Terre. Le télescope a pris 4 images montrant chacune la planète Mars après $\frac{1}{4}$ de tour de sa rotation ce qui permet de voir la totalité de la planète

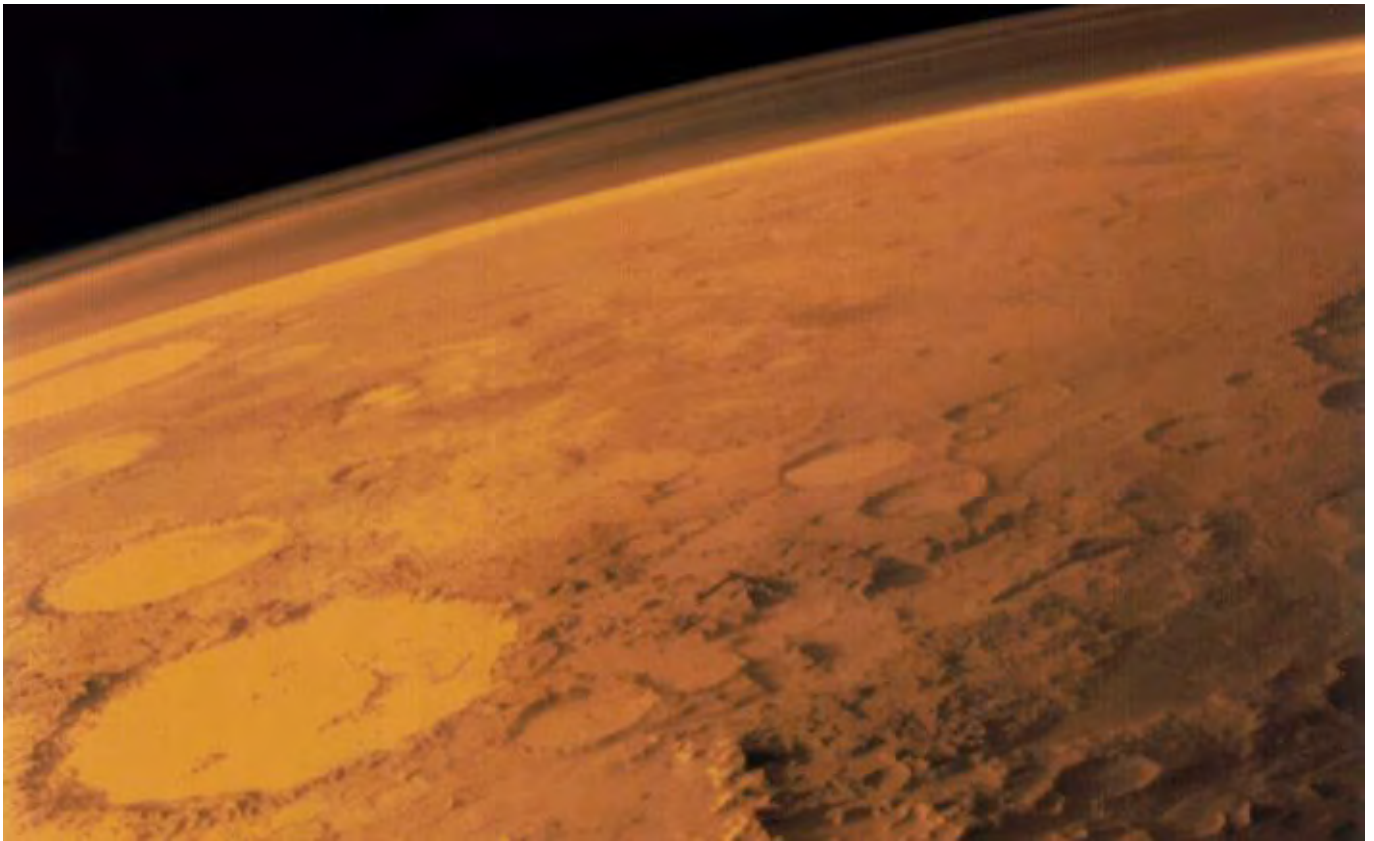
B) A partir de sondes en orbite martienne



Mi-mai 2005 : le pôle sud de Mars par Mars Global Surveyor

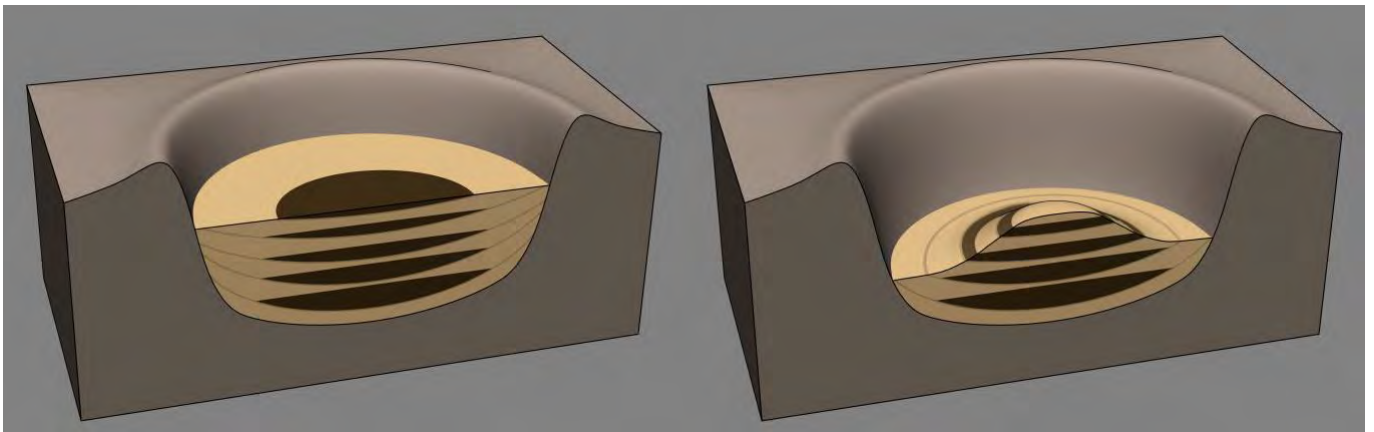


Le cratère Victoria et le rover Opportunity, image prise par le MRO



Mars a perdu la plus grande partie de son atmosphère (on en voit quand même les restes sur cette photo). Où est-elle partie ? La mission de MAVEN cherche des réponses qui nous permettront peut-être de comprendre quand et pendant combien de temps Mars a pu avoir un environnement qui aurait pu supporter une vie microbienne dans son lointain passé

C) Divers



Ces dessins montrent comment le Mont Sharp dans le cratère Gale, Mars, l'endroit où Curiosity s'est rendu peut avoir été formé il y a des milliards d'années. A gauche, on voit le cratère Gale rempli de couches de sédiments. En jaune, des sédiments issus des parties hautes et escarpées qui sont descendues vers le centre du cratère. On voit les traces alternées de périodes humides et sèches. Pendant les périodes humides, l'eau a stagné dans des lacs où les sédiments se sont fixés au centre du cratère (en marron). Même pendant les périodes sèches, l'eau a dû exister sous la surface. Puis, durant la période humide suivante, cette eau serait remontée pour former un nouveau lac. Cette alternance de lacs, rivières et déserts a pu abriter un environnement habitable sur de longues périodes. Le dessin de droite montre ce qui est arrivé ensuite : Après que le cratère ait été au moins partiellement rempli par des sédiments, l'érosion des couches sédimentaires précédentes a eu lieu, exposant ainsi les anciennes séquences alternées de lacs, rivières et déserts comme une série de bandes ou de couches le long des flancs

inférieurs du Mont Sharp. Comme Curiosity montait vers le sud depuis son site d'atterrissage vers le milieu du cratère, il a trouvé des preuves des dépôts sombres rendus apparents grâce à l'érosion. Ces couches font partie de la formation « Murray » dans les régions inférieures du Mont Sharp.



Ombre de Phobos à la surface de Mars, photographiée par Mars Global Surveyor



Les différents Rovers de la NASA

Au centre le petit **Sojourner** de la mission Mars Pathfinder s'est posé sur Mars en 1997.
Dimensions : 65 x 48 x 30 cm pour un poids de 10,6 kg. Il devait fonctionner pendant 7 jours et a fonctionné pendant 85 jours. Il a parcouru 300 mètres.

À gauche les rovers **Opportunity** et **Spirit**, de type MER (Mars Exploration Rover), se sont posés sur Mars le 3 janvier 2004 (Spirit) et le 24 janvier 2004 pour Opportunity.
Dimensions : 2,30 x 1,60 x 1,50 m pour un poids de 185 kg. Ils devaient fonctionner pendant 3 mois et parcourir 600 mètres. Spirit s'est arrêté le 22 mars 2010, plus de 6 ans pour 7,7 km.
Opportunity s'est arrêté le 13 février 2019 (15 ans) ayant parcouru 45,16 km.

À droite le rover de type MSL (Mars Science Laboratory), **Curiosity**, s'est posé sur Mars le 6 août 2012.
Dimensions : 3,00 x 2,70 x 2,20 m pour un poids de 900 kg. Contrairement aux rovers précédents qui étaient alimentés électriquement par des panneaux solaires, le MSL est alimenté par un générateur thermoélectrique nucléaire au dioxyde de plutonium. Sa mission primaire était de 22 mois. Il roule depuis près de 11 ans malgré quelques ennuis de roues et à parcouru environ 30 kilomètres et oule encore.

Le dernier rover de la NASA, **Perseverance** est une version améliorée du MSL Curiosity. Doté d'un équipement beaucoup plus complet et sophistiqué que son cousin. Il pèse 1025 kg. Il a déjà parcouru 115 km depuis son arrivée sur Mars le 18 février 2021. Il a la même taille que Curiosity. Ses roues ont été améliorées par rapport à celle de son prédécesseur. Il peut rouler à 152 m/h. Également alimenté au plutonium. Il est équipé pour recueillir des prélèvements de sol martien, qu'il dépose dans des containers qu'il dépose sur le sol et qui seront ultérieurement collecté par de futures autres sondes qui ramèneront les échantillons vers la Terre. Il a emmené un petit hélicoptère (**Ingenuity**) qui a fonctionné à plusieurs reprises malgré la très faible atmosphère martienne.

Table des matières

I Généralités	1
Histoire de l'observation de Mars	2
1) Premières traces de l'observation de Mars (-2000)	3
2) Modèles orbitaux (-400 - 1600)	4
3) Les premières observations télescopiques (1600 - 1800)	6
4) La période « géographique » (1800 - 1877)	7
5) Les canaux martiens	8
6) Précision des paramètres planétaires (1870 - 1950)	10
7) L'ère de la télédétection (depuis 1950)	11
II Caractéristiques physiques et orbitales de Mars	13
A) Variations de l'excentricité	16
B) Variations de l'obliquité	16
C) Oppositions Terre-Mars	17
D) Géographie de Mars	18
III Atmosphère, climats et radiations	23
A) Atmosphère de Mars	23
B) Structure	25
C) Composition	26
D) Conditions atmosphériques et climatiques	28
IV Géologie de Mars	39
A) Cadre chronologique	39
B) Structure interne	40
1) Ecorce martienne	41
2) Topographie, champ de gravité et « Moho » de Mars	41
3) Structure interne	42
4) Champ magnétique	42
a) Géographie du paléomagnétisme martien et minéraux impliqués	42
b) Inversions de polarité et disparition du magnétisme global	44
c) Origine de la dichotomie magnétique entre hémisphères nord et sud	45
C) Principales formations géologiques	45
1) Dichotomie crustale	46
2) Cratères et bassins d'impact	46
3) Formations volcaniques	47
a. Plaines de lave	48
b. Volcans boucliers et stratovolcans	49
c. Renflement de Tharsis : volcans, Syria Planum et Valles Marineris	51
d. Elysium Planitia et autres volcans ... mais peut-être pingos	53
e. Dykes	53
f. Datation du volcanisme martien	54
4) Formations vraisemblablement d'origine hydrologique	55
a. Ravines	57
b. Deltas argileux et vallées au relief inversé	57
5) Glaciers, lacs gelés et fragments de banquise	58
6) Formations de Medusae Fossae	58
7) Calottes polaires	59
a. Excentricité de la calotte résiduelle australe	60
b. Geysers, points noirs et « araignées »	60
8) Traînées noires sur terrains en pente	61
9) Avalanches et glissements de terrain	62
10) Dunes	63
11) Terrains tourmentés	64
12) Terrains chaotiques	64
D) Minéralogie de la surface martienne	66
1) Analyses in situ	66
2) Résultats des sondes en orbite martienne	68
a. Olivines et pyroxènes	68
b. Phyllosilicates, altération aqueuse de roches ignées	68
c. Chlorures et sulfates hydratés, marqueurs d'un passé humide	68

d. Méthane et hydrothermalisme dans la région de Nili Fossae	68
e. Olivine et jarosite, ne subsistant qu'en climat aride	69
E) Histoire géologique de Mars.....	70
1) Acte I – Formation et différenciation	70
2) Acte II – Champ magnétique global et climat tempéré humide	70
a. Environnement martien au Noachien	70
b. Indices d'une hydrosphère martienne au Noachien	71
3) Acte III – Premiers épanchements volcaniques et grand bombardement tardif.....	71
4) Acte IV – Formation des grandes structures volcaniques martiennes	72
5) Acte V – Ralentissement du volcanisme et dessiccation de l'atmosphère	73
V Les satellites de Mars	74
A) Phobos	75
B) Deimos	78
VI Les sondes envoyées vers Mars	82
A) Déroulement d'une mission automatique vers Mars.....	83
B) Les premières sondes et orbiteurs	86
1) Première tentative : les missions soviétiques Mars 1 et Zond 2	86
2) Le survol de Mariner 4 (1965).....	87
3) Mariner 9 premier orbiteur révèle une géologie complexe (1971).....	87
C) Les premiers atterrisseurs	88
a. Le programme soviétique Mars.....	88
b. Les atterrisseurs Viking.....	88
D) Une pause de 15/20 ans (1975-1996).....	89
E) Le retour vers Mars de la NASA.....	89
1) L'échec de Mars Observer	89
2) Mieux, plus vite, moins cher.....	90
F) Les contributions des autres nations.....	90
1) Mars 96.....	90
2) L'orbiteur japonais Nozomi.....	90
3) L'orbiteur européen Mars Express	91
G) Les projets avortés : le retour d'échantillon et le réseau martien	99
H) Les années 2000.....	99
1) L'orbiteur 2001 Mars Odyssey (2001).....	99
2) Les rovers MER (2003).....	104
a) Spirit	119
b) Opportunity.....	122
3) L'orbiteur MRO.....	132
4) L'étude in situ de la calotte polaire par Phoenix	133
5) La sonde Phobos-Grunt.....	135
6) Le rover Mars Science Laboratory Le Rover Curiosity.....	135
7) Les orbiteurs de 2013.....	165
a) Maven	165
b) Mars Orbiter Mission.....	165
c) ExoMars 2016.....	165
8) Les missions à partir de 2018	166
a) InSight.....	166
b) Les Émirats Arabes Unis	173
c) La sonde chinoise Tianwen-1	173
d) La mission Mars 2020 de la NASA	178
9) Les missions en développement.....	187
10) Les projets de missions habitées	191
VII Iconographie martienne	194
A) A partir de télescopes terrestres ou en orbite terrestre.....	194
B) A partir de sondes en orbite martienne	198
C) Divers	200

Table des Matières.....	203/204
--------------------------------	----------------