

L'exploration de la planète Mars à l'aube du 3^e millénaire.

C. Ferrari, Professeure à l'Université Paris Diderot.

Le deuxième millénaire de l'ère chrétienne aura vu l'Homme s'extraire de l'attraction gravitationnelle de la Terre pour explorer le système solaire, placer des satellites artificiels autour des planètes et poser parfois des engins à leur surface. En ce troisième millénaire, l'exploration de la planète Mars entame une nouvelle ère d'observation systématique et détaillée pour en comprendre le climat et la géologie, y assurant une présence terrestre continue. Sondes en orbites ou robots en surface, à l'échelle globale ou locale, s'attachant en particulier à écrire l'histoire de l'eau et d'un éventuel développement de la vie et à préparer le retour d'échantillons martiens vers la Terre.

Le chemin de l'exploration spatiale habitée passe par la Lune et par Mars. Ces deux mondes focalisent depuis longtemps déjà les intérêts des nations, parfois comme une démonstration obligée de leur puissance technologique. Notre compréhension des conditions d'émergence de la vie sur Terre (et de sa survie !) passe aussi par une exploration poussée de la planète Mars, entre autres territoires, le plus proche et le moins hostile. Quelles sont les conditions qui rendent une planète habitable, comment changent-elles au cours des milliards d'années et quel impact cela a-t-il sur le maintien de la vie ? Y a-t-il (eu) de la vie sur Mars ? La planète serait-elle habitable, moyennant quelques aménagements ? Les programmes d'exploration martienne ont pour objectifs de déterminer si la vie a jamais apparu sur Mars, de caractériser le climat et la géologie de la planète pour se préparer à l'exploration humaine.

La route vers Mars est ouverte.

Depuis 1960, une quarantaine de sondes spatiales ont été lancées à destination de la planète rouge, plus de la moitié ont manqué leur but, jusqu'à tout récemment encore, témoignant de la difficulté de l'exploiter et de la volonté de la surpasser.

Après maintes tentatives, Mariner 4 a enfin ouvert la route en 1965 et survolé brièvement la planète avant de poursuivre son orbite autour du Soleil. Mariner 6 et 7 ont survolé en 1969 des zones cratérisées de l'hémisphère sud de la planète. Mariner 9 a été la première sonde mise en orbite autour de la planète en 1971. Elle a découvert le grand canyon de Valles Marineris

et différents canaux témoignant d'écoulements importants dans le passé, ce qui a ravivé l'intérêt de la question de la vie sur Mars. Les missions russes Mars 2, 3, 5, 6 et 7, leur ont succédé entre 1971 et 1973, avec parfois moins de succès. Mars 3 reste cependant le premier module à s'être posé à la surface de Mars, même si le contact a été perdu en moins d'une minute. Mars 5 a effectué les premières mesures d'inertie thermique du sol qui ont montré une nature variable du terrain, entre lits rocheux et vastes étendues poussiéreuses. Son spectromètre a mesuré les rayonnements gamma émis par les éléments radioactifs des roches (uranium, thorium et potassium) et constaté leur similitude avec les roches terrestres.

Les sondes Viking 1 et 2, qui sont les premiers modules à vraiment fonctionner à la surface de la planète, se sont posées à l'été 1976, respectivement dans Chryse Planitia et Utopia Planitia.

À bord, les expériences conçues pour chercher la présence de micro-organismes dans le sol ont donné des résultats négatifs. La planète est dès lors restée déserte de toute présence terrestre pendant plus de 17 ans, avec les échecs successifs des sondes russes Phobos en 1988 et de la sonde américaine Mars Observer en 1992, toutes perdues en route. C'est aussi l'époque de la grande épopée des sondes Voyager vers les planètes géantes du Système Solaire.

La mission Mars Global Surveyor (MGS) est partie en 1996 avec le plan de mission de la sonde Mars Observer perdue, c'est-à-dire la topographie globale du sol et le suivi météorolo-

gique de l'atmosphère. C'est la première sonde à avoir testé et réussi la mise en orbite lente par aérofreinage. Placée sur une orbite polaire, d'une durée de deux heures, elle a balayé la surface de Mars avec ses instruments. La carte altimétrique

complète de la planète réalisée par l'altimètre laser MOLA entre 1999 et 2001 constitue un des résultats majeurs de cette mission, atteignant une précision de l'ordre de 30 cm (figure 1).

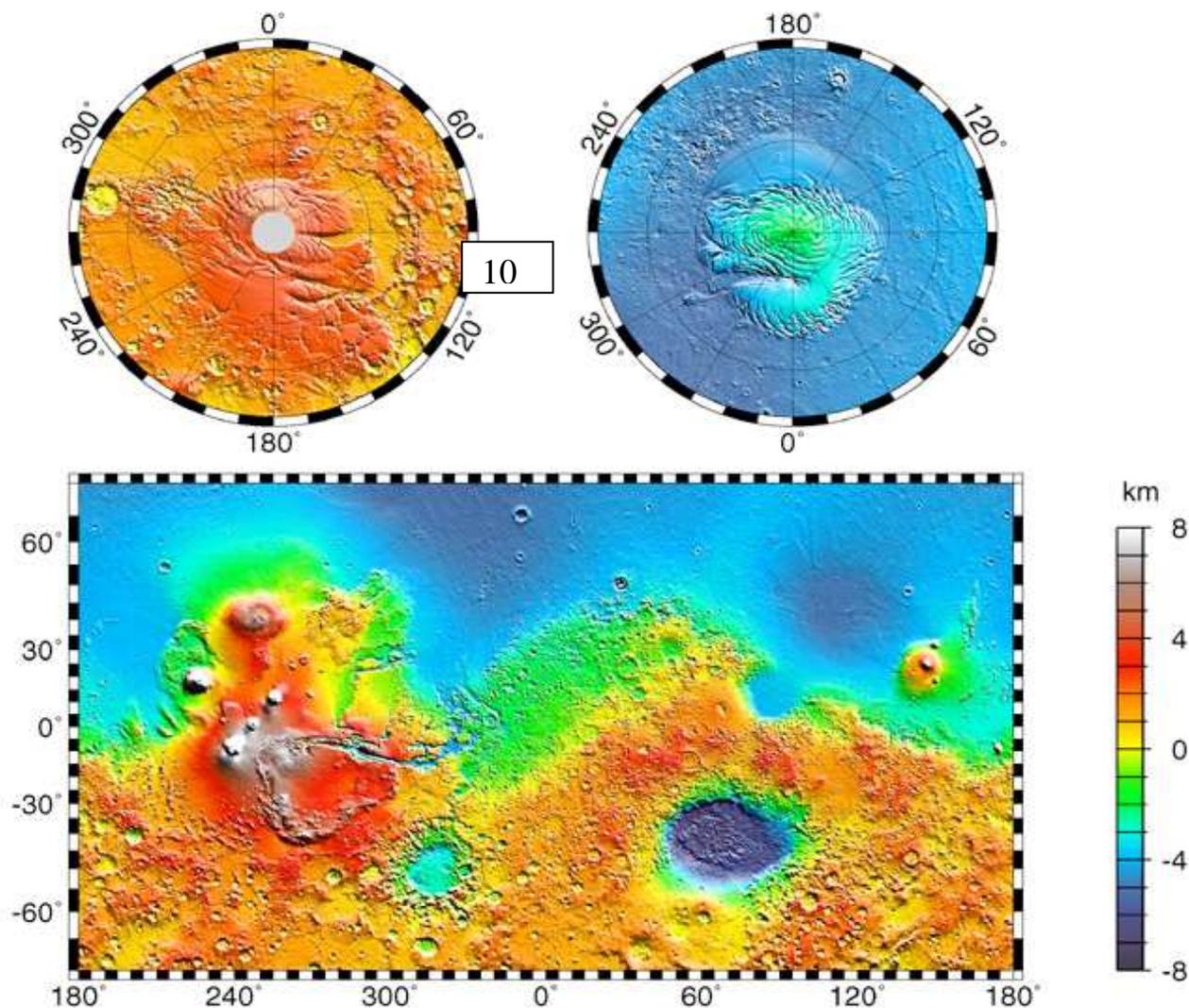


Fig. 1. MOLA-MGS (2001) - Carte altimétrique de la surface de Mars en projection de Mercator (bas) et stéréographique pour les pôles Sud (haut gauche) et Nord (haut, droite). Les variations de couleurs code l'échelle des altitudes entre - 8 km et 8 km par rapport à l'altitude moyenne. La dichotomie entre un hémisphère Nord, sans cratère, et l'hémisphère Sud, beaucoup plus élevé et fortement bombardé, est flagrante. On distingue la grande chaîne de volcan de Tharsis culminant à 8 km (240° - 300° de longitude), Valles Marineris à l'équateur entre 270° et 320° de longitude et l'énorme cratère d'impact Hellas dans l'hémisphère Sud à environ 70° de longitude. Sa profondeur est de 9 km et il fait 2 100 km de diamètre. L'essentiel du plateau qui l'entoure entre 0° et 150° de longitude proviendrait d'une couche d'épaisseur de 3,5 km environ éjectée du point d'impact. Chryse Planitia est l'estuaire de Valles Marineris situé à (330° - 50° N) dans l'hémisphère Nord. Utopia Planitia est la large dépression située à 45° N - 120° E. Crédit NASA.

Cette sonde aura fourni aussi la première carte globale de l'inertie thermique des différents terrains grâce à l'instrument TES (Spectromètre d'émission thermique), elle aura suivi les cycles des "dust devils", tornades de poussières formées dans les déserts, et aura découvert par milliers, des écoulements récents à l'affleurement des fa-

laises grâce à sa camera MOC (Mars Orbiter Camera). Ce phénomène révèle de manière indirecte la présence de glace d'eau souterraine (figure 2). Elle a cessé d'émettre en 2006. Mars Global Surveyor a ouvert une nouvelle ère d'exploration systématique de la planète.

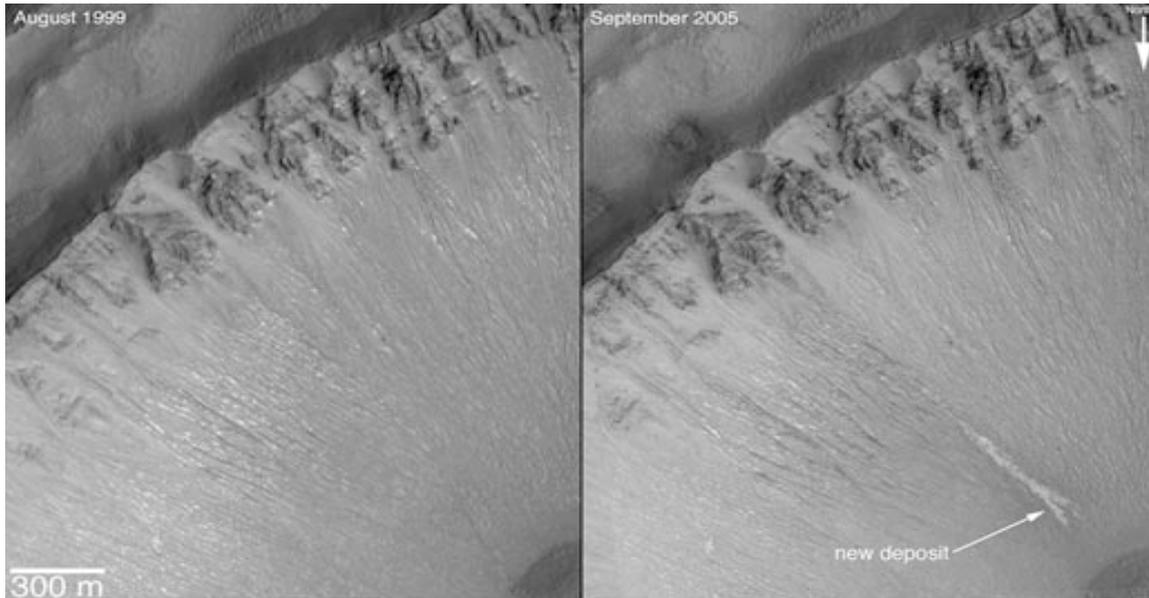


Fig. 2 - MGS-MOC (2005) - Nouveau dépôt résultant du déplacement des grains de sédiments par un fluide, très vraisemblablement de l'eau qui devient liquide à l'affleurement de la falaise en plein après-midi, heure à laquelle la sonde passe à la verticale du lieu. Il est apparu entre 1999 et 2005. Crédit Nasa.

En ce début de troisième millénaire, pas moins de trois sondes en orbite et deux robots en surface scrutent Mars : Mars Odyssey (USA, 2001-), Mars Express (EU, 2003-), Mars Reconnaissance Orbiter (USA, 2005-) et les deux "rovers" Spirit et Opportunity (USA, 2004-). Aujourd'hui, on roule sur Mars à la vitesse de 5 cm/s sur terrain dur. D'une altitude de 300 km environ, on détecte des détails à la surface de l'ordre du mètre. Un observateur situé à Toulouse pourrait ainsi observer les amateurs de pastis attablés à la fraîche sur le port de Marseille (si la Terre était plate!). Leurs innombrables découvertes sont difficiles à décrire en quelques pages. En voici, parmi les plus remarquables, qui nous permettent de reconstruire l'histoire de l'eau sur Mars.

L'histoire de l'eau sur Mars.

Grâce à des techniques stratigraphiques, on distingue dans l'histoire de Mars trois périodes-clé correspondant à trois types de terrains observés à sa surface : le *Noachien*, entre - 3,95 et - 3,7 milliards d'années (Ga), âge auquel des régions telle Noachis dans l'hémisphère Sud se sont solidifiées, à l'époque donc du bombardement massif tardif. En effet 0,7 Ga après la formation du Soleil (- 4,5 Ga), la migration des planètes géantes semble avoir déstabilisé le système solaire extérieur et la ceinture extérieure des astéroïdes, provoquant un taux d'impact important, encore inscrit sur les surfaces planétaires qui ont peu évolué depuis. L'*Hespérian*, situé entre - 3,7 Ga et - 3,0 Ga correspond au déclin du bombardement tardif et à

l'apparition des volcans, sur des terrains typiques de Hesperia Planum, à l'Est du cratère Hellas. Enfin, l'*Amazonien* (de Amazonia Planitia, à l'ouest de la région volcanique Tharsis) s'étale de - 3 Ga à nos jours. Cette région témoigne d'un âge plus récent de volcanisme très actif et d'érosion faible de la surface.

Suivant la théorie en cours, l'eau a été présente très tôt à la surface de Mars. D'où vient-elle ?

Apparemment des astéroïdes proches de Jupiter qui ont été projetés ici lors du bombardement tardif. Plus chargés en eau que les planétésimaux qui ont formé l'embryon planétaire martien, plus proches du Soleil et donc plus secs. Le flux d'astéroïdes prédit semble suffisant pour créer un océan martien de quelques kilomètres de profondeur qui aurait pu occuper l'hémisphère Nord de Mars.

Les images de Mariner 9 et des sondes Viking ont montré que les bords des cratères les plus vieux datant du *Noachien* avaient subi une érosion plus importante qu'ailleurs, due à une érosion par la pluie. Les grands canaux d'écoulement se trouvent pour l'essentiel sur ces anciens terrains. Les caméras de MGS et Mars Odyssey ont trouvé de larges estuaires, des dépôts sédimentaires et d'anciens lacs, tous témoignant de la présence de l'eau à cette époque-là.

LATE SOUTHERN SUMMER

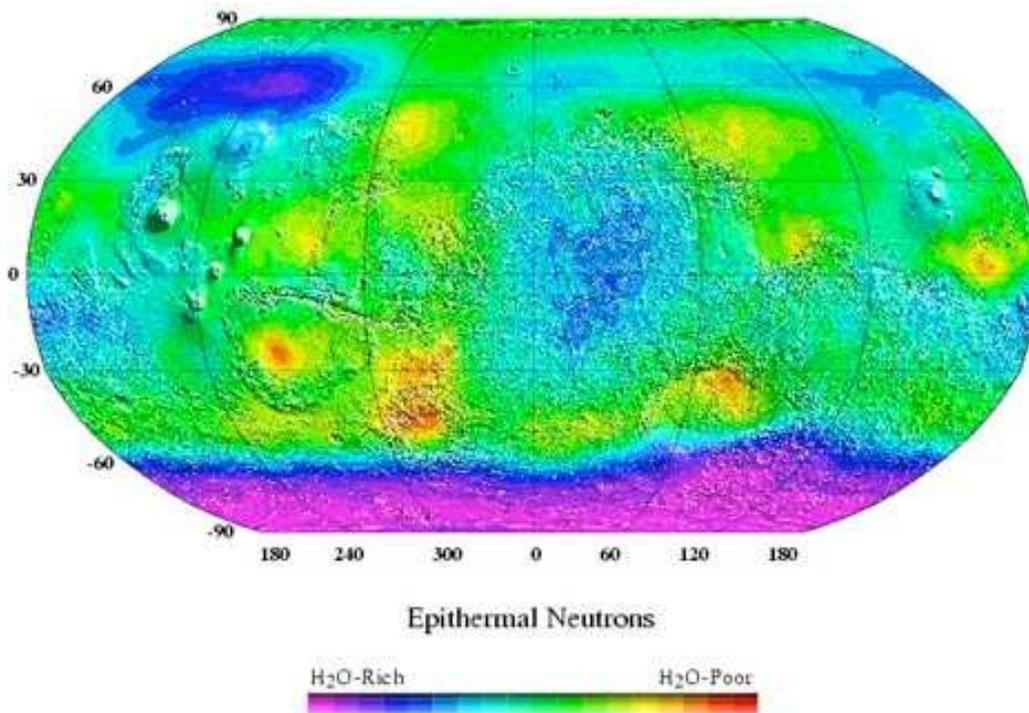


Fig. 3 - MO-GRS (2004) - Une carte de la surface de Mars donnant l'abondance de neutrons d'énergie comprise entre 0,4 et 0,7 eV (neutrons dits épithermiques). Ceux-ci sont beaucoup moins entre - 60° et - 90° de latitude Sud. C'est alors l'été dans l'hémisphère sud, la calotte polaire est plus ensoleillée. Durant l'été austral, le CO₂ se vaporise dans l'atmosphère et dégage ainsi les zones de forte densité de glace d'eau proches de la surface qu'on attend plus importantes dans les zones polaires les plus froides. Au nord, la glace d'eau est ensevelie sur plusieurs mètres de glace de CO₂, au coeur de l'hiver. Crédit NASA.

L'eau, maintenant, où est-elle ? Température et pression actuelles à la surface de Mars empêchent l'eau liquide d'exister de manière stable. L'eau, à l'origine des traces d'écoulement est sans doute gelée, en sous-surface. Cette cryosphère pourrait avoir une épaisseur de 2 à 7 km suivant la latitude. Cette hypothèse a été avancée dans les années 90, basées seulement sur l'aspect géologique de Mars. C'est le spectromètre détecteur de rayonnement gamma GRS (Spectromètre de rayons gamma) embarqué sur la sonde Mars Odyssey qui va donner en 2002 des informations directes sur la présence d'eau dans le premier mètre de profondeur. Les rayons cosmiques qui pénètrent jusque-là, interagissent avec les noyaux des éléments présents en produisant des neutrons d'énergie variable. Les rayons plus énergétiques (valeur supérieure à 0,4 eV) sont ralentis efficacement par l'hydrogène, condensé en premier lieu dans la molécule d'eau, avant d'émerger de la surface. En détectant, d'une région à l'autre le manque de ces neutrons émergeant de la surface, on détecte la présence d'eau (figure 3).

Les sondes Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter sont équipées de nouveaux instruments (des radars, appelés respectivement MARSIS et SHARAD) capables de sonder la surface sur quelques kilomètres d'épaisseur. Ils ont pour mission de cartographier la glace d'eau en sous-sol en analysant l'écho radar réfléchi à l'interface entre les strates de composition chimique ou d'états de phase différents. Ils peuvent ainsi distinguer les échos venant d'un dépôt de poussière, d'une couche d'eau glacée ou liquide. L'écho est mesuré avec des antennes dipolaires longilignes dont le champ de vue équivaut à une coupe longiligne de la surface. Un radargramme présente une image qui donne en ordonnée le temps de retour de l'écho radar (donc la profondeur) et en abscisse la distance le long de la coupe radar. Ces instruments apportent donc la troisième dimension dans l'exploration de Mars et montrent la présence de glace d'eau sur des épaisseurs importantes dans le sous-sol de Mars (figure 4).

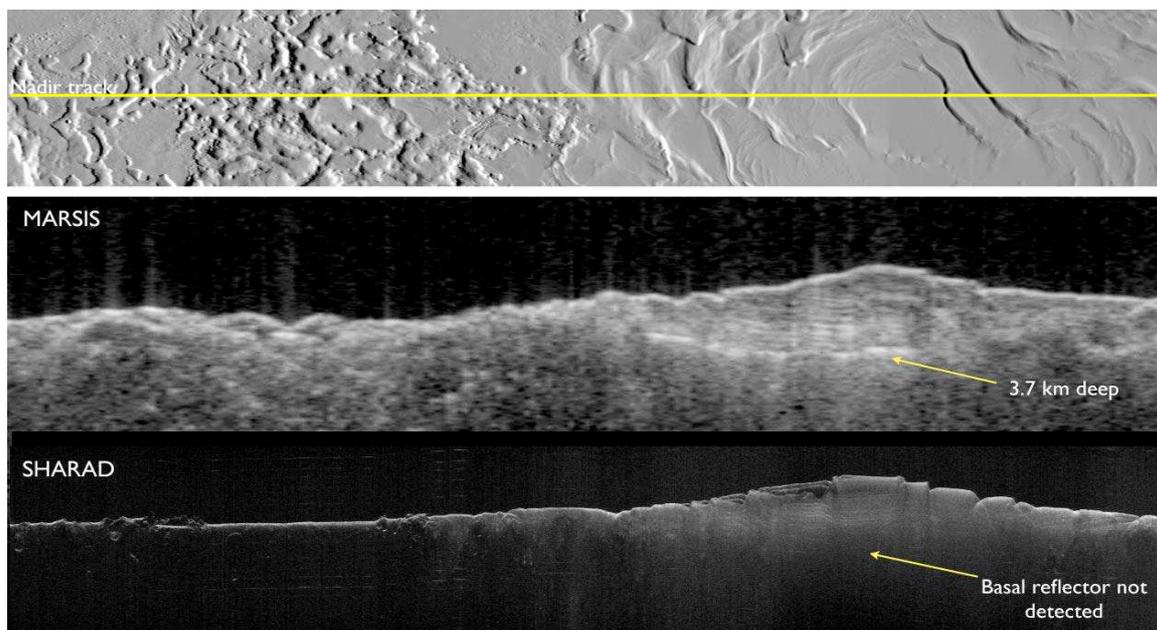


Fig. 4 - Mars Express-MARSIS/MRO-SHARAD (2008) – *En haut*, image du pôle Nord de Mars avec la calotte polaire bien visible sur la droite. La coupe en profondeur faite par les deux mesures radar est repérée (trait jaune). *Au centre*, radargramme de MARSIS suivant la coupe désignée donnant une image des différentes strates empilées sous le pôle Nord. Un écho est reçu d'une couche située à 3,7 km de profondeur. Il indique la base de la calotte glacière. Les fines strates visibles entre le sommet le plus proéminent et cette couche sont des strates de matériau plus réfléchissant, sans doute de la poussière déposée au cours de variations climatiques à l'échelle de millions d'années. Les strates plus sombres qui les séparent sont constituées de glace d'eau. *En bas*, radargramme de SHARAD pour la même région. Ce radar donne une image plus détaillée mais pénètre moins profondément et n'a donc pas détecté la base de la calotte.

L'eau a été présente dans un passé lointain sous forme liquide. On la trouve maintenant sous forme solide. Est-elle restée assez longtemps liquide pour que la vie apparaisse ? Ce sont les dépôts de minéraux qui n'ont pu se former qu'en présence d'eau sur de grandes périodes de temps qui peuvent nous le dire. Il faut donc regarder leur composition le long des lignes de côtes d'océans anciens, ou au fond des lacs anciens. Le spectromètre proche infrarouge OMEGA embarqué sur la sonde Mars Express a détecté des minéraux hydratés dans les régions les plus anciennes, les phyllosilicates, sur des terrains apparemment longtemps cachés sous des dépôts plus jeunes et maintenant découverts. Très tôt dans l'époque hespérienne, l'atmosphère semble s'être amincie et la température avoir diminué, les nouveaux terrains témoignant de conditions anhydres.

Phyllosilicates : du grec "phyllo" "feuille" Les phyllosilicates, appelés aussi *silicates lamellaires*, sont construits par empilement de feuillets tétraédriques dont trois sommets sur quatre sont partagés, le quatrième sommet est relié à un feuillet octaédrique. L'ensemble des tétraèdres et des octaèdres forme des feuillets qui permettent le clivage des phyllosilicates. (micas, argiles).

La route sur Mars est ouverte.

Les rovers-robots Spirit et Opportunity explorent la surface de Mars depuis 2004 et nous envoient des paysages tels que nous les verrions si nous y étions. Ils nous rendent la planète familière. Opportunity (figure 5) a été bâti pour gravir et descendre les pentes des cratères.

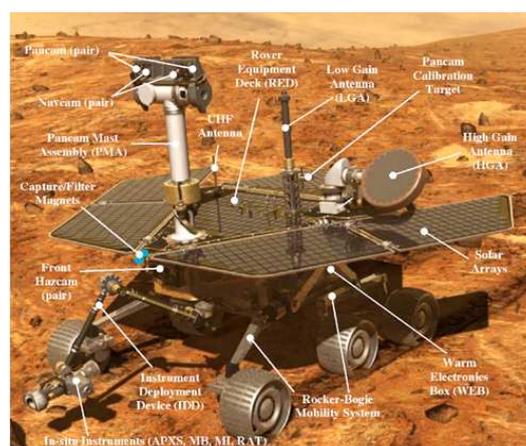


Fig. 5 Opportunity (vue d'artiste)

Spirit a fait de l'handicap d'une roue cassée une chance. Sa roue traînant a mis en évidence des dépôts jaune-blanchâtre, du soufre ou des sels, impliquant la présence d'eau chaude à un moment

donné de l'histoire martienne. Opportunity a aussi découvert dans les différents cratères visités des dépôts de sulfates impliquant la présence d'eau chaude. En route vers le cratère Endeavour, il a fourni un splendide panorama de 360° où l'on aperçoit un lit rocheux riches en sulfates. Phoenix (figure 6) enfin a été largué le 25 mai 2008 à 68°

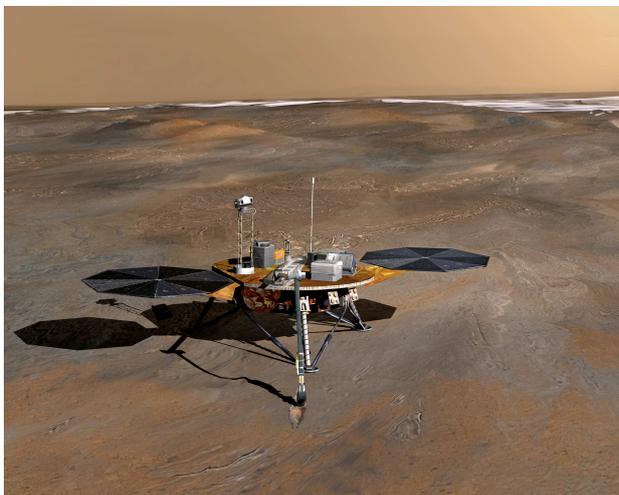


Fig. 6. Phoenix (vue d'artiste)

de latitude Nord, 234° de longitude est, près du cratère Heimdall, à la recherche de l'eau et de son histoire pour étudier l'habitabilité potentielle des régions arctiques. Il est équipé pour analyser la composition du sol à la recherche d'éléments chimiques structurant la vie comme d'atomes de C, N, P et H. Ces premières pelletées ont permis de détecter de la glace d'eau effleurant la surface (figure 7).

A l'horizon 2020-2025, l'exploration in-situ devrait prendre de l'ampleur avec la quête d'échantillons du sol et de l'atmosphère et leur

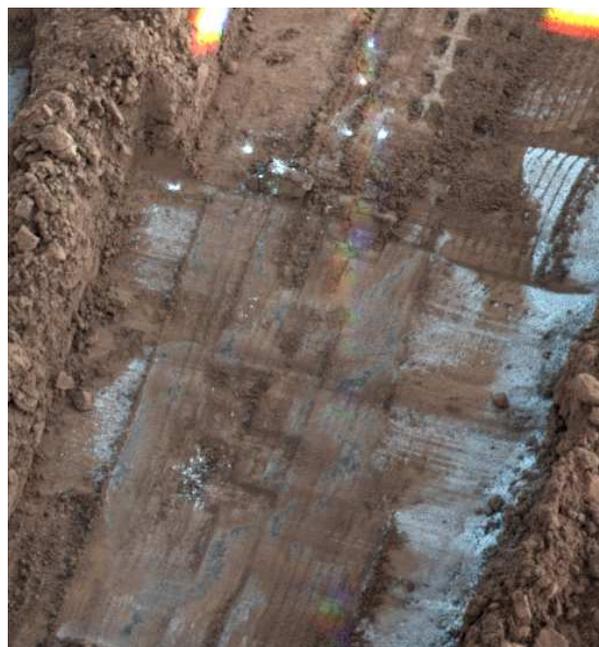


Fig. 7. Phoenix (2008). Glace d'eau mise à jour sous quelques centimètres de poussières le 20 Octobre 2008 alors que la température du jour est de - 46° et la nuit de - 89° - Crédit NASA.

renvoi sur Terre à des fins d'analyse chimique plus poussée que celles faites in situ. La séparation de composés ou une analyse plus adaptée en fonction des découvertes est alors possible. Un autre laboratoire ambulant à la recherche de traces de vie (Astrobiology Field Laboratory) est aussi proposé qui emporterait des instruments capables d'identifier les composés chimiques essentiels pour la vie, composés organiques, soufre, azote, etc. Un robot-foreur capable d'atteindre quelques centaines de mètres de profondeur est aussi à l'étude.

Mars Science Laboratory : Il a failli partir en 2009, il partira en 2011. Il s'agit du super robot de la NASA,

Mars Science Laboratory (MSL : 600 kg dont 65 kg d'instruments scientifiques). Son énergie sera fournie par des générateurs au plutonium et portera la traditionnelle caméra stéréo couleur, une caméra microscopique, un spectromètre alpha rayons X, une caméra de descente sophistiquée, un spectromètre à ablation laser capable de vaporiser, grâce à un rayon laser, la surface des roches et du sol dans un rayon de 10 mètres, un détecteur à neutrons, une station météorologique, un capteur ultraviolet (c'est une première), Mais je me suis laissé emporter par l'enthousiasme. Ce n'est pas de lui que je voulais vous parler, mais de sa maquette.

Impliqué dans la mission, un chercheur du Centre d'Études Spatiales du Rayonnement (Toulouse) souhaitait faire réaliser une petite maquette par des élèves de lycée. Après une rencontre avec l'IPR de STI, c'est une maquette à l'échelle 1 et mobile qui fut réalisée. Ce qui est extraordinaire, c'est que ceci fut possible par la mise en réseau de 13 lycées de l'académie de Toulouse. Le CNES a soutenu financièrement le projet. Les étudiants de BTS de ces lycées ont ainsi réalisé un engin qui est motorisé et télépiloté ; il identifie la position d'une roche à analyser par faisceau laser ; l'image de l'environnement est obtenue par 2 caméras, l'image 3D extraite est renvoyée à l'équipement de pilotage. Cette maquette fut présentée pour la première fois au salon du Bourget en juin dernier (nous espérons bien l'avoir à Cahors pour une Fête de la Science).

Quelle magnifique aventure pour ces étudiants et enseignants !!!

Pour en savoir plus : http://orbitmars.futura-sciences.com/mars_actu/print.php?id_news=317
http://msc.cnes.fr/MSL/Fr/A_proj_etud.htm

(liens sur le site CLEA)

Jean Ripert