



EDITORIAL

Membres de l'Association Planète Mars, nous sommes tous concernés par l'arrivée de l'Homme sur Mars. L'histoire des grandes migrations humaines nous enseigne que dès qu'un territoire devient « technologiquement » accessible, il est peuplé. Il serait incompréhensible que l'histoire ne se répète pas. Pour paraphraser un célèbre commentateur, la question n'est pas de savoir si cet événement se produira, mais plutôt quand. Les mois à venir vont avoir un impact important sur cette date possible, avec des signaux contradictoires.

En premier lieu, nous entrons dans les semaines à venir dans une fenêtre de lancement vers Mars (tous les 26 mois). Il est prévu que soient lancés vers Mars le rover Perseverance (ex Mars 2020), la mission chinoise Huoxing-1 (incluant un rover) et Mars-Hope, orbiteur des Émirats Arabes Unis. Nous ne pouvons que regretter le deuxième report d'ExoMars. L'intérêt médiatique est déjà important, avec plusieurs demandes d'entretiens qui nous ont été adressés. Il devrait se poursuivre en 2021, avec l'arrivée des missions sur Mars, et les premiers résultats.

Pourtant, à l'heure actuelle, la durée de la fenêtre de lancement de Perseverance vient d'être fortement réduite, à 11 jours au lieu d'un mois, en raison d'un problème technique rencontré sur le lanceur et des vérifications nécessaires. Gardons l'espoir que ce lancement se fera bien dans les délais et sera une réussite.

En deuxième lieu, rappelons le succès de SpaceX et de sa capsule Dragon2, qui a rétabli la capacité des Américains à envoyer des hommes dans l'Espace, en amenant un équipage sur l'ISS. La crédibilité ainsi accrue de SpaceX (en compétition avec Boeing) renforce indirectement sa crédibilité dans ses projets martiens, et la conception du Starship.

En troisième lieu, le programme Artemis de la NASA donne une feuille de route assez claire vers Mars (2033), après un retour sur la Lune (2024), même si le coûteux projet de Lunar Gateway – une station spatiale en orbite autour de la Lune – est assez critiqué (avec un coût disproportionné en regard du bénéfice en termes d'acquisition de connaissances). Néanmoins, les élections américaines en novembre 2020 sont susceptibles de remettre en cause ce programme. Espérons qu'une victoire démocrate n'annulerait pas le programme, mais le recentrerait sur une feuille de route moins coûteuse.

2020, 2021 – années martiennes à fort suspens... à suivre.

Philippe Clermont
Président

Dans ce numéro :

- Phobos-Deimos : la JAXA prendra-t-elle la NASA de vitesse ? p.1
 - En route pour Mars ! p.3
 - La mission du siècle p.5
 - La vie de l'Association p.5
 - Les glaciers martiens, ressource astronautique capitale p.6
- prochain numéro : octobre 2020...

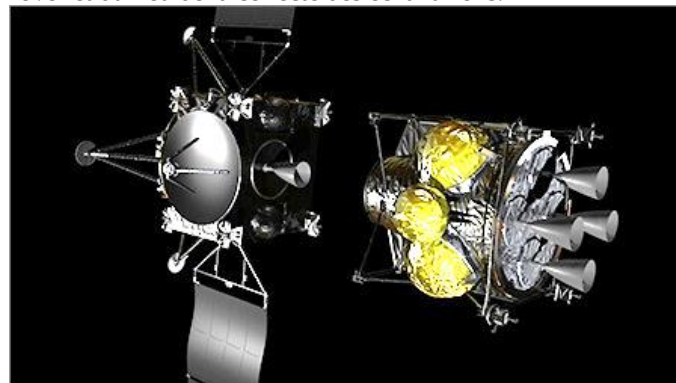
PHOBOS-DEIMOS : LA NASA PRISE DE VITESSE PAR LA JAXA ?

Alors que Mars suscite un très grand intérêt scientifique, avec 3 lancements de sonde pour la fenêtre de 2021, et qu'à l'horizon 2030 la NASA et l'Agence spatiale européenne planifient une mission de retour d'échantillons martiens qui seront prélevés par Perseverance dans le cratère Jezero, la JAXA a annoncé en 2017 qu'elle en rapportera en 2029 de Phobos, une des deux lunes de la Planète rouge ! C'est la mission Martian Moons eXploration (MMX).

MMX n'est pas la première mission à tenter d'effectuer une étude détaillée des lunes martiennes. Au cours des 30 dernières années, les scientifiques soviétiques et russes ont réalisé quatre missions sans succès : les sondes Phobos-1 et Phobos-2 en 1988, suivies en 1996 de Mars-96, et enfin, Phobos-Grunt en 2011. Mais les sondes spatiales russes ont toutes échoué.

Le principal objectif scientifique de la mission MMX est de déterminer si les lunes martiennes Phobos et Deimos sont des astéroïdes capturés par Mars ou s'ils se sont formés par aggrégation de matériaux éjectés par la planète à la suite d'un impact géant dans le cadre d'un processus analogue à celui ayant abouti à la formation de notre Lune. La réponse à cette question permettra d'affiner le scénario de formation des planètes du système solaire.

En avril 2017, Jean-Yves Le Gall, président du CNES, et Naoki Okumura, président de la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) avaient signé un accord pour préparer la mission MMX. Le 19 février 2020, l'Agence spatiale japonaise (JAXA) a donné son feu vert au développement de la mission MMX, qui a pour objectif de déchiffrer l'origine des deux lunes martiennes, encore incertaine, par des observations sur place et un retour d'échantillons sur Terre. La JAXA a profité de cette annonce pour lever les incertitudes sur les choix du site d'atterrissage du rover et du lieu de la collecte des échantillons.



Représentation de l'orbiteur et de l'étage propulsif de la sonde MMX.
(doc. JAXA)

La mission Martian Moons eXploration (MMX) est ainsi un projet d'exploration des deux lunes de Mars, dont le lancement est

prévu pour la fenêtre 2024. Environ un an après avoir quitté la Terre, l'engin spatial arrivera dans l'espace martien et entrera en orbite autour de Mars. Il se déplacera ensuite sur une orbite quasi-satellite (QSO) autour de la lune martienne, Phobos, pour collecter des données scientifiques et recueillir un échantillon de la surface de la lune. La sonde emportera un petit rover d'exploration qui sera réalisé par le CNES et le DLR (Centre Allemand pour l'Aéronautique et l'Astronautique).

Après observation et collecte d'échantillons, un module reviendra sur Terre avec le matériel recueilli auprès de Phobos, en 2029.

L'exploration des lunes martiennes contribuera à améliorer la technologie pour l'exploration future de la planète et des satellites. Par exemple, l'avancement de la technologie requise pour effectuer des allers-retours entre la Terre et Mars, les techniques d'échantillonnage avancées qui seront utilisées sur la surface de la lune martienne et la technologie de communication optimale à l'aide des stations au sol du Deep Space Network.

D'où viennent Phobos et Deimos

On envisage deux possibilités :

- ce sont des astéroïdes capturés par la gravité martienne ; le spectre et la faible densité observés militent pour cette thèse ;

- ces corps résultent de l'accrétion des débris d'un impact majeur avec Mars. Cette thèse s'accorde bien avec leurs caractéristiques orbitales.

Et finalement, est-ce que Deimos a les mêmes origines que Phobos ? L'origine ainsi identifiée permettrait de comprendre la dynamique du disque proto-solaire, qui a profondément modelé l'évolution des mondes planétaires, caractérisés aujourd'hui par l'immense diversité de leurs propriétés.

MMX va également effectuer un suivi pluri-annuel de l'atmosphère de Mars, pour mieux caractériser les processus liés à son évolution climatique.

Objectifs de la mission MMX

L'objectif scientifique majeur de la mission est ainsi de clarifier l'origine des deux lunes martiennes et le processus d'évolution de la sphère martienne (Mars, Phobos et Deimos). La création de ce système est l'une des clés pour résoudre les mystères de la formation planétaire dans le système solaire. Le second objectif est de comprendre les mécanismes contrôlant l'évolution de la surface des lunes martiennes et de Mars, et acquérir de nouvelles perspectives sur l'histoire de la sphère environnementale de Mars, y compris celle des lunes martiennes.

Les lunes martiennes devraient avoir accumulé des sédiments qui ont été éjectés de Mars pendant des milliards d'années. L'observation des lunes fournira donc des informations sur l'évolution de la surface martienne. De plus, si les lunes se sont formées lors d'une collision entre Mars et de gigantesques astéroïdes, le matériau de ces lunes révélera les conditions d'origine sur Mars à cette époque précoce, offrant un aperçu de la formation de la planète et de son jeune environnement. Alternativement, si les lunes sont des astéroïdes capturés, leur composition aidera à clarifier le processus de transport des composants volatils (tels que l'eau) nécessaires à l'habitabilité. En d'autres termes, l'exploration des lunes martiennes est importante non seulement pour comprendre les lunes elles-mêmes, mais aussi pour la science planétaire future. Pour atteindre ses objectifs, MMX couplera trois approches complémentaires, exemplaires des missions des prochaines décennies : caractérisation globale par observations

à distance, analyses in situ jusqu'à l'échelle microscopique à partir d'un rover qui se posera à sa surface, collecte et retour sur Terre d'échantillons, pour analyses en laboratoire (environ 10g). Les opérations devraient durer deux années martiennes, pour un retour des échantillons en 2029.

Si Phobos et Deimos, les deux satellites naturels de la Planète rouge sont des objectifs prisés des scientifiques, ils suscitent aussi l'intérêt des planificateurs des futures missions habitées à destination de Mars. En effet, Phobos, le plus grand des deux satellites, est souvent cité pour devenir un avant-poste habité de l'exploration humaine et robotique de Mars. Parmi les objectifs de MMX, un certain nombre sont en lien avec les problématiques d'une mission habitée martienne. Par exemple, du fait de la proximité à Mars de ces deux lunes, sortir du puits gravitationnel de Mars ne sera pas une mince affaire. MMX testera une technologie pour atterrir et naviguer à la surface de corps de faible gravité et déployer de l'équipement pour des tâches telles que l'échantillonnage de surface. Un instrument mesurera également les taux de rayonnement et de radiation reçus par ces deux satellites, une préoccupation majeure pour la santé des astronautes.

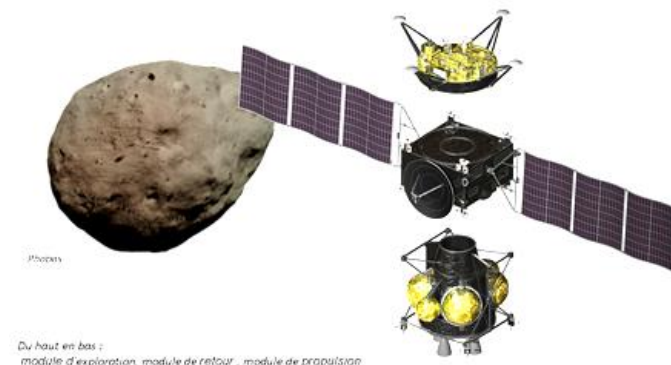
Caractéristiques techniques de la sonde

La sonde spatiale MMX aura une masse de 4 tonnes et comprendra trois modules :

- un module de propulsion chargé d'amener la sonde spatiale jusqu'à Mars ;

- un module d'exploration comprenant le train d'atterrissage à quatre pieds et le système de prélèvement d'échantillon du sol lunaire. Il embarque un petit astromobile fourni par les agences spatiales française (CNES) et allemande (DLR) ;

- un module chargé de ramener la capsule contenant l'échantillon de sol sur Terre.



De haut en bas, modules d'exploration, de retour et de propulsion.
(doc. F.Forget/LMD/IPSL)

La charge utile scientifique comprend sept instruments :

- TENGOO, « Imageur Téléojectif Nadir pour la Géomorphologie ». C'est une caméra téléobjectif (angle étroit) pour observer le terrain détaillé à la surface des lunes martiennes. TENGOO, dont la résolution est d'environ 40 cm, et obtenir des informations sur la distribution des différents matériaux correspondant aux échantillons collectés. Il peut également être utilisé pour vérifier la sécurité sur le site d'atterrissage prévu.

- OROCHI, « RadiOmètre Optique composé d'Imageurs Chromatiques », caméra grand angle en lumière visible à plusieurs longueurs d'onde pour la détection des matériaux hydratés et de matière organique.

- LIDAR, « Light Detection And Ranging ». C'est un instrument télémétrique pour observer les informations sur la

forme de la surface de la lune martienne. LIDAR utilise un laser pour mesurer l'altitude et l'albédo du terrain survolé.

-MacrOmega, « Observatoire Macroscopique pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité ». C'est un instrument d'observation proche infrarouge pour étudier la distribution des minéraux hydratés, des substances liées à l'eau et des matières organiques. Il sera utilisé pour choisir les lieux d'échantillonnage. MacrOmega est développé en partenariat avec l'agence spatiale française CNES et l'Institut d'Astrophysique Spatiale.

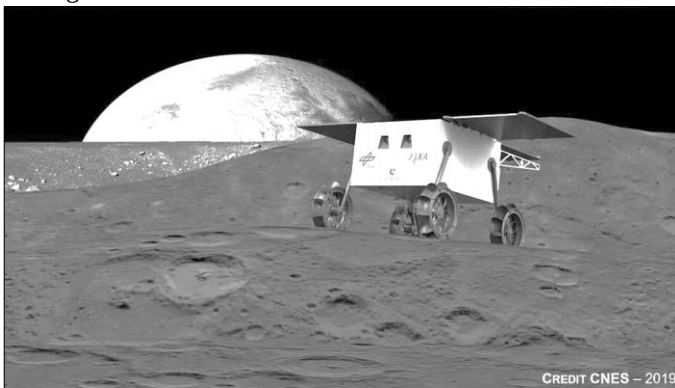
-MEGANE, « Mars-lune Exploration avec les rayons Gamma et Neutrons ». En étudiant les rayons gamma et les neutrons libérés par la surface, la présence des principaux éléments et de l'hydrogène sera observée et ces mesures utilisées pour sélectionner les emplacements de prélèvement.

-CMDM, « Circum-Martian Dust Monitor ». C'est un appareil pour étudier l'environnement de poussière autour de la lune de Mars. En mesurant l'abondance de poussière de 10 μm ou plus, la fréquence de collision des corps célestes qui génèrent de la poussière et le phénomène de réintégration de la poussière sur les lunes martiennes peuvent être analysés.

-MSA, « Mass Spectrum Analyzer ». C'est un instrument pour étudier l'environnement ionique autour de la lune martienne. La présence de glace à l'intérieur de celle-ci, l'effet des intempéries sur sa surface et la quantité de dissipation de l'atmosphère martienne peuvent être étudiés en mesurant les ions libérés de la lune martienne, les ions libérés de Mars et les ions du vent solaire.

Le rover

MMX comprendra un petit rover, développé par le CNES et le DLR, déjà partenaires dans le projet MASCOT (mission Hayabusa 2). Muni de panneaux solaires, sa durée de vie nominale sera de 100 jours à la surface de Phobos. Il sera équipé de 4 roues et comportera 4 instruments : des caméras de navigation, un spectromètre Raman, deux caméras spécialement dédiées à l'observation de l'interaction roue/régolithe et un radiomètre infrarouge.



Le système de prélèvement

Sur Phobos, la gravité est de $0,0057 \text{ m/s}^2$ (1700 fois moins que sur Terre), valeur minuscule, mais néanmoins plus importante que dans le cas des astéroïdes déjà approchés par les Japonais. La technique de prélèvement d'échantillon est donc différente ; au lieu d'un contact très bref avec sa cible, MMX se posera à la surface de Phobos pour prélever l'échantillon du sol à 2 cm de profondeur. Si nécessaire, deux atterrissages seront effectués pour garantir le succès du prélèvement. Mais la durée du séjour sera limitée à 3 heures.

Déroulement de la mission

Le lancement, annoncé vers septembre 2024, sera confié au nouveau lanceur japonais H3, encore en développement. MMX devrait atteindre son orbite martienne en août 2025. Durant 34 mois la sonde restera sur une orbite quasi stationnaire par rapport aux satellites, lui permettant de procéder à une cartographie minéralogique et à l'étude de la géologie de Phobos (et en partie de Deimos). On cherchera à déterminer la structure interne, en particulier la présence éventuelle de glaces. Après avoir accompli deux atterrissages sur Phobos, MMX effectuera plusieurs survols de Deimos. Puis, la capsule d'échantillon entamera son voyage de retour en août 2028, pour une arrivée sur Terre en septembre 2029.

Seulement cinq années s'écouleront entre la date de lancement (septembre 2024) et le retour sur Terre (septembre 2029) de la sonde qui, entre-temps aura séjourné trois ans, d'août 2025 à août 2028, dans le système martien. L'atterrissage devrait avoir lieu dans une région désertique située en Australie, comme pour le retour des échantillons d'Hayabusa 1, le 13 juin 2010 et pour Hayabusa 2, prévu en fin 2020.

Yves Monier

Sources principales :

Wikipedia : Martian Moons Exploration.

Site officiel JAXA : <http://mmx.isas.jaxa.jp/en/>

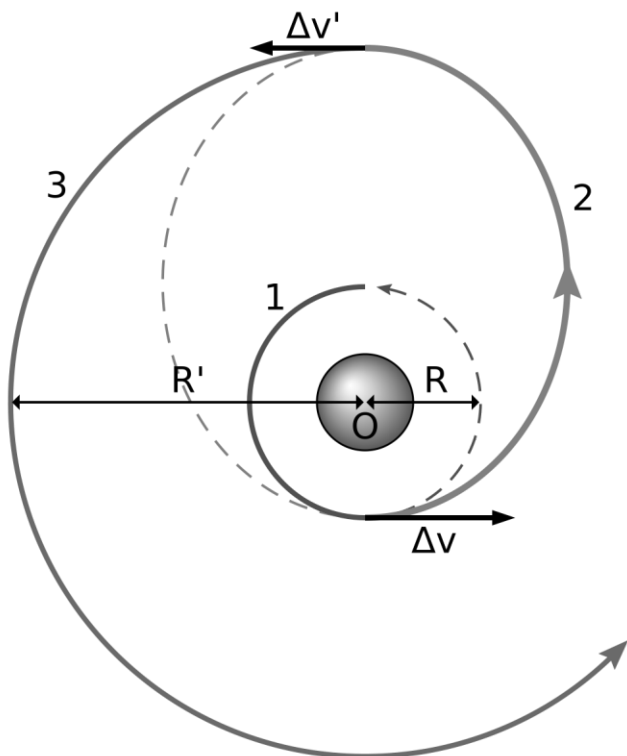
EN ROUTE POUR MARS !

Mars la rouge est froide et désertique. Pourtant aucune autre planète n'a autant excité l'imagination ou été la cible d'autant de missions spatiales. L'histoire de l'exploration de Mars commence en juillet 1965, avec le premier survol par la sonde Mariner 4. Mais il faut attendre le 14 novembre 1971 pour que Mariner 9 arrive, pour la première fois, à se mettre en orbite autour de Mars. Le 2 décembre suivant, la sonde soviétique Mars 3 se pose en douceur à la surface de Mars, mais tombe en panne peu après avoir déployé ses instruments. En 1976, les deux missions américaines Viking sont les premières charges scientifiques significatives posées sur le sol martien. Enfin, en juillet 1997, Pathfinder est le premier véhicule à rouler sur Mars. À l'heure où de nouvelles sondes partent pour Mars – la mission Hope Mars des Émirats arabes unis partira le 14 juillet prochain, suivie par le rover américain Mars 2020 le 20 juillet et la mission chinoise Tianwen-1 le 23 juillet – discutons de la façon d'atteindre la planète rouge.

En 1925, l'ingénieur allemand Walter Hohmann (1880–1945) publie un livre intitulé *Die Erreichbarkeit der Himmelskörper* (L'accessibilité des corps célestes) dans lequel il montre que, pour passer d'une orbite circulaire à une autre située dans le même plan, la trajectoire la plus économe du point de vue énergétique est une ellipse tangente aux deux orbites.

Des propulseurs fournissent une première impulsion pour quitter l'orbite initiale et entrer sur l'orbite de transfert, puis une seconde impulsion doit être fournie pour que la vitesse de la sonde s'ajuste à celle nécessaire pour rester sur l'orbite cible. En pratique, les orbites de la Terre et de Mars ne sont pas tout à fait circulaires (leurs excentricités sont respectivement de 0,0167 et de 0,0934) et l'orbite de Mars est inclinée de $1,85^\circ$ par rapport

au plan de celle de la Terre. Mais l'idée est là : faire passer une sonde de la Terre à Mars nécessite une première manœuvre pour l'engager sur une ellipse dont le périhélie est situé sur l'orbite de la Terre et l'aphélie sur celle de Mars, et une autre pour la placer en orbite martienne.



Trajectoire de Hohmann (2), pour transfert de la Terre (orbite 1) à Mars (orbite 3).
(doc. Leafnode, Wikimedia Commons)

Au début de son voyage, la sonde possède déjà la vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil, soit environ 29,8 km/s : cela nécessite quand même de la propulser dans la direction de révolution de la Terre autour du Soleil. Bien sûr, il faut aussi extraire la sonde de la gravité terrestre, ce qui nécessite une phase initiale de propulsion, qui doit être prolongée afin de gagner suffisamment d'énergie pour s'engager sur l'orbite de transfert de Hohmann. À la fin de cette phase la vitesse de la sonde est 2,9 km/s supérieure à celle de la Terre autour du Soleil. En raison de la deuxième loi de Kepler, dite loi des aires, la vitesse héliocentrique de la sonde diminue le long de sa trajectoire, jusqu'à atteindre 21,5 km/s quand elle atteint son périhélie. On calcule alors qu'elle parcourt sa trajectoire en à peu près 258 jours, soit près de 9 mois. C'est la voie la plus économe en carburant, mais cette durée peut être réduite à 180 jours si l'on accepte de dépenser plus de carburant. C'est bien sûr le choix qui serait fait pour amener un équipage humain sur Mars afin de limiter les nombreux inconvénients d'un si long voyage.

Le moment du départ doit être soigneusement choisi car la Terre et Mars se déplacent autour du Soleil à des vitesses différentes. Il existe des périodes particulièrement propices aux lancements, nommées fenêtres de tir. Durant le voyage de la sonde, Mars parcourt une certaine portion de son orbite, environ 136° car l'année martienne dure 687 jours. L'écart angulaire entre la position de la Terre au décollage et la position de Mars à l'arrivée étant de 180°, il faut que le vaisseau quitte la Terre quand celle-

ci est située 44° (= 180° - 136°) en arrière de Mars. Vu les périodes orbitales des deux planètes, cette situation ne se produit que tous les 780 jours, qui est la période synodique de Mars, c'est-à-dire durée au bout de laquelle une position relative Terre-Soleil-Mars se répète à l'identique. Cette configuration particulièrement favorable est, à chaque occurrence, l'occasion d'une vague de lancements vers la planète rouge.

En approchant Mars, il est nécessaire d'effectuer quelques corrections de trajectoire afin de survoler la planète à faible distance. Quand la sonde entre dans la sphère d'influence gravitationnelle de Mars, cette dernière la rattrape car elle se déplace sur son orbite à une vitesse moyenne de 24 km/s. La sonde doit alors manœuvrer pour être capturée, faute de quoi elle continuera sur sa lancée après avoir été déviée par la planète. En pratique, la sonde utilise ses propulseurs lors de son passage au plus près de Mars afin de décélérer relativement à la planète et de se placer sur une orbite elliptique. Pour réduire l'intensité du freinage nécessaire, et donc la masse de carburant à emporter, la sonde peut d'abord être placée sur une orbite très elliptique. Le demi-grand axe et l'excentricité de celle-ci sont ensuite progressivement réduits par freinage sur les couches supérieures de l'atmosphère martienne. Cette technique a été expérimentée pour la première fois en 1996 avec la sonde Mars Global Surveyor. Elle nécessite une grande maîtrise de la trajectoire pour éviter que la sonde ne se désintègre dans les couches trop épaisses de l'atmosphère. Pour obtenir sans risque une orbite satisfaisante, la procédure peut durer plusieurs mois.

Pour se poser sur Mars depuis l'orbite, comme le firent les sondes Viking, il faut encore décélérer de sorte que l'orbite intercepte la surface de la planète. Comme Mars possède une atmosphère très ténue, la décélération finale peut être effectuée par un freinage aérodynamique puis grâce à des parachutes avec éventuellement une ultime décélération grâce à des rétro-fusées. On l'aura compris, atteindre Mars et *a fortiori* se poser à sa surface est une opération plutôt compliquée : sur les 51 missions lancées, on ne compte que 22 succès. Cela est sans doute dû au fait que Mars cumule une gravité assez importante (38 % de celle de la Terre) et une atmosphère très ténue. Sur la Lune, dépourvue d'atmosphère et dont la gravité est faible, il n'y a qu'une seule solution : se poser grâce à des rétro-fusées. Sur Terre, dont la gravité est forte, on peut freiner efficacement sur son épaisse atmosphère, à condition d'être pourvue d'une protection thermique adéquate. Ensuite un simple parachute fait l'affaire. En revanche, sur Mars il faut la panoplie complète : bouclier thermique lors de la rentrée atmosphérique, parachutes sophistiqués pour un freinage supersonique, rétrofusées pour la touche finale. Et toute la chaîne doit parfaitement fonctionner pour éviter le crash... C'est sans doute ce qui explique le taux d'échec des missions martiennes et la durée qu'il a fallu pour perfectionner les techniques utilisées.

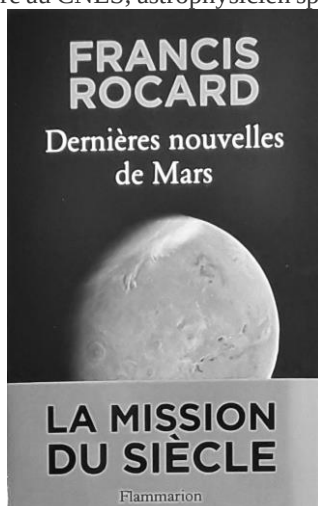
Espérons que tout se passe bien pour l'ESA et son rover Exo-Mars, rebaptisé Rosalind Franklin en l'honneur de la célèbre physico-chimiste britannique qui a œuvré à la découverte de la structure de l'ADN. Après deux reports successifs, son lancement est maintenant prévu en 2022, lors de la prochaine fenêtre de tir.

Roland Lehoucq

CEA Saclay DRF/IRFU/Département d'astrophysique

LA MISSION DU SIÈCLE

Début juin, parution chez Flammarion du livre “Dernières nouvelles de Mars”, de Francis Rocard, responsable de l’exploration du système solaire au CNES, astrophysicien spécialiste de Mars.



Ce “Petit livre orange” de l’aventure martienne (petit par son format et... son prix : 12 €), est accessible à tous et particulièrement agréable à lire. L’auteur commence par traiter de la question de la vie sur Mars et de la prochaine étape majeure de l’exploration robotique, le retour d’échantillons. Mais son ouvrage est essentiellement consacré aux perspectives techniques et politiques du projet d’exploration humaine de la Planète rouge. Et dans ce difficile exercice, il parvient à donner, de façon claire et concise, une vision cohérente de la situation actuelle de cette grande ambition.

L’auteur ne cache pas les nombreuses difficultés qui se présentent, dont celles d’origine budgétaire et géopolitique sont à ses yeux les plus déterminantes. Mais, précisément, il pense que le programme se fera du fait de la volonté des Américains de rester leaders, quitte à étaler le programme en le garnissant d’étapes intermédiaires (c’est essentiellement à ce titre que la station orbitale lunaire se justifierait...).

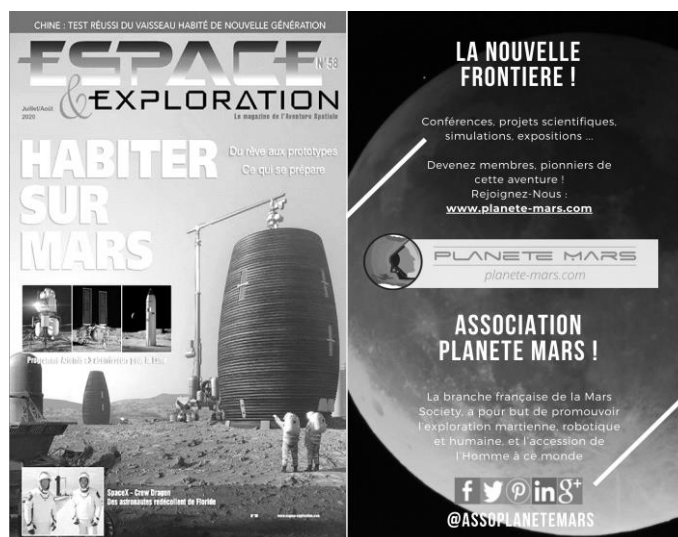
Sur le plan des défis techniques, même si leur analyse reflète une extrême prudence, la conclusion de l’auteur est qu’ils seront surmontables, mais qu’ils conduiront à des retards programmés. Trois développements sont particulièrement préoccupants à ses yeux : le nucléaire spatial (incontournable comme source d’énergie), le système d’entrée atmosphérique, de descente et d’atterrissage et, enfin, le véhicule de remontée en orbite martienne. Malgré ces réserves, son point de vue global est plutôt positif : le projet se réalisera, les difficultés trouveront solution. Mais cela sera progressif et demandera du temps...

Cette analyse reste dans le cadre de la vision institutionnelle, imposée de fait par les Américains, et on peut regretter que la vision alternative de SpaceX soit pratiquement passée sous silence. Certes, on peut douter du réalisme technique et financier de celle-ci, néanmoins elle prétend surmonter les trois obstacles majeurs rappelés ci-dessus, tout en réduisant les coûts. Son financement ? La réponse de SpaceX est Starlink, sa constellation de diffusion Internet globale, qui pourrait générer un revenu annuel de 30 milliards de dollars... De quoi imaginer un partenariat public-privé solide.

Richard Heidmann

LA VIE DE L’ASSOCIATION

Ce trimestre, la vie de l’Association, de nos membres et de nos familles a été chamboulée par le COVID-19. Néanmoins, quelques faits marquants nous ont animés.



Nous avons préparé un dossier sur Mars pour la revue Espace & Exploration. **Philippe Clermont** a rédigé un article de synthèse sur Perseverance (Mars 2020), la mission de rover chinois et Mars Hope, orbiteur des Émirats Arabes Unis. Ce dossier a été suivi d’un deuxième article préparé par **Richard Heidmann** sur les habitats martiens. **Aline Decadi** a également fourni un poster nouvelle mouture de l’Association, pour illustrer les articles. Vous pouvez d’ores et déjà vous procurer le magazine Espace & Exploration numéro 58 dans les kiosques.

Nous avons signé une convention de coopération et communication croisée entre APM et l’Association « Fédération Open Space Makers », dont les fondateurs sont également membres d’APM. Fédération Open Space Makers est une initiative soutenue par le CNES qui vise à ouvrir le monde de l’infrastructure spatiale au plus grand nombre en fournissant un cadre et des outils pour la conduite de divers projets en open source (fusées expérimentales, cubesats, ballons stratosphériques...).

Durant les mois de mai et juin, **Philippe Clermont** a donné des interviews pour les revues Phosphore (vulgarisation scientifique pour les adolescents) et Le Parisien Week-end, et **Richard Heidmann** pour le magazine Néon. **Jean-Marc Salotti** a publié l’article « Minimum Number of Settlers for Survival on Another Planet » dans Scientific Reports. Cet article a donné lieu à des interviews, notamment dans Les Echos, Ouest France, Futura Sciences, et prochainement dans SpaceFlight.

Aline Decadi
responsable communication APM

Ont collaboré à ce numéro : Pierre Brisson, Philippe Clermont, Aline Decadi, Richard Heidmann, Dominique Ledevin, Roland Lehoucq, Yves Monier.

Achevé d’imprimer : Objectif numérique 56100-Lorient
Dépôt légal : juillet 2020.

LES GLACIERS MARTIENS, RESSOURCE ASTRONAUTIQUE CAPITALE

La communauté scientifique martienne a, depuis longtemps, fait sien la devise « Follow the water » (suivez la piste de l'eau), la présence d'eau liquide apparaissant indispensable pour l'émergence d'une vie. Ce slogan a guidé la progression des investigations menées par les missions successives, avec un succès indéniable en matière de logique, d'économie de moyens et de résultats.

Sur Mars, à l'heure actuelle, l'eau n'existe pratiquement pas à l'état liquide en raison de la pression atmosphérique très basse, 6 millibars en moyenne, sur la journée et l'année, à l'altitude moyenne (« Datum ») qui correspond par ailleurs à la ligne de la dichotomie crustale qui sépare de façon très contrastée les hautes terres du Sud (jusqu'à 3 ou 4 km au-dessus du Datum), des basses terres du Nord (4 à 5 km en dessous du Datum en moyenne). Cette pression est aussi celle du point triple de l'eau (611 Pa) c'est-à-dire le point du diagramme de phase de l'eau pure où peuvent coexister ses phases liquide, solide et gazeuse. A cette pression la glace d'eau pure a tendance à se sublimer, c'est-à-dire à passer directement de la phase solide à la phase gazeuse lorsque la température monte au-dessus de 0°C. Ceci dit la pression en dessous de cette altitude moyenne monte au-dessus de 6 millibars et dans ces conditions, compte tenu des très fortes dénivellations à la surface de Mars, on peut trouver un peu d'eau liquide dans les basses terres du Nord ou dans le Bassin d'Hellas au Sud (région la plus basse de Mars à - 8 km du Datum en moyenne, pression de 11 millibars maximum) mais les possibilités sont très limitées. Au mieux, dans ces régions privilégiées, elle bout à quelques tout petits degrés au-dessus de 0°C (2° ou 3°C ?) et elle gèle un peu en dessous de 0°C (-10 à -15°C ?) grâce à une très forte salinité (perchlorates). Le résultat de la sublimation quasi générale de l'eau de surface qui tendrait à évoluer en phase liquide à un moment ou un autre de la journée et /ou de l'année, est que Mars est partout aride, les endroits les plus humides étant comparables aux endroits les plus secs du Désert d'Atacama.

Cependant on a pu observer la présence de glace d'eau un peu partout en surface de Mars. D'abord, même depuis la Terre, les deux calottes polaires (glace d'eau au Pôle Nord et au Pôle Sud, glace d'eau et glace carbonique en surface) offrent leurs surfaces réfléchissantes à tout observateur disposant d'un télescope de puissance moyenne. Dans les latitudes élevées, la sonde PHOENIX nous a aussi montré que là où elle s'était posée (68° Nord) la glace était immédiatement accessible (elle a été découverte sous quelques cm de régolite sous la sonde, dégagée par la force de la rétropropulsion lors de l'atterrissage et la pelle de l'engin l'a mise à jour un peu plus loin, sans effort). Ensuite, avec les radars embarqués sur plusieurs orbiteurs (notamment MARSIS de Mars Express, de l'ESA, puis SHARAD – Shallow Radar – à bord de MRO – Mars Reconnaissance Orbiter, de la NASA, qui fonctionne à plus hautes fréquences) on a découvert plusieurs banquises enterrées, même en zone intertropicale (Medusa Fossae), et, en latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, entre 40 et 50°, dans l'Ouest d'Utopia Planitia (près d'Isidis Planitia),

une vaste région (quelques 375000 km²) de buttes (« mesas ») à forte teneur en eau. En janvier 2018, une étude a mis en évidence l'existence de véritables falaises de glace à des latitudes assez élevées (55°) dans l'hémisphère Sud. Par ailleurs, de petits cratères d'impact créés aux altitudes moyennes dans les basses terres du Nord montrent, à l'occasion, de petites surfaces blanches qui disparaissent dans un temps relativement court ; il s'agit incontestablement de glace d'eau proche de la surface et qui se sublime une fois découverte, plus ou moins vite en fonction de l'importance du volume. Enfin l'analyse radar de SHARAD a révélé une diélectricité faible, comme attendu, se renforçant en profondeur, dans toute la région des basses terres du Nord (zone de basse altitude occupant environ 40% de l'hémisphère Nord et réceptacle probable d'un ancien Océan), ce qui indique la présence d'eau actuelle ou ancienne (porosité du sol après sublimation).

Il y a donc beaucoup de glace d'eau sur Mars, mais ce qui intéresse ceux qui y préparent l'installation de l'Homme (en particulier certaines équipes de la NASA), ce sont les latitudes basses et moyennes de l'hémisphère Nord car ce n'est qu'à ces latitudes que l'on peut envisager d'utiliser le rayonnement solaire pour obtenir de l'énergie (ne serait-ce que complémentaire à l'énergie nucléaire) et éviter des hivers trop rudes et trop longs (sur une année de 630 jours, ils le sont aux latitudes élevées, surtout dans l'hémisphère Sud compte tenu de l'excentricité de l'orbite de la planète !). C'est dans l'hémisphère Nord également que l'on trouve les conditions les plus favorables pour l'atterrissage (vastes plaines lisses et plates d'altitudes basses à proximité de l'équateur et en latitude moyenne, qui impliquent plus de temps disponible pour le freinage, moins de risques de déstabilisation lors du contact au sol, moins de consommation d'énergie car moindre déviation de la trajectoire « naturelle » du vaisseau, qui se place au-dessus de l'équateur par attraction « naturelle » de la planète).

Or, une étude récente, dirigée par Sylvain Piqueux (CalTech) et publiée dans les « Geophysical Research Letters » en décembre 2019, révèle qu'il existe une vaste région de l'hémisphère Nord au climat acceptable, où cette eau est abondante et serait très facilement accessible.

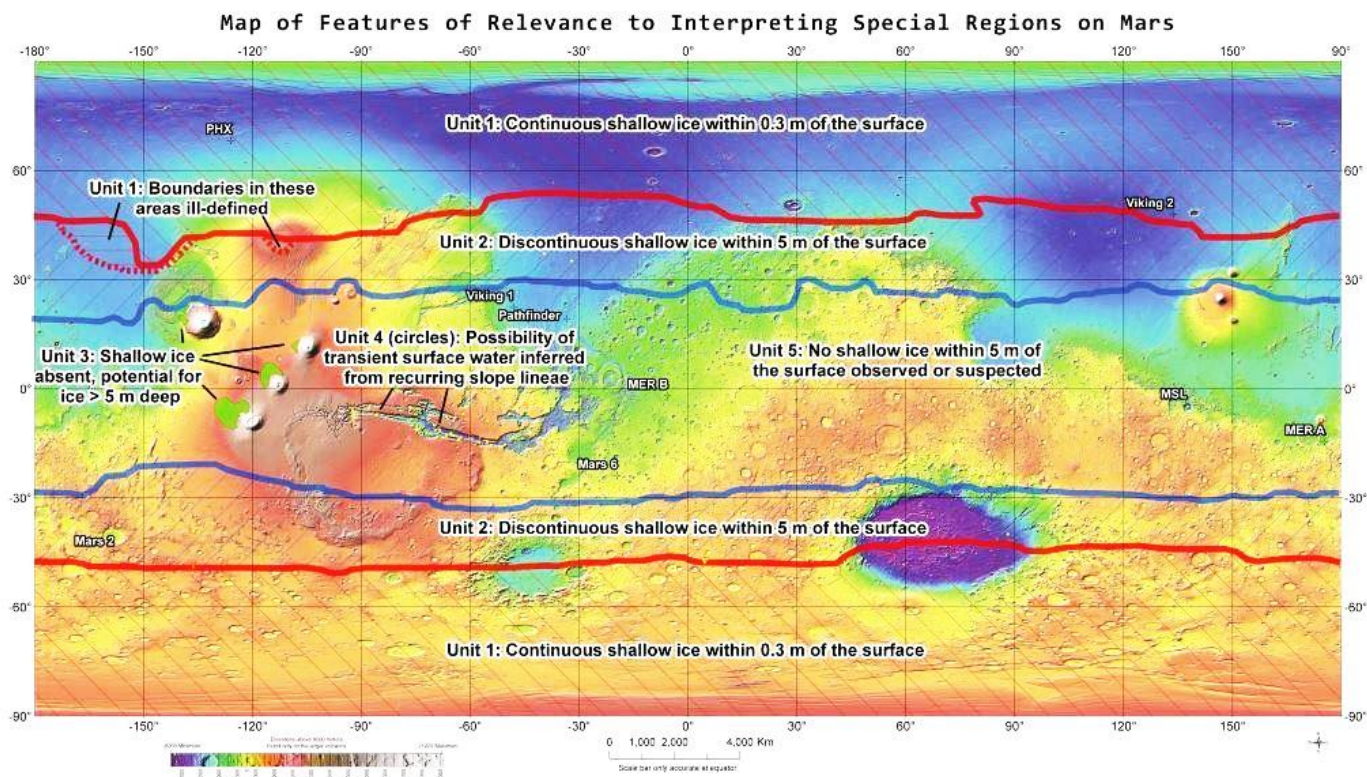
L'étude de Sylvain Piqueux porte précisément sur ce type de « gisements » des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, qui sont cachés ou qui n'apparaissent qu'en cas d'impacts. Le chercheur a eu l'idée d'utiliser les données de température du sol, collectées par deux instruments embarqués à bord de l'orbiteur 2001 Mars Odyssey, le radiomètre infrarouge MCS (Mars Climate Sounder) et l'imageur THEMIS (Thermal Emission Imaging System) fonctionnant dans le visible et également dans l'infrarouge. Les données ont été accumulées sur une très longue période (plus de 13 ans) et donnent une bonne définition (précision de 3 ppd pour MCS et de 100 mètres par pixel pour THEMIS). La glace d'eau ayant une inertie thermique notablement haute comparée à celle du régolite martien, l'intérêt est que ces données de température du sol indiquent clairement sa présence. Comme écrit dans l'étude, « la glace présente dans le sol influe de façon mesurable sur les tendances saisonnières de la température de surface et la profondeur de la couche d'eau s'exprime dans l'ampleur de l'effet ». En été la glace d'eau absorbe l'énergie du soleil et les températures du sol qui en contiennent sont donc

plus basses que celles du sol qui n'en contient pas. En automne/hiver c'est le contraire, la chaleur est restituée et le sol qui contient de la glace d'eau est moins froid que celui qui n'en contient pas. La réactivité ou plutôt la différence de réactivité du sol est d'autant plus nette que la glace est proche du sol et qu'elle est abondante. Bien entendu le système ne peut fonctionner qu'à une latitude suffisante pour que les différences de température entre les saisons puissent être sensibles (au moins 35°).

Selon ce principe le chercheur a pu dresser avec les données recueillies à deux saisons opposées sur la durée des treize années, une carte de l'hémisphère Nord montrant les zones où ce phénomène se manifestait le mieux. Il en est ressorti une région particulièrement « riche » qui descend jusqu'à 35° de latitude Nord dans le Sud d'Arcadia Planitia, entre les volcans Alba Patera et Elysium Mons. La glace d'eau y est abondante très près de la surface (à partir de seulement 3 cm). Comme le dit l'auteur (et comme la NASA l'a remarqué) cette région est particulièrement intéressante car dans ces conditions la glace pourrait être facilement extraite pour tous les besoins d'une implantation humaine, et cela se combine avec un sol lisse et plat à basse altitude permettant un atterrissage moins difficile qu'ailleurs. Notez bien que cela ne veut pas dire que l'on ne pourrait pas extraire de la glace d'eau ailleurs à la surface de Mars. Cela veut simplement dire que dans cette région, cela serait particulièrement facile.

Ces résultats ont vraisemblablement contribué à crédibiliser le scénario, désormais bien reconnu, d'une mission habitée faisant le plein pour le retour à l'aide d'ergols produits in situ à partir de ressources locales (CO₂ atmosphérique et eau du sol). Mais, surtout, SpaceX a dû y trouver un encouragement pour son projet de mission. Celui-ci implique en effet de produire 1100 tonnes d'ergols (sans compter les pertes au sol) pour le retour de chaque Starship, ce qui conduit à la production d'une tonne d'eau (1000 litres) par jour. Le moyen réaliste pour parvenir à ce débit n'est certainement pas le procédé d'extraction de l'eau du régolite par évaporation/condensation, mais bien le minage de couches de glace massives. SpaceX avait d'ailleurs déjà provoqué il y a quelque temps une discussion sur ce sujet avec les spécialistes de la NASA.

Fait significatif de l'émergence d'un intérêt renforcé pour ce thème de la production d'eau à partir de glace, le MEPAG* l'a traité lors d'une récente réunion, le 15 avril. Au cours de cette réunion, le directeur NASA du programme d'exploration de Mars a présenté les vues de l'agence sur cette question, insistant sur l'importance critique de la localisation des ressources en glace d'eau pour l'exploration humaine. La NASA a d'ailleurs à l'étude une mission principalement dédiée à cet objectif, dénommée **Mars Exploration Ice Mapper**, présentée conjointement avec un représentant de l'agence spatiale canadienne.



*Arcadia Planitia, entre les volcans Elysium Mons à droite et Alba Patera à gauche (au Nord de Tharsis). La ligne de latitude 35°N passe au Nord du premier et au Sud du second. Notez, un peu plus au Sud, Olympus Mons et le bloc de Tharsis avec ses trois volcans alignés. L'endroit serait un excellent site d'atterrissage en raison de cet environnement volcanique et aussi des tunnels, parfois effondrés, résultant d'anciens cheminements d'eau souterrains plus au Sud. La carte montre les formes de présence d'eau dans différentes zones (Units) : **Zones 1** : couche continue de glace, peu épaisse, à faible profondeur (30 cm) ; **Zones 2** : couche discontinue, peu épaisse, à moins de 5 m de profondeur ; **Zone 3** : absence de glace à faible profondeur, présence possible au-delà de 5 m ; **Zone 4** : possible existence transitoire d'eau liquide en surface (traces d'écoulements sur terrains pentus) ; **Zone 5** : absence d'observation ou de suspicion de la présence de glace à moins de 5 m de profondeur.*

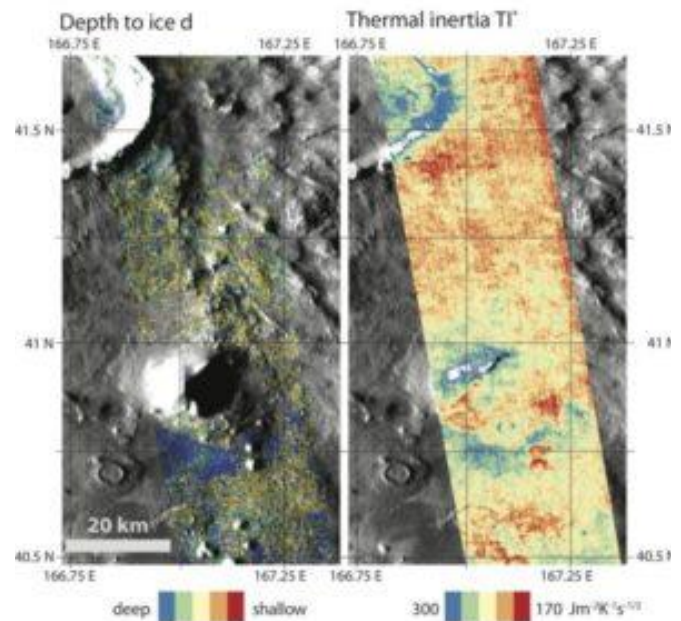
(doc. NASA/MOLA)

L'instrument principal serait un **radar à ouverture de synthèse** (SAR), permettant un pointage électronique de l'antenne et qui opérerait selon deux modes : balayage latéral et vertical. Quelques valeurs sur les conditions d'acquisition des données :

Rayon Mars	3390 km
Altitude orbitale	250-320 km
Volume données	48000 Mbits/jour
Vitesse au sol	~3 km/s
Portée latérale	32 km
Nombre de révolutions	13/jour
Espacement traces équatoriales	20 km

Cet orbiteur serait aussi chargé de caractériser la consistance superficielle du sol dans les régions d'intérêt, un objectif également lié au projet d'exploration humaine ; en effet, il ne suffit pas que de la glace soit facilement accessible, il faut aussi choisir un site permettant d'assurer un atterrissage dans les meilleures conditions (planéité, absence d'obstacles, solidité, épaisseur de poussière...). Or, si nous avons l'expérience du poser de sondes robotiques de 1 tonne, un vaisseau comme celui imaginé par SpaceX accuserait une masse de l'ordre de 250 tonnes à l'atterrissage, avec une puissance des jets des moteurs de descente en conséquence !

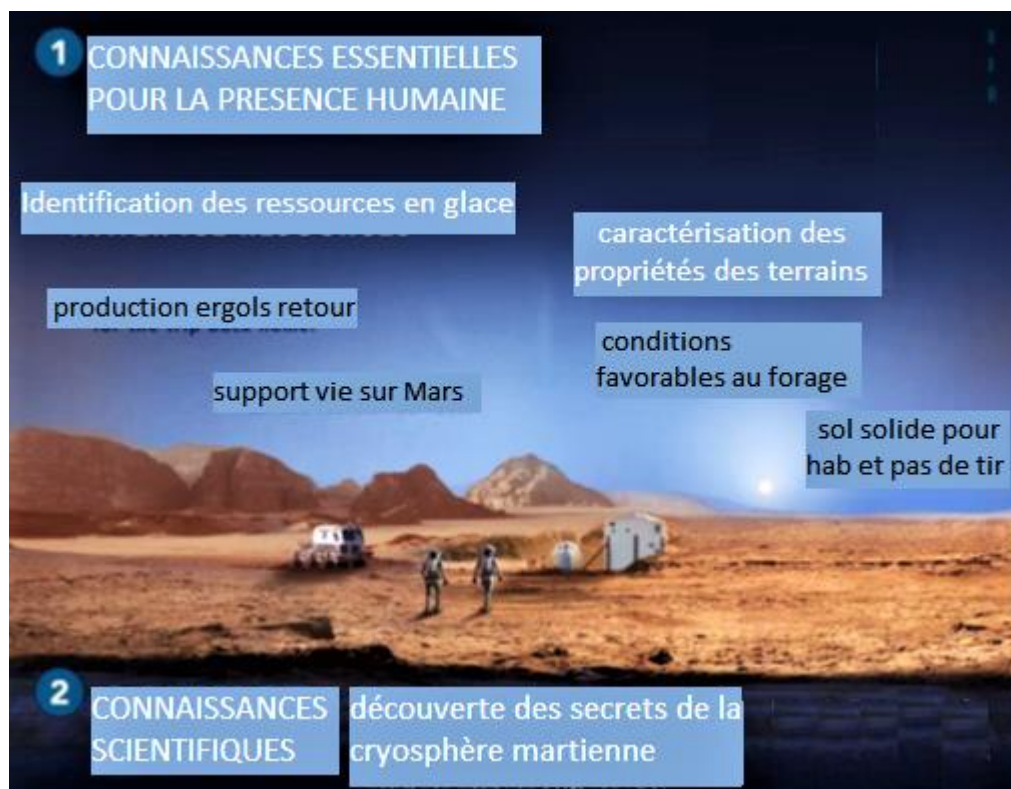
Pierre Brisson
Richard Heidmann



Exemple d'épaisseur relative de couche de glace d'eau à gauche et d'inertie thermique du régolite de surface (TI, à droite). Carte établie à partir de données recueillies par THEMIS, à l'Ouest d'Arcadia Planitia, où plusieurs cratères exposant de la glace occasionnelle ont été observés. « deep » signifie environ 1 mètre (mais pas plus); « shallow », quelques dizaines de cm. (doc. S. Piqueux, THEMIS, MCT et Geophysical Research Letter).*

Référence

“Widespread shallow water ice on Mars at high latitudes and mid latitudes” par Sylvain Piqueux et al. in *Geophysical Research Letters*, doi.org/2019GL083947.



Les objectifs de la mission Mars Exploration Ice Mapper, présentée aux scientifiques du MEPAG en avril 2020, visent l'acquisition de données sur la cryosphère et les terrains martiens en vue d'optimiser le site d'installation des premiers équipages. (doc. NASA)