

Bulletin

98

Juillet 2024

Bulletin APM

Sommaire

Editorial P. 2

IDEFIX à la conquête de Phobos ! P. 3

Dichotomie nord-sud de Mars : origine et implications P. 8

Vie de l'association. P. 18





Bulletin n°98, juillet 2024.

Images de la page de couverture :

- Planète Mars, image NASA.
- Curiosity Landing with the Crane, image NASA.
- Mars Desert Research Station en Utah, image Alain Souchier, APM.

Association Planète Mars : <https://planete-mars.com/>

Editeur du bulletin : Jean-Marc Salotti

SOMMAIRE

Editorial.....	2
IDEFIX à la conquête de Phobos !	3
Dichotomie nord-sud de Mars : origine et implications	8
Vie de l'Association, avril à juin 2024	18



Editorial

Par Philippe Clermont, Président APM,

La NASA lance une consultation radicalement innovante pour le futur du programme Mars Sample Return (MSR)

Le programme Mars Sample Return a pour objectif de ramener sur Terre des échantillons variés de sol martien, actuellement recueillis par le rover Perseverance dans de petits conteneurs scellés. Cette mission est à planifier dans la décennie 2030.

La mission dans sa conception actuelle, a fait l'objet d'un webinaire APM en 2022 (par Yves Monier, administrateur) ! <https://www.youtube.com/watch?v=KukBqKYrN9s>

En Janvier, nous avons invité Robert Zubrin. Au CNES, Robert nous a présenté la situation de ce programme. Un audit a conclu à des coûts à terminaison de 10 Mds\$, obérant pour la décennie les budgets NASA pour des missions robotiques... Pour comparaison, le coût d'un programme de rover de type Curiosity ou Perseverance est de l'ordre de 2 Mds\$ pour un retour scientifique et technologique considérable.... De plus, Robert nous a exposé une probabilité de succès très faible compte tenu de la complexité de la conception. Il nous a présenté ses idées alternatives sur de multiples missions robotiques peu coûteuses, avec un retour scientifique très supérieur. Et, c'est notre conviction, préparant beaucoup mieux l'arrivée de l'Homme sur Mars.

Robert a été largement entendu, concernant le besoin de reconception radicale de MSR.

En Avril, la NASA a lancé un appel à idées, très large, pouvant concerner de nouveaux concepts de mission, des nouvelles missions réutilisant des parties de MSR ou du programme Artemis, ou des équipements couvrant un besoin partiel, avec un horizon 2040 au plus tard. L'objectif, bien sûr, étant de baisser les coûts et dérisquer le programme.

Début Juin, la NASA a annoncé que sept sociétés ont été retenues et financées pour une première phase d'études de concept. Northrop Grumman (actuel Mars Ascent Vehicle à propulsion solide), Lockheed Martin, mais aussi SpaceX (Starship !) et Blue Origin, Aerojet Rocketdyne (pour un MAV à propulsion liquide), et deux sociétés innovantes beaucoup plus petites peu connues : Quantum Space et Whittinghill Aerospace.

Dans une reconception complète du programme, que deviendrait la contribution de l'ESA ? Celle-ci est actuellement prévue pour deux composants importants : ERO (Earth Return Orbiter – le véhicule de rendez-vous en orbite et de retour) et SFR (Sample Fetch Rover - permettant de récupérer les capsules scellées déposées par Perseverance sur le sol martien). C'est une inconnue.

Philippe Clermont

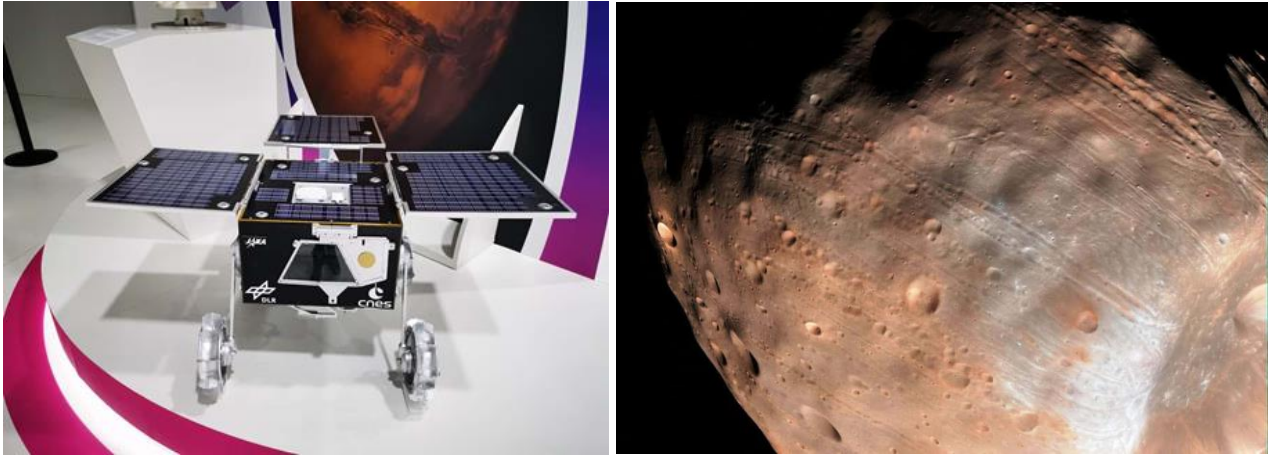
Président

pclermont@planete-mars.com



IDEFIX à la conquête de Phobos !

Par Yves Tichené, APM



A gauche : IDEFIX à taille réelle © Daniel Chrétien, FUTURA. A droite : Phobos, un des deux satellites de Mars, une pomme de terre de 20 à 25 km de diamètre à gravité faible © NASA JPL-Caltech. IDEFIX ne sera pas largué avec des parachutes ou amorti par des airbags mais simplement lâché à 50 mètres d'altitude. Ce qui correspond à un lâché d'une hauteur de 10 cm sur Terre. Conçu robuste, il absorbera l'impact et fera comme des roulés-boulés sur environ 30 mètres avant de s'immobiliser. Grâce à un algorithme embarqué, IDEFIX pourra se situer. Il se remettra à l'endroit au cas où et déploiera ses panneaux solaires...

Nom de la mission : MMX, Mars Moons eXploration

Elle est prévue posée en 2027. La technologie est inspirée par les cubesats. IDEFIX sera l'éclaireur de la sonde japonaise qui l'emporte, avant qu'elle ne se pose à son tour sur Phobos.

But de la mission :

« Pourquoi ces ravins ? Quelle est l'origine de Phobos et de Deimos ? Est-ce que le sous-sol de ces lunes contient des ressources intéressantes pour refaire le plein des fusées ? » Autant de réponses à apporter lors des analyses in situ et de l'analyse des échantillons au retour de la mission MMX... Plus précisément, il s'agit de déterminer l'origine de l'existence des deux satellites martiens en étudiant la composition du sol phobosien avant celui de Deimos, deuxième satellite de Mars, en étudiant le climat martien, et en collectant, au mieux, des échantillons qui seront envoyés sur Terre en 2029 - 2030.

On peut imaginer que le scénario prévu de ce retour d'échantillons complètera celui prévu sur le sol martien dans le courant de la même période, 2028-2030.

Mais revenons un peu en arrière...

- Souvenez-vous, en 1965, une sonde est envoyée dans l'espace, elle s'appelait ASTERIX...



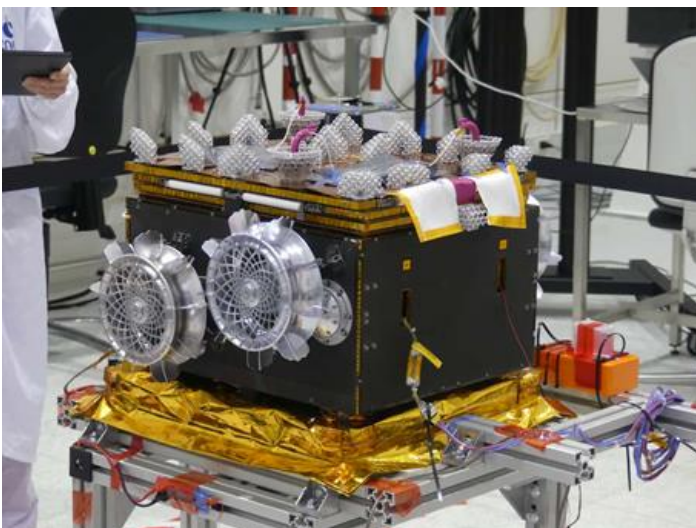
ASTERIX ?

- Oui, c'est le premier satellite artificiel français lancé le 26 novembre 1965 à 14 h 47 min 21 s TU par une fusée Diamant-A depuis le Centre militaire d'Hammaguir, dans le Sahara algérien, avec une mise en orbite via un radar, et réussi du premier coup, potion scientifi-magique oblige. Ce lancement réalisé par le Centre national d'études spatiales (CNES), propulse la France à la troisième place pour avoir réussi à effectuer une mise en orbite de manière autonome avec un lanceur national, après l'Union soviétique (Sputnik 1, 1957), et les États-Unis (Explorer 1, 1958).
- Et le 24 décembre 1979, le premier satellite lancé par la fusée Ariane, fut surnommé Obélix, 14 ans plus tard. Il pesait 1 600 kg. Son nom officiel : CAT-1 (Capsule Ariane Technologique).

2023 : le CNES envoie 2 instruments de mesure et d'exploration au pays du Soleil Levant , à la JAXA, l'agence spatiale japonaise qui orchestrera la mission :

- le spectromètre MIRS (MMX InfraRed Spectrometer, voir image ci-dessous), développé par le Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique - Lesia - à Meudon
- un rover de 25 kg de la taille d'un four à micro-ondes, en coopération avec l'agence allemande DLR, appelé du nom d'un adorable héros à 4 pattes adulé par Obélix, rond héros de Goscinny et Uderzo, et connu du monde entier, IDEFIX.

IDEFIX décollera en septembre 2024 et devra affronter les vibrations et les températures extrêmes qui règnent sur ce satellite. Il arpentera le sol, tant faire se peut, de Phobos, lancé par la main de la JAXA, l'agence spatiale japonaise. On pense à la sonde Hayabusa 2, lancée le 3 décembre 2014, qui a rapporté sur Terre des échantillons provenant de l'astéroïde Ryugu, en 2018...



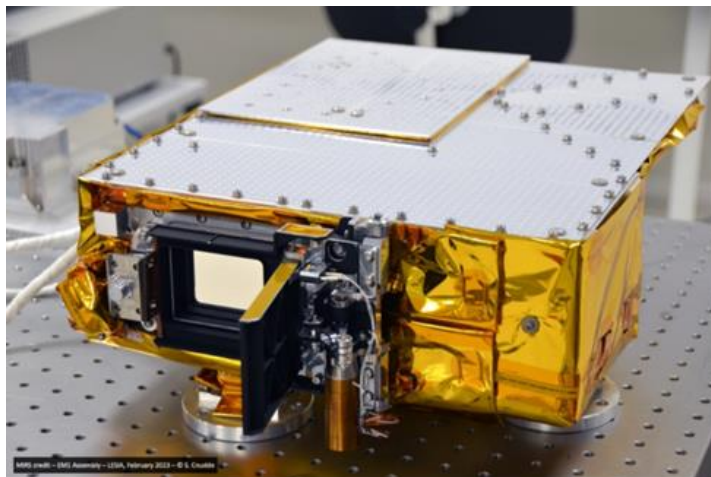
Le rover en salle blanche au CNES à Toulouse. On voit les roues repliées et attachées. Elles se libéreront une fois le rover posé au sol de Phobos. Les 3 couches dorées au-dessous sont les panneaux solaires en position repliée pour les protéger du choc quand le rover rebondira à la surface. Au-dessus, on peut voir des "mousses d'aluminium", pareilles à des éponges grises, qui ont été ajoutées. © Daniel Chrétien, FUTURA

Sa mission : actif durant sa course orbitale martienne, ce spectromètre imageur proche infra-rouge identifiera les minéraux présents à la surface de Phobos et Deimos, les deux satellites de Mars, par les signatures spectrales. MIRS analysera la lumière réfléchiée par la surface de ces deux satellites

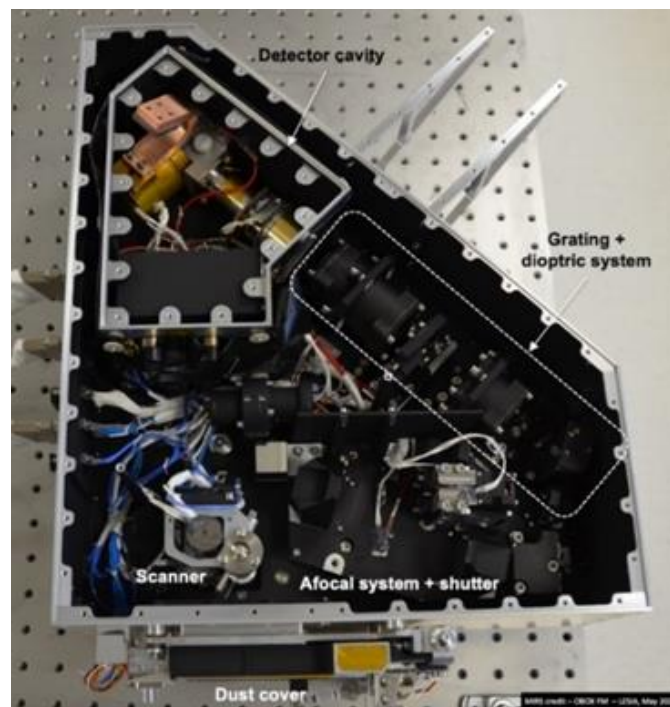


naturels et ainsi déterminera leur nature selon les diverses longueurs d'onde enregistrées.

De plus, il cartographiera la répartition des minéraux : roches, taux d'hydratation, présence de matière organique ¹. La résolution des mesures variera entre 20 mètres lors des premières observations et 1 mètre lorsque la sonde descendra se poser à la surface. MIRS se tournera aussi vers l'atmosphère de la planète Mars, et vers les bandes de fréquences auxquelles il est sensible (CO₂, H₂O). Cela permettra d'identifier des phénomènes météo comme l'apparition de tempêtes de poussière (dust devil) et la présence de nuages.



Le spectromètre français MIRS. © S. Cnudde - EM1 Assembly - LESIA, 2023.



© OBOX FM - LESIA, 2023



IDEFIX et ses roues à aubes en cours de fabrication au CNES à Toulouse. © Frédéric Lancelot/ CNES

Conclusion : chercher les origines de Phobos et de Deimos

On cherche toujours à comprendre leur présence. Et il y aurait seulement deux possibilités : soit la planète rouge a capturé ces deux astéroïdes, soit il s'agit d'une collision de Mars avec une autre planète en formation il y a des milliards d'années et les débris se seraient agglomérés pour former deux petites lunes. Selon le chercheur du CNRS (Centre National de Recherche Scientifique), Patrick Michel, coresponsable du dressage scientifique d'IDEFIX, « seules des données sur le terrain de ce satellite permettront de décider... ». Durée totale de la mission : cinq ans avec un retour des échantillons dans le désert australien. On espère fort que cette mission IDEFIX marche... et nous décrive l'ambiance intime de ces trois acteurs, que sont Mars, la planète mère, et ses 2 enfants-satellites en livrant des informations capitales sur la formation du système solaire...



Patch de la mission du rover IDEFIX. © CNES, DLR, JAXA, 2023, Les éditions Albert René / Gosciny-Uderzo



Yves Tichené : Carrière dans l'Aéronautique en tant que Personnel Navigant Commercial. Formateur des équipages PNC et PNT au niveau de l'expertise Sûreté. Astronome amateur conférencier. Fondateur d'une section Astronomie au sein d'Air France en 1992. Co-fondateur du Groupe Astrovoyageurs Extrêmes en 2015 avec une chaîne sur Youtube.

1: Note de Jean-Marc Salotti : lors du concours de la Mars Society de 2022 où il fallait imaginer une société martienne de 1 million de personnes, l'équipe APM du projet Foundation a posé comme hypothèse l'exploitation de Phobos comme base avancée, notamment pour refaire le plein des fusées. Selon les données d'observation, la surface de Phobos est constituée de roches faiblement hydratées et carbonées, mais cela ne serait pas représentatif du sous-sol, bien plus intéressant, car les éléments les plus légers ont pu s'échapper en raison de leur volatilité. D'où le grand intérêt d'y aller et de creuser un peu pour vérifier cette théorie !



Dichotomie nord-sud de Mars : origine et implications

par Dr Mélanie Thiriet, Escape Productions

L'obtention des premières images de Mariner 9 dans les années 70 nous a permis d'obtenir une topographie détaillée de la surface martienne et de nous dévoiler des structures de surface particulièrement étonnantes. Parmi les plus remarquables de ces structures figuraient les plus grands volcans boucliers connus du système solaire (dont Olympus Mons : 22 km de haut pour 650 km de diamètre) ou encore la profonde entaille de Valles Marineris (jusqu'à 10 km de profondeur et 3500 km de long, soit des dimensions 10 fois plus imposantes que celles du Grand Canyon du Colorado). Mais un des plus grands étonnements provint certainement de la découverte d'une dichotomie d'aspect très marquée entre les hémisphères nord et sud de la planète. Aujourd'hui encore, l'origine de cette dichotomie ainsi que ses conséquences sur l'intérieur de la planète demeurent très énigmatiques et représentent un des enjeux majeurs de la recherche martienne.

1. La dichotomie crustale nord/sud : présent et passé

a. Une dichotomie d'altitude et d'aspect

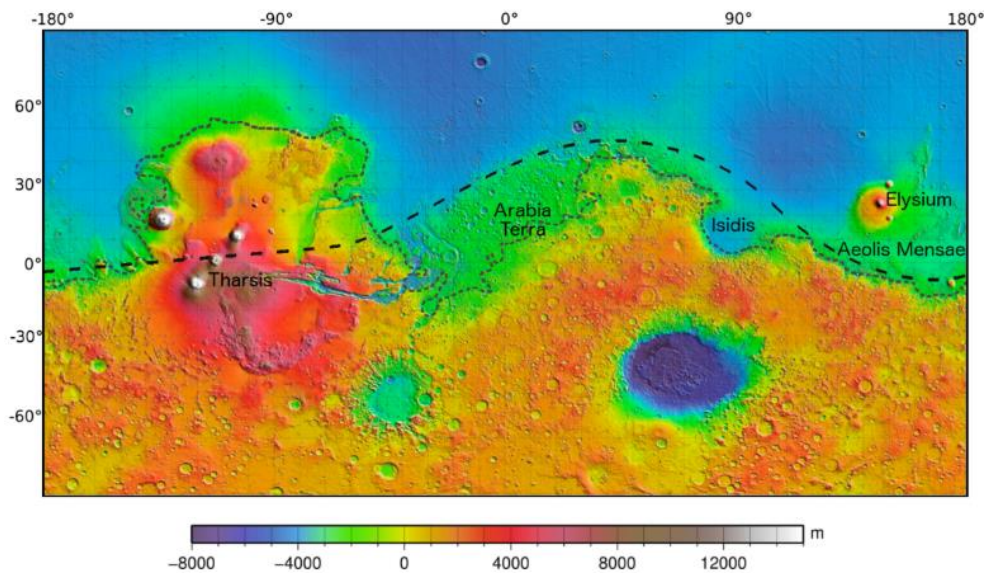


Figure 1 – Carte dont l'échelle colorimétrique correspond aux données altimétriques fournies par l'instrument Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) de la mission Mars Global Surveyor. Les pointillés fins représentent la limite de la dichotomie si celle-ci est définie à partir d'une épaisseur de croûte constante (ici 40 km selon Neumann et al., 2004). Les pointillés plus larges illustrent la limite après prise en compte des remaniements ultérieurs à la formation de la dichotomie, qu'ils soient de nature érosive ou éruptive (Andrews-Hanna et al., 2008).



L'aspect le plus frappant de cette dichotomie est la différence d'altitude qui est observée entre les hémisphères nord et sud de Mars avec une répartition quasi-bimodale des altitudes, l'hémisphère sud étant plus élevé d'environ 5.5 km en moyenne (Figure 1).

Une autre caractéristique de cette dichotomie est une différence d'aspect et de rugosité très marquée entre les 2 hémisphères. En effet, les hautes terres du sud comprennent majoritairement des terrains qui comptent parmi les plus anciens de la surface (Figure 2), et qui sont très cratérisés et incisés par de nombreuses vallées et canaux d'écoulement. Par contraste, les basses terres du nord sont recouvertes de vastes plaines très lisses, beaucoup moins cratérisées et plus jeunes. Ces plaines correspondent à de vastes dépôts sédimentaires qui sont issus de l'érosion intensive des hautes terres de l'hémisphère sud et qui recouvrent des coulées de lave de plusieurs kilomètres d'épaisseur.

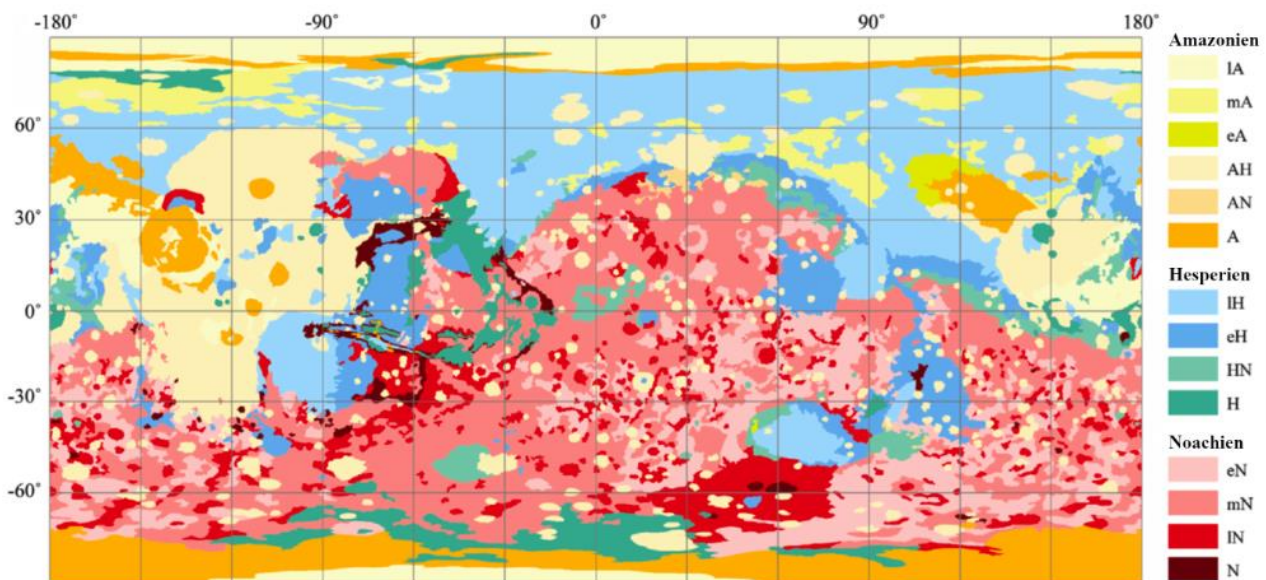


Figure 2 – Carte chronostratigraphique de Mars, Tanaka et al. (2014). L'échelle des temps géologiques martiens de Hartmann and Neukum (2001) a été établie à partir de données stratigraphiques et de la densité des cratères d'impact. Cette densité, ainsi que la taille des structures d'impact, sont directement corrélées à l'importance du bombardement météoritique et cométaire qui est allé décroissant durant l'évolution du système solaire : plus un terrain est impacté et avec de larges cratères plus il est ancien et inversement. Le Noachien est la période la plus ancienne (entre -4.5 et ~ -3.7 milliards d'années). L'Hespérien couvre, quant à lui, une période allant de ~ -3.7 à ~ -3 milliards d'années. La dernière époque, l'Amazonien, correspond aux terrains les plus récents et peu cratérisés principalement situés dans l'hémisphère nord (de ~ -3 milliards d'années à aujourd'hui).



b. Délimitation de la dichotomie

Entre les deux hémisphères s'étendent des zones de transition (Arabia Terra, Aeolis Mensae) qui ont été remaniées après la formation de la dichotomie, tant par des processus érosifs que par l'activité des grandes provinces volcaniques (Figure 1). De même, la région du bouclier de Tharsis – immense renflement crustal de 5500 km de diamètre regroupant notamment de multiples stratovolcans, et cinq volcans boucliers majeurs dont Olympus Mons – a eu une activité volcanique intense qui a recouvert toute trace de l'ancienne délimitation nord-sud dans la région. L'ancienne limite nord-sud reste donc mal comprise, ce que nous en voyons aujourd'hui résultant d'une évolution longue et complexe de la surface. La Figure 1 présente deux limites potentielles de la dichotomie originelle : en pointillés fins une limite correspondant à une épaisseur de croûte estimée à 40 km avec les modélisations actuelles (Neumann et al., 2004), et en pointillés larges une limite prenant en compte les processus de remaniement ayant eu lieu au cours de l'évolution au niveau de la zone de transition (Andrews-Hanna et al., 2008). Cette dernière délimitation est tout particulièrement intéressante car elle a une forme elliptique qui nous fournit un indice précieux sur la manière dont a pu se former la dichotomie martienne.

c. Comment s'est-elle formée ?

S'il est aujourd'hui largement admis que la dichotomie est une des plus anciennes structures de la surface de Mars et qu'elle daterait des premiers stades de l'évolution de la planète entre -4.5 Ga (formation du système solaire) et -3.7 Ga (Solomon et al., 2005), il n'y a toutefois pas de consensus quant au mécanisme ayant conduit à sa formation, bien qu'elle soit très vraisemblablement liée à un événement majeur de l'histoire de Mars. Plusieurs hypothèses ont été avancées et confrontées aux contraintes dont nous disposons :

- formation de la dichotomie à un stade très précoce de l'évolution martienne
- maintien de la différence d'altitude entre les deux hémisphères dans le temps
- répartition quasi-bimodale des altitudes
- forme vraisemblablement elliptique de l'ancienne limite de la dichotomie.

→ La théorie de l'impact

La théorie de l'impact est l'une des hypothèses les plus populaires et les plus prometteuses, notamment car elle parvient à expliquer la répartition quasi bimodale des altitudes ainsi que la forme elliptique de la dichotomie, forme typiquement retrouvée dans les grands bassins d'impact du système solaire. Dans cette hypothèse, la croûte de l'hémisphère nord est éradiquée lors d'un grand impact. L'énergie phénoménale fournie par un événement d'une telle ampleur provoque la formation d'un océan de magma à l'échelle hémisphérique qui, en refroidissant, aurait conduit à la formation d'une croûte nord secondaire (Marinova et al., 2008) (Figure 3). Un tel impact pourrait, de plus, également justifier la formation des deux petits satellites de Mars, Phobos et Deimos, à partir des éjectas de



l'impact vers l'espace (Rosenblatt et al., 2016).

Plusieurs arguments ont toutefois été opposés à cette théorie. La localisation de l'impact reste notamment débattue, un événement situé dans l'hémisphère austral ayant pu conduire, à l'inverse, à un épaissement de la croûte sud (Reese et al., 2010; Golabek et al., 2011). De plus, un impact de cette magnitude pourrait conduire à la disruption de la planète, ou tout du moins, à l'éradication de la dichotomie car l'apport considérable de chaleur de l'impact pourrait conduire à un rééquilibrage des altitudes entre les deux hémisphères.

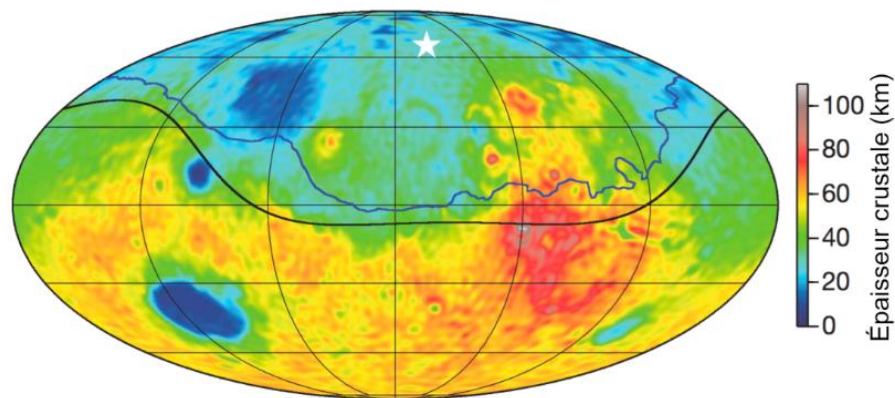


Figure 3 : comparaison entre la délimitation de la dichotomie de forme elliptique de Andrews-Hanna et al. (2008) (en noir) et les limites d'excavation crustale modélisées par Marinova et al. (2008) (en bleu) dans le cas où la dichotomie serait formée suite à un grand impact dans l'hémisphère nord (localisation représentée par l'étoile blanche) (Figure issue de Marinova et al., 2008).

→ La théorie de la convection mantellique avec un panache dominant dans un hémisphère

Alternativement la dichotomie martienne pourrait résulter de processus endogènes et être l'expression de surface de la structure interne de la planète par le passé. Ainsi, certains modèles de dynamique interne prédisent la présence d'un panache chaud dominant dans un hémisphère tandis qu'un écoulement descendant de manteau froid est observé au niveau de l'hémisphère opposé. Dans une telle configuration, le panache pourrait soit amincir soit épaisir la croûte de l'hémisphère sous lequel il se trouve, ceci dépendant de la domination, ou non, de l'érosion de la croûte par le panache, sur les processus magmatiques à l'origine de la formation de cette croûte (Zhong and Zuber, 2001).

Cependant, à l'instar de la théorie de l'impact, certaines problématiques posées par la théorie de la convection mantellique demeurent à ce jour irrésolues. Un contre-argument majeur concerne l'incompatibilité apparente entre la formation très précoce de la dichotomie et les délais nécessaires avant la mise en place d'une structure convective, c'est-à-dire typiquement quelques centaines de millions d'années. Un autre challenge pour cette théorie est de parvenir à expliquer la répartition quasi-bimodale des altitudes. En effet, avec une convection mantellique de cette nature les altitudes auraient tendance à être maximales au niveau de la tête du panache mais à s'étaler à distance de celle-ci.



→ La théorie d'un manteau gravitationnellement instable

La formation de la dichotomie pourrait être encore plus primordiale que dans les deux scénarios précédents et être directement en lien avec la différenciation de la planète elle-même. En effet, lors de la formation des planètes telluriques les sources de chaleur étaient nombreuses, ce qui a très certainement conduit à la formation d'océans magmatiques primordiaux d'échelle planétaire ou, tout du moins, hémisphérique. Le refroidissement et la cristallisation de ces océans primordiaux a conduit à la formation de la croûte primaire des planètes telluriques.

Sur Mars, différents scénarios de refroidissement ont été proposés avec une cristallisation qui se fit vraisemblablement de bas en haut, c'est-à-dire du noyau jusqu'à la surface. Si le scénario d'une cristallisation rapide et homogène est possible, il n'est cependant pas exclu que cette cristallisation ait été plus lente avec la formation de cristaux légers près du noyau puis de plus en plus lourds vers la surface. Cette stratification en densité étant instable elle aurait pu conduire à un retournement du manteau, créant ainsi un épaissement de la croûte au niveau du panache associé à la remontée des cristaux peu denses proches du noyau vers la surface (Elkins-Tanton et al., 2003). Cependant, dans un tel scénario, le rétablissement de l'équilibre gravitationnel dans le manteau aurait conduit à l'arrêt rapide de la convection, ce qui est incompatible avec l'observation d'un volcanisme récent sur Mars. De plus, comme pour la théorie de l'impact, la différence d'altitude entre les deux hémisphères disparaîtrait rapidement, aucun processus ne permettant de la maintenir.

→ La théorie de la tectonique des plaques

Bien qu'aujourd'hui la tectonique des plaques de notre planète soit un phénomène unique dans le système solaire, certains indices font penser que ce processus a également pu exister sur d'autres planètes et, en particulier, sur Mars. Dans l'hypothèse de l'existence d'une tectonique des plaques anciennes ayant conduit à la formation de la dichotomie, les hautes terres du sud s'apparenteraient alors à un continent, tandis que les basses régions plus jeunes du nord correspondraient à de la croûte océanique recyclée (Sleep, 1994).

Cependant cette théorie est loin de faire l'unanimité car les preuves de l'existence d'une ancienne zone de subduction manquent. Par ailleurs, ce scénario nécessite des délais de mise en place également trop longs pour permettre la formation très précoce de la dichotomie.

→ Vers un scénario de formation hybride ?

Comme nous venons de le voir, aucun des scénarios qui ont jusqu'à présent été envisagés n'est compatible avec toutes les contraintes dont nous disposons. Cependant, des scénarios alliant certaines des théories précédemment évoquées peuvent également être envisagés. Ainsi, à titre d'exemple, Citron et al. (2018) proposent une théorie où un impact de grande envergure excaverait la croûte primordiale dans l'hémisphère nord, créant ainsi une différence d'épaisseur entre les deux hémisphères. Cet impact favoriserait par la suite la mise en place d'une structure de convection avec



un panache qui migrerait préférentiellement aux antipodes de l'impact, c'est-à-dire sous la croûte épaissie et donc isolante de l'hémisphère sud. La chaleur apportée par ce panache permettrait d'épaissir encore la croûte de l'hémisphère sud et d'assurer ainsi la pérennité de la différence de relief entre les deux hémisphères tout en conservant la forme elliptique de l'impact initial.

2. Impact de la dichotomie sur la structure et l'évolution de Mars

Même s'il n'y a pas de consensus sur le processus de formation de la dichotomie de Mars, tous ceux qui ont été envisagés opèrent à large échelle et ont, donc, profondément dû influencer la structure interne de la planète. Mais dans quelle mesure cette dichotomie de surface s'étend-elle en profondeur ?

a. Une dichotomie dans la structure de la croûte martienne

L'analyse des données topographiques et gravimétriques a montré que la différence d'altitude entre les deux hémisphères était compensée par une différence d'épaisseur de croûte, ou, alternativement, par une différence de densité. Or, les chercheurs ont longtemps pensé que la croûte martienne était homogène et de composition basaltique. Cette hypothèse a donc donné lieu au modèle traditionnel de la croûte martienne où la croûte sud compense son altitude plus élevée par une épaisseur plus importante que la croûte nord (Figure 4, modèle 1). Avec un tel modèle, une compilation des différentes études prédit une répartition quasiment bi-modale entre les épaisseurs des croûtes nord (pic à ~ 30 km) et sud (pic à ~ 60 km) (Neumann et al., 2004, Wieczorek, 2007).

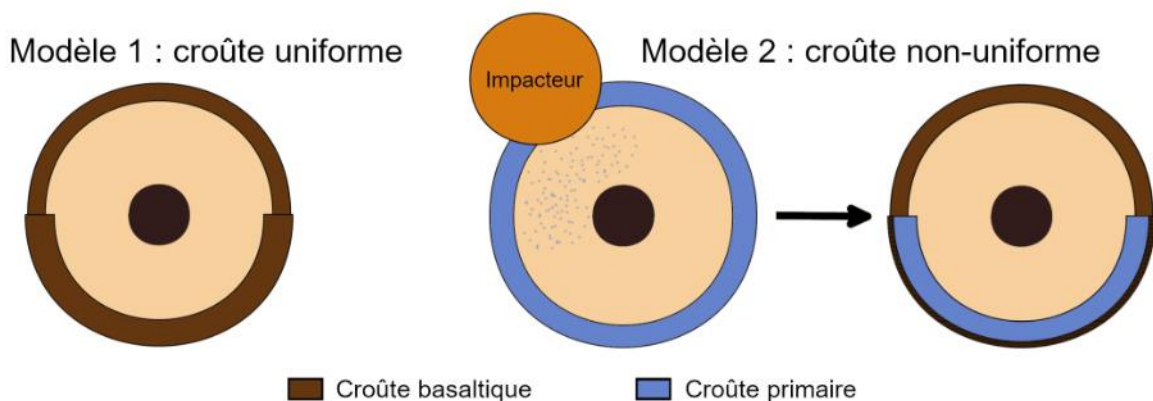


Figure 4 : schéma non à l'échelle de deux modèles de croûte différents. a : modèle classique de la croûte martienne où celle-ci est uniformément basaltique. b : modèle alternatif où la croûte primaire est remplacée dans le nord par une croûte secondaire basaltique suite à un grand impact. Cette même croûte primaire est enfouie dans le sud sous une couche de surface de nature basaltique.

b. Une dichotomie de composition et de propriétés de la croûte ?

Cependant, la croûte martienne ne serait peut-être pas aussi homogène que le suggèrent les



observations de surface. En effet, des études récentes (par télédétection et analyses in situ) ont montré la présence de roches felsiques plus légères que les roches basaltiques (Carter and Poulet, 2013 ; Wray et al., 2013 ; Sautter et al., 2015) et proches des restes de la croûte terrestre continentale précoce. Ces roches ont toutes été mises en évidence dans le sud, au niveau des cratères d'impact, ce qui suggère l'existence d'un réservoir commun enfoui en profondeur dans cet hémisphère.

Cette découverte, couplée au mode de formation le plus communément adopté de la dichotomie par impact, suggérerait un modèle de croûte alternatif. Dans ce modèle une croûte primaire uniforme est formée dès les premiers stades de l'évolution de Mars. Cette croûte primaire serait ensuite éradiquée dans l'hémisphère nord lors de la formation de la dichotomie par un grand impact, puis remplacée par une croûte secondaire basaltique. Au sud, la croûte secondaire basaltique se limiterait ainsi à une couche de surface, tandis qu'un composant plus léger de croûte primaire persisterait en profondeur avec des propriétés et une composition différente (Figure 4, modèle 2). Dans une telle configuration, ce composant de croûte primaire pourrait, notamment, être plus riche en éléments radioactifs, la croûte secondaire étant formée à partir d'un manteau déjà appauvri en éléments radioactifs suite à la formation de la croûte primaire.

c. Influence de ces différences nord-sud sur la structure interne de Mars

Bien que l'existence d'une tectonique des plaques dans le passé ne soit pas exclue, Mars est aujourd'hui entièrement recouverte d'une lithosphère rigide et relativement froide, qui englobe la croûte ainsi que la partie haute du manteau. Avec le refroidissement de la planète durant les milliards d'années qui ont suivi sa formation, cette lithosphère rigide s'est épaissie et s'est étendue de plus en plus profondément dans le manteau. Cependant la manière dont une planète refroidit dépend pour beaucoup de la répartition des sources de chaleur (et donc des éléments radioactifs) dans la planète. Lors de sa formation, la croûte extraite du manteau est enrichie en éléments radioactifs par rapport à celui-ci. Plus cet enrichissement est important plus les sources de chaleur sont localisées près de la surface – c'est-à-dire dans la croûte – et plus la chaleur est facilement évacuée vers la surface et la lithosphère est chaude.

Dans les deux modèles proposés (Figure 4), la production de chaleur est plus importante dans la croûte sud que dans celle du nord. Ceci est dû au fait que la croûte sud contient plus d'éléments radioactifs que la croûte nord : soit parce qu'elle est plus épaisse (modèle homogène : Figure 4, modèle 1), soit parce que la croûte primaire qui y est enfouie est probablement enrichie en éléments radioactifs (modèle alternatif : Figure 4, modèle 2). Aujourd'hui l'hémisphère sud a donc une lithosphère très probablement plus fine que celle de l'hémisphère nord (Figure 5a) avec des températures bien plus élevées (Figure 5b : 170-304 K de différence dans le manteau superficiel) et un flux de chaleur de surface qui est également plus important (17.1-19.5 mW/m² au nord, 24.8-26.5 mW/m² au sud) (Thiriet et al., 2018).

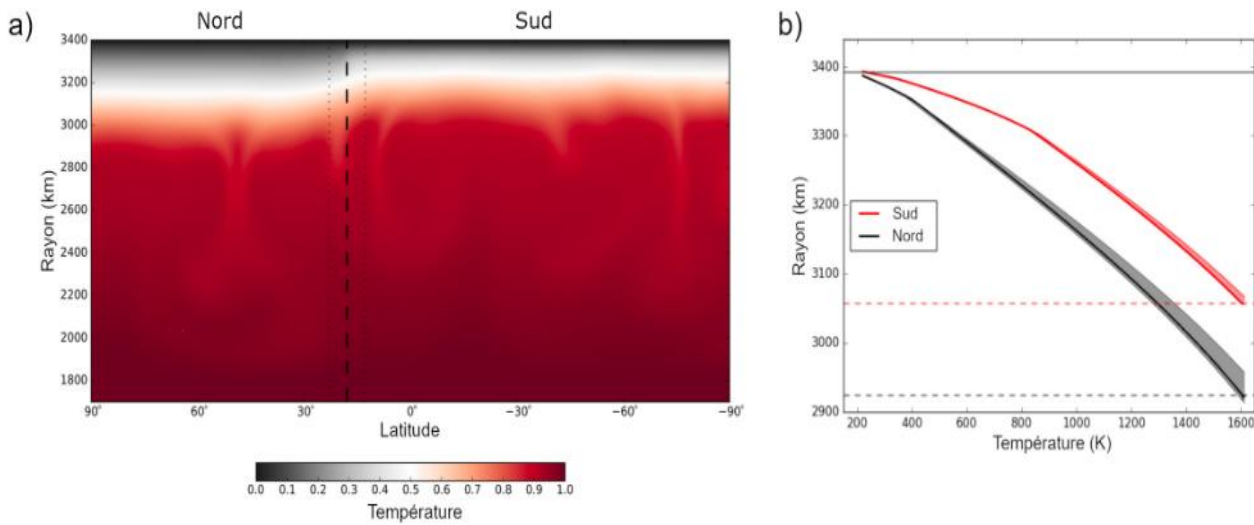


Figure 5 : a : coupe transversale de l'intérieur de la planète Mars à l'heure actuelle, réalisée à partir d'une simulation thermique dynamique en 2 dimensions (Thiriet, 2018). La limite de la dichotomie nord-sud est représentée par la ligne en tirets, les zones de transition par les lignes en pointillés. L'échelle de couleur correspond à la température : 0 correspond au point le plus froid de la simulation, 1 au point le plus chaud. La lithosphère nord apparaît bien plus épaisse que celle du sud. b : profils de température actuels dans la lithosphère sud (en rouge) et nord (en noir) avec leurs marges d'erreur (zones ombrées) (Thiriet et al., 2018). À une même profondeur la lithosphère de l'hémisphère sud présente des températures plus élevées que celle du nord.

Conclusion

La dichotomie nord/sud représente une des caractéristiques majeures de la surface martienne et date très probablement des premiers stades de l'évolution de la planète. Elle se caractérise par une dualité marquée entre les surfaces des hémisphères nord et sud de la planète, la surface sud étant plus élevée, plus ancienne, plus rugueuse et cratérisée. Bien que la formation de cette dichotomie représente vraisemblablement un événement majeur de l'histoire martienne, le mécanisme qui en est à l'origine demeure à ce jour encore très énigmatique. La théorie d'un grand impact dans l'hémisphère nord est cependant la thèse la plus populaire.

Mais loin de se limiter à un simple aspect de surface, cette dichotomie nord/sud s'étend également très probablement en profondeur et influence la structure-même de la planète. En effet, afin de compenser son altitude plus élevée, la croûte sud est probablement plus épaisse que la croûte nord et pourrait même avoir une composition différente avec un composant enfoui en profondeur, constitué de roches plus légères et potentiellement enrichies en éléments radioactifs. Ces différences entre les propriétés des croûtes des deux hémisphères prédisent une lithosphère plus froide et plus épaisse dans le nord, avec un flux de chaleur de surface par conséquent plus faible par rapport à celui observé dans le sud.



Bibliographie

- Andrews-Hanna, J., M. Zuber, and W. Banerdt (2008), The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy, *Nature*, 453, 1212–1215, doi :10.1038/nature07011.
- Carter, J., and F. Poulet (2013), Ancient plutonic processes on Mars inferred from the detection of possible anorthositic terrains, *Nature Geosci*, 6, 1008–1012, doi :10.1038/NGEO1995.
- Citron, R. I., M. Manga, and E. Tan (2018), A hybrid origin of the martian crustal dichotomy : Degree-1 convection antipodal to a giant impact, *Earth and Planetary Science Letters*, 491, 58–66, doi :10.1016/j.epsl.2018.03.031.
- Elkins-Tanton, L., E. Parmentier, and P. Hess (2003), Magma ocean fractional crystallization and cumulate overturn in terrestrial planets : Implications for Mars, *Meteoritics and Planetary Science*, 38, 1753–1771, doi :10.1111/j.1945-5100.2003.tb00013.x.
- Golabek, G., T. Keller, T. Gerya, G. Zhu, P. Tackley, and J. Connolly (2011), Origin of the martian dichotomy and Tharsis from a giant impact causing massive magmatism, *Icarus*, 215, 346–357, doi :10.1016/j.icarus.2011.06.012.
- Hartmann, W. K., and G. Neukum (2001), Cratering chronology and the evolution of Mars, in *Chronology and evolution of Mars*, pp. 165–194, doi :10.1007/978-94-017-1035-0_6.
- Marinova, M., O. Aharonson, and E. Asphaug (2008), Mega-impact formation of the Mars hemispheric dichotomy, *Nature*, 453, 1216–1219, doi :10.1038/nature07070.
- Neumann, G., M. Zuber, M. Wieczorek, P. McGovern, F. Lemoine, and D. Smith (2004), Crustal structure of Mars from gravity and topography, *Journal of Geophysical Research*, 109, E08,002, doi :10.1029/2004JE002262.
- Reese, C., C. Orth, and V. Solomatov (2010), Impact origin for the Martian crustal dichotomy : Half emptied or half filled ?, *Journal of Geophysical Research*, 115, E05,004, doi :10.1029/2009JE003506.
- Rosenblatt, P., S. Charnoz, K. M. Dunseath, M. Terao-Dunseath, A. Trinh, R. Hyodo, H. Genda, and S. Toupin (2016), Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons, *Nature Geoscience*, 9, 581–583, doi :10.1038/ngeo2742.
- Sleep, N. H. (1994), Martian plate tectonics, *Journal of Geophysical Research : Planets*, 99, 5639–5655, doi :10.1029/94JE00216.
- Sautter, V., M. Toplis, R. Wiens, A. Cousin, C. Fabre, O. Gasnault, S. Maurice, O. Forni, J. Lasue, A. Ollila, J. Bridges, N. Mangold, S. Le Mouélic, M. Fisk, P.-Y. Meslin, P. Beck, P. Pinet, L. Le Deit, W. Rapin, E. Stolper, H. Newsom, D. Dyar, N. Lanza, D. Vaniman, S. Clegg, and J. Wray (2015), In situ evidence for continental crust on early Mars, *Nature Geosci*, 8, 605–611, doi :10.1038/NGEO2474.
- Solomon, S., O. Aharonson, J. Aurnou, W. Banerdt, M. Carr, A. Dombard, H. Frey, M. Golombek, S. Hauck, II, J. Head, III, B. Jakosky, C. Johnson, P. McGovern, G. Neumann, R. Phillips, D. Smith, and M. Zuber (2005), New Perspectives on Ancient Mars, *Science*, 307, 1214–1220, doi :10.1126/science.1101812.
- Tanaka, K., S. Robbins, C. Fortezzo, J. Skinner Jr., and T. Hare (2014), The digital global geologic map of Mars : Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history, *Planetary and Space Science*, 95, 11–24, doi : 10.1016/j.pss.2013.03.006.
- Thiriet, M., Michaut, C., Breuer, D., & Plesa, A. C. (2018). Hemispheric dichotomy in lithosphere thickness on Mars caused by differences in crustal structure and composition. *Journal of Geophysical Research: Planets*,



123(4), 823-848.

Thiriet, M. (2018). Effect of the north/south dichotomy on the thermal structure and evolution of Mars (Doctoral dissertation, Université Sorbonne Paris Cité).

Wieczorek, M. (2007), The gravity and topography of the terrestrial planets, Treatise on Geo- physics, 10, 165–206, doi :10.1016/B978-044452748-6/00156-5.

Wray, J., S. Hansen, J. Dufek, G. Swayze, S. Murchie, F. Seelos, J. Skok, R. Irwin III, and M. Ghiorso (2013), Prolonged magmatic activity on Mars inferred from the detection of felsic rocks, Nature Geosci, 6, 1013–1017, doi :10.1038/NGEO1994.

Zhong, S., and M. Zuber (2001), Degree-1 mantle convection and the crustal dichotomy on Mars, Earth and Planetary Science Letters, 189, 75–84, doi :10.1016/S0012-821X(01) 00345-4.

Mélanie Thiriet est Docteur Es Sciences, discipline Science de l'Univers et Géophysique. Elle a soutenu sa thèse de doctorat "Effet de la dichotomie Nord/Sud sur l'évolution thermique et la structure de Mars", sous la direction de Chloé Michaut et Doris Breuer, Institut du Globe de Paris, le 22/10/2018. Elle est actuellement photographe et réalisatrice de films documentaires chez Escape Productions <https://www.escape-productions.com/>



Vie de l'Association, avril à juin 2024

Par Jean-Marc Salotti, APM

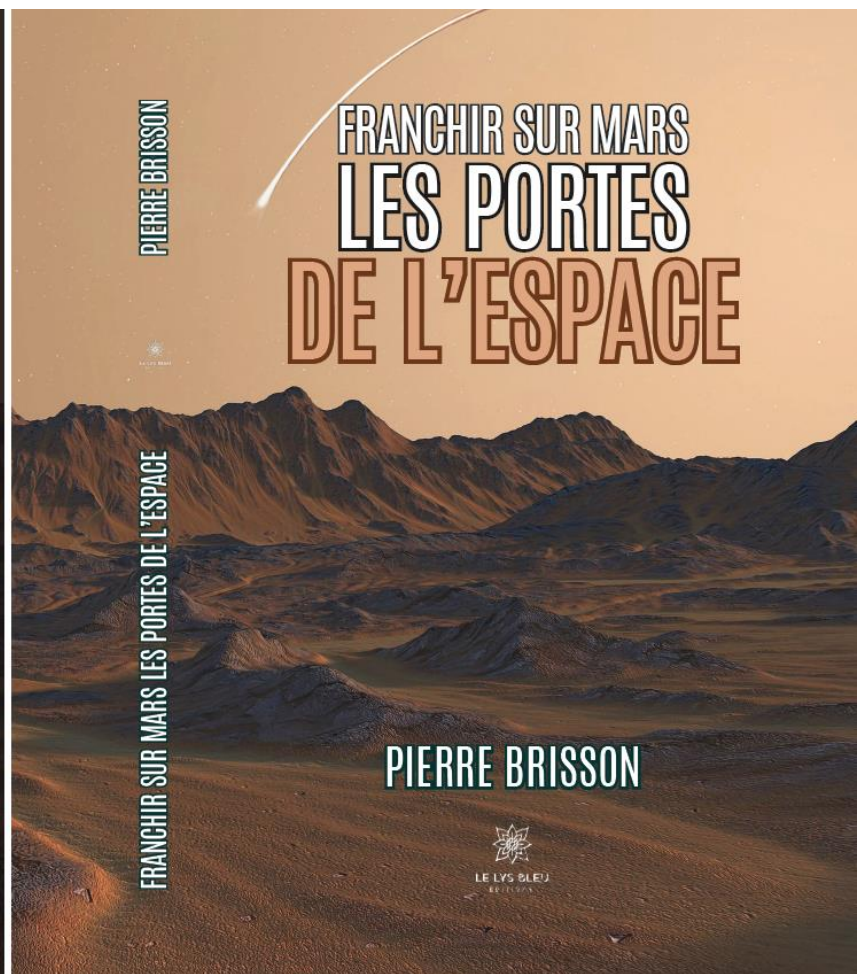
Chers membres,

Voici les nouvelles de l'association pour le deuxième trimestre 2024 :

- Deux articles ont été acceptés avec présentation orale pour le congrès International Astronautical Congress (IAC) qui se tiendra à Milan en octobre prochain :
 - celui des étudiants de l'ESTACA sous la tutelle de Lucien Bildstein : "Dimensioning and Cost Evaluation of a Martian Steel Production Plant"
 - celui de Jean-Marc Salotti : "Designing light Mars ascent vehicles"

L'association apportera une contribution financière aux étudiants pour qu'ils puissent s'y rendre afin de présenter leurs travaux.

- Pierre Brisson vient de publier un nouveau livre.





Le livre de Pierre Brisson, « Franchir sur Mars les portes de l'Espace » a rencontré son éditeur, « Le Lys Bleu Editions ». Il est maintenant publié dans cette maison. Vous pouvez l'y commander directement ou aller chez Amazon, la Fnac, Payot (liens ci-dessous) ; vous pouvez aussi l'acheter ou le commander en librairie (voir ci-dessous).

NB : Pierre Brisson est président de la Mars Society Switzerland. Il a longtemps été administrateur et trésorier de l'APM.

Cet essai de 240 pages fait le point de nos connaissances en astronomie, en astronautique, en géologie martienne, en exobiologie et en ingénierie pour milieux extrêmes. Il entreprend de démontrer qu'il est possible d'envisager de s'installer durablement sur Mars à conditions d'atténuer l'effet des radiations, surtout pendant le voyage, et d'utiliser le Starship de SpaceX. Une fois sur place, l'homme sera devenu une espèce multiplanétaire. Il aura de ce fait, « franchi les portes de l'Espace ».

Plus généralement, dans la trame du récit, il s'agit de parler de cet Espace, des sentiments qu'il inspire et de l'attitude qu'il convient d'adopter vis-à-vis de ce pseudo-vide si grand et si riche dans lequel nous baignons depuis toujours mais auquel nous n'avons accès que depuis quelques décennies.

Dans ce contexte, aller physiquement sur cette planète est le défi que l'homme peut et doit aujourd'hui relever. Beaucoup d'entre nous y voient d'abord l'aventure. Ils ont raison mais aller sur Mars c'est aussi nous donner la possibilité d'accroître considérablement nos connaissances, de nous armer pour apprendre à vivre « ailleurs », et d'assurer notre sécurité à long terme en tant qu'espèce.

La soif inextinguible de mieux comprendre notre environnement proche et lointain est en soi une raison suffisante pour que nous consacrons toujours plus d'énergie et de moyens financiers à recueillir et analyser tous les types d'information et les rechercher à partir de notre sol, de l'Espace ou du sol de la seule autre planète aujourd'hui accessible semblable à la Terre. Par ailleurs, la recherche d'une protection pour notre espèce n'est pas qu'une fantaisie à laquelle nous pouvons rêver quand nous en avons le temps, sans nous préparer pour agir. Préparer le voyage et l'établissement sur Mars d'un tout petit nombre d'entre nous est l'équivalent de la démarche entreprise par Noé avec son Arche dans notre tradition judéo-chrétienne, car les risques de catastrophe planétaire, sur Terre, sont de plus en plus graves et de moins en moins improbables comme la montée des eaux l'était du fait du Déluge. Dans cet esprit, l'essaimage sur Mars d'un petit groupe de Terriens soigneusement sélectionnés, peut être notre seul espoir de ne pas disparaître de l'Univers, au moins comme espèce civilisée.

Notre action ne peut être que fonction de nos capacités technologiques. Mars est de ce fait la seule planète où l'humanité peut envisager aujourd'hui d'installer une petite colonie malgré toutes les



difficultés et tous les dangers que cela représente et dont il faut rester conscient. Le défi est important mais il n'est pas impossible de le relever. Nous sommes à la limite de ce que nous pouvons faire mais les hommes toujours ont voulu affronter leurs limites. L'autonomie sur place sera très rapidement une réalité car elle sera en même temps une nécessité, compte tenu de l'éloignement, des dangers du voyage (dont les risques pour la santé induits par les radiations), et de l'espacement de 26 mois des fenêtres de lancements depuis la Terre. Mars deviendra ainsi notre première « Planète-B ».

Le livre repose sur un socle solide, la théorie du fondateur de la Mars Society, Robert Zubrin, présentée dans son livre *The Case for Mars* (1995) écrit lorsqu'il était ingénieur en Propulsion chez Lockheed Martin en charge du Projet Mars. C'est Robert Zubrin qui a conceptualisé les éléments clefs indispensables pour que le voyage habité et la vie sur Mars entrent dans le domaine du possible : Mars Direct, la gravité artificielle et l'ISRU.

« Mars Direct » car si l'on veut aller sur Mars il faut décider d'aller sur Mars sans compliquer inutilement l'architecture du voyage en passant par la Lune, par Phobos ou par une « Gateway » ce qui entraînerait une débauche de masse, d'énergie, de difficultés techniques et de financements, sans avantages correspondants. La « gravité artificielle » car l'on sait bien les dommages pour la santé et les capacités physiques d'un long séjour en apesanteur, et que l'on peut pallier ce problème en créant une pseudo-gravité par mise en rotation de deux masses dont l'une constituerait l'habitat. L'« ISRU » enfin, parce que, comme du temps des pionniers qui ont traversé l'Amérique ou ceux qui ont traversé l'Antarctique, pour réussir un tel voyage et le séjour qui « va avec » entre l'aller et le retour, il faut voyager léger et pour être efficace, faire en sorte de pouvoir utiliser les ressources locales qui nous attendent sur Mars. Ces ressources ce sont l'atmosphère de CO₂ donc l'oxygène et le carbone, la glace d'eau donc l'eau elle-même, son hydrogène et son oxygène, sans oublier tous les minéraux du sol martien et la protection contre les radiations que peuvent apporter l'atmosphère de Mars et son sol. L'énergie, nucléaire, devra être importée mais il existe aujourd'hui des réacteurs à fission de petites tailles qui, non activés, sont transportables.

Le Starship de SpaceX est l'instrument qui peut nous permettre de concrétiser notre projet qui est aussi celui d'Elon Musk. La fusée est certes très massive, elle demande beaucoup d'énergie et elle est relativement peu maniable du fait de sa masse, de sa taille et de son centre de gravité élevé mais ses capacités sont considérables et ses débuts sont encourageants. C'est aujourd'hui la seule fusée capable de transporter les masses et les volumes dont nous aurons besoin pendant le voyage et une fois sur place. Il faut miser sur son amélioration progressive et Elon Musk a déjà largement démontré son inventivité et ses capacités d'adaptation.

Il faut croire, vouloir, oser !

On to Mars !

Illustration : couverture du livre, crédit Le Lys Bleu Editions. Un jour sur Mars, une trainée dans le ciel, l'arrivée d'un nouveau vaisseau. Demain ?

Plan du livre :



Avant-propos / Chapitre 1 : L'espace et nos capacités à l'explorer / Chapitre 2 : La vie, l'homme / Chapitre 3 : L'exploration par l'astronomie et par les sondes / Chapitre 4 : L'astronautique / Chapitre 5 : La vie à bord / Chapitre 6 : Mars, la planète / Chapitre 7 : La préparation du premier vol habité pour Mars / Chapitre 8 : Mars, s'y installer / Chapitre 9 : Mars, y vivre / en guise de conclusion : Après ?

Achat :

Sur le site de l'éditeur : <https://www.lysbleueditions.com/produit/franchir-sur-mars-les-portes-de-lespace/> . Sur ce site vous pouvez obtenir une réduction promotion de 5% avec le code LLB5

Sur le site d'amazon.fr (NB : le livre est disponible sur papier et sur liseuse électronique Kindle) ou sur le site de la fnac.com ou chez payot.ch

Chez votre libraire : En attendant la mise sur rayons, vous pouvez passer commande en demandant de le rechercher sur le site Dilicom. Le distributeur est la Sodis.

- Boris Segret, membre APM de longue date, a passé son Habilitation à Diriger des Recherches le 4 juillet 2024 à Meudon. Le titre de son HDR est "Nanosatellites pour l'astrophysique".

- Malheureusement, la conférence EMC envisagée en octobre 2024 à Paris "European Mars Conference" est annulée, faute de ressources humaines pour la mettre en place. Pierre Brisson suggère que la prochaine pourrait se dérouler en Suisse en 2025. Affaire à suivre.

- Maxime Bary, polytechnicien, est le nouveau secrétaire APM. Il représentera APM à la prochaine conférence de la Mars Society.

Nouvelles de la Mars Society

- La convention de la Mars Society aura lieu du 8 au 11 août à Seattle :

<https://www.marssociety.org/news/2024/03/12/save-the-date-2024-international-mars-society-convention/>

Il est possible de s'inscrire pour la suivre en ligne.

DEVENIR MEMBRE :

Vous pouvez soutenir notre Association en devenant membre : <https://planete-mars.com/devenir-membre/>

Prenez soin de vous et en avant Mars !

Jean-Marc Salotti

Responsable du bulletin APM