



Numéro 88

PLANÈTE MARS



Bulletin de l'association Planète Mars, 28 rue de la Gaîté 75014-Paris

juillet 21

ISSN 1772-0370

EDITORIAL : Le tourisme spatial devient réalité. Quelle incidence pour un voyage martien ?

Après la création de Blue Origin (Jeff Bezos) en 2000, Virgin Galactic (Richard Branson) en 2004, et une succession d'aléas techniques et réglementaires, nous y sommes : dans un contexte de compétition entre les deux projets, les premiers vols suborbitaux pour des touristes ont été accomplis ce mois avec succès. Ils sont certes moins ambitieux que les séjours d'une semaine dans l'ISS effectués par de précédents touristes, qui avaient nécessité préalablement, non seulement le paiement d'un prix sans aucun doute très élevé (plusieurs M\$), mais aussi un entraînement intensif d'astronaute professionnel.

Ce n'est pas le cas ici, avec des prix affichés de l'ordre de 200.000\$, pour un service limité à la contemplation de la rotondité de la Terre et une expérience d'apesanteur, durant quelques minutes. La différence fondamentale est que cette offre s'adresse à des non professionnels, sans entraînement spécifique. Nous nous rapprochons de la simplicité de prendre l'avion.... Des prix, certes élevés, mais non réservés à des milliardaires, accessibles à des personnes ayant fait le choix de vivre une expérience unique, quitte à sacrifier le prix d'un petit appartement à Paris....

Nous attendons également le premier vol de tourisme spatial de SpaceX prévu en octobre, plus ambitieux (trois jours en orbite). Des esprits chagrins objecteront qu'il ne faut pas faire rêver sur des projets dont l'impact écologique est considérable. Si l'on raisonne par passager, certainement. Mais l'impact global absolu est complètement marginal actuellement, même en tenant compte d'un développement futur de la demande.

Quel est l'impact pour les projets de vol habité vers Mars ?

Il est considérable car il contribue à démocratiser le vol habité, à augmenter le nombre de lancements et ainsi à réduire les coûts et améliorer les procédures de sécurité. Il démontre aussi la crédibilité de sociétés privées pour opérer des voyages habités.

Sans oublier, à très court terme, que Jeff Bezos a fait don du produit des enchères du premier siège commercialisé (28 M\$) à la fondation américaine Club for the Future. Cette dernière a sélectionné The Mars Society comme récipiendaire d'un don de 1 M\$ pour soutenir ses activités. Une belle reconnaissance et de nouveaux projets !

Bel été à toutes et à tous,

Philippe Clermont
président

Dans ce numéro :

- Phobos, une lune prometteuse p.1
- Les cavernes... p.3
- La vie de l'association p.6
- Rhéa, projet d'une première base permanente p.6

prochain numéro : octobre 2021...

PHOBOS, UNE LUNE PROMETTEUSE

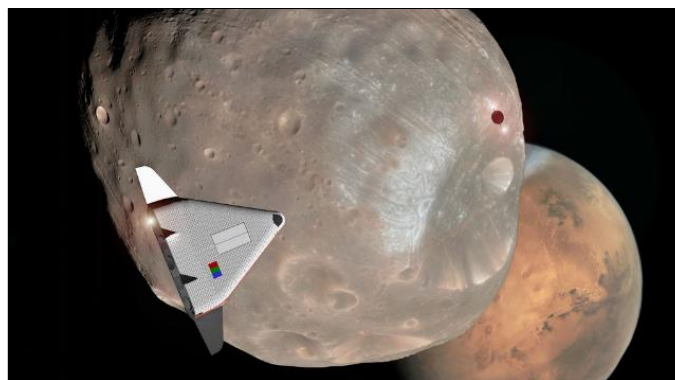


Image composite montrant la navette Albatros, étudiée dans ce projet, survolant Phobos ; à l'arrière-plan, Mars. (doc. M. Lamontagne)

Introduction

Dans le cadre du concours 2020 « Mars City State Design Competition » organisé par la Mars Society, il fallait imaginer le futur de la colonisation de Mars à un stade avancé, en postulant que la population atteindrait près d'un million d'habitants, avec des villes et toutes sortes d'infrastructures. L'équipe Fondation, arrivée en troisième place, était constituée de Florent Bednarek, Laurent Gauthier, Olivier Gourdon, Michel Lamontagne, Rémy Navarro, Jean-Marc Salotti et Carl Vambert [1]. Concernant le secteur spatial, nous nous sommes appuyés sur deux concepts innovants. Le premier est une base sur Phobos, une des deux lunes de Mars et le deuxième est l'Albatros, un vaisseau spatial monobloc réutilisable. Ces deux concepts sont présentés ici.

Phobos et Deimos

Phobos et Deimos sont les deux lunes de Mars. Voici ci-dessous un tableau de synthèse de leurs caractéristiques physiques et orbitales. Elles orbitent respectivement à 9400 et 23500 km de la planète rouge, sur des orbites pratiquement circulaires et d'inclinaison quasi nulle.

	Deimos	Phobos
Périapse	23 546 km	9 234 km
Apoapse	23 471 km	9 518 km
Période orbitale	1,26 jour	7 h 39 min
Rayon	6,2 km	11,3 km
Gravité	0,003 m/s ²	0,0057 m/s ²

Ces caractéristiques ont amené les chercheurs à s'interroger sur leur origine. De nombreuses études spectrales ont été réalisées, mais l'interprétation des données est complexe et la composition des roches internes reste finalement encore incertaine [2,3]. Selon les études les plus récentes, la composition serait étroitement liée à l'origine des lunes [5,6]. Il y a deux hypothèses : la

première est la capture d'un astéroïde et la seconde est l'accrétion de débris après un impact géant à la surface de Mars, qui se serait produit il y a des milliards d'années. Leurs orbites étant proches d'un cercle et contenues dans le plan équatorial de la planète, la seconde hypothèse est actuellement privilégiée. Dans ce cas, il est probable qu'il y a eu autour de Mars des anneaux de débris qui se seraient lentement agrégés pour former les deux lunes. Leur composition serait ainsi un mélange de roches provenant d'une part de l'astéroïde impactant et d'autre part de la surface de Mars. Selon la nature de l'astéroïde (carboné ou non), différents éléments chimiques sont attendus. Cependant, comme certains éléments proviendraient de la surface martienne, de nombreux éléments chimiques légers seraient dans tous les cas présents en quantités non négligeables, en particulier des carbonates et de l'eau. Malgré tout, ces éléments légers ne sont pas détectés par les observations. Selon les chercheurs, par exemple Rosenblatt *et al*, il y aurait une explication simple : les éléments légers étant volatils, et la gravité à la surface des lunes étant extrêmement faible, ils se seraient peu à peu perdus dans l'espace [5]. Pour cette raison, les carbonates et la glace pourraient être absents de la surface des lunes de Mars, mais on pourrait néanmoins les trouver en creusant un peu, comme cela a été suggéré par Canale en 1990 [3]. Il est à noter que l'orbite de Phobos est très basse et se rapproche de la planète. Les modèles prédisent même un passage sous la « limite de Roche » dans quelques centaines de milliers d'années, ce qui implique une dislocation de la lune, certains morceaux tombant à la surface de Mars tandis que d'autres morceaux reconstitueraient un anneau de débris, puis se ressouderaient pour former une lune plus petite.

Station spatiale sur Phobos

S'il est confirmé qu'il existe bien des éléments carbonés et de l'eau dans le sous-sol de Phobos, il est intéressant de se poser la question de l'exploitation de ces éléments pour une base orbitale accrochée à cette lune, qui pourrait en particulier servir de ravitaillement aux vaisseaux spatiaux et de terminal de transit pour les passagers en provenance de Mars. C'est l'idée que nous avons choisi de développer. De façon relativement classique, nous avons imaginé des forages pour récupérer dans le sous-sol des éléments carbonés ainsi que de la glace d'eau, puis d'en extraire le carbone, l'hydrogène et l'oxygène afin de produire le couple d'ergols méthane/oxygène. Les processus chimiques permettant d'y parvenir sont très proches de ceux envisagés par Robert Zubrin, Elon Musk ou la NASA pour produire ces ergols à la surface de Mars. Sur Phobos, il n'y a pas de gaz carbonique, mais il est aisé de le produire à partir d'éléments carbonés en présence d'oxygène. En dehors des problèmes de faible gravité, il n'y a donc pas de difficulté majeure, a priori, à faire de Phobos une station de ravitaillement en ergols. Les vaisseaux spatiaux arrivant de la Terre pourraient avantageusement y faire halte afin de réduire les besoins énergétiques du voyage vers Mars et aussi pour faciliter la réutilisabilité, le vaisseau évitant les frottements et les secousses de la descente vers Mars. Il y a également un autre intérêt à faire une halte à Phobos. Premièrement, si on imagine une répartition des colonies martiennes un peu partout sur la planète, Phobos pourrait être vue comme une gare de triage où les passagers changeraient de vaisseau pour embarquer sur un vaisseau plus petit desservant une destination particulière à la surface de Mars. Et deuxièmement, Phobos pourrait être un lieu de tourisme réputé, avec une vue extraordinaire sur

la planète rouge. Pour éviter les problèmes de microgravité, on pourrait y construire une gigantesque roue tournant lentement et simuler ainsi la pesanteur martienne, comme cela est illustré ci-dessous.



(doc. M. Lamontagne)

Albatros

Pour effectuer le trajet Phobos / Mars ou Mars / Phobos, un vaisseau monobloc à un seul étage réutilisable serait très avantageux. Sur Terre, de nombreuses études ont été faites pour concevoir un tel vaisseau, mais le Delta V est très grand et personne n'y est encore parvenu. Une des tentatives les plus abouties était le X33, développé par Lockheed Martin. C'était une sorte de navette spatiale aplatie. Nous nous sommes inspirés de ce concept pour le design de l'Albatros, un vaisseau monobloc capable de rejoindre la station de Phobos et de réaliser une entrée atmosphérique pour revenir sur Mars. Le Delta V requis étant de l'ordre de 5 à 6 km/s, la faisabilité du monoétage paraît assurée avec un système de propulsion basé sur le même mélange méthane/oxygène que sur Phobos.



L'Albatros, un vaisseau monobloc pour les aller-retours entre la surface et l'orbite martienne.
(doc. M. Lamontagne)

Les caractéristiques de l'Albatros dépendent de nombreux facteurs difficiles à appréhender. Il pourrait même exister différents types de vaisseau, en fonction de la charge utile requise. Nous avons opté pour une configuration relativement légère, qui a de nombreux avantages. Cela permet notamment un stationnement et une maintenance facilitée dans des hangars de taille raisonnable ainsi qu'un transport ou un repositionnement à la verticale par des moyens relativement simples. De plus, ce même vaisseau pourrait être exploité comme un avion pour un voyage entre deux sites martiens éloignés. La portance du vaisseau lui permettrait de planer sur une partie du trajet. Concernant l'atterrissage, nous n'avons pas pu déterminer s'il était possible et préférable d'atterrir à l'horizontale, comme un avion, ou s'il fallait obligatoirement atterrir à la verticale. La densité atmosphérique étant très faible, atterrir à l'horizontale impliquerait une vitesse de l'ordre de 500 km/h et une piste très longue, mais des solutions techniques pourraient exister. Voici les principales caractéristiques de ce vaisseau :

Longueur	21 mètres
Largeur	25 mètres
Masse sèche	30 tonnes (bouclier inclus)
Système de propulsion	LCH ₄ / LO ₂ , impulsion spécifique 319 s
Charge utile	20 tonnes / 50 passagers
Masse d'ergols	240 tonnes ($\Delta V = 5500$ m/s)

Autres usages de l'Albatros

Grâce à la station de ravitaillement de Phobos, même l'orbite terrestre paraît facilement accessible depuis Mars. Ainsi, pour placer un satellite en orbite géostationnaire, l'Albatros pourrait être le vaisseau le moins cher du marché : 5,5 km/s pour aller à la station de Phobos et refaire le plein, puis seulement 3,2 km/s pour un transfert vers la Terre afin de rejoindre l'orbite de transfert géostationnaire et y déposer un satellite. Avec une charge utile maximale de 20 tonnes et des satellites généralement bien plus légers, il y aurait suffisamment de réserves de carburant pour effectuer le retour jusqu'à Phobos ! Le challenge serait en fait de construire le satellite sur Mars. Dans les premières phases de la colonisation, ce serait utopique, mais une fois bien établie avec des centaines de milliers d'habitants, l'industrie spatiale martienne pourrait concurrencer l'industrie spatiale terrestre. De plus, l'Albatros et Phobos pourraient être avantageusement exploités pour des missions d'exploration vers les astéroïdes de la ceinture principale entre Mars et Jupiter ou même vers d'autres planètes du système solaire. On pourrait en particulier envisager des missions habitées vers Vénus et des échanges réguliers avec la Lune.

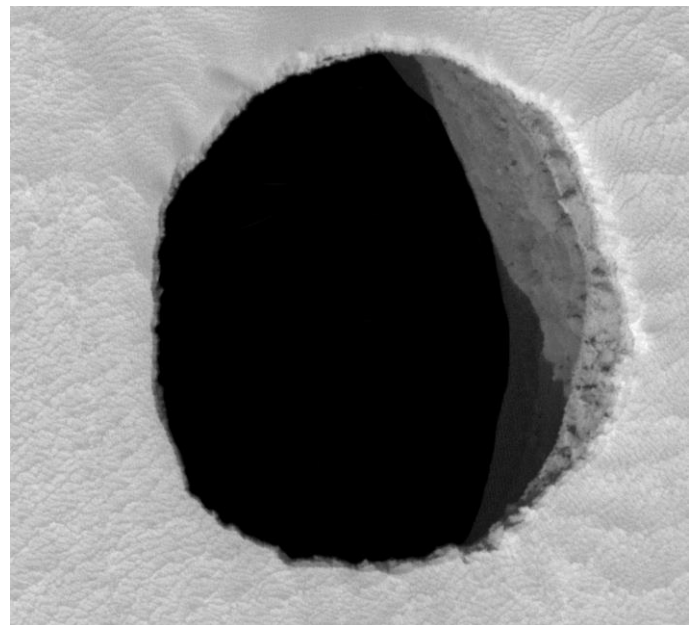
A terme, Phobos pourrait ainsi devenir un centre spatial très important du système solaire. Selon Robert Heinlein (citation traduite librement), « une fois en orbite terrestre, vous êtes à mi-chemin de n'importe quelle destination du système solaire ». Pour Phobos, on pourrait dire : « De cette Lune, tout le système solaire n'est qu'à un battement d'aile de l'Albatros. »

Jean-Marc Salotti

Références

- [1] M. LAMONTAGNE, L. GAUTHIER, J-M SALOTTI, F. BEDNAREK, C. VAMBERT, O. GOURDON, R. NAVARRO, *Foundation, chapitre du livre MARS CITY STATES New Societies for a New World*, Frank Crossman ed., 2021.
- [2] Pollack, J.B., Veverka, J., Pang, K.D., Colburn, D.S., Lane, A.L., Ajello, J.M. (1978). Multicolor observations of Phobos with the Viking lander cameras—evidence for a carbonaceous chondritic composition. *Science*, 199, 66–69.
- [3] Rivkin, A.S., Brown, R.H., Trilling, D.E., Bell, J.F. III, & Plassman, J.H. (2002). Near-Infrared spectrophotometry of Phobos and Deimos. *Icarus* 156(1), 64-75.
- [4] Fanale, Fraser P., Salvail, James R. (December 1990), "Evolution of the water regime of Phobos". *Icarus*. 88 (2): 380-395.
- [5] Ronnet, T. Vernazza, P. Mousis, O. Brugger, B. Beck, P. Devouard, B. Cipriani, F. (2016). Reconciling the Orbital and Physical Properties of the Martian Moons. *The Astrophysical Journal*, 828(2).
- [6] P. Rosenblatt, S. Charnoz, On the formation of the martian moons from a circum-martian accretion disk, *Icarus*, Volume 221, Issue 2, 2012, Pages 806-815.

LES CAVERNES, RETOUR VERS NOTRE PASSÉ ET PERSPECTIVE D'UN RECOMMENCEMENT...



Gouffre « Jeanne », photo HiRISE (2007), *High Resolution Imaging Science Experiment*, caméra embarquée à bord de l'orbiteur MRO. Le gouffre est situé au Nord-Est d'Arsia Mons, un des volcans dominant le socle de Tharsis. (doc. NASA).

Des sites d'étude passionnants et des abris naturels essentiels s'offrent aux premiers hommes qui partiront pour Mars, ses cavernes. C'est peut-être là qu'on trouvera les plus intéressants des indices exobiologiques que l'on cherche et en tout cas les abris les plus efficaces et les plus faciles à utiliser par les premiers hommes. Elles présentent en effet l'avantage d'être bien protégées des radiations et de pouvoir abriter plus d'eau concentrée, sous forme de glace, qu'en surface. Les cavités souterraines présentent de plus, pour ce qui est des habitats, la possibilité d'être beaucoup plus volumineuses que sur Terre.

En 2009, pour la 40^{ème} « Lunar & Planetary Science Conference », Nathalie Cabrol a dirigé une étude sur la « Détection des cavernes et la géologie génératrice de cavernes sur Mars ». Cette étude est la base de toute réflexion sur le sujet.

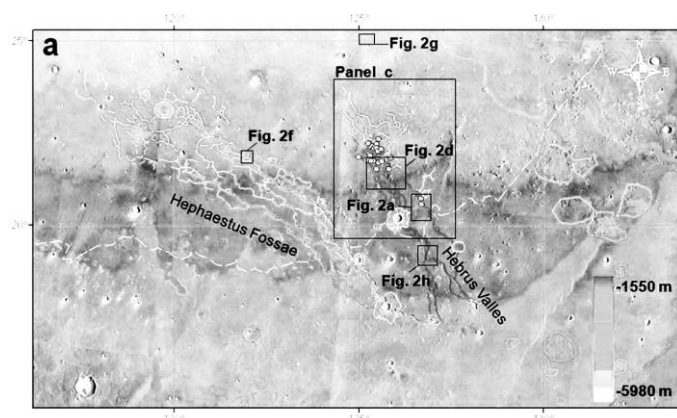
Deux types principaux de cavernes sont possibles : les tunnels de lave et les cavités creusées par des écoulements d'eau dans des sols boueux, impliquant éventuellement un volcanisme de boue. La différence essentielle entre ces types est évidemment la consistance de la roche « hôte », les milieux volcaniques offrant des parois beaucoup plus résistantes que les roches sédimentaires. Une autre différence est la localisation. Les tunnels de lave se trouvant davantage sur les flancs des volcans, en altitude (socle de Tharsis), dans un environnement d'atmosphère plus ténue (ce n'est pas indifférent pour l'occupation humaine). Enfin l'action de l'eau dans les sols boueux semble a priori plus favorable à l'évolution biotique et à la conservation des traces. En dehors de ces types, on trouve des gouffres résultant de failles tectoniques. A noter qu'étant donnée l'histoire très particulière du calcaire sur Terre, liée à une certaine forme de vie, il n'y a pas de formation purement karstique sur Mars. Cependant la géologie est souvent complexe et il existe des tunnels et cavernes qui résultent de la conjonction de différents facteurs. Je veux parler de Hebrus Vallis et Hephaestus Fossae. Ce sont évidemment les plus intéressants. Avant de les décrire, il convient de définir différents phénomènes.

Les tunnels de lave sont formés par des coulées sur les flancs des cônes volcaniques, visqueuses avec un taux de liquidité plus ou moins prononcé (plus dans le cas de Mars, comme dans les îles hawaïennes). Le flux prend la forme de coulées, plus chaudes à l'intérieur et moins sur les bords exposés à l'environnement plus froid. Cette différence définit des murs, un sol et une voûte. Lorsque la coulée cesse d'être alimentée par l'éruption, pourvu qu'elle puisse se déverser « quelque part », elle se vide et laisse une cavité en forme de galerie.

Les zones de boue sont le résultat de flux cataclysmiques provenant des hauteurs environnantes. Suffisamment liquides, elles s'étalent en nappes. Elles stagnent ensuite dans les zones d'altitudes basses où elles ont été accueillies (cuvettes) si elles ne peuvent être dissoutes et dissipées dans une étendue d'eau suffisante pour leur masse (Chryse planitia et sud d'Acidalia planitia à l'embouchure de Valles Marineris). L'accumulation des boues, si elle est suffisamment épaisse, produit un gradient de températures qui favorise l'évacuation des couches souterraines plus chaudes vers la surface où elles s'écoulent par des cheminées de pseudo-volcans (« volcans de boue »), d'autant plus que l'intérieur de la planète est chaud, donc que la croûte est mince par rapport au magma du manteau.

Le pergélisol est le sol gelé riche en eau (les boues ci-dessus) qui résulte des températures particulièrement froides, circumpolaires sur Terre et omniprésentes en surface de Mars.

Il s'est produit dans les régions voisines de Hebrus Vallis et Hephaestus Fossae, centrées sur 15°N, entre le volcan Elysium Mons (24°N, au Nord-Est) et les hautes-terres du Sud (plus ou moins à l'équateur), un phénomène complexe qui associe le volcanisme magmatique, ayant des effets dans le pergélisol, avec le volcanisme de boue, et qui a créé des tunnels et cavernes étendus qui pourraient s'avérer extrêmement intéressants et utiles.



Dans le creux situé entre les deux élévations, la couche superficielle du sol, formée par les alluvions qui en proviennent, était gelée (pergélisol), avec en profondeur, dans un environnement plus chaud, car plus proche du sous-sol volcanique, un aquifère. Avec le temps, 1) la pression de l'eau chauffée produisit des fractures dans le pergélisol, ce qui conduisit à du volcanisme de boue ; 2) l'aquifère s'assécha ainsi que les passages d'eau qui s'étaient formés dans les fractures du pergélisol ; 3) une intrusion de magma souterrain (« dike ») provoqua une fonte sévère du pergélisol qui s'écoula dans des vallées de débâcle ; 4) les flux furent captés par les cavernes asséchées qui les évacuèrent par les failles précédemment formées. Il en résulte aujourd'hui des réseaux de débâcle asséchés aux tracés particuliers. Les parcours de leurs vallées montrent des ruptures de débit (largeur et profondeur des vallées) extrêmement marquées et subites, signalant la présence de gouffres sous-jacents. On déduit aussi, à la vue des alignements de puits d'effondrement y donnant accès, le parcours de longs cheminements souterrains.

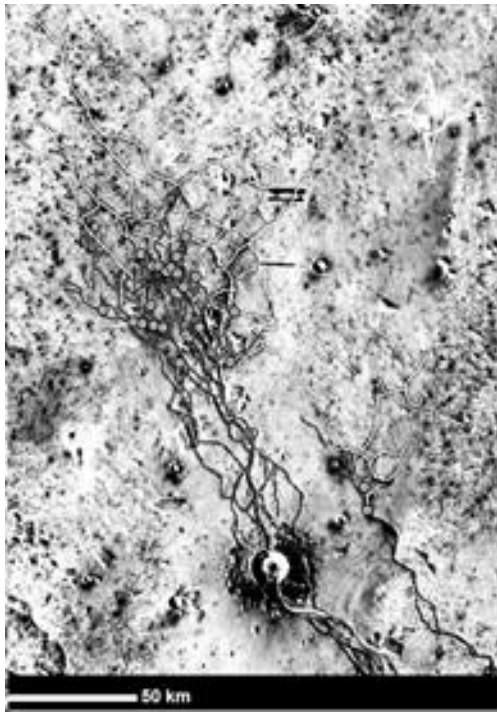
Sous le sol de ces deux sites voisins il y a donc en prolongement de vallées sèches, dans un environnement où l'eau a séjourné longtemps, des cavernes profondes et/ou très allongées comme des tunnels, formant réseaux, les unes étant accessibles par les autres avec des accès intermittents en surface.

Regardons maintenant ces cavités de plus près, quelle que soit leur origine, sachant qu'aucune n'a été encore explorée.

Pour des roches de même nature, la porosité du sol martien est très nettement inférieure à celle du sol terrestre en raison d'une gravité beaucoup plus faible (1 à 5% à 3 ou 4 km sur Terre, même pourcentage à -10 km sur Mars). En conséquence on peut espérer trouver des cavernes sur Mars jusqu'à -5 km contre -2 km sur Terre (les profondeurs peuvent être supérieures si les cavernes sont emplies d'eau (comme sous notre calotte Antarctique, à -4 km). Et les volumes de ces cavernes pourraient être 4 fois plus importants (1,6³) que sur Terre, avec des plafonds d'une portée de 60% supérieure (la largeur stable possible d'une caverne augmente selon l'inverse de la racine carrée de l'accélération gravitationnelle). Petit problème, si l'on choisit d'habiter dans une caverne, il faut que l'accès n'en soit pas trop difficile. Difficile d'imaginer qu'il faudrait prendre un ascenseur (ou un escalier !) à chaque fois qu'on voudrait sortir !

Les températures du sol martien sont très froides car la planète s'est refroidie très vite en raison d'une masse beaucoup plus petite que celle de la Terre (1/10^{ème}). La croûte est donc

Ont collaboré à ce numéro : P. Brisson, P. Clermont, A. Decadi, P.-Y. Froissard, R. Heidmann, D. Ledevin, J.-M. Salotti
Achévé d'imprimer : Objectif numérique 56100-Lorient
Dépôt légal : août 2021



Réseaux de Hebrus Vallis et Hesperaeus Fossae. (in *Infiltration of Martian outflow channel floodwaters into lowland cavernous systems* ; original légendé en couleurs ; voir ref. ci-dessous).

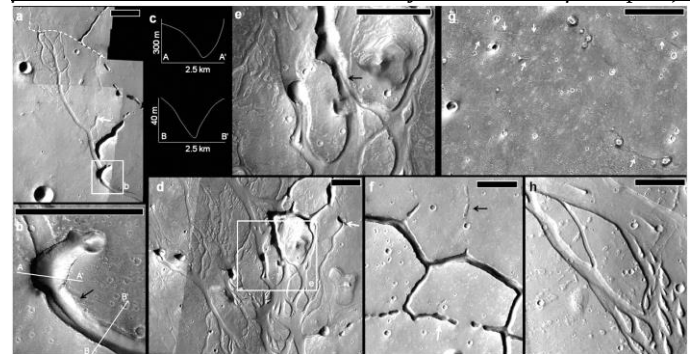
aujourd'hui beaucoup plus épaisse que celle de la Terre (pour Mars, 10 à 100 km, maximum sous Tharsis ; pour la Terre, 6 sous les Océans, 30 sous les continents, 70 sous les grandes chaînes de montagnes) et le gradient des températures a une pente très « raide » (15 K par km, au début) ce qui fait qu'il faut plusieurs km à partir de la température de la surface du sol (215 K en moyenne) pour arriver à un point où l'eau peut être liquide (en fonction aussi de la pression, qui augmente). La température maximum pour la vie, estimée à 120°C, est atteinte sur Terre à -3 ou -4 km. Sur Mars elle se situerait plutôt vers -30 km (mais bien sûr cela varie en fonction de l'épaisseur de la croûte puisque le manteau sous-jacent est beaucoup plus chaud). A partir de la surface à l'équateur, l'eau pourrait être liquide vers -4,7 km si elle est très saumâtre et vers -8 km pour de l'eau douce. Quand on remonte vers la surface la température se refroidit. Et au niveau où l'on trouve des cavernes (la plupart étant probablement quand même à moins des 5 km ci-dessus mentionnés) la différence avec la température de surface sera très réduite. La seule chose remarquable est que le sol étant thermiquement beaucoup plus inerte que l'atmosphère, il ne connaît pas l'amplitude des variations journalière ou saisonnière de la surface. On estime donc qu'en moyenne, à quelques deux mètres de leur ouverture, les cavernes non éclairées auraient la température moyenne de surface (215 K précités). Le point de givrage de l'eau est, lui, autour de 200 K (rappelons que 273,15 K = 0°C). Dans ces conditions, une caractéristique jusqu'à présent non étudiée et qui vient de l'être sur le plan théorique (décembre 2020 par Norbert Schörghofer), est celle de la glace d'eau dans ces cavernes. Il semble que les parois de très nombreuses cavernes martiennes puissent être recouvertes de glace du fait d'une sur-saturation en humidité (même si l'atmosphère comprend très peu de vapeur d'eau, celle-ci se condense en glace avec le froid). Compte tenu du mouvement de l'atmosphère, il y aurait

déchargement de glace d'eau au contact des parois plus froides. Par sublimation inverse, les cristaux de glace recouvriraient les parois (plutôt le haut que le bas). Le processus serait très lent (pour ordre d'idée, 1 cm d'épaisseur après une période de 2000 ans) puisque la quantité d'eau est faible mais ces cavernes sont très anciennes (plusieurs millions d'années) et donc la couche de glace pourrait être assez épaisse. A noter qu'il ne devrait y avoir ni stalagmite, ni stalactite puisque l'eau ne peut être sous forme liquide (pas de « goutte à goutte » !) mais que le sol pourrait être jonché de plaques de glace détachées de la voute (du fait de leur poids). Imaginez les recherches planétologiques et exobiologiques que l'on pourrait faire dans cet environnement et (après étude !) l'utilisation que pourrait faire un établissement humain de la glace (étant donné que les volumes pourraient être très limités puisqu'il y aurait un recyclage intensif de l'eau utilisée) !

Ainsi les premiers hommes sur Mars auraient toutes les raisons pour s'établir dans les cavernes, comme leurs prédécesseurs très lointains lorsqu'ils voulurent se protéger des animaux et des rigueurs du climat terrestres. Retournement de situation qui donne à penser et à espérer puisque nous pouvons anticiper un développement aussi prodigieux pour nos descendants que celui qui s'est étendu depuis nos ancêtres jusqu'à nous.

Pierre Brisson

*Illustration ci-dessous : vues des lits asséchés des écoulements d'eau dans la région d'Hebrus Vallis. On voit nettement les ruptures de débit impliquant des gouffres et des prolongations souterraines des écoulements (outre, bien sûr, les lits à découvert, creusés dans la boue) (in *Infiltration of Martian outflow channel floodwaters into lowland cavernous systems*, voir ref. ci-après).*



Références, liens :

<https://mars.nasa.gov/resources/21879/hebrus-valles/>
Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology par Francesco Sauro, Riccardo Pozzobon, Matteo Massironi, Pierluigi De Berardinis, Tommaso Santagata, Jo De Waele. Earth-Science Reviews, 2020; 103288 DOI: [10.1016/j.earscirev.2020.103288](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103288)
Geological evidence of planet-wide groundwater system on Mars, par F. Salese et al. 2019 : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JE005802>
Detection of cave and cave bearing geology on Mars. Nathalie Cabrol et al. 2009: Cabrol 2009 1040.pdf
Modern geothermal gradients on Mars and implications for subsurface liquids. N. Hoffman, Earth Sciences, La Trobe University, Melbourne 3086, 2001 : <https://www.lpi.usra.edu/meetings/geomars2001/pdf/7044.pdf>
Infiltration of Martian outflow channel floodwaters into lowland cavernous systems J. Alexis, P. Rodriguez et al. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012GL053225>

Ice caves on Mars, Hoarfrost and microclimates. Norbert Schörghofer, 9 décembre 2020 : https://www.researchgate.net/publication/347951956_Ice_caves_on_Mars_Hoarfrost_and_microclimates Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars, Dorothy Oehler, 2010: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103510001405>

LA VIE DE L'ASSOCIATION

Série de webinaires APM

Notre association a continué d'apporter sa contribution à cette année 2021 très martienne, par la tenue d'une série de webinaires que vous pouvez retrouver en replay **sur la chaîne Youtube de l'Association Planète Mars** :

<https://www.youtube.com/user/AssoPlaneteMars> (présentation : 1 à 4 : Aline Decadi, secrétaire exécutive et responsable communication ; 5 : Philippe Clermont, président de l'Association Planète Mars).

#1 Persévérance, technologies et enjeux scientifiques (17/03/2021) : Gilles Dawidowicz, secrétaire général de la Société Astronomique de France, et Philippe Clermont.

Lien : <https://youtu.be/VoUEyRXTyLY>

#2 État des lieux et défis du projet Starship (31/03/2021) : Richard Heidmann.

Lien : https://youtu.be/OeKrIa_BwOY

#3 Enjeux et défis du premier vol sur Mars d'Ingenuity (28/04/2021) : Jeff Delaune, PhD, membre de l'équipe Ingenuity à NASA JPL.

Lien : <https://youtu.be/Z7MLSJD4-IU>

#4 Les projets de retours d'échantillons martiens (19/05/2021) : Yves Monier, administrateur de l'Association Planète Mars, ingénieur chimiste CPE/ESCIL

Lien : <https://youtu.be/KukBqKYrN9s>

#5 L'exploration humaine de Mars, et les simulations analogues (23/06/2021) : Aline Decadi (membre d'une simulation de 5 semaines, et qui prépare une mission MDRS pour décembre 2021).

Lien : <https://youtu.be/axVf1x5jygE>

Summer Space Festival

Notre association a également participé au *Summer Space Festival* à Lille le Dimanche 4 Juillet. Cet événement était organisé par une équipe très enthousiaste dont plusieurs membres actifs de l'association. Nous tenons à saluer tout particulièrement nos collègues **Antoine Bocquier** pour son accueil, l'organisation globale de la journée, et **Thibault Wartel** pour son support précieux au stand. Aline Decadi a été notre ambassadrice APM pour cette occasion. Elle est allée à la rencontre du public. Elle a également fait une intervention « immersive » durant la journée, sur les défis à relever pour la survie de l'équipage, la mise en place de l'architecture de mission, les expériences à dérouler sur le terrain, et la découverte des secrets de la planète rouge. Aline a proposé quelques retours d'expériences en vue de préparer les futures missions d'exploration. Son intervention sera accessible sur notre chaîne Youtube APM d'ici quelques jours.

RDV sur <https://www.youtube.com/user/AssoPlaneteMars>.

Cette journée a été l'occasion de belles rencontres : notamment avec d'autres intervenants amis de l'APM, comme **Christophe Bonnal**, expert des lanceurs et des débris spatiaux, ainsi que l'astronaute français **Michel Tognini**, avec qui Aline a partagé un Escape Game sur le spatial, organisé par INOUI <https://www.inoui-vr.fr/>



Aline au stand APM du Summer Space Festival de Lille (04/07/2021)



Le stand de l'Escape Game.

pour être informé(e)s des prochains événements, inscrivez-vous à la newsletter APM : <http://eepurl.com/gMKVX5>

Aline Decadi

RHÉA, PROJET D'UNE PREMIÈRE BASE PERMANENTE

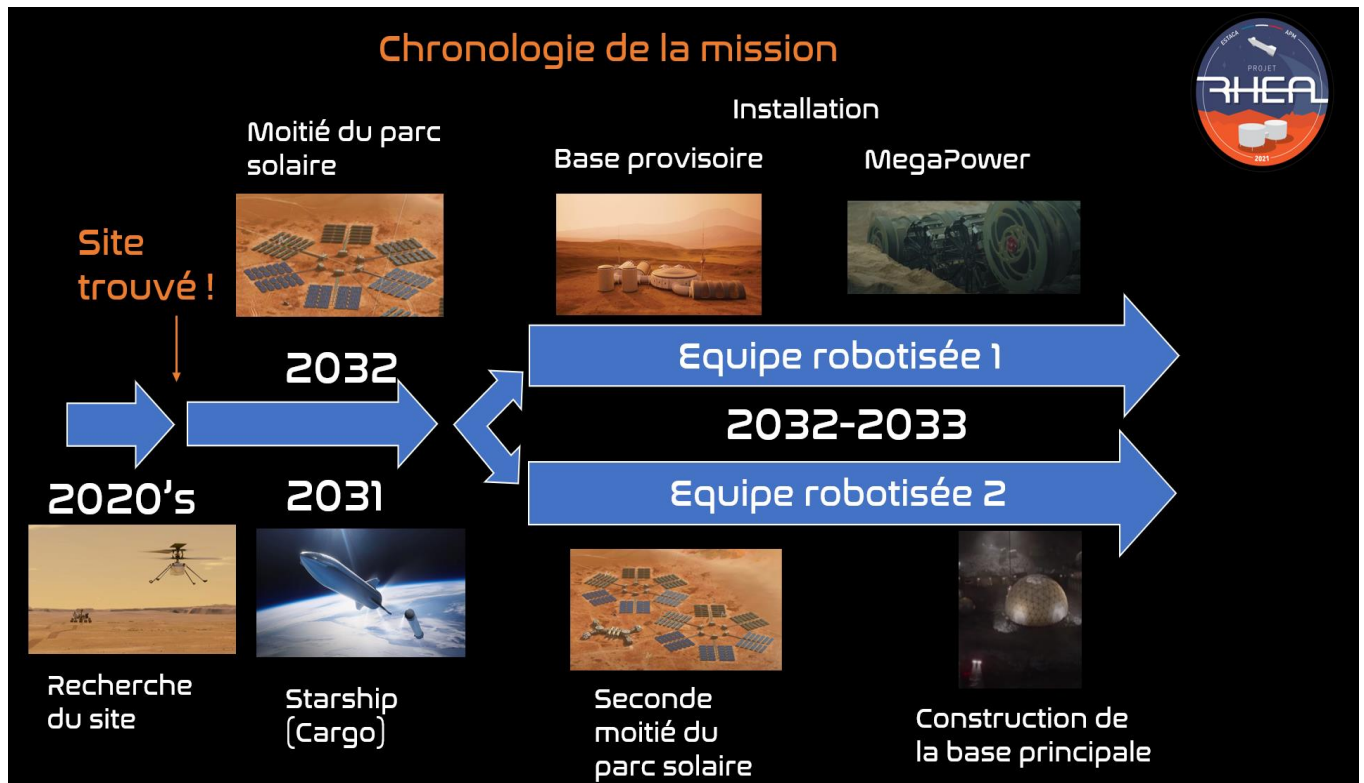
Introduction

Depuis sa création, SpaceX a pour objectif d'envoyer des humains sur Mars. Aujourd'hui cette ambition semble se concrétiser avec les avancées du programme Starship dont le projet se base sur le concept de fusée réutilisable, technologie déjà éprouvée sur le programme Falcon. Les derniers succès, notamment celui du 5 mai 2021 avec atterrissage contrôlé, laissent penser que plus que jamais, le rêve de voir se développer une colonie martienne est à portée de main.

Le but de ce projet est donc d'imaginer et de concevoir le planning d'une mission martienne basée sur l'architecture du programme Starship. Cet article résume les résultats de cette étude, divisée en plusieurs parties : planning, équipage, vie sur place, ressources et énergies ainsi qu'une partie sur le financement.

La première contrainte concernant le planning d'une mission vers Mars à long terme réside dans la fréquence des fenêtres de tir, et plus particulièrement quand il y a un facteur humain. Une estimation de ces fenêtres via une simulation a été réalisée afin de pouvoir décider de l'architecture globale de la mission.

Cette dernière propose des transferts d'une régularité d'environ 2 ans et des trajets allant de 6 à 9 mois en fonction de la charge utile : cargo ou équipage. Il en résulte deux grandes phases établies pour le planning :



La mission débute par **une première phase** d'exploration et de construction robotisée. L'objectif est de mettre en place un maximum d'infrastructures essentielles à la vie des astronautes avant leur arrivée. Cette phase sera déployée sur les deux premières fenêtres de tir et sa réussite est essentielle pour le départ des vols habités.

La seconde phase de la mission est l'installation humaine. Celle-ci commence lorsque les premiers équipages d'astronautes débarquent sur Mars. Cette phase correspond à la

finalisation des infrastructures et à leur exploitation. La fin de la mission n'est pas envisagée ; au bout d'environ 4 ans des relèves seront mises en place à chaque fenêtre de tir afin de renouveler l'équipage et que la colonie puisse se développer sur le long terme.

Conditions martiennes et choix du site

Avec une atmosphère fine constituée principalement de CO₂ et des températures très froides, Mars rend sa colonisation des plus

complexes. En plus des conditions météorologiques extrêmes, la planète rouge reçoit de fortes doses de radiations venant de l'espace. Une des solutions consisterait à installer la base martienne dans des tunnels de lave, qui offriraient une protection idéale contre les radiations (et les météorites). De plus, l'abondance des ressources sur place (eau, ensoleillement notamment) sont à prendre en compte dans la localisation de la base. La zone de Terra Arabia semble répondre à ces différentes contraintes.

Équipages

Les futurs résidents seront en totale autonomie une fois sur place ; leur recrutement devra se faire en fonction des compétences qu'ils pourront apporter ainsi que sur leur parfaite conditions physique et mentale. Il a été estimé qu'un équipage d'entre 12 à 24 personnes pourrait couvrir l'ensemble des compétences requises à une installation de longue durée. Ces compétences sont aussi variées qu'indispensables : médecins, ingénieurs, biologistes, etc.

Conditions de vie sur place, habitat

La base occupera une place centrale dans cette aventure martienne : protection contre les radiations et les micrométéorites, cadre de vie confortable dans un environnement hostile et stressant, elle doit remplir de nombreuses fonctionnalités.

Dans l'optique d'utiliser des technologies matures, la base sera fortement inspirée de la base Concordia (base franco-italienne en Antarctique), l'Antarctique ayant des conditions similaires en termes de contraintes de mission (isolement total, équipage de taille similaire) et d'environnement (conditions extrêmes).

Afin de résoudre les contraintes liées au transport et rentrer sous une coiffe de Starship, la base sera pliable, gonflable et modulable. Un abri temporaire sera également embarqué pour le début de la mission, il durera le temps de la construction de la base principale et servira par la suite d'abri de secours.

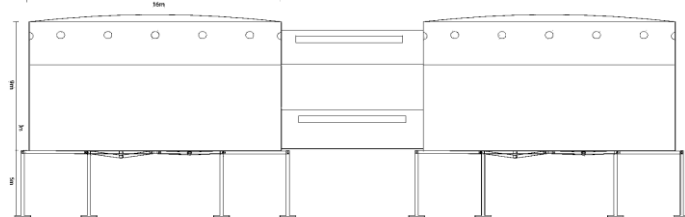


Schéma de la base Concordia

Énergie, ressources In Situ, nourriture...

La production d'énergie représente le plus grand défi des colons. Dans un premier temps, des panneaux solaires seront installés lors de la phase robotique afin d'assurer l'apport énergétique des robots. Suite à l'arrivée des équipages, 2 réacteurs nucléaires de type Megapower et 5 de type Kilopowers seront déployés pour assurer le fonctionnement nominal de la base. Les panneaux seront par la suite utilisés en redondance en cas de panne majeure. Concernant le méthane, qui sera nécessaire afin de permettre au lanceur de retourner sur Terre, il sera produit in situ, au moyen de la réaction de Sabatier entre le CO₂ de l'air et l'H₂ extrait de l'eau.

L'eau destinée à la consommation humaine, quant à elle, bien que recyclée à hauteur de 95%, devra être produite en partie sur Mars. Nous utiliserons ainsi des robots du type Rassor (projet NASA) afin d'extraire de la glace ou des roches hydratées (type régolite) d'où sera extrait l'H₂O.

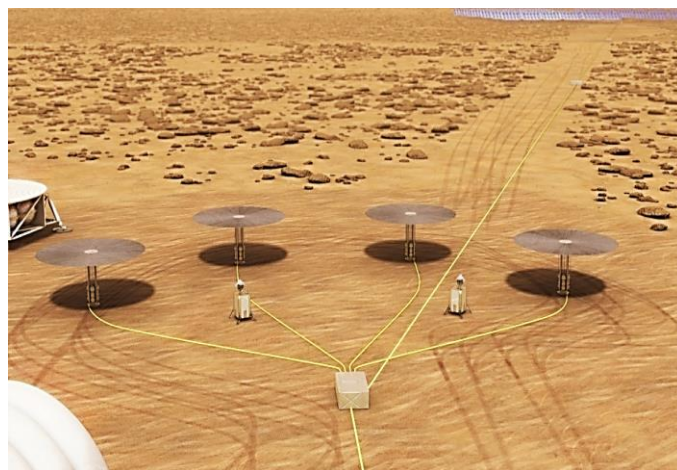


Illustration de l'implantation de 4 Kilopowers pour une base préliminaire (puissance totale : 40 kWe). (doc.NASA)

Lors des premières missions, la nourriture sera apportée depuis la Terre sous forme lyophilisée. Suite à plusieurs missions et un fonctionnement nominal de la base, des serres seront construites pour subvenir en partie aux besoins en nourriture des habitants.

Financement

Afin d'obtenir les fonds pour son financement le projet devra être capable de démontrer sa capacité à assurer son fonctionnement de manière autonome et durable. Le financement de la mission pourra s'appuyer sur les investisseurs suivants :

- **Un consortium d'agences spatiales** : Il est possible d'envisager que les grandes nations spatiales s'unissent autour d'un projet commun comme pour l'ISS.
- **Des groupes industriels** : un marché d'exploitation de ressources martiennes pourrait les intéresser et être rentable au bout de quelques décennies.
- **Une fondation dédiée** : financée par de généreux donateurs fortunés passionnés par l'exploration martienne.

Budget

Les estimations de budget sont très approximatives concernant certaines technologies dont les coûts sont incertains. Une part importante des dépenses liées à un tel projet réside dans les coûts de développement, qui n'ont pas été pris en compte dans notre étude. En prenant en compte les trajets ainsi que le matériel amené sur place et son utilisation, le prix total estimé de l'installation de la base varie entre **4.5 et 12 milliards de dollars**.

Conclusion

Les premiers jalons de l'exploration martienne étant posés par SpaceX, l'établissement de l'humanité sur la planète rouge semble à notre portée. Toutefois les obstacles technologiques, humains et sociétaux sont encore nombreux et il sera indispensable de considérer l'ensemble des facteurs pour la réussite de cette entreprise humaine.

Cette étude balaie seulement une fraction des technologies nécessaires pour l'installation durable sur la planète rouge et ayant été réalisé par un groupe d'ingénieur, elle ne saurait donc être entièrement objective sur l'ensemble des sujets abordés.

Un projet comme l'installation humaine sur Mars nécessite la mobilisation de l'ensemble des connaissances humaines et ne peut se faire qu'avec une coopération globale internationale réunissant tous les domaines scientifiques.

Pierre-Yves Froissart

Si le projet vous intéresse, le rapport complet est disponible sur le site de l'APM et n'hésitez pas à contacter l'équipe pour en discuter de manière plus approfondie.