



EDITO : L'HOMME SUR MARS DANS DIX ANS ?

A l'heure où j'écris ces lignes, Robert Zubrin, fondateur et président de la Mars Society, va tenir la conférence d'ouverture de la convention 2021 de celle-ci (en visioconférence) : « *Reaching Mars this decade* ».

Ce thème n'est pas nouveau. L'ambitieux programme Constellation, lancé par Georges Bush, a été finalement abandonné par Barack Obama, en ne conservant que les développements du lanceur lourd SLS et de la capsule Orion.

Mais les temps sont différents.

L'industrie privée américaine a pris le relais, avec une évolution de la politique NASA orientée vers l'achat de services plutôt que le simple financement d'importants programmes de R&D. SpaceX a réussi le retour des Américains dans l'Espace, a validé avec une méthode d'itérations menées à un rythme époustouflant, le mode innovant de retour « *Sky Diver* » du Starship (SN20)... Il semble de plus en plus que le succès de Starship Heavy, plus gros lanceur au monde, puisse éclipser les premiers essais du SLS, développé par la NASA avec des méthodes classiques de contractualisation.

Parallèlement, le tourisme spatial décolle enfin, avec des non-professionnels qui atteignent l'orbite basse, et un retour d'expérience important pour le vol habité.

Pour le meilleur ou pour le pire, un autre accélérateur se met en place : la concurrence géostratégique entre la Chine et les Etats-Unis. Nous entrons de plus en plus dans un scénario de nouvelle guerre froide. N'oublions pas que le programme Apollo a été conduit, à un rythme effréné, pour démontrer la supériorité technologique quasi totale des Etats-Unis sur l'Union soviétique, suite à l'apparition soudaine du premier Spoutnik. L'Histoire se répète : le programme Artemis de la NASA (2019) vise le retour de l'Homme sur la Lune en 2024, avec un objectif de premiers pas sur Mars en 2033. Le programme chinois a été annoncé en Juin dernier, lors de la conférence GLEX 2021 à Moscou. Wang Xiaojun, directeur de la société publique CALT (China Academy of Launch Vehicle Technology), a résumé les plans chinois dans son discours « The Space Transportation System of Human Mars Exploration ». Le programme martien chinois prévoit l'Homme sur Mars en 2033, et à terme l'installation d'une base permanente.

Entre le dynamisme du privé américain, l'ambition du programme Artemis de la NASA, la Chine qui ne veut pas se laisser distancer, les boosters semblent en place. Quelle place pour l'Europe dans tout cela (sans aucun programme de développement de capacité autonome de vol habité en orbite basse) ?

Philippe Clermont
président

Dans ce numéro :

- Radiations : un risque réel mais maîtrisable p.1
- Les cycles du climat martien p.4
- Des nouvelles des sondes martiennes p.6

prochain numéro : janvier 2022...

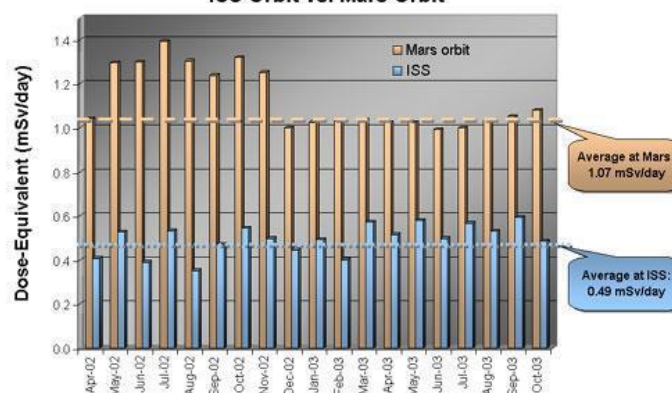
RADIATIONS : UN RISQUE RÉEL MAIS MAÎTRISABLE

Une évolution des positions NASA inattendue

En juin dernier, le serpent de mer des rayonnements ionisants a refait surface, suite à la proposition de la NASA, approuvée par un comité ad hoc d'universités étatiques américaines, de modifier les limites d'exposition des astronautes à ce facteur de l'environnement spatial. Les nouvelles normes ne différencieraient désormais plus les cas en fonction de l'âge et du sexe, au prix d'un abaissement du tolérable pour les hommes et de son accroissement pour les femmes. La norme unique proposée serait de 600 mSv (60 Rem). Le comité souligne que cela remet sur un pied d'égalité les candidats aux voyages interplanétaires, indépendamment de leur sexe. On peut supposer que cette petite révolution n'est pas justifiée principalement par cette considération (même si les sens opposés des deux évolutions interrogent) mais qu'elle repose sur l'avancement des connaissances, grâce en particulier au nombre considérable d'heures de vol spatial accumulées grâce à l'ISS. Elle élargit les possibilités de rendre, par des dispositions techniques adéquates, les voyages vers Mars faisables. Mais surtout, plus fondamentalement, elle constitue un aveu du caractère conservatif des normes en vigueur, établies pour l'ISS à une époque où presque tout restait à mesurer et objectiver.

Contrairement à l'opinion la plus répandue, cette limite de 600 mSv ne représente pas un obstacle sérieux pour la mission habitée martienne, même si on doit évidemment faire les choix d'architecture de mission permettant de s'en éloigner.

Radiation Dose-Equivalent at Skin Level (mSv/day):
ISS Orbit vs. Mars Orbit



Comparaison des doses dans l'ISS et en orbite martienne.(NASA)

Les auteurs du rapport ont certes pris en compte des données réalistes sur les flux de radiations, données acquises en particulier par l'instrument RAD porté par la sonde Curiosity, tant en phase de croisière Terre-Mars qu'à la surface de Mars (sans protection particulière). Grosso modo ces précieuses données indiquent des niveaux d'exposition 2,4 fois supérieur à celui de l'ISS durant les transferts, et similaire à ce dernier sur le sol de Mars. Mais ils ont conservé les hypothèses du modèle traditionnel de mission, où les astronautes devraient endurer 2 fois 6 mois de trajets interplanétaires (particulièrement exposés) et 18

mois de séjour planétaire sans protection ad hoc (autre qu'un abri contre les événements particuliers solaires, les SPE). Ils en déduisent une dose totale encourue (dépendant aussi des variations du cycle solaire) proche de 1000 mSv, c'est-à-dire bien supérieure à la nouvelle norme. Un nouveau pavé dans la mare pour les partisans du développement de l'astronautique.

Des moyens efficaces de réduction des doses

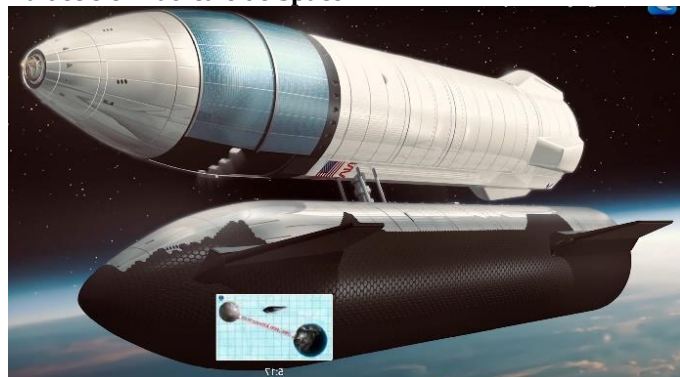
Le problème est réel, et le contenu de cette étude n'est pas à remettre en question. Par contre ce travail traduit indéniablement la réflexion d'un groupe d'experts qui a limité son analyse aux faits, sans chercher à contourner l'obstacle en explorant les possibilités d'agir sur la conception de la mission. Or plusieurs décisions techniques permettraient de réduire l'exposition à un niveau acceptable. Les plus radicales sont claires :

- enterrer ou recouvrir l'habitat d'une épaisseur de régolite ou de glace suffisante : 2 à 3 mètres (une réduction de moitié peut être déjà obtenue avec moins d'un mètre) ;

- limiter les sorties en scaphandre ;

- raccourcir drastiquement la durée des transferts interplanétaires, en adoptant, aux dépens de la masse de propergol nécessaire, des trajectoires non optimales en énergie ! Durant ces phases de vol, l'exposition est maximale et, de plus, son spectre d'énergie et la présence d'ions lourds ne permet pas d'imaginer un blindage significativement efficace à bord du vaisseau. Ce point est décisif, mais les projets de mission l'ont refusé, du fait du surplus de masse de propergol qu'il entraîne. Tout juste était-il admis qu'un transfert aller réduit à environ 6 mois, permettant un « libre retour » en cas d'incident soit envisageable.

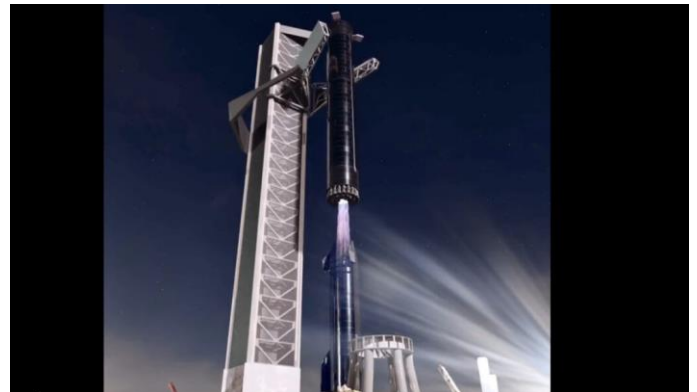
La décision radicale de SpaceX



Ravitaillement d'un Starship, selon un des modes envisagés, avec mise en place d'un tanker faisant office de dépôt. (doc. InfographicTony)

Mais l'émergence du projet Starship de SpaceX pourrait changer la donne. Elon Musk en effet défend l'idée d'un voyage rapide (3 mois), non seulement parce que cela fait tomber l'obstacle des radiations ionisantes, mais aussi parce qu'il imagine à l'avenir un véritable trafic passagers, pour qui la réduction de ces phases fastidieuses du voyage serait un attrait majeur. Mais, malgré sa taille impressionnante, le Starship ne peut prétendre débarquer sa charge utile de 100 tonnes sur Mars (ou sur la Lune) que moyennant son ravitaillement en orbite basse terrestre par une salve de « Starship Tankers » (inhabités). Le nombre de vols tankers requis pourrait monter jusqu'à 6, voire plus, sachant que les réservoirs du vaisseau ont une capacité de 1200 tonnes et que chaque tanker pourrait apporter 150 tonnes, probablement à un vaisseau inhabité laissé en orbite pour servir de dépôt de propergol. Un nouveau défi pour SpaceX ! Tout ceci ne pourra se faire que si, outre la réussite technique, il devient

possible de réutiliser rapidement les boosters et les tankers (dans l'esprit d'Elon Musk, avec un cycle peut-être même inférieur à 24 heures !). C'est la raison pour laquelle est introduit un système de récupération des vaisseaux par la tour de lancement, juste avant l'atteinte du sol, dispositif d'ores et déjà installé sur le pas de tir orbital de Boca Chica (au Texas) et que SpaceX voudrait tester dès le deuxième vol d'essai du lanceur...



Un booster lourd de Starship est capturé en fin de vol par des pinces géantes montées sur la tour de lancement. (doc.ErcXSpace)



Les impressionnantes pinces, alors sur le point d'être montées sur la tour de lancement orbital (octobre 2021).

L'accumulation des défis et innovations de SpaceX a de quoi faire douter, tant au plan technique qu'au plan économique. Pourtant, les idées et les prises de risque viennent d'un homme qui a réussi une cascade d'innovations et est devenu (surtout grâce à son autre initiative majeure, Tesla) l'homme le plus riche du monde. Les faits sont là, et ce sont plutôt les graves problèmes auxquels est confrontée l'humanité qui sont susceptibles de briser ce nouvel élan vers l'Espace...

La seule prise en compte de ces deux dispositions, même sans compter d'autres apports, tels que les combinaisons à protection optimisée, l'emplacement des réserves d'eau et de nourriture dans le vaisseau, l'application de régimes alimentaires et de protocoles médicaux, permettrait de ramener le risque des radiations à un niveau acceptable, avec une probabilité de mort à long terme par cancer accrue de +1% du fait de l'exposition ; il n'y a objectivement aucune raison que l'on ne puisse s'éloigner des conditions conduisant à un taux de +3%.

Objectiver les catégories de risques

Ce risque minime est cependant statistiquement attendu. Comment se situe-t-il par rapport à tous les autres risques, essentiellement techniques, mais aussi humains ? Il faut admettre que, dans l'impossibilité pratique de démontrer en développement l'atteinte d'un objectif chiffré pour la probabilité de Loss Of

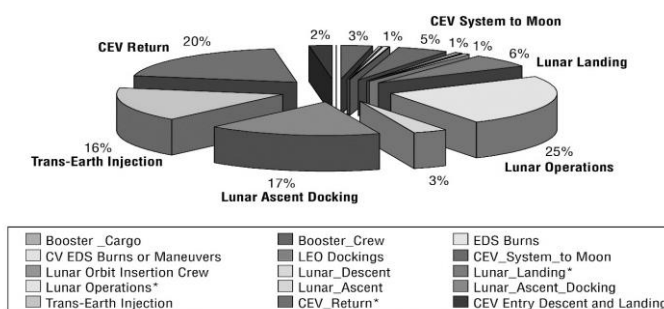
Crew (Perte de l'Équipage), on ne peut que s'assurer du respect de règles et de spécifications et garantir que les meilleurs efforts auront été faits pour atteindre le niveau visé, compte tenu des contraintes techniques, de délais et de coûts.

Un rapide coup d'œil sur les programmes habités passés permet de se faire a posteriori une idée des niveaux de risque alors encourus, et de s'y référer :

-Apollo : un incident très grave sur 10 vols (dont un limité à l'orbite terrestre et un autre sans alunissage) ; l'échantillon est réduit, mais en considérant Apollo 13 comme une demi-catastrophe, on obtient une statistique de LOC de 5% ;

-Vols Soyuz vers une station spatiale (MIR, Saliout, Skylab et ISS) et tous vols Shuttle : 3 LOC sur environ 300 vols ; statistique de LOC : 1,0% ; c'est mieux qu'Apollo, qui était évidemment beaucoup plus complexe à maîtriser (à noter : l'objectif de probabilité de LOC pour le Shuttle était de 0,2 %, pour une statistique finale de 1,5% !)

-Etude NASA-ESAS de retour sur la Lune : un rapport d'étude de 2004 analyse la contribution des différentes phases de mission et fait état d'un objectif de probabilité de LOC de 2,5% ; c'est le seul chiffrage écrit d'une mission interplanétaire trouvé ; à notre connaissance, rien n'est officialisé.



Analyse de la structure des risques d'une mission lunaire, en 2005. (doc.NASA-ESAS)

La mission martienne comporte des facteurs de risque aggravés par rapport à Apollo ; essentiellement la durée (exigences accrues de fiabilité des équipements) et l'éloignement (retour rapide ou mission de secours impossibles). Cette mission n'est donc imaginable que si sont mis en place des mesures permettant de contrebalancer ces causes de risques accrus. Principalement, au-delà du niveau de fiabilité démontrée des équipements : missions en tandem (comme d'ailleurs proposé par Von Braun) et mise en place préalable sur Mars d'une base pouvant supporter un rôle de havre de secours en cas de nécessité d'un séjour prolongé. Moyennant ces précautions, et en tablant aussi sur les progrès techniques accomplis en un demi-siècle, il ne paraît pas illusoire de tabler sur les objectifs suivants pour la probabilité de LOC :

-5% pour les premières missions ;

-2,5%, (évaluation NASA de 2005 pour la Lune), à vérifier en « phase de croisière » (20 ans ?) ;

-et < 0,5% à long terme, si l'on veut croire aux visions futuristes du créateur de SpaceX, dont rien ne permet de dire qu'elles seront un jour (trop lointain ?) réalisables, même s'il n'est pas non plus possible d'affirmer le contraire...

Pour l'instant, ce sont ces ordres de grandeur de 5% et 2,5% qu'il convient de comparer au 1% supplémentaire considéré pour la probabilité de mourir à long terme d'un cancer provoqué par un voyage martien.

Conclusions

Ces évaluations conduisent aux conclusions suivantes :

* la conception des matériels et de l'architecture de mission doivent permettre d'afficher une ambition de probabilité de LOC d'origine technique de 2,5% ; cet objectif difficile doit non seulement être visé, mais atteint si on veut assurer la pérennité et le développement d'une astronautique martienne ;

* sur la base de nos connaissances actuelles, la probabilité de décès différé dû aux radiations, raisonnablement estimée à 1% (moyennant les dispositions évoquées), ne permet pas de considérer que ce risque est négligeable ; il convient de continuer à acquérir des données, à travailler sur les contremesures (y compris biologiques) et de garder ce facteur présent à l'esprit des concepteurs ;

* les objectifs de 1% et de 2,5%, à prendre comme guide fondamental pour la conception et le programme de développement, devraient être recevables, tant par les décideurs (risque politique) que par les candidats astronautes eux-mêmes ;

* mais l'ambition proclamée par Elon Musk d'aboutir à un système de transport interplanétaire de masse, comparable au transport aérien, suppose d'atteindre des niveaux de sécurité encore plus exigeants.

La probabilité de LOC est-elle le bon critère ?

Il convient de souligner la difficulté qu'il y a à évaluer l'acceptabilité de ce projet au plan sécurité en agglomérant deux types d'accident aux conséquences radicalement différentes : l'accident technique conduisant à une LOC, et l'induction chez un astronaute d'un événement biologique conduisant à terme à un décès par cancer, jugé prématuré par rapport aux statistiques relatives à la maladie.

Dans le premier cas en effet on peut tabler assez rapidement sur les données recueillies au cours des missions successives pour valider un niveau de sécurité minimal, tout en étant à même de corriger les points techniques incriminés dans la catastrophe (ou de tout autre incident sérieux).

Dans le second cas, les faits ne deviennent avérés que 15 à 20 années après, sans que l'on ait d'ailleurs aucun moyen d'affirmer que la cause est bien le vol spatial. Par ailleurs, sans compter sur les progrès de la médecine, la probabilité pour un individu de 35 ans non-fumeur de mourir d'un cancer est de 22% (40% chez un fumeur américain !). Pour l'astronaute martien non-fumeur, ce ratio passerait donc à 23%...

Ce sont ces nombres qui situent la réelle dangerosité, toute relative, d'un facteur radiations bien géré : le risque cancer doit être comparé relativement à la probabilité statistique de mourir d'un cancer, et non pas aux risques techniques... D'ailleurs, si on voulait à tout prix comparer le risque radiations aux risques techniques du voyage, il vaudrait mieux se baser sur le nombre relatif d'années d'espérance de vie statistiquement perdues. Ceci permettrait théoriquement d'utiliser la même mesure dans les deux cas. Ainsi, si on considère les données suivantes (à titre d'exemple !) :

-âge moyen de l'astronaute en mission : 35 ans
 -âge moyen de décès de non-astronautes : 85 ans
 -âge moyen de décès par cancer post-mission : 60 ans
 -taux de LOC (techniques) : 0,025

on peut évaluer (statistiquement) les contributions relatives des deux catégories :

-nombre d'années perdues en LOC :

$6 \times 0,025 \times (85 - 35) = 7,5 \text{ années par mission}$

(taille équipage x taux de LOC x différence d'âge de décès)

-nombre d'années perdues par cancer « spatial » :

$6 \times 0,01 \times (85 - 60) = 1,5 \text{ année par mission.}$

Cette façon de jauger conduit à réduire d'un facteur 2 l'importance relative du risque radiations par rapport à l'ensemble des

risques techniques. Resterait à imaginer comment les volontaires astronautes (et les décideurs) pourraient comparer ces deux catégories de risque et les mettre en balance avec l'attrait de la mission...

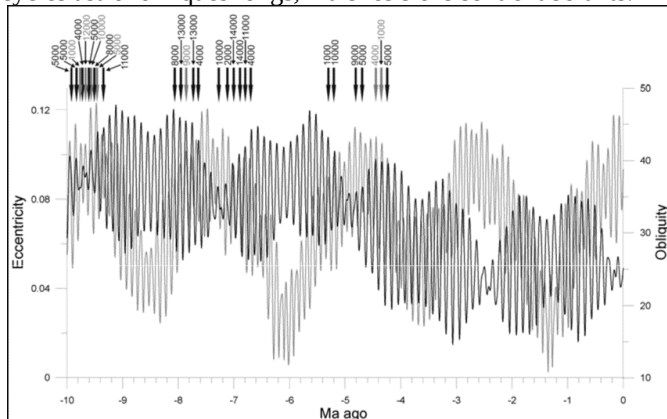
Richard Heidmann

Références:

<https://spacenews.com/report-backs-nasa-proposal-to-change-astronaut-radiation-exposure-limits/>
[NASA's Exploration Systems Architecture Study](#) (chapitre 8)

LES CYCLES DU CLIMAT MARTIEN

Le climat de la planète Mars est soumis comme le nôtre à des cycles astronomiques longs, mais les siens sont exubérants.



Les cycles de Milankovitch sur Mars au cours des derniers 10 millions d'années. La ligne noire est celle des variations de l'obliquité, la ligne grise celle des variations de l'excentricité : « Elles mettent en évidence les périodes possibles d'habitabilité pendant lesquelles l'été boréal (Ls 90 – 180) coïncide avec le périhélie, l'obliquité est au-dessus de 35° et l'excentricité au-dessus de 0,08, ou au-dessus de 0,1. Les nombres au-dessus des flèches indiquent la durée de la période si les conditions se sont reproduites continûment pendant plus de 1000 ans (échelle minimum de Laskar, graphe établi en 2004) ».

Le scientifique serbe Milutin Milankovitch a mis en évidence dans la première moitié du XX^{ème} siècle (publications majeures en 1930* et 1941*) les corrélations entre les cycles climatiques longs de la Terre et les cycles astronomiques eux-mêmes longs qui affectent la planète du fait des caractéristiques de sa masse en rotation, de sa relation de gravité avec le Soleil et, dans une moindre mesure, de sa relation de gravité avec les planètes voisines. On a pu extrapoler que ces cycles existent aussi pour les autres planètes, soumises évidemment à la force de gravité du soleil et éventuellement d'autres astres, où ils induisent des évolutions planétologiques et climatiques comparables à celles qui nous concernent sur Terre. C'est le cas pour Mars. C'est pour cela que si Milankovitch a été considéré d'abord comme un des plus éminents spécialistes des « sciences de la Terre », il est également un des pères de la planétologie.

Il a identifié trois paramètres dont l'évolution détermine "ses" cycles :

Le premier est l'**inclinaison** de l'axe de rotation de la planète par rapport au plan de l'écliptique, son « obliquité ». Il détermine l'intensité des variations saisonnières. Il ne s'agit pas ici du changement d'axe (« dérive vraie des pôles » ou « true polar wander ») qui consiste à un réalignement du plus grand axe d'inertie de la planète avec son axe de rotation du fait du changement de répartition des masses au sein du volume planétaire (par exemple sur Mars, à la suite de la formation du socle de Tharsis). Le changement d'obliquité est une simple variation

d'inclinaison n'entraînant pas de changement dans la localisation géographique des pôles.

Le deuxième est l'**excentricité** de l'orbite, c'est-à-dire l'élongation de son ellipse, donc la variation de la distance du périhélie par rapport à celle de l'aphélie. Il a un effet sur la durée relative des saisons et sur les températures. A noter que la distance parcourue sur l'ellipse par la planète, reste inchangée et que c'est seulement le grand axe de l'ellipse qui est modifié. La variation de ce paramètre ne peut être due qu'aux variations de l'influence gravitaire des planètes voisines.

Le troisième est la **précession climatique**, c'est-à-dire l'avance continue du point vernal (ou autre repère) sur l'orbite, du fait que la planète n'est pas homogène en quantité de matière selon la distance au centre de gravité le long de son axe de rotation. Le noyau est évidemment beaucoup plus dense que le manteau et la masse a tendance à tendre vers l'équateur du fait de la rotation. Pour la terre, la force de gravité solaire, augmentée de celle de la Lune, ne s'appliquant pas à la même quantité de matière (plus à l'équateur, sur le « bourrelet équatorial », et beaucoup moins aux pôles), un effet de couple est généré qui tend à entraîner l'excès de masse présent à l'équateur vers le plan de l'écliptique. Cet effet ne conduit toutefois pas à une inclinaison « définitive » puisque la masse est en rotation (de l'Ouest vers l'Est), mais à la définition par l'axe des pôles, avec le temps, d'un cône dans l'espace, par rapport à l'axe perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le déplacement de l'axe des pôles vers l'Ouest (contraire à celui de la rotation « normale » des planètes), a pour effet d'avancer chaque année un peu (quelques 50 secondes pour la Terre) la succession des saisons.

L'excentricité de l'orbite terrestre varie de 0,005 (donc quasi circulaire) à 0,058, sur 413.000 ans (actuellement 0,017) ; une autre influence qui s'exerce selon une périodicité de 9 millions d'années, décelée récemment, pourrait être due à l'influence gravitationnelle de Mars. Les planètes ont donc bien une influence les unes sur les autres, pourvu qu'elles ne soient pas trop éloignées (mais, attention, cette constatation des scientifiques, qui ressort de la seule gravité, est loin des divagations des astrologues).

L'obliquité de la Terre varie de 22,1° à 24,5° sur 41000 ans (actuellement 23,44°).

La précession des équinoxes dessine son cône sur une période de 25760 ans et le point vernal va se retrouver au même endroit en terme de longitude solaire à l'issue de cette période, après être passé par tous les signes du zodiaque. C'est ce que les anciens (Hipparque de 147 à 127 avant JC) appelaient « La Grande année » ou « année platonique » (parce que Platon - 428 à 348 - a, le premier, spéculé sur sa durée) et si on a envisagé sa possibilité depuis très longtemps, c'est parce que c'était sans doute le seul cycle à pouvoir être déduit de l'observation de la voûte étoilée à l'œil nu.

Le déroulement des cycles a une influence sur le climat et leurs interactions sur des échelles de temps différentes complexifient cette évolution.

En fait pour la Terre, les conséquences sont marquées mais elles ne sont pas catastrophiques (ou moins que pour d'autres) puisque notre planète est située (actuellement) dans le milieu de la zone d'habitabilité de notre système solaire (plage de températures où l'eau peut être liquide). Lorsque l'obliquité augmente au maximum (vers 24,5°), les différences saisonnières sont plus fortes (nous nous en éloignons mais en sommes encore proches). Lorsque l'excentricité augmente, l'irradiance varie davantage sur l'année et les saisons deviennent de plus en plus inégales en durée et selon l'hémisphère. Là aussi, pas de problème pour la

Terre actuellement. Mais à son minimum (0,005), dans 27000 ans, nous connaissons probablement une nouvelle glaciation (moindre insolation des pôles) avant de repartir vers une période plus chaude. Par ailleurs, si, du fait de la précession climatique, le passage au périhélie se fait aux solstices, les saisons seront accentuées, les étés seront plus chauds dans l'hémisphère Nord et les hivers plus froids dans l'hémisphère Sud.

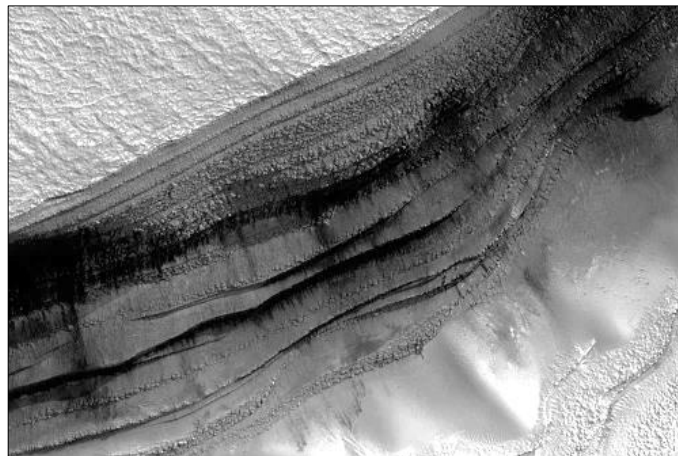
C'est la combinaison de tous ces facteurs qui détermine le climat selon des variations presque infinies à l'intérieur de tendances lourdes puisque les durées de cycles sont différentes. Bien entendu ces variations ne prennent pas en compte l'évolution de la composition de l'atmosphère ou l'évolution de la nucléosynthèse du Soleil, autres facteurs qui résultent de l'activité de la biosphère ou de celle de la planète (volcanisme, dérive des continents) ou encore du Soleil lui-même (nucléosynthèse à partir d'une ressource épuisable, l'hydrogène) mais qui, elles, ne sont pas cycliques. Comme on le sait bien maintenant, l'Univers est en évolution et notre petit coin de paradis, de l'état duquel nous sommes en partie responsable, n'est pas dans une bulle protégée vis-à-vis du temps qui passe !

Mars est comme la Terre, soumise à ces cycles, sur le long-terme (même s'il faut distinguer le long-terme et le très-long-terme, au-delà de plusieurs dizaines de millions d'années). La différence est que pour elle, tout est « exagéré ». Cela tient bien sûr à sa situation plus éloignée du Soleil mais également à la proximité, plus grande, de Jupiter. Cette dernière ne l'a pas seulement privée de « matière première » dans sa période d'accrétion, elle continue aujourd'hui à la bousculer gentiment et continûment. Cela tient encore à l'absence d'astre stabilisateur de son obliquité, comme pour nous la Lune. Phobos et Deimos ne sont que des amas de poussière et de roches (probablement des astéroïdes captifs) dont la masse est absolument insuffisante pour contrebalancer les déstabilisations d'obliquité (la masse du plus gros, Phobos, deux fois celle de Deimos, n'est que de 1/50 millionième de celle de la Lune). Comme Mars se trouve à la limite de la zone habitable de notre système et que sa masse ne lui permet pas de garder une atmosphère substantielle sur le long terme, les variations cycliques ont pour elle des conséquences beaucoup plus graves lorsqu'elles la font sortir à un moment ou l'autre de cette zone.

La variation de son obliquité va en effet de 14,9° à 35,5° sur 124000 ans (actuellement 25,19°) mais sur une période très longue (au-delà de quelques 40 millions d'années), les fluctuations ont été beaucoup plus amples (jusqu'à 60°) et certains les ont même qualifiées de chaotiques. Son excentricité moyenne se situe à 0,066 mais le domaine de fluctuations est très important, de presque circulaire, 0,002, à 0,103 sur 100000 ans (actuellement 0,0933 soit 207 millions de km pour le périhélie, à 249 millions de km pour l'aphélie). Sa précession climatique s'allonge, elle, sur une périodicité de 170000 ans.

Lorsque l'obliquité s'accroît vers 35°, le gaz carbonique gelé aux pôles dans des calottes (actuellement surtout au Sud, plus froid en raison de l'excentricité), fond, l'atmosphère s'épaissit et des dépôts de glace d'eau se forment aux latitudes moyennes. C'est à cela que nous devons les inlandsis présents encore aujourd'hui un peu partout à la surface de Mars. L'excentricité, lorsqu'elle est réduite, empêche les étés boréaux chauds et

renforce la sécheresse. Tout cela concourt à une histoire climatique complexe avec un éventail très ouvert de conditions successives. Au-delà de la sécheresse générale et des périodes de densification de l'atmosphère causées par les épisodes volcaniques, cela explique la réapparition d'étendues d'eau liquide en surface au cours d'une histoire encore récente (quelques millions d'années), et de glace d'eau persistant aujourd'hui sous une protection légère de régolite. La calotte polaire Nord actuelle ne daterait que de quelques 5 millions d'années.



Vue MRO d'un flanc de la grande faille Chasma Boreale, visible sur la calotte polaire Nord. Elle montre clairement les variations de consistance des dépôts de sol glacé au cours des quelques derniers millions d'années, témoignant des variations du climat.

(doc.NASA-JPL-Univ.Arizona)

Les Terriens ont de la chance (mais c'est peut-être pour cela qu'il y a des Terriens) car notre grande stabilité d'obliquité est très ancienne et elle va durer (et Mars ne perturbe que très peu notre excentricité). Certes la Lune s'éloigne (actuellement de 3,82 cm par an). Mais elle ne va pas disparaître de notre regard (même si dans 600 millions d'années ses éclipses ne pourront plus cacher le Soleil). Notre système deviendra stable lorsque par effet de marée réciproque, nos jours et ceux de la Lune seront devenus de même durée, 40 de nos jours actuels (durée qui sera aussi celle du mois lunaire). Nous serons alors en orbite « synchrone », comme, par exemple, Charon et Pluton dont la relation est asymptotiquement devenue stable, une « planète-double ». Ceci dit, en fin de compte, dans quelques 5 milliards d'années, nous serons rattrapés par l'évolution catastrophique du Soleil en fin de vie, lorsqu'il aura épuisé l'hydrogène de son cœur et qu'il sera obligé d'aller le chercher toujours plus haut dans ses couches supérieures. A ce moment, rouge et boursoufflé mais toujours très chaud, il viendra nous absorber dans sa chaleur et tout ce qui n'aura pas été brûlé lors des milliards d'années précédents, sera définitivement détruit (ou presque car on a observé récemment les traces chimiques de croûtes de planètes telluriques, à la surface de naines blanches, vestiges d'étoiles de type solaire).

Pour terminer sur une comparaison que je trouve parlante, pour moi l'histoire géologique de la Terre pourrait se raconter sur une musique de Mozart, d'une très grande richesse (« beaucoup de notes ») mais merveilleusement équilibrée, celle de Mars, sur une musique de Vivaldi, baroque et exubérante.

Pierre Brisson

Liens :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/milankovitch-2005.xml>
<https://www.climate-policy-watcher.org/surface-temperature/milankovic-cycles-on-mars.html>
<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/conference-le-vrard.xml>
<https://space.stackexchange.com/questions/48918/do-we-know-the-likely-conditions-on-mars-when-its-orbital-eccentricity-was-very>
<https://science.sciencemag.org/content/352/6289/1075>
https://www-k12.atmos.washington.edu/k12/re-sources/mars_data-information/temperature_overview.html
<https://www.climate-policy-watcher.org/surface-temperature/milankovic-cycles-on-mars.html>
https://www2.physics.ox.ac.uk/sites/default/files/2011-06-15/milankovic_on_mars2013.pdf_93344.pdf
https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_astronomique_des_pal%C3%A9oclimats
https://fr.wikipedia.org/wiki/Param%C3%A8tres_de_Milankovi%C4%87

Références :

- (1) Milutin Milanković, *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen, Handbuch der Klimalogie Band 1, Teil A* Bornträger Berlin, 1930
- (2) Milutin Milanković, *Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*, Belgrade, 1941.

DES NOUVELLES DES SONDES MARTIENNES

Ingenuity

Sur le site web nous avons laissé Ingenuity à son sixième vol. A ce jour il y a eu 13 vols et une série de tests de rotation jusqu'à 2800 tours/mn, au lieu des 2400 nominaux, à partir du 16 septembre au matin (heure de Paris).

Une vitesse de rotor plus élevée devrait permettre de compenser la diminution de la densité atmosphérique causée par les changements saisonniers sur Mars. L'augmentation de la vitesse du rotor est un changement important par rapport à la procédure nominale utilisée jusqu'à présent, il fallait avancer prudemment. La première étape consistait à effectuer un test de rotation à grande vitesse à 2 800 tr/min au sol et, si tout se passait bien, la deuxième étape consistait à effectuer un vol de courte durée, en survolant brièvement l'emplacement actuel, avec une vitesse de rotor de 2 700 tr/min.

Le test de rotation à grande vitesse s'est terminé avec succès le 15 septembre 2021 à 23h29 PDT, 11h11 LMST, heure locale de Mars (Sol 204 de la mission Persévérance). Les moteurs d'Ingenuity ont fait tourner les rotors jusqu'à 2 800 tr/min, ont brièvement maintenu cette vitesse, puis ont fait tourner les rotors jusqu'à l'arrêt, le tout exactement comme séquencé pour le test. Tous les autres sous-systèmes fonctionnaient parfaitement. Il était particulièrement intéressant de déterminer si les vitesses de rotor plus élevées provoquent des résonances (vibrations) dans la structure d'Ingenuity. Les résonances sont un défi courant dans les giravions aériens et peuvent causer des problèmes de détection et de contrôle, et peuvent également entraîner des dommages mécaniques. Heureusement, les données de cette dernière rotation à grande vitesse n'ont montré aucune résonance aux régimes de rotor les plus élevés. La rotation réussie à grande

vitesse a été une réalisation passionnante pour Ingenuity et a donné le feu vert pour procéder à un vol d'essai avec une vitesse de rotor de 2 700 tr/min.

Le vol d'essai devait avoir lieu le 18 septembre 2021 (Sol 206) et devait être un bref vol stationnaire à 5 mètres d'altitude avec une vitesse de rotor de 2 700 tr/min. Le vol s'est avéré sans incident, car Ingenuity a décidé de ne pas décoller ! Voici ce qui s'est passé : Ingenuity a détecté une anomalie dans deux des petits servomoteurs de commande de vol (ou simplement « servos ») lors de sa vérification automatique avant le vol et a fait exactement ce qu'il était censé faire : il a annulé le vol.

Ingenuity contrôle sa position et son orientation pendant le vol en ajustant le pas de chacune des quatre pales du rotor lorsqu'elles tournent autour du mât. Le pas de lame est ajusté par un mécanisme de plateau cyclique, qui est actionné par des servos. Chaque rotor a son propre plateau cyclique contrôlé indépendamment, et chaque plateau cyclique est actionné par trois servos, donc Ingenuity a six servos au total. Les servomoteurs sont beaucoup plus petits que les moteurs qui font tourner les rotors, mais ils font une énorme quantité de travail et sont essentiels à un vol stable et contrôlé. En raison de leur criticité, Ingenuity effectue un contrôle automatisé des servos avant chaque vol. Cet auto-test entraîne les six servos à travers une séquence d'étapes sur leur plage de mouvement et vérifie qu'ils atteignent leurs positions commandées après chaque étape.

Les données du mouvement anormal du servo avant le vol montrent que deux des servos du plateau cyclique du rotor supérieur - les servos 1 et 2 - ont commencé à osciller avec une amplitude d'environ 1 degré autour de leurs positions commandées juste après la deuxième étape de la séquence. Le logiciel d'Ingenuity a détecté cette oscillation et annulé l'auto-test et le vol.

Vol	Date	Distance	Alt.max (m)	Vit.max (m/s)	Durée (s)	Parcours	
1	sol 58	0	3	0	39,1		
2	sol 61	4	5	0,5	51,9		
3	sol 64	100	5	2	80,3		
4	sol 69	266	5	3,5	116,9		
5	sol 76	129	10	2	108,2	Champ Wright	AérodB
6	sol 91	215	10	4	139,9	AérodB	AérodC
7	sol 107	106	10	4	62,8	AérodC	AérodD
8	sol 120	160	10	4	77,4		Champ Wright
9	sol 133	625	10	5	166,4	AérodE	AérodF
10	sol 152	233	12	5	165,4	AérodF	AérodG
11	sol 163	383	12	5	130,9	AérodG	AérodH
12	sol 174	450	10	4,3	169,5	AérodH	AérodH
13		210	8	3,3	161	AérodH	

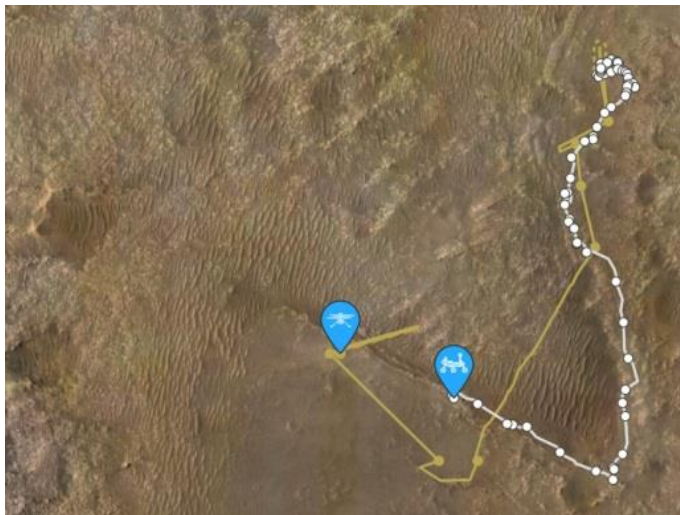
L'équipe est toujours à la recherche de l'anomalie. Pour recueillir plus de données, elle a demandé à Ingenuity d'exécuter des tests de tremblement des servos supplémentaires au cours de la semaine dernière, avec un test de tremblement le 21 septembre 2021 (Sol 209) et un le 23 septembre 2021 (Sol 211). Les deux

tests d'oscillation se sont déroulés avec succès, le problème n'est donc pas entièrement reproductible.

Une théorie expliquant ce qui se passe est que les pièces mobiles des servo-réducteurs et des liaisons du plateau cyclique commencent à montrer une certaine usure maintenant qu'Ingenuity a effectué bien plus de deux fois plus de vols qu'initialement prévu (13 terminés contre cinq prévus). L'usure de ces pièces mobiles entraînerait une augmentation des jeux et un jeu accru, et pourrait expliquer l'oscillation du servo. Une autre théorie est que le test de rotation à grande vitesse a laissé le rotor supérieur dans une position qui charge les servos 1 et 2 d'une manière unique et induisant des oscillations qui n'ont jamais été rencontrées auparavant. Un certain nombre d'outils sont disponibles pour travailler sur l'anomalie et elle devrait être surmontée, envisageant la reprise des vols bientôt.

Perseverance et Ingenuity évoluent vers le sud de Mars. Leur position peut être suivie via cette carte :

Même s'il n'emporte aucun instrument ni aucune expérience scientifique à son bord, Ingenuity a surpris les scientifiques qui ont examiné les images obtenues lors des envolées du drone-hélicoptère, servant d'éclaireur. En volant sur Mars, Ingenuity fait une expérience scientifique imprévue : ses pales soulèvent la poussière martienne bien plus facilement qu'on aurait pu l'imaginer dans l'atmosphère ténue de la planète.



Trajectoires de Perseverance et d'Ingenuity sur Mars.

(doc. NASA)

Perseverance

Le rover Perseverance de la NASA commence à rassembler des pièces de puzzle de l'histoire de Mars

Le rover a opéré dans le cratère Jezero, juste au nord de l'équateur qui abritait un lac il y a 3,5 milliards d'années, lorsque les conditions sur Mars étaient beaucoup plus chaudes et humides qu'aujourd'hui.

Après une première tentative de prélèvement d'un échantillon au début du mois d'août qui avait échoué car la roche s'est avérée trop friable pour résister au forage, le rover Perseverance de la NASA a collecté avec succès sa première paire d'échantillons de roche, et les scientifiques acquièrent déjà de nouvelles connaissances sur la région. Après avoir collecté son premier échantillon, nommé "Montdenier", le 6 septembre, l'équipe a collecté un deuxième, "Montagnac", à partir de la même roche appelée Rochette, le 8 septembre.



On remarque les deux trous creusés dans Rochette, celui de gauche a été baptisé Montagnac et celui de droite Montdenier (des noms de communes de la région PACA).

(doc. NASA/JPL-Caltech)

L'analyse des roches à partir desquelles les échantillons de Montdenier et de Montagnac ont été prélevés et de la précédente tentative d'échantillonnage du rover peut aider l'équipe scientifique à reconstituer la chronologie du passé de la région, marquée par une activité volcanique et des périodes d'eau persistante.

La roche qui a fourni les premiers échantillons de carottes de la mission est de composition basaltique et peut être le produit de coulées de lave. La présence de minéraux cristallins dans les roches volcaniques est particulièrement utile pour la datation radiométrique. L'origine volcanique de la roche pourrait aider les scientifiques à dater avec précision quand elle s'est formée.

Chaque échantillon peut faire partie d'un puzzle chronologique plus vaste ; mettez-les dans le bon ordre et les scientifiques auront une chronologie des événements les plus importants de l'histoire du cratère. Certains de ces événements incluent la formation du cratère de Jezero, l'émergence et la disparition du lac de Jezero et les changements du climat de la planète dans un passé ancien.

De plus, des sels ont été repérés à l'intérieur de ces roches. Ces sels peuvent s'être formés lorsque l'eau souterraine a traversé et altéré les minéraux d'origine de la roche, ou plus probablement lorsque l'eau liquide s'est évaporée, laissant les sels.

Les minéraux de sel dans ces deux premières carottes rocheuses peuvent également avoir piégé de minuscules bulles d'eau martienne ancienne. S'ils sont présents, ils pourraient servir de capsules temporelles microscopiques, offrant des indices sur l'ancien climat et l'habitabilité de Mars. Les minéraux de sel sont également bien connus sur Terre pour leur capacité à préserver les signes de la vie ancienne.

L'équipe scientifique de Perseverance savait qu'un lac avait déjà rempli le cratère ; depuis combien de temps a été plus incertain. Les scientifiques ne pouvaient écarter la possibilité que le lac de Jezero ait été un événement bref : les eaux de crue auraient pu rapidement remplir le cratère d'impact et s'assécher en l'espace de 50 ans, par exemple.

Mais le niveau d'altération que les scientifiques voient dans la roche qui a fourni les échantillons de carottes - ainsi que dans la roche ciblée par l'équipe lors de sa première tentative d'acquisition d'échantillons - suggère que les eaux souterraines étaient présentes depuis longtemps.

Cette eau souterraine aurait pu être liée au lac qui se trouvait autrefois à Jezero, ou elle aurait pu traverser les rochers

longtemps après que le lac se soit asséché. Bien que les scientifiques ne puissent toujours pas dire si l'eau qui a altéré ces roches était présente pendant des dizaines de milliers ou des millions d'années, ils sont plus certains qu'elle a été là assez longtemps pour rendre la région plus accueillante pour la vie microscopique dans le passé.

Ces échantillons ont une grande valeur pour les futures analyses de laboratoire sur Terre. Un jour, nous pourrions peut-être déterminer la séquence et le calendrier des conditions environnementales que représentent les minéraux de cette roche. Cela aidera à répondre à la question scientifique globale de l'histoire et de la stabilité de l'eau liquide sur Mars.

Prochain arrêt : South Seitah

Perseverance recherche actuellement dans le fond du cratère des échantillons pouvant être ramenés sur Terre pour répondre à des questions profondes sur l'histoire de Mars.

Le prochain site d'échantillonnage probable de Perseverance se trouve à seulement 200 mètres dans South Seitah, une série de crêtes couvertes de dunes de sable, de rochers et d'éclats de roche comparables à des "assiettes cassées".

L'échantillon de forage récent du rover représente ce qui est probablement l'une des couches rocheuses les plus jeunes que l'on puisse trouver sur le sol du cratère Jezero. South Seitah, en revanche, est probablement plus âgée et fournira à l'équipe scientifique une meilleure chronologie pour comprendre les événements qui ont façonné le fond du cratère, y compris son lac.

Début octobre, toutes les missions martiennes cesseront d'opérer leur sondes et rover spatiaux pendant plusieurs semaines, une mesure de protection pendant une période appelée conjonction solaire martienne. Pendant cette phase où Mars se trouve du côté opposé du Soleil par rapport à la Terre, les particules ionisées éjectées du Soleil pourront interférer avec les signaux radio de communication avec les missions martiennes. Cela pourrait compromettre les télécommandes et entraîner des comportements inattendus de ces missions.

Il est peu probable que Perseverance s'exerce à South Seitah avant cette période.

Mission chinoise

De même pour Zhurong et Tianwen-1, une pause des activités est prévue pendant plusieurs semaines. **Le rover chinois de la mission Tianwen-1 qui a atterri sur le sol martien le 15 mai 2021 avoisinera bientôt les 150 jours de mission après son dépôt sur le sol le 22 mai. Au 30 août, Zhurong avait parcouru 1064 mètres au sud du site d'atterrissage.** Beaucoup plus rapide par exemple que Curiosity qui n'avait atteint son premier kilomètre qu'au Sol 335, bien que les 2 rovers ne soient comparables ni en taille ni en mission.

InSight

Le 18 septembre, l'atterrisseur InSight de la NASA a célébré son 1 000^{ème} Sol.

Pour rappel, InSight avait atterri sur Mars le 26 novembre 2018. Depuis son dépôt le sismomètre SEIS enregistre les

tremblements du sol martien. Malheureusement, la sonde HP3, l'un des 3 instruments de l'atterrisseur, n'a pas réussi à accomplir sa mission.

Depuis le déploiement sur le sol martien, **SEIS, pour Seismic Experiment for Interior Structure, a détecté plus de 700 tremblements de Mars.** Le premier séisme avait été enregistré en avril 2019.

InSight a détecté des tremblements de sol de magnitude 4,2 et 4,1 le 25 août, puis a détecté un autre séisme d'une magnitude d'environ 4,2 le 18 septembre qui a duré près de 90 minutes.

Le plus grand tremblement de Mars mesuré par InSight précédemment en 2019, avait atteint une magnitude de 3,7, soit environ cinq fois moins puissant qu'un séisme de magnitude 4,2.

Les premières publications montrent que Mars a un noyau étonnamment grand et une croûte relativement mince, contrairement aux prédictions. D'autres surprises nous attendent certainement encore.

La mission InSight, prolongée par la NASA après le nettoyage cet été des panneaux solaires avec du régolite, devrait continuer à écouter le cœur de Mars jusqu'en décembre 2022 si tout va bien.

Curiosity

C'est en Août 2012 que Curiosity se posait dans le cratère Gale, 9 ans plus tard il est toujours vaillant après plus de 26 km et s'achemine doucement vers les hauteurs du Mont Sharp (Aeolis Mons est le nom savant), but ultime de son voyage.

Il est a priori dans le fond d'un ancien lac, ou peut-être pas suivant les dernières études. Celles-ci semblent indiquer que cet endroit aurait plutôt été plus sec, balayé par les vents et avec moins d'eau que prévu.

Néanmoins, après avoir parcouru des terrains plutôt riches en argile (formés en présence d'eau obligatoirement), il s'attaque maintenant à des terrains plutôt riches en sulfates, correspondants à des zones moins humides. Il a à ce jour recueilli plus de trente échantillons grâce à sa foreuse.

Mission Hope

Hope ne s'est donc pas posée sur le sol martien mais mise en orbite définitive en avril 2021.

Au cours des derniers mois, Hope effectua des essais d'instruments et de système, et fit aussi la transition de son orbite de capture à son orbite scientifique, entre 1.000 et 49.380 km de Mars. L'orbite scientifique, unique et innovante, offrira une couverture inégalée de l'atmosphère planétaire. Grâce au point de vue dynamique de l'orbite scientifique elliptique de Hope (20.000 à 43.000 km), la sonde va explorer les changements du climat martien entre la haute et la basse atmosphère, sur toute la surface de la planète, à tout moment de la journée et pendant toutes les saisons de l'année. Elle orbitera toutes les 55 heures et capturera une image martienne complète tous les neuf jours.

Elle doit utiliser trois instruments scientifiques pour surveiller l'atmosphère de la planète rouge et devait commencer à transmettre des informations en septembre 2021, des données auxquelles les scientifiques du monde entier auront accès.

Nous les attendons avec impatience.

Yves Monier

Ont collaboré à ce numéro : P. Brisson, P. Clermont, Richard Heidmann, Dominique Ledevin, Yves Monier
Achevé d'imprimer : Objectif numérique 56100-Lorient
Dépôt légal : octobre 2021