6 OPINIO

MARS : AMBITION HUMAINE, DÉFIS PLANÉTAIRES

ACADÉMIE ROYALE
DES SCIENCES, DES LETTRES ET DES BEAUX-ARTS
DE BELGIQUE

Publié avec le soutien de

loterie nationale
BIEN PLUS QUE JOUER

Académie royale de Belgique
rue Ducale, 1
1000 Bruxelles, Belgique
www.academie-editions.be
www.academieroyale.be

Sous la direction de Didier Viviers,
Secrétaire perpétuel de l'Académie royale de Belgique

Opinio n° 6

© 2025, Académie royale de Belgique

Crédits :
© Véronique Dehant, pour le texte

Suivi éditorial: Lysis Mettens, Académie royale de Belgique

Réalisation graphique: Loredana Buscemi, Académie royale de Belgique

Impression :
Snel Grafics sa, Vottem

Document réalisé par le Groupe de travail sur l'Éthique du spatial de l'Académie royale de Belgique, sous la direction de Véronique Dehant, et par les auteurs de la note aux décideurs « Pouvons-nous, et devons-nous, aller sur Mars ? ».

Membres du groupe de travail sur l'Éthique du spatial :

Dehant Véronique, Présidente du Groupe de travail, planétologie, Observatoire royal de Belgique et Université catholique de Louvain, Belgique

Arnould Jacques, philosophie, Centre national d'études spatiales, France

Bartik Kristin, chimie, Ingénierie des nanosystèmes moléculaires – Université libre de Bruxelles, Belgique

Coustenis Athéna, planétologie, Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique – Observatoire de Paris – Université Paris Sciences et Lettres, France

Husniaux Albert, aéronautique, spatial, recherche et technologie, Général major d'aviation en repos, ministère de la Défense, Belgique

Javaux Emmanuelle, astrobiologie, paléobiologie, premières traces et évolution de la vie, Université de Liège, Belgique

Kazarian Aïda, art, Académie royale de Belgique, Belgique

Lambert Dominique, philosophie des sciences et éthique, Université de Namur, Belgique

Mandea Mioara, géophysique et coordination de la science, Centre national d'études spatiales, France

Migeot Jean-Louis, ingénierie et acoustique, Université libre de Bruxelles, Belgique

Missa Jean-Noël, éthique et médecine, Centre de Recherche Interdisciplinaire en Bioéthique – Université libre de Bruxelles, Belgique

Morbidelli Alessandro, planétologie, Collège de France, France

Pence Charles H., philosophie, Université catholique de Louvain, Belgique

Poncelet Jean-Pol, politique du spatial et nucléaire, ancien ministre, Université catholique de Louvain, Belgique

Poullet Yves, informatique et droit, Université de Namur, Belgique

Reisse Jacques, chimie, Université libre de Bruxelles, Belgique

Schein Françoise, art plastique et droit fondamental, École nationale supérieure des arts visuels de La Cambre, Belgique

Auteurs de la note « Can We, and Should We, Go to Mars? A Note for Decision-Makers », dans *European Astrobiology Institute*, 2025 :

Verseux Cyprien, astrobiologie, Centre pour la technologie spatiale appliquée et la microgravité – Université de Brême, Allemagne

Poulet Lucie, ingénierie des processus de survie, Institut Pascal et Université Clermont Auvergne, France

Gargaud Muriel, astrobiologie, Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux, France

Mason Nigel, planétologie et astrobiologie, Université de Kent, Royaume-Uni

Lehto Kirsi, biologie, Département des sciences moléculaires de la vie – Université de Turku, Finlande

Viso Michel, astrobiologie, Centre national d'études spatiales et Innovaxiom SA, France

Cette note est issue du livre *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*, Cham, Springer, 2024, édité par :

Verseux Cyprien, astrobiologie, Centre pour la technologie spatiale appliquée et la microgravité – Université de Brême, Allemagne

Gargaud Muriel, astrobiologie, Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux, France

Lehto Kirsi, biologie, Département des sciences moléculaires de la vie – Université de Turku, Finlande

Viso Michel, astrobiologie, Centre national d'études spatiales et Innovaxiom SAS, France

Et dont les auteurs sont :

Arnould Jacques, philosophie, Centre national d'études spatiales, France

Baatout Sarah, radiation et biologie, Institut des applications médicales nucléaires, Centre d'étude de l'énergie nucléaire belge – SCK CEN, Belgique

Barthomeuf Perrine, droit, Cabinet Avocat Barthomeuf, France

Briones Carlos, astrobiologie, Centre d'astrobiologie – Institut national de technique aérospatiale et Conseil supérieur de la recherche, Espagne

Brucato John Robert, astrobiologie, Institut national d'astrophysique – Observatoire d'astrophysique d'Arcetri, Italie

Capova Klara-Anna, sciences sociales, Université de Durham, Royaume-Uni

Carré Fabrice, science-fiction, auteur de *Mars! Case studies*, *Shinypix* et *Les Hypermondes*, France

Cesari Laetitia, droit du spatial, Université du Luxembourg, Luxembourg

Chatzitheodoridis Elias, physique, Université nationale technique d'Athènes, Grèce

Clerc Philippe, droit du spatial, Centre national d'études spatiales, France

de Vera Jean-Pierre, astrobiologie, Opérations spatiales et entraînement des astronautes, MUSC – Centre aérospatial allemand, Allemagne

Dehant Véronique, planétologie, Observatoire royal de Belgique et Université catholique de Louvain, Belgique

Detrell Gisela, technologie des vols spatiaux habités, Université technique de Munich, Allemagne

Ditrych Ondřej, relations internationales, Institut des relations internationales, République tchèque

Dunér David, histoire des sciences, Université de Lund, Suède

Esslinger Yéléna, études des lois, Université de Bordeaux, France

Ewald Reinhold, opérations de vols spatiaux habités, astronaute, Université de Stuttgart, Allemagne

Forget Francois, planétologie, Laboratoire de météorologie dynamique – Institut Pierre-Simon Laplace, France

Fornaro Teresa, astrobiologie, Institut national d'astrophysique – Observatoire d'astrophysique d'Arcetri, Italie

Freissinet Caroline, planétologie, Laboratoire Atmosphères et Observations spatiales, Centre national de la recherche scientifique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université et Institut Pierre-Simon-Laplace, France

Gargaud Muriel, astrobiologie, Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux, France

Gonçalves Barbara, études des lois, Centre Michel de L'Hospital – Université Clermont Auvergne, France

Gross Christoph, planétologie, Université libre de Berlin, Allemagne

Hedlund Maria, sciences sociales, Université de Lund, Suède

Hofmann Mahulena, études des lois, Université du Luxembourg, Luxembourg

Holynska Malgorzata, chimie, Agence spatiale européenne et Centre européen de recherche et de technologie spatiales, Pays-Bas

Javaux Emmanuelle, astrobiologie, paléobiologie, premières traces et évolution de la vie, Université de Liège, Belgique

Kereszturi Akos, planétologie, Observatoire Konkoly, Centre de recherche en astronomie et sciences de la Terre – Réseau de recherche hongrois, Hongrie

Krassakis Alexandros, gestion des risques, Société Mars Hellas, Grèce

Lee Natuschka M., biologie, Collège suédois d'études avancées et Université suédoise d'agriculture, Suède

Lehoucq Roland, cosmologie, Département d'astrophysique – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives Saclay, France

Lehto Kirsi, biologie, Département des sciences moléculaires de la vie – Université de Turku, Finlande

Mangold Nicolas, planétologie, Laboratoire Planétologie et Géosciences, Centre national de la recherche scientifique, Université de Nantes et Université d'Angers, France

Mason Nigel, planétologie et astrobiologie, Université de Kent, Royaume-Uni

Meneghin Andrea, ingénierie des systèmes spatiaux, Institut national d'astrophysique – Observatoire d'astrophysique d'Arcetri, Italie

Milligan Tony, éthique, Département de théologie et études religieuses – King's College, Royaume-Uni

Noack Lena, planétologie, Département des sciences de la Terre – Université libre de Berlin, Allemagne

Novakova Julie Nekola, biologie, Université Charles et Institut de physique de l'Académie tchèque des sciences, République tchèque

Persson Erik, éthique, Université de Lund, Suède

Plesa Ana-Catalina, planétologie, Institut de recherche planétaire – Centre aérospatial allemand, Allemagne

Possnig Carmen, physiologie et médecine spatiales, membre de la réserve d'astronautes de l'Agence spatiale européenne, Université d'Innsbruck, Autriche

Poulet Lucie, ingénierie des processus de survie, Institut Pascal et Université Clermont Auvergne, France

Puumala Mikko, philosophie, Département de philosophie, d'histoire contemporaine et de sciences politiques – Université de Turku, Finlande

Rivoldini Attilio, planétologie, Observatoire royal de Belgique, Belgique

Rodríguez Manfredi José Antonio, astrobiologie, Centre d'astrobiologie – Institut national de technique aérospatiale et Conseil supérieur de la recherche, Espagne

Rückert Patrick, science de la production, Institut de génie mécanique de Brême – Université de Brême, Allemagne

Runavot Marie-Clotilde, droit et lois publiques internationales, Université Toulouse Capitole, France

Schmidt Nikola, politique du spatial, Institut des relations internationales – République tchèque

Selke Stefan, sciences sociales, Laboratoire scientifique public – Université de Furtwangen, Allemagne

Siljeström Sandra, astrobiologie, Instituts de recherche de Suède, Suède

Sivula Oskari, philosophie, Département de philosophie, d'histoire contemporaine et de sciences politiques – Université de Turku, Finlande

ten Kate Inge Loes, biologie, planétologie et astrobiologie, Université d'Utrecht et Université d'Amsterdam, Pays-Bas

Tikkanen Mikko, biologie, Département des sciences moléculaires de la vie – Université de Turku, Finland

Tønnessen Morten, philosophie, Université de Stavanger, Norvège

Tracht Kirsten, collaboration humain-robot, Institut de génie mécanique de Brême – Université de Brême, Allemagne

Vago Jorge L., étude de l'origine de la vie, Agence spatiale européenne, Pays-Bas

Verseux Cyprien, astrobiologie, Centre pour la technologie spatiale appliquée et la microgravité – Université de Brême, Allemagne

Viso Michel, astrobiologie, Centre national d'études spatiales et Innovaxiom SAS, France

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 13

RÉSUMÉ 15

INTRODUCTION 17

CHAPITRE 1 — ÉTAT DE L'ART CONCERNANT L'HABITABILITÉ DE MARS ET QUESTIONS SCIENTIFIQUES NON RÉSOLUES 21

CHAPITRE 2 — INSTRUMENTATION EXISTANTE, HÉRITAGES ET EXPÉRIENCES ACQUISES 29

CHAPITRE 3 — LES HUMAINS SUR MARS : PRÉSERVATION DES PLANÈTES TERRE ET MARS 33

CHAPITRE 4 — LES QUESTIONS LIÉES À LA « COLONISATION » DE MARS 35

CHAPITRE 5 — LA LÉGISLATION EXISTANTE 37

CHAPITRE 6 — QUELLES FUTURES MISSIONS HABITÉES VERS MARS, ALORS ? 41

- *Objectifs scientifiques et technologiques* 41
- *Une dynamique politique internationale* 41
- *Préparation des futures missions martiennes :* Artemis, Chang'e et les ambitions lunaires 42
- *Défis humains et logistiques* 42
- *Coûts, incertitudes politiques et enjeux commerciaux* 44

CHAPITRE 7 — TERRAFORMATION 47

Trois niveaux d'ambition 47

Limitations physiques et énergétiques 48

Alternatives locales : micro-habitabilité 49

Problèmes éthiques, juridiques et philosophiques 49

L'irréversibilité et la perte de valeur intrinsèque 50

CHAPITRE 8 —L'ESPACE : UN BIEN
ET UNE RESPONSABILITÉ COMMUNE ? 51

Le principe de la dignité et de l'intégrité des personnes 52

La question de la préservation des biens communs 53

CONCLUSION 57

BIBLIOGRAPHIE 61

AVANT-PROPOS

La perspective d'envoyer des humains sur Mars suscite un enthousiasme croissant, alimenté par les progrès technologiques et les ambitions affichées par certains acteurs publics et privés. Pourtant, derrière les promesses et les visions futuristes, les réalités scientifiques, techniques, éthiques et politiques restent complexes et souvent mal comprises.

Ce document s'appuie largement sur l'ouvrage *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[1] et sur les nombreuses discussions associées au Groupe de travail sur l'Éthique du spatial de l'Académie royale de Belgique. Il vise, d'une part, à proposer une analyse rigoureuse des principaux scénarios envisagés – exploration, colonisation, exploitation ou terraformation de Mars – en les replaçant dans le cadre de nos connaissances actuelles et en examinant leur faisabilité réelle, et, d'autre part, à comprendre les implications concrètes de ces scénarios en matière d'éthique, ainsi qu'en matière de risques et d'enjeux environnementaux et sociétaux. Pour obtenir des informations complémentaires, le lecteur est invité à consulter les références fournies dans l'ouvrage ou à prendre contact avec les auteurs.

Si certaines formes d'exploration humaine, de la visite limitée dans le temps à un établissement comparable aux stations de recherche polaires, peuvent être envisagées dans les prochaines décennies, d'autres projets plus hypothétiques, comme la terraformation ou l'installation de colonies permanentes, se heurtent à d'importants obstacles, tant médicaux et techniques qu'éthiques. Les conditions extrêmes à la surface de Mars, la rareté des ressources utilisables *in situ* ou encore les enjeux liés à une présence humaine durable appellent à la prudence et à la lucidité.

Loin de rejeter l'exploration de Mars, ce document invite à l'aborder avec réalisme et responsabilité. Il invite à un débat éclairé, capable de faire la part

---

[1] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*, Cham, Springer, 2024.

des choses entre fascination et faisabilité, sans céder aux généralisations ni à l'idéologie. L'exploration de Mars ne saurait devenir un simple symbole politique ou un substitut à la nécessaire préservation de notre propre planète : la Terre reste, et restera pour longtemps encore, le seul véritable foyer de l'humanité.

RÉSUMÉ

Les missions habitées vers Mars suscitent un vif intérêt et sont désormais considérées comme techniquement envisageables, la Lune servant de possible étape intermédiaire. Les agences spatiales et certains acteurs privés s'y préparent activement, mais la concrétisation de ces missions reste incertaine, en raison des nombreux défis – scientifiques, techniques, sociaux, juridiques et politiques – qu'elles soulèvent. Ce livre met en garde contre les idées trop optimistes, voire irréalistes, comme la colonisation rapide, la terraformation ou Mars comme « planète B » pour l'humanité, qui relèvent souvent davantage de la fiction que de la science.

Face à ces défis, ce texte souligne, à la suite des recherches de notre collectif d'auteurs et d'autrices, que toute exploration humaine devrait être précédée d'une évaluation rigoureuse, pluridisciplinaire et internationale, intégrant également les dimensions éthiques et environnementales. La protection de l'environnement martien, la préservation des biens communs spatiaux et le respect des limites humaines constituent des conditions essentielles à une exploration responsable.

Enfin, cet ouvrage appelle à un débat nuancé, dépassant les clivages idéologiques, fondé sur des connaissances solides, pour garantir que l'ambition spatiale serve le bien commun, la coopération pacifique et l'avancement scientifique, tout en évitant les dérives éthiques et les illusions technologiques.

INTRODUCTION

Les missions habitées vers Mars fascinent tant les chercheurs que le grand public et apparaissent aujourd'hui comme techniquement envisageables. Il semble cependant acquis que l'humanité retournera d'abord sur la Lune, avant d'envisager un débarquement sur la planète rouge – un projet qui suscite de nombreux débats, entre ambition d'exploration spatiale et exigences de la protection planétaire.

Au cours des dernières décennies, l'ESA[1], la NASA[2] et d'autres agences spatiales ont mené de nombreuses missions à destination de Mars, générant une moisson déjà riche de résultats scientifiques. Pourtant, des interrogations fondamentales subsistent – au premier rang desquelles celle de l'existence passée d'une forme de vie sur la planète rouge et de ce que cela impliquerait pour notre compréhension des conditions nécessaires à l'émergence de la vie. Quelques missions visant à y répondre sont prévues, mais leurs calendriers de mise en œuvre demeurent incertains. Le premier retour d'échantillons martiens pourrait être réalisé par la Chine, à la suite de l'abandon du programme de coopération américano-européenne Mars Sample Return, décidé par la nouvelle administration américaine. Au-delà des missions d'exploration robotique, Mars reste, après la Lune, la destination privilégiée pour l'exploration humaine, en raison de sa proximité relative à la Terre. Désormais, des projets portés par des acteurs privés évoquent même la perspective d'une implantation humaine permanente. Mais irons-nous réellement jusque-là ? Et surtout, serons-nous capables d'y rester ?

Avant toute mission habitée, une évaluation scientifique rigoureuse de Mars et des technologies disponibles s'impose. Celle-ci doit mobiliser de nombreuses disciplines : depuis le développement de lanceurs jusqu'à l'étude de la surface et de la structure interne de Mars, en passant par l'astrobiologie. Il est également essentiel d'intégrer les dimensions psychologique, sociale, légale et politique

---

1 L'ESA, European Space Agency, est l'agence spatiale européenne.

2 La NASA, National Aeronautics and Space Administration, est l'agence spatiale américaine.

d'une telle entreprise.

Les agences spatiales s'y préparent activement. Dans la feuille de route de l'exploration mondiale publiée en 2018 par l'ISEG (International Space Exploration Group, consortium regroupant notamment la NASA, l'ESA, Roscosmos et la CNSA[3]), l'atterrissage d'êtres humains sur Mars est mentionné comme un objectif commun. Le programme Artemis, lancé en 2019 sous l'égide de la NASA (mais fragilisé par des décisions politiques récentes des États-Unis), vise à renvoyer des humains sur la Lune en vue, notamment, d'en faire une étape intermédiaire vers Mars. L'Europe (*via* l'ESA) ainsi que d'autres pays, comme la Chine, la Russie, l'Inde ou les Émirats arabes unis, ont également exprimé leur volonté de participer à ce qui ressemble de plus en plus à une nouvelle course spatiale vers Mars.

Des acteurs privés, tels que SpaceX, jouent eux aussi un rôle croissant. Toutefois, certains de leurs projets sont empreints d'un optimisme excessif : les rêves d'une implantation humaine à long terme sont parfois présentés comme des objectifs atteignables à court terme. L'idée que l'humanité puisse bientôt devenir une civilisation multiplanétaire séduit, mais elle soulève aussi de profondes interrogations, dont celle de savoir s'il est possible, raisonnable et convenable de transformer en profondeur une autre planète.

Récemment, un groupe interdisciplinaire européen rassemblant plus de soixante spécialistes – planétologues, astrobiologistes, ingénieurs, philosophes, spécialistes du droit, spécialistes de l'éthique, astronautes – a analysé en profondeur les scénarios envisagés pour une présence humaine sur Mars. Dans cet « Opinio », nous reviendrons sur ces scénarios, leur faisabilité, leurs risques et leur justification éventuelle. Il est clair que le fait de considérer Mars comme une « planète B », comme un refuge potentiel en cas de catastrophe terrestre, ou d'envisager sa terraformation relève de la fiction plus que de la science et pose de sérieuses questions éthiques. Il est crucial d'éviter toute dérive sans pour autant renoncer à l'exploration de Mars. En réalité, l'exploration scientifique de Mars se poursuit déjà aujourd'hui grâce aux robots.

Notre contribution vise à présenter et analyser les principaux arguments en jeu, afin d'éclairer toute lectrice ou tout lecteur curieux de savoir non seulement ce qu'il est possible de faire, mais aussi ce qu'il conviendrait de faire. Le livre de référence[4] sur lequel se fonde ce texte appelle à nuancer le débat en s'appuyant sur des connaissances scientifiques solides. Des évaluations rigoureuses et objec-

---

[3] Roscosmos est l'agence spatiale russe. La CNSA, China National Space Administration, est l'agence spatiale chinoise.

[4] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

tives sont indispensables pour contrer la propagation de demi-vérités et d'idées fausses. Nous ne rejetons pas l'idée d'une présence humaine sur Mars et sommes conscients que renoncer complètement à cette exploration impliquerait de passer à côté d'opportunités scientifiques majeures et d'objectifs porteurs de coopération internationale. Toutefois, nous souhaitons alerter sur les dérives éthiques potentielles ainsi que sur les illusions dangereuses qu'elle pourrait porter, notamment l'idée selon laquelle l'humanité pourrait se transférer sur Mars si la Terre devenait invivable.

Chercher, explorer, exploiter, coloniser, terraformer : chacun de ces termes implique des niveaux très différents de faisabilité, de coûts et de conséquences. Certaines personnes, fascinées par le rythme effréné des progrès technologiques, croient possible une colonisation rapide de Mars. D'autres, plus sceptiques ou préoccupées par les implications éthiques, réagissent vivement face à ce qu'ils perçoivent comme de la naïveté, voire de la manipulation. Les excès des uns et des autres peuvent être tout aussi préjudiciables, risquant soit de tuer dans l'œuf des initiatives scientifiques inspirantes, soit de nourrir des chimères.

Cette note s'appuie sur un résumé[5] rédigé par les éditeurs du livre *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[6], eux-mêmes co-auteurs aux côtés des 60 experts ayant participé à sa rédaction. Notre objectif est de mettre en lumière certains éléments saillants de ce livre, qui traduisent notre sensibilité actuelle face à ces enjeux. Cette note s'inspire aussi des travaux[7] et discussions du Groupe de travail sur l'Éthique du spatial de l'Académie royale de Belgique.

---

5 Verseux C., Poulet L., Mason N. *et al.,* « Can We, and Should We, Go to Mars? A Note for Decision-Makers », dans *European Astrobiology Institute*, 2025 [en ligne, https://europeanastrobiology.eu/wp-content/uploads/2025/06/250610_Can-we-and-should-we-go-to-Mars-English-.pdf ; consulté le 15/07/2025].

6 Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

7 Dehant V., Arnould J., Bartik K. *et al.*, « Manifeste pour une exploration et une utilisation de l'espace mieux contrôlées et plus responsables. Déclarations de l'Académie royale de Belgique », dans *Académie royale de Belgique*, 2024 [en ligne, https://academieroyale.be/Academie/documents/DeclarationGTespace33619.pdf ; consulté le 15/07/2025]. Dehant V., Arnould J., Bartik K. *et al.*, « L'espace extra-atmosphérique doit demeurer un patrimoine commun de l'humanité », dans *Daily Science*, 2024 [en ligne, https://dailyscience.be/04/10/2024/lespace-extra-atmospherique-doit-demeurer-un-patrimoine-commun-de-lhumani/ ; consulté le 15/07/2025].

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART CONCERNANT L'HABITABILITÉ DE MARS ET QUESTIONS SCIENTIFIQUES NON RÉSOLUES

Mars s'est formée il y a environ 4,56 milliards d'années. Grâce aux missions spatiales, il a été découvert que, comme la Terre, Mars possédait à un moment de son histoire une atmosphère primitive, un champ magnétique et de l'eau liquide en abondance à sa surface. Cependant, la situation a radicalement changé il y a environ 3 milliards d'années: la planète est devenue un désert froid, rocheux et poussiéreux, avec une atmosphère ténue incapable de retenir la chaleur ou de bloquer les radiations. Aujourd'hui, la surface de Mars est extrêmement inhospitalière. Bien que cette planète ait connu des bouleversements géologiques majeurs, l'absence de tectonique des plaques a permis à une grande partie de sa surface de rester intacte, conservant les archives de son histoire, ce qui en fait un objet d'étude fascinant pour les scientifiques. Des traces d'une éventuelle vie passée pourraient ainsi avoir été préservées.

Les chercheurs divisent l'histoire de Mars en quatre grandes périodes.

— **Période pré-noachienne (de 4,5 à 4,1 milliards d'années)**: on connaît peu de choses sur cette phase, caractérisée par la formation de la croûte martienne. Elle fut marquée par un bombardement intense, aux impacts colossaux qui creusèrent de vastes bassins, puis par une interruption de 400 millions d'années avant le bombardement suivant. Durant cette période, les grandes plaines martiennes, telles que Vastitas Borealis au nord (voir figure 1), se sont formées. Mars possédait vraisemblablement une atmosphère très dense, issue des gaz libérés par les impacteurs et le dégazage du manteau. L'effet de serre combiné à une forte chaleur interne aurait maintenu des températures compatibles avec la présence d'eau liquide, malgré un Soleil alors plus faible (période dite du « faint young Sun »).

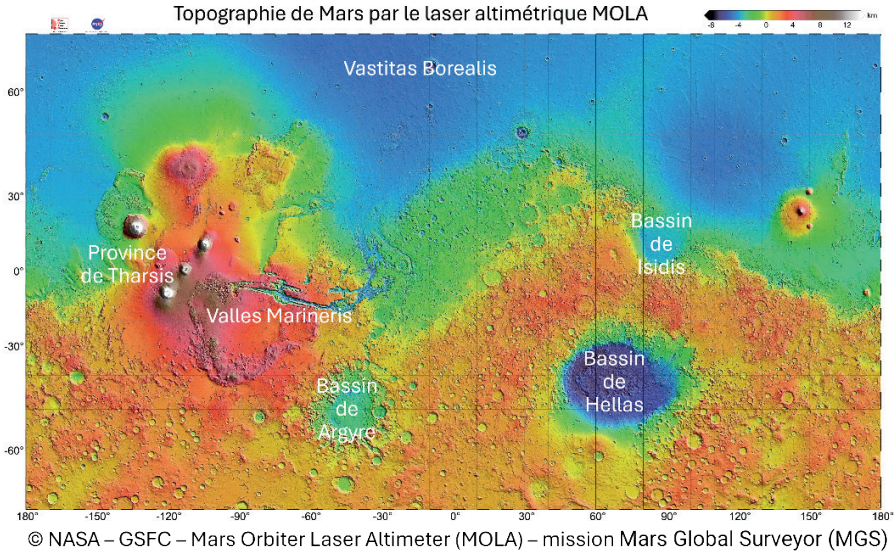

Figure 1 — Surface de Mars mesurée par l'altimètre laser MOLA sur la mission MGS de la NASA.

— **Période noachienne (de 4,1 à 3,7 milliards d'années)** : cette époque a été marquée par un bombardement intense qui a façonné les hautes terres du sud et formé les plus grands bassins d'impact (Argyre, Isidis, Hellas ; voir figure 1). Une activité volcanique intense a également eu lieu, en particulier dans la région de Tharsis, avec la formation des volcans géants Olympus Mons, Ascraeus Mons, Pavonis Mons et Arsia Mons (voir figure 2). Ce soulèvement a entraîné la formation du système du rift Valles Marineris, une immense fracture visible à la surface. À la fin de cette période, la planète a continué à se refroidir, la dynamo interne s'est arrêtée et la lente érosion atmosphérique a commencé.

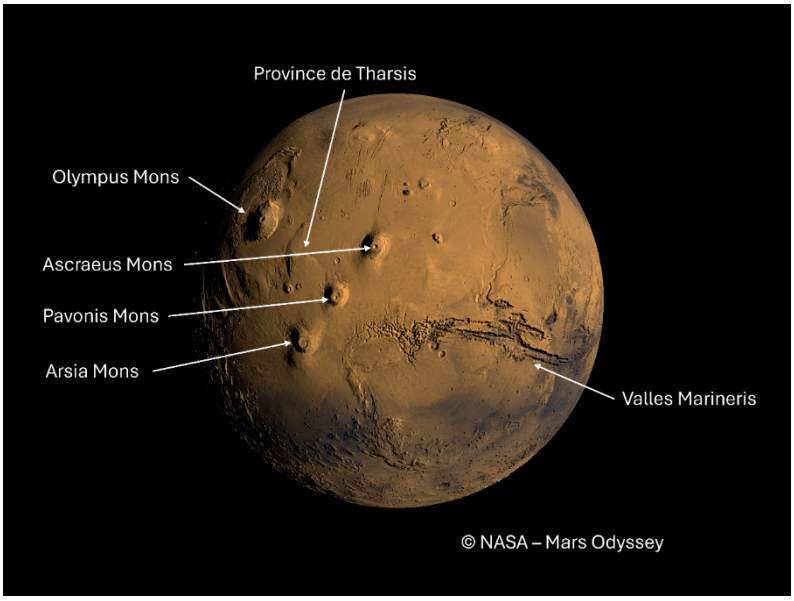

Figure 2 — Surface de Mars © NASA – mission Mars Odyssey.

— **Période hespérienne (3,7 à 3 milliards d'années)**: environ 30 % de la surface martienne a été remodelée au cours de cette période par des événements géologiques divers. Le taux d'impacts a diminué, mais l'accentuation du volcanisme a donné naissance à de vastes plaines basaltiques dans les basses terres, notamment au nord. De nouveaux édifices volcaniques colossaux se sont formés (Tharsis Montes, Olympus Mons, etc.). Les réseaux de vallées ont cessé d'apparaître, les températures ont chuté et l'eau s'est progressivement évaporée, a gelé ou a été piégée dans le sol (pergélisol) et les calottes. Cependant, des rejets cataclysmiques d'eau stockée dans le sous-sol ont encore eu lieu, creusant de gigantesques chenaux d'écoulement comme dans Mangala Valles (voir figure 3).

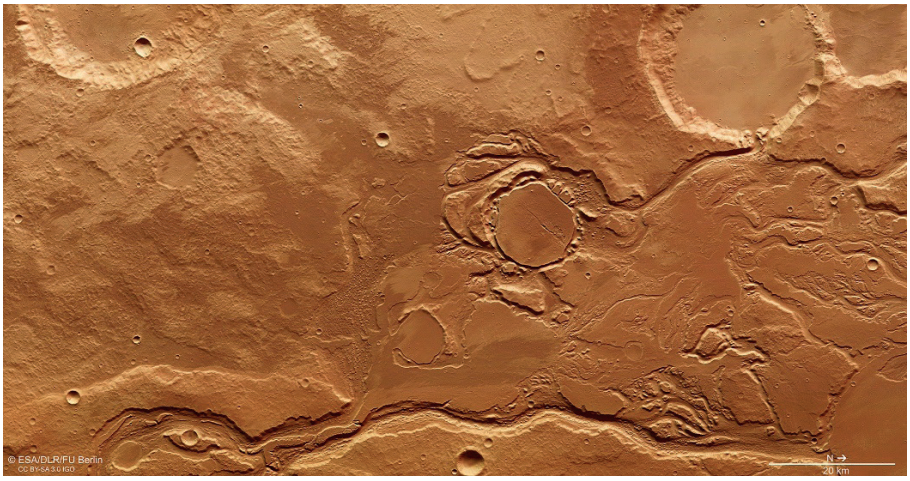

Figure 3 — Surface de Mars, Mangala Valles © ESA-DLR/FU Berlin – mission Mars Express.

— **Période amazonienne (de 3 milliards d'années à aujourd'hui)** : c'est la plus longue période de l'histoire martienne. Elle est caractérisée par des conditions froides, arides et relativement stables. Des épisodes plus chauds et humides ont pu survenir ponctuellement, à la suite d'impacts, d'activité volcanique ou de variations de l'obliquité martienne.

La question de savoir si la vie a un jour existé sur Mars demeure au cœur des recherches : si la vie y a existé, peut-on encore en trouver des traces ? Si oui, s'agissait-il d'une forme de vie ayant émergé indépendamment de celle de la Terre ? Une telle découverte aurait des implications majeures, tant scientifiques que philosophiques, notamment sur notre compréhension de l'origine, de la diversité et de la distribution potentielle de la vie dans l'Univers. De plus, la confirmation que la vie ait pu émerger sur deux planètes dans notre système solaire multiplierait les possibilités de mondes habitables dans l'Univers.

Actuellement, la surface de Mars est recouverte d'environ un mètre de régolithe, un matériau meuble issu de la désagrégation des roches. Sa couche supérieure, d'environ 10 cm, le « sol », est constituée de grains allant de la poussière aux fragments de roche (voir figure 4). Contrairement au sol terrestre, il contient très peu de matière organique. La poussière martienne, composée de particules fines (1 à 4 µm), présente un risque pour les humains et les équipements en raison de ses propriétés physiques : forte cohésion, abrasivité, faible conductivité thermique et densité particulière.

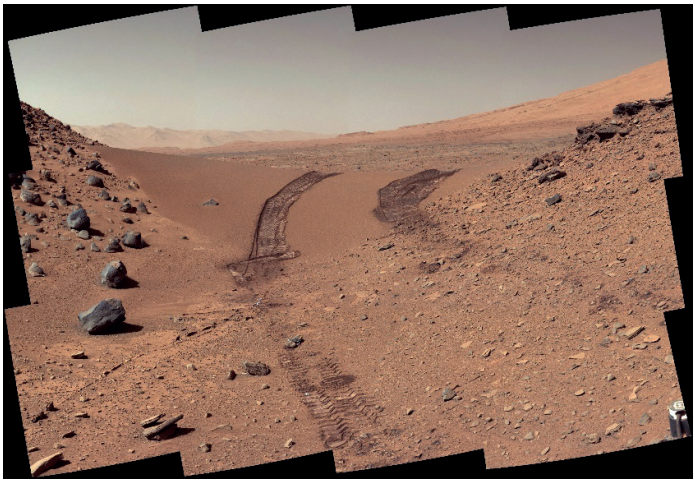

Figure 4 — Régolithe martien contenant les traces du rover américain Curiosity
© NASA/JPL-Caltech/MSSS.

Les missions de la NASA et de l'ESA ont révélé que, autrefois, de grandes quantités d'eau ont existé sur Mars, parfois sous forme de couches atteignant 100 à 1000 m d'épaisseur. Une partie de cette eau s'est échappée dans l'espace, probablement emportée par le vent solaire, tandis que le reste a été piégé sous forme de glace ou de minéraux hydratés. Jusqu'à 99 % de l'eau initiale pourrait être enfouie dans le pergélisol depuis plus de 3 milliards d'années. Aujourd'hui, l'eau liquide n'existerait que de façon épisodique, selon les saisons, dans des zones très ensoleillés ou riches en sel, mais elle s'évaporerait rapidement. Certains travaux suggèrent également qu'elle ne serait stable qu'aux pôles, emprisonnée sous la glace – une découverte très controversée dans la littérature scientifique. Cependant, de la glace d'eau subsiste en faible profondeur aux latitudes plus tempérées. Si toute cette glace fondait, elle recouvrirait Mars d'une couche d'eau épaisse d'environ 30 m.

Les conditions nécessaires à l'habitabilité d'une planète comprennent la présence d'eau liquide, de nutriments essentiels (carbone, hydrogène, azote, oxygène, phosphore, soufre) et d'une source d'énergie. Une certaine stabilité environnementale est généralement favorable, mais des conditions dynamiques créant des déséquilibres géochimiques peuvent également favoriser l'émergence d'une forme de vie. Si l'eau liquide reste un critère qui fait consensus, certains chercheurs envisagent d'autres types de chimie que celle basée sur le carbone ou sur l'eau liquide, qui seraient capables de soutenir des formes de vie alternatives.

En attendant, les missions spatiales ciblent les régions où l'eau est ou a été présente, estimant qu'elles offrent les conditions les plus favorables à l'apparition ou à la préservation d'éventuelles formes de vie[1]. La notion de « zone d'habitabilité » s'étend désormais dans le système solaire externe et inclut les océans internes de lunes glacées des planètes géantes telles qu'Europe (autour de Jupiter) ou Encelade (autour de Saturne), qui sont elles aussi considérées comme potentiellement habitables[2]. Le mouvement dans les océans internes et le contact eau-roche sont également jugés cruciaux, car ils permettent la source et le transport de nutriments et contribuent à la dynamique énergétique globale en complément de l'apport stellaire.

Bien que Vénus soit également proche de la Terre, ses conditions extrêmes – température et pression très élevées et atmosphère dense et acide – rendent l'existence d'une forme de vie hautement improbable. Les hypothèses évoquant une vie possible dans sa haute atmosphère demeurent très spéculatives.

Mars reste aujourd'hui la meilleure candidate pour explorer ces questions d'habitabilité. Relativement proche et accessible, elle a réuni par le passé des conditions comparables à celle de la Terre ancienne, possiblement favorables à l'émergence d'une forme de vie. De plus, l'hypothèse selon laquelle la vie sur Terre pourrait partager une origine commune avec celle de Mars *via* le transport par météorites intrigue autant les scientifiques que le grand public.

Nos connaissances actuelles sur Mars, telles que celles résumées précédemment, reposent principalement sur l'exploration robotique, commencée dès les années 1960 avec des missions de survol, des orbiteurs et des atterrisseurs. Plus de 50 missions martiennes ont été lancées par divers pays (Europe, Émirats arabes unis, États-Unis, Chine, Inde, Japon, Russie), avec un taux de réussite d'environ 50 %, ce qui témoigne de la complexité de telles missions, même lorsqu'elles ne sont pas habitées. Les avancées technologiques et la coopération internationale ont permis des découvertes majeures en géologie, physique de l'atmosphère et recherche de molécules organiques (biologiques ou non) et de biosignatures.

Sur Mars, les recherches actuelles se concentrent sur des formes de vie simples et unicellulaires, un peu comme celles imaginées pour de premières lignées cellulaires émergeant de la chimie prébiotique, avant LUCA (Last Universal Common Ancestor), l'ancêtre commun le plus récent de la vie terrestre d'aujourd'hui et déjà

---

1 Dehant V., *Habiter sur Mars ?*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2012.

2 Dehant V., *Habiter sur une lune du système solaire ?*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2015 ; Encrenaz T. et Coustenis A., *L'énigme de la vie dans le Cosmos*, Paris, Éditions Eyrolles, 2025.

une forme de vie unicellulaire relativement complexe. Cette vie microbienne martienne hypothétique aurait développé sa propre biochimie, un code génétique et une structure cellulaire différents de la vie terrestre.

L'atmosphère martienne, environ 100 fois moins dense que celle de la Terre, est aujourd'hui composée d'environ 95 % de dioxyde de carbone (CO_2), 3 % de diazote (N_2) et 2 % d'argon (Ar) en moyenne (la valeur exacte de ces pourcentages varie avec les saisons), ainsi que des traces (0,2 %) d'autres gaz. De la vapeur d'eau a été détectée près de la surface. Toutefois, les tempêtes de poussière, fréquentes et parfois planétaires, modifient considérablement les conditions atmosphériques.

Cette atmosphère ténue ne protège pas efficacement contre les rayons UV et les rayonnements ionisants, particulièrement destructeurs pour les molécules organiques. À long terme, ces radiations peuvent donc altérer ou détruire d'éventuelles premières traces de vie. Seules celles qui seraient enfouies profondément pourraient être durablement préservées.

L'ensemble de ces connaissances est détaillé dans le chapitre 2 de l'ouvrage *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[3] et une première description a été donnée dans une publication de l'Académie royale de Belgique[4].

[3] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

[4] Dehant V., *Habiter sur Mars ?*, *op. cit.*

CHAPITRE 2

INSTRUMENTATION EXISTANTE, HÉRITAGES ET EXPÉRIENCES ACQUISES

Toutes les informations présentées jusqu'ici proviennent des missions spatiales menées à l'aide d'instruments embarqués à bord de sondes en orbite autour de Mars ou déposées à sa surface. Ces instruments offrent aujourd'hui un niveau de précision inégalé.

Les caméras, par exemple, peuvent atteindre une résolution de 25 cm par pixel depuis une orbite de 300 km d'altitude. Les spectromètres, quant à eux, analysent la lumière sur un large éventail de longueurs d'onde, permettant d'identifier à la fois la composition chimique de la surface martienne et celle de son atmosphère. Les radars sont capables de détecter des interfaces souterraines : selon leur fréquence et leur emplacement, ils peuvent sonder jusqu'à 10 m de profondeur depuis un atterrisseur, et jusqu'à 1,5 km depuis un orbiteur.

Parmi les instruments d'analyse *in situ*, on peut citer les caméras à mise au point rapprochée et les microscopes, capables de distinguer des structures de l'ordre de 0,1 mm, ainsi que des spectrométres de masse miniaturisés, permettant d'analyser la composition de la matière organique et sa chiralité. Il ne faut pas non plus négliger les instruments dédiés à l'étude de la géophysique interne de Mars : ils mesurent notamment la sismicité, les déformations de la croûte, le flux de chaleur et les variations de rotation de la planète. D'autres, relevant de la géophysique externe, comprennent les stations météorologiques qui collectent des données atmosphériques sur le moyen terme.

La robotique martienne est aujourd'hui capable de forer le sol, de prélever et d'analyser des échantillons, et même de détecter la présence de composés organiques.

Au-delà des défis techniques, toute mission robotique vers Mars repose sur

des objectifs scientifiques clairs et susceptibles de justifier les coûts de la mission. Bien sûr, l'enjeu politique et stratégique de la mission n'est pas étranger à sa mise en œuvre. L'intérêt scientifique est indéniable, mais il ne saurait, à lui seul, justifier une entreprise de cette importance. Une analyse comparative de plusieurs documents stratégiques majeurs – notamment l'enquête décennale américaine[1], la feuille de route d'exploration de l'ESA[2], celle d'astrobiologie de la NASA[3] et les recommandations du MEPAG[4] (Mars Exploration Program Analysis Group) – permet d'identifier un socle d'objectifs largement convergents. Ces priorités, qui peuvent évoluer selon les résultats des missions en cours et les grandes orientations des agences, se structurent autour de trois axes principaux :

1. Déterminer si une forme de vie a existé sur Mars ;
2. Comprendre les processus météorologiques et climatiques dans la perspective de l'habitabilité ;
3. Décrypter l'histoire géologique de la planète, notamment l'évolution de sa surface et de son intérieur.

À ces objectifs scientifiques s'ajoutent des objectifs technologiques étroitement liés à l'exploration humaine future, comme le développement de capacités d'exploitation des ressources *in situ* (ISRU, In Situ Resource Utilization) ou la mise à l'épreuve de systèmes de survie, de communication et de navigation dans des conditions martiennes.

Comme démontré dans la section précédente, la préparation des futures missions habitées vers Mars repose sur des fondations déjà établies. Elle s'appuie sur plus de 60 ans de missions spatiales. Les expériences accumulées sur les stations orbitales telles que Mir, l'ISS[5] (habitée sans interruption depuis l'an 2000) ou

---

[1] Canup R. M., Christensen P. R., Banaji M. R. *et al.*, *Origins, Worlds, and Life*, Washington, National Academies Press, 2023.

[2] Mey S. D., « Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap », dans *Destination Orbite*, 2022 [en ligne, https://destination-orbite.net/documentations/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf ; consulté le 15/07/2025].

[3] Des Marais D. J., Nuth J. A., Allamandola L. J. *et al.*, « The NASA Astrobiology Roadmap », dans *Astrobiology*, vol. 8, n° 4, 2008, p. 715-730.

[4] Banfield D., Stern J., Davila A. *et al.*, « Mars Science Goals, Objectives, Investigations, and Priorities », dans *Lunar and Planetary Institute*, 2020 [en ligne, https://www.lpi.usra.edu/mepag/about/MEPAGGoals_2020_MainText_Final.pdf ; consulté le 15/07/2025].

[5] The European Space Agency, « International Space Station », dans *ESA* [en ligne, https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station ; consulté le 15/07/2025] ; National Aeronautics and Space Administration,

encore Tiangong[6] (en orbite depuis 2021), ainsi que les vols orbitaux habités et le programme Apollo[7] (dans le cadre duquel douze hommes ont marché sur la Lune) ont permis de tester de nombreuses technologies critiques : support-vie, recyclage de l'eau et de l'air, systèmes de navigation, robotique, etc.

Le séjour prolongé d'équipages dans l'espace, dans des environnements confinés et en microgravité, a également fourni une compréhension approfondie de certains effets physiologiques et psychologiques des vols spatiaux de longue durée.

Ces avancées sont détaillées dans les chapitres 3 et 6 de l'ouvrage *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[8].

« International Space Station », dans *NASA* [en ligne, https://www.nasa.gov/international-space-station/ ; consulté le 15/07/2025].

6 China National Space Administration, « Tiangong I », dans *CNSA*, 2022 [en ligne, https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465715/n6465717/c6840344/content.html ; consulté le 15/07/2025].

7 National Aeronautics and Space Administration, « The Apollo Program », dans *NASA*, 2024 [en ligne, https://www.nasa.gov/the-apollo-program/ ; consulté le 15/07/2025].

8 Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al*. (éds), *op. cit.*

CHAPITRE 3

LES HUMAINS SUR MARS : PRÉSERVATION DES PLANÈTES TERRE ET MARS

Les missions habitées vers Mars offrent des avantages concrets par rapport aux missions robotiques. La présence humaine permet une plus grande flexibilité et une plus grande rapidité dans l'exécution des tâches, notamment lorsqu'il s'agit de manipulations requérant de la dextérité, comme sceller des échantillons, creuser le sol martien ou encore improviser un échantillonnage plus prometteur. Toutefois, cette supériorité opérationnelle est à nuancer. La coordination des analyses scientifiques requiert généralement des équipes interdisciplinaires restées sur Terre, ce qui réduit l'avantage supposé d'une prise de décision directe par les astronautes sur place. Par ailleurs, les communications avec Mars restent contraintes par un délai incompressible de 3 à 20 minutes pour l'émission du signal radio, et autant pour son retour, ce qui limite toute interaction en temps réel. Par ailleurs, l'échange de signaux radio peut être impossible pendant quelques dizaines de jours lorsque le Soleil s'interpose entre les deux planètes (conjonction planétaire).

En outre, les infrastructures nécessaires à une mission habitée sont considérablement plus complexes, coûteuses et volumineuses que celles nécessaires à une mission robotique. Les défis logistiques et technologiques sont encore nombreux, notamment en matière de transport, de conditions de vie, de survie, de santé, de fiabilité et de sécurité à long terme. De plus, il faut s'interroger sur les conséquences potentielles (pour les astronautes, pour la Terre et pour Mars) de tels déploiements, qu'il s'agisse d'exploration, d'exploitation, de colonisation ou de terraformation.

Une analogie avec l'Antarctique permet d'éclairer cette réflexion : l'implantation de grandes villes sur ce continent semblerait absurde et le réchauffer

artificiellement pour transformer la glace en terres agricoles paraîtrait criminel. De la même manière, vouloir modifier radicalement Mars soulève, au-delà de son impossibilité, de nombreuses objections écologiques et éthiques.

Jusqu'à récemment, ces débats restaient largement théoriques. Mais la montée en puissance de la Chine et de l'Inde dans l'exploration habitée de l'espace, ainsi que l'émergence du NewSpace[1] portée par des acteurs privés, ont joué un rôle de catalyseur en accélérant les progrès technologiques et en ravivant les ambitions politiques autour de l'exploration humaine de la Lune et de Mars. Les annonces officielles et les engagements stratégiques suscitent désormais des débats souvent passionnés qu'il faut nuancer.

L'introduction d'humains dans l'environnement martien aurait inévitablement des effets sur la planète rouge. Il est essentiel d'anticiper ces impacts pour éviter des conséquences indésirables et peut-être irréversibles. L'empreinte biologique des activités humaines, plus que toute exploration par des robots stérilisables, pourrait perturber d'éventuels écosystèmes indigènes, si tant est qu'ils existent, ou détruire toute chance de découvrir une autre forme de vie qui ne serait pas amenée sur la planète par les astronautes. De même, des activités industrielles à grande échelle pourraient altérer durablement un paysage que les générations futures ne connaîtraient plus dans son état original.

En sens inverse, si une forme de vie martienne devait être ramenée sur Terre, elle pourrait représenter un danger pour la biosphère terrestre, que ce soit par compétition, par pathogénicité ou par toxicité. Même si la probabilité d'un tel scénario reste extrêmement faible, sa gravité potentielle est telle qu'elle ne saurait être ignorée.

Ainsi, les choix que l'humanité fera dans les décennies à venir auront des répercussions profondes et durables sur les générations futures, sur les deux planètes.

---

[1] Ce terme désigne la nouvelle dynamique du secteur spatial, caractérisée par l'arrivée d'acteurs privés, le recours à l'innovation technologique rapide, des logiques commerciales (réduction des coûts, rentabilité) et une diversification des usages (satellites miniaturisés, surveillance environnementale, gestion des catastrophes, télécommunications globales, tourisme spatial, exploitation des ressources). Ce mouvement s'oppose à l'ancien paradigme dominé par les agences étatiques.

CHAPITRE 4

LES QUESTIONS LIÉES À LA « COLONISATION » DE MARS

Les enjeux éthiques, sociétaux et politiques liés à la colonisation de Mars peuvent sembler lointains à la fois dans l'espace et dans le temps. Pourtant, ils revêtent une certaine urgence. Les décisions prises dans les prochaines décennies auront des conséquences durables sur les générations futures, sur d'éventuelles formes de vie extraterrestre et sur l'environnement martien lui-même.

Les premiers accords concernant la gestion des ressources ou le type de gouvernance à établir pourraient façonner les structures martiennes pour des siècles. Ces choix initiaux, qu'ils émanent d'une collaboration internationale ou d'initiatives privées, soulèvent une question centrale : se feront-ils de manière juste, équitable et dans l'intérêt commun ? Le premier acteur à atteindre Mars pourrait imposer un modèle pour toutes les activités futures sur la planète rouge. Les motivations qui sous-tendent la planification des missions martiennes (exploration scientifique, quête de ressources, ambition spirituelle ou survie de l'espèce humaine) méritent donc une attention critique.

La littérature sur l'éthique spatiale[1] a mis en évidence une grande diversité d'objectifs associés à l'exploration et à la colonisation martiennes, qui vont de l'aventure humaine à l'exploitation des ressources en passant par des visées scientifiques ou existentielles. Ces objectifs et les valeurs qui les accompagnent sont d'autant plus importants qu'ils servent de fondement à une entreprise

[1] Par exemple : Schwartz J. S. J. et Milligan T. (éds.), *The Ethics of Space Exploration*, Cham, Springer, 2016 ; Schwartz J. S. J., *The Value of Science in Space Exploration*, Oxford, Oxford University Press, 2020 ; Arnould J. et Parent O. (dir.), « Enjeux éthiques et de l'espace », dans *Centre national d'études spatiales*, 2021 [en ligne, https://cnes.fr/sites/default/files/2025-01/spaceibles-enjeux-ethiques-rapport-final.pdf ; consulté le 15/07/2025] ; Arnould J., *La seconde chance d'Icare,* Paris, Éditions du Cerf, 2001 ; Arnould J., *Icarus' Second Chance,* Vienne, Springer, 2013.

extrêmement coûteuse, risquée et potentiellement irréversible.

Ces réflexions sont approfondies dans le chapitre 4 de l'ouvrage *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[2]. L'objectif de ce chapitre est d'examiner les enjeux sociétaux, politiques et éthiques majeurs dans les différentes phases du développement de l'exploration martienne, depuis les premières missions habitées jusqu'à l'émergence hypothétique de colonies autosuffisantes, voire d'une planète terraformée, devenue une véritable « planète B ». Même sans aller aussi loin, l'installation de communautés humaines stables sur Mars soulèverait déjà de nombreuses questions : quel statut politique et social accorder à ces migrants ? Quelles normes éthiques guideraient leur vie quotidienne dans un environnement aussi hostile ? Quelles responsabilités auraient-ils envers leur planète d'origine ? Et quelles responsabilités les nations terrestres auraient-elles envers eux ?

Les conséquences d'une colonisation martienne peuvent être lourdes et, dans certains cas, suffisamment négatives pour remettre en question la légitimité même d'un tel projet.

Un aspect critique de cette réflexion concerne la protection planétaire. Les missions habitées posent un défi bien plus complexe que les missions robotiques : les humains ne peuvent être stérilisés comme des machines. Nous dépendons d'une multitude de micro-organismes pour survivre. Ils sont partout, dans notre microbiote intestinal, sur notre peau, etc. Cela rend inévitable la dispersion de micro-organismes à la surface de Mars. Même si les probabilités d'une contamination sont faibles, les conséquences écologiques, sanitaires et juridiques pourraient être considérables. Ces enjeux méritent d'être sérieusement intégrés dans toute planification future.

Les enjeux éthiques de l'exploration spatiale, qui ne se limitent pas à Mars, et la notion d'espace comme bien commun sont par ailleurs discutés plus avant à la fin de ce texte.

[2] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

CHAPITRE 5

LA LÉGISLATION EXISTANTE

Il existe aujourd'hui une base juridique et institutionnelle encadrant les missions spatiales, et notamment celles vers Mars. Dès le début de l'ère spatiale, les gouvernements de nombreux pays, qu'ils participent ou non aux activités spatiales, ont adopté la « Déclaration des principes juridiques régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique[1] ». Placée sous l'égide des Nations Unies, cette déclaration a jeté les bases d'un droit international de l'espace, applicable à toutes les activités humaines dans l'espace extra-atmosphérique, y compris sur les corps célestes (astéroïdes, lunes, planètes).

Ces principes ont été consacrés dans le « Traité sur l'espace extra-atmosphérique[2] » (ou OST), adopté par l'Assemblée générale des Nations Unies et entré en vigueur en 1967. Ratifié par environ 120 États à ce jour, ce traité, juridiquement contraignant, affirme plusieurs grands principes : la liberté d'exploration pacifique, la responsabilité des États en cas de dommages causés à des tiers, l'assistance mutuelle entre acteurs spatiaux et la protection de l'environnement, tant celui de la Terre que celui des corps célestes. Il interdit surtout toute appropriation nationale de territoires dans l'espace, y compris sur Mars, empêchant ainsi toute revendication de souveraineté ou de propriété sur des sols extraterrestres.

---

[1] Assemblée générale des Nations unies, « Résolution A/RES/1962 (XVIII), Déclaration des principes juridiques régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique », dans *United Nations Office for Outer Space Affairs*, adoptée le 13 décembre 1963 [en ligne, https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_18_1962F.pdf ; consulté le 15/07/2025].

[2] Assemblée Générale des Nations Unies, « Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies », dans *United Nations Office for Outer Space Affairs*, 1966 [en ligne, https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html ; consulté le 15/07/2025].

Alors que ce traité régit depuis plus d'un demi-siècle les opérations de lancement, le contrôle des satellites, la récupération des objets spatiaux et le domaine de l'exploration spatiale, son champ d'application doit désormais s'étendre aux activités du NewSpace. Sont inclus dans celui-ci les services privés en orbite (amarrage, ravitaillement, réparation, réorbitage ou désorbitage), ainsi que les vols habités et les infrastructures permanentes exploitées par des entreprises, sur ou autour de corps célestes. Même si elles sont menées par des entreprises privées, les États signataires demeurent responsables des actions de leurs ressortissants et des entreprises sous leur juridiction. Ce cadre juridique devra, dans le futur, intégrer aussi des principes issus du droit de l'environnement et des réflexions éthiques sur les droits des générations futures.

Une comparaison peut ici aussi être faite avec l'Antarctique, et en particulier avec le « Protocole sur la protection de l'environnement » annexé au « Traité sur l'Antarctique[3] ». Celui-ci établit l'Antarctique comme une réserve naturelle consacrée à la paix et à la science et interdit toute exploitation des ressources minérales, sauf à des fins scientifiques (article 7). Ces dispositions ne sont pas modifiables avant 2048 (article 25), fixant un moratoire de 50 ans. Un cadre juridique similaire pourrait être envisagé pour Mars, avec des clauses de révision différée et des restrictions initiales fortes.

Le Comité des Nations Unies pour les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (COPUOS), créé en 1959 et regroupant plus de 100 États membres, joue un rôle central dans la régulation des activités spatiales. Il élabore les grands traités internationaux (notamment celui de 1967) et émet des recommandations sur la durabilité, la sécurité et la coopération. Il s'attaque aux défis émergents comme la gestion des débris spatiaux, la traçabilité des objets en orbite ou l'accès équitable à l'espace. En 2019, le COPUOS a adopté 21 directives volontaires visant à assurer la sûreté et la durabilité à long terme des activités spatiales : prévention des collisions, partage d'informations, standardisation des pratiques (conception, lancement, désorbitation), protection de l'environnement spatial, transparence et coopération internationale.

L'un des défis majeurs actuels réside dans l'absence d'un mécanisme mondial contraignant pour la gestion du trafic spatial. Aujourd'hui, cette coordination repose sur la coopération volontaire entre les agences spatiales et les opérateurs. Des initiatives comme l'EU Space Surveillance and Tracking (EUSST) montrent

[3] Secretariat of the Antarctic Treaty, « Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty », dans *ATS*, 1991 [en ligne, https://www.ats.aq/e/protocol.html ; consulté le 15/07/2025].

l'engagement de l'Union européenne à renforcer ses capacités techniques (radars, capteurs, catalogues), tout en plaidant pour un cadre international commun.

L'organisation internationale Comité pour la recherche spatiale (COSPAR) joue, quant à elle, un rôle clé non seulement dans la prévention des activités potentiellement préjudiciables à l'environnement dans l'espace, mais aussi dans la protection planétaire par ses Panels[4] (PEDAS et PPP respectivement). La protection planétaire formule des directives non contraignantes visant à limiter les risques de contamination biologique croisée, que ce soit en évitant d'introduire des micro-organismes terrestres sur d'autres planètes, ou en protégeant la Terre de l'importation d'échantillons ou de matériaux potentiellement contaminés par une forme de vie extraterrestre. L'ESA et les agences des pays européens, entre autres, appliquent rigoureusement ces directives, notamment pour les missions vers des zones où la vie pourrait exister, en stérilisant les équipements envoyés ou en évitant l'atterrissage dans des zones sensibles.

À côté des traités multilatéraux existants, on trouve des accords bilatéraux qui cherchent à les compléter ou les assouplir, comme les Accords Artemis, signés entre les États-Unis et 55 pays à ce jour. Ces accords visent à établir un cadre commun pour la coopération spatiale, notamment en ce qui concerne les missions lunaires, mais ils prévoient également de s'étendre à Mars. Ils reposent sur plusieurs principes fondamentaux : l'utilisation pacifique de l'espace, la transparence des activités, l'assistance en cas d'urgence, l'enregistrement des objets spatiaux, la préservation du patrimoine spatial, l'exploitation responsable des ressources et le partage des données scientifiques. Ils incluent aussi la possibilité pour un État ou une entité de désigner des zones d'intérêt exclusif, appelées « zones de sécurité », afin d'éviter les interférences, pour une durée et dans des limites définies. Toutefois, de nombreux États membres de l'Union européenne, dont la France et l'Allemagne, n'ont pas encore signé ces accords, bien que certains pays de l'Union y aient déjà adhéré.

Le défi à venir consiste à concevoir une gouvernance intégrée, tenant compte de la diversité des acteurs publics et privés, et à compléter le traité de 1967 par un nouveau droit économique international. Il faudra trouver un équilibre entre coopération et concurrence, entre exploitation et protection, entre innovation technologique et respect des droits environnementaux et humains – y compris ceux des générations futures.

Enfin, il convient de souligner que l'Union européenne, en se dotant d'une

[4] Committee on Space Research, « Panels », dans *COSPAR*, 2025 [en ligne, https://cosparhq.cnes.fr/scientific-structure/panels/ ; consulté le 15/07/2025].

agence pour les programmes spatiaux (European Union Space Programme Agency, EUSPA), joue un rôle croissant dans la régulation de l'espace, que ce soit à travers la gestion du trafic spatial, la lutte contre les débris, la sécurisation des technologies à double usage ou la supervision des systèmes de navigation comme Galileo.

Une partie des réflexions abordées ici est approfondie dans le chapitre 5 de *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[5].

[5] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al*. (éds), *op. cit.*

CHAPITRE 6

QUELLES FUTURES MISSIONS HABITÉES VERS MARS, ALORS ?

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Les premières missions habitées vers Mars seront motivées par une volonté politique, mais elles auront une vocation scientifique. Elles viseront à approfondir notre compréhension de l'histoire de la planète, à rechercher d'éventuelles traces de vie passée ou présente et à tester des technologies essentielles pour une exploration plus poussée. Pour optimiser ces missions, la Protection planétaire a mis en place un certain nombre de règles très strictes sur Mars déjà pour les missions robotiques. Dans le cas de missions humaines, de nombreuses études portent actuellement sur les étapes nécessaires pour combler les lacunes de connaissances sur la protection des environnements explorés, en vue de futures missions habitées vers Mars.

UNE DYNAMIQUE POLITIQUE INTERNATIONALE

Les récentes avancées en matière de technologies spatiales rendent concevable l'envoi d'équipages humains vers Mars d'ici quelques décennies. Mais la principale force motrice reste politique. La perspective de « planter le drapeau en premier » sur la planète rouge suscite une compétition acharnée entre puissances spatiales, motivées par le prestige et les retombées géopolitiques.

Cette course se reflète dans les politiques spatiales américaines, où le programme Artemis d'exploration de la Lune est considéré comme une étape vers l'exploration de Mars. Nous sommes incapables à l'heure actuelle (à l'aube du deuxième mandat présidentiel de Trump) de prédire si ces politiques seront toujours de mise dans quelques mois ou quelques années. La course vers Mars est également visible – de manière plus discrète, mais résolue – dans les ambitions de

la Chine, des Émirats arabes unis, de la Russie ou de l'Inde. Mars reste également une priorité de l'ESA. Comme à l'époque d'Apollo, il est probable que le premier atterrissage habité conditionnera les activités futures des grandes puissances spatiales ou de certains acteurs privés.

PRÉPARATION DES FUTURES MISSIONS MARTIENNES : ARTEMIS, CHANG'E ET LES AMBITIONS LUNAIRES

Le programme Artemis, initié par la NASA, dont la première étape était d'envoyer des femmes et des hommes sur la Lune, est en train d'être révisé en profondeur. Les éléments essentiels du projet initial sont en voie d'être abandonnés. Le vaisseau *Orion*, conçu pour transporter des équipages et intégrant une contribution européenne, n'effectuera que la prochaine mission habitée autour de la Lune. Le Lunar Gateway, plateforme relais pour les missions lunaires et martiennes, qui bénéficiait aussi d'une importante contribution européenne, ainsi que d'autres éléments qui lui étaient liés, sont abandonnés. Les futures missions lunaires américaines sont en train d'être redéfinies à la lumière de la volonté affichée de préparer dès maintenant les vols habités vers Mars.

En parallèle, la Chine développe un programme lunaire ambitieux avec la série des missions Chang'e. Elle a réussi notamment le premier atterrissage sur la face cachée de la Lune. Les prochaines missions (Chang'e-7 en 2026, Chang'e-8 en 2028) visent à prospecter la glace d'eau et à tester l'exploitation de ressources locales, en vue de missions habitées. Elle planifie sa première mission habitée vers la Lune avant 2030.

D'autres nations affichent aussi leurs ambitions lunaires : c'est le cas de l'Inde (ISRO), avec Chandrayaan-3, ou encore de la Russie (Roscosmos) qui projette la construction d'une base lunaire à partir de 2031.

Dans ce contexte très concurrentiel, Artemis définit de nouveaux objectifs de *leadership* politique, affirmant la volonté des États-Unis d'asseoir leur « suprématie » dans l'exploration spatiale internationale.

DÉFIS HUMAINS ET LOGISTIQUES

Les défis associés à l'envoi d'êtres humains sur Mars sont immenses.

— Risques physiologiques et psychologiques : rayonnements cosmiques, microgravité, hypogravité et isolement prolongé ;

— Contraintes martiennes : pression atmosphérique très faible, températures extrêmes, poussières abrasives et atmosphère irrespirable ;

— Logistique : une mission humaine exigeant l'acheminement préalable de dizaines de tonnes d'équipements, alors que le plus lourd objet jamais déposé sur Mars, le rover *Perseverance*, n'en pèse qu'une seule.

Les lacunes abordées lors d'une série de réunions organisées par le COSPAR, la NASA et l'ESA se répartissent en trois grands thèmes :

1. La surveillance microbienne et de la santé humaine ;
2. Les technologies et opérations de contrôle de la contamination biologique ;
3. Le transport naturel de la contamination biologique sur Mars[1].

Les astronautes auront besoin d'un habitat protégé, d'une source fiable d'énergie, d'un système de support-vie et d'une capacité autonome de diagnostic et de réparation. Les effets physiologiques d'un séjour prolongé sont encore mal connus : la gravité martienne (0,38 g) pourrait avoir des conséquences imprévues à long terme. Les missions Apollo, en gravité lunaire (0,16 g), étaient bien trop brèves pour être comparables.

Comme l'explique le chapitre 6 du livre *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[2], un vaste écosystème d'infrastructures sera nécessaire : modules d'atterrissage et de remontée, habitats de surface, cargos prépositionnés, systèmes de communication longue distance, exploitation des ressources locales (ISRU)… Or, la majorité de ces technologies sont encore peu matures.

Le voyage vers Mars illustre bien cette complexité. Toutes les missions actuelles utilisent des trajectoires de type Hohmann (transit direct d'environ 8 mois, séjour de 500 jours, retour sur la prochaine fenêtre). Une telle mission durerait près de trois ans, exposant les astronautes à de nombreux risques. Des scénarios de courte durée envisagent des séjours martiens de 30 jours, grâce à des systèmes de propulsion plus rapides (nucléaire thermique ou électrique). Toutefois, cela nécessiterait une accélération 2,5 fois plus élevée et impliquerait notamment un survol de Vénus, avec des défis technologiques et des risques biologiques accrus.

L'atterrissage sur Mars représente une autre étape critique. L'atmosphère est trop dense pour être négligée, mais trop ténue pour permettre un freinage efficace. Le EDL (Entry, Descent and Landing) est donc extrêmement délicat, même

[1] Spry A., Siegel B., Bakermans C. *et al.*, « Planetary Protection Knowledge Gap Closure Enabling Crewed Missions to Mars », dans *Astrobiology*, vol. 24, n° 3, 2024, p. 230-274.

[2] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

pour des sondes légères.

Enfin, le *Moon to Mars Architecture Definition Document*[3], publié par la NASA en 2024, identifie 30 fonctions critiques pour les missions martiennes. La plupart n'en sont qu'au stade de prototype.

COÛTS, INCERTITUDES POLITIQUES ET ENJEUX COMMERCIAUX

Malgré l'enthousiasme affiché, le financement des missions vers Mars reste incertain. Le gouvernement Trump a proposé dans son budget 2026 une réduction de 25 % du budget de la NASA, soit environ 6 milliards de dollars. Les systèmes SLS (Space Launch System) et Orion sont abandonnés au profit d'alternatives commerciales (SpaceX, Blue Origin), jugées plus efficaces et moins coûteuses. Le projet Gateway est également en voie d'être annulé. Les acteurs du NewSpace (comme SpaceX) pourraient abaisser ces coûts grâce à la réutilisation et à une approche plus agile. Ces choix inquiètent les partenaires internationaux. Une remise en question des coopérations pourrait désorganiser les alliances en place et exclure de nombreux acteurs de second plan.

Les ordres de grandeur des coûts sont très variables. Les dépenses budgétaires de la NASA pour le programme Artemis entre 2012 et 2025 se sont élevées à 93 milliards de dollars. Chaque lancement de la fusée SLS est estimé à 1,2 milliard de dollars. En ignorant les technologies choisies et les développements à envisager, il est actuellement impossible d'estimer avec précision les budgets nécessaires à une mission martienne habitée. L'ordre de grandeur des investissements est sans doute de l'ordre de 100 milliards de dollars sur quinze ans (6 à 7 milliards par an), selon le livre *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[4]. Chaque engin cargo pourrait coûter en outre plusieurs centaines de millions de dollars.

Une base permanente sur Mars nécessiterait de produire sur place les ressources vitales : eau, oxygène, nourriture, matériaux de construction… Cela implique le développement de technologies de production à partir de ressources locales (ISRU), mais aussi des investissements considérables, une infrastructure robuste

---

[3] National Aeronautics and Space Administration, « Moon to Mars Architecture », dans *NASA* [en ligne, https://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/resources/M2M_ACR2024_ArchitectureExecutiveOverview.pdf ; consulté le 15/07/2025] ; National Aeronautics and Space Administration, « Architecture Definition Documents », dans *NASA* [en ligne, https://www.nasa.gov/moontomarsarchitecture-architecturedefinitiondocuments/ ; consulté le 15/07/2025].

[4] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

et une logistique bien plus complexe que tout ce qui a été entrepris jusqu'ici. L'ISRU est un concept central dans les projets de base permanente sur Mars ou d'exploration spatiale à long terme. Il vise à permettre l'autonomie progressive des missions habitées sur Mars en produisant sur place les éléments vitaux. Cela permettrait de réduire considérablement la masse de matériel à envoyer depuis la Terre, ce qui est crucial compte tenu des coûts et des contraintes logistiques actuels. Parmi les applications envisagées, on trouve la production d'oxygène à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne, comme l'a démontré avec succès l'expérience MOXIE à bord du rover *Perseverance*. D'autres procédés, comme la réaction de Sabatier, permettraient de fabriquer du méthane utilisable comme carburant à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène, potentiellement extrait de la glace martienne. Par ailleurs, le régolithe (la poussière et les roches de surface) pourrait être transformé en matériaux de construction grâce à des techniques de frittage (chauffer une poudre comme celle de métal, de céramique ou de roche, à une température suffisamment élevée pour que les particules se lient entre elles) ou d'impression 3D. Ces innovations sont essentielles non seulement pour soutenir la vie humaine sur Mars, mais aussi pour préparer une économie spatiale durable à long terme.

Au-delà, SpaceX envisage des colonies humaines permanentes et autosuffisantes sur Mars. L'installation de colonies de plusieurs centaines ou de plusieurs milliers de personnes exigerait des moyens logistiques colossaux et des solutions techniques, aujourd'hui inexistantes, pour assurer l'autosuffisance en énergie, nourriture, eau et autres composants essentiels nécessaires à la vie humaine. Les implications éventuelles des conditions drastiques qui s'imposeront, sur le comportement et l'évolution des sociétés et des individus vivant en confinement loin de la Terre, font aussi partie des grandes inconnues.

Malgré les obstacles, les projets vers Mars progressent. Le transfert de technologies depuis les missions lunaires est toujours perçu comme une stratégie clé pour gagner en maturité. De nombreuses agences considèrent la Lune comme un terrain d'essai pour les futurs systèmes martiens.

CHAPITRE 7

TERRAFORMATION

La surface de Mars est aujourd'hui fondamentalement hostile à toute forme de vie connue, y compris à l'être humain. Pour transformer la planète rouge en un environnement plus proche de celui de la Terre – plus favorable à la vie humaine et, à terme, habitable – des hypothèses ont été formulées autour d'une modification délibérée de son atmosphère, de son sol et de son climat à grande échelle : un processus appelé terraformation.

Ce concept, popularisé par la science-fiction, les essais prospectifs et certains discours publics, vise à rendre la planète partiellement ou totalement habitable. Dans les années 1990, des planétologues réputés ont, dans un article[1] décrivant une expérience de pensée, proposé d'éventuelles méthodes permettant d'y parvenir, ce qui prendrait, estimaient les auteurs, une centaine de milliers d'années au minimum.

TROIS NIVEAUX D'AMBITION

La terraformation peut recouvrir des scénarios et étapes très différents, correspondant à des seuils technologiques et éthiques croissants :

1. L'augmentation de la pression atmosphérique martienne jusqu'à permettre aux humains d'évoluer à l'extérieur avec un simple masque à oxygène, sans combinaison pressurisée. Cela suppose d'atteindre une pression minimale absolue d'environ 120 mbar, voire 160 mbar si l'on veut garantir une pression partielle d'oxygène (PO_2) suffisante pour éviter l'hypoxie. Ce terme désigne une situation dans laquelle les tissus du corps ne reçoivent pas assez d'oxygène pour fonctionner correctement. Elle survient lorsque la PO_2 de l'air respiré descend en dessous d'un certain seuil, généralement

[1] McKay C., Toon O. et Kasting J., « Making Mars Habitable », dans *Nature*, n° 352, 1991, p. 489-496.

estimé autour de 160 mbar. À 120 mbar de pression atmosphérique, même en respirant de l'oxygène pur, la PO_2 ne serait que de 0,12 bar, ce qui est insuffisant pour garantir un apport en oxygène adéquat, sauf si le masque délivre de l'oxygène sous pression. À titre de comparaison, la pression moyenne à la surface de Mars est de seulement 6 mbar et celle de la Terre au niveau de la mer est de 1013 mbar.

2. La création d'environnements propices à la vie microbienne ou végétale, par exemple en introduisant des organismes génétiquement modifiés capables de survivre dans des conditions extrêmes, à très basse pression, dans un environnement très sec, sous des rayonnements ultraviolets et avec des températures glaciales. Toutefois, le simple fait d'introduire des organismes capables de survivre aux conditions martiennes ne constitue pas, en soi, une véritable transformation de l'environnement de la planète. L'objectif serait plutôt de modifier cet environnement de manière à le rendre plus propice au développement de formes de vie microbienne ou végétale, en s'appuyant, le cas échéant, sur des organismes génétiquement modifiés si les conditions naturelles restent trop hostiles à la croissance d'organismes non modifiés. Une telle intervention ne devrait cependant être envisagée qu'une fois l'exploration robotique suffisamment avancée pour avoir livré toutes les informations possibles sur l'histoire du système solaire, la zone d'habitabilité martienne et l'éventuelle émergence passée de la vie. Il faudrait également s'être assuré, dans la mesure du possible, de l'absence de toute forme de vie martienne actuelle, même si démontrer cette absence reste théoriquement impossible, en raison de l'impraticabilité d'une exploration exhaustive de la surface et du sous-sol de la planète.
3. La transformation de l'atmosphère martienne en une atmosphère respirable par les humains et propice à la faune et à la flore terrestres. Ce scénario, le plus ambitieux, supposerait non seulement une atmosphère dense, mais aussi une température moyenne bien supérieure à l'actuelle et la présence stable d'eau liquide à la surface.

LIMITATIONS PHYSIQUES ET ÉNERGÉTIQUES

L'idée de libérer le CO_2 piégé dans les calottes polaires, le sol ou les roches martiennes a longtemps été envisagée comme une première étape de la terraformation. Toutefois, les données acquises plus récemment ont conduit à une révision

drastiquement à la baisse des estimations concernant la quantité totale de CO_2 mobilisable sur Mars. Celle-ci serait insuffisante pour générer une atmosphère significativement plus épaisse. Quant à l'extraction du CO_2 à partir des carbonates présents dans la croûte, elle nécessiterait la libération en profondeur de quantités d'énergie colossales, hors de portée des capacités technologiques actuelles et probablement futures.

Une autre possibilité envisagée consiste à importer depuis l'extérieur de Mars des substances volatiles – telles que des gaz à effet de serre ou de l'ammoniac – présentes dans les comètes ou les lunes glacées. Toutefois, ces dernières se dissocient rapidement en azote et en hydrogène, ce qui limite fortement leur efficacité en tant qu'agent de réchauffement. Là encore, les ordres de grandeur en termes de masse et d'énergie rendent ce scénario techniquement et économiquement irréalisable : il faudrait plusieurs milliers de corps célestes pour atteindre une pression atmosphérique significative. De plus, même si une atmosphère plus épaisse pouvait être générée, encore faudrait-il pouvoir la maintenir dans le temps et la protéger de l'érosion, due au vent solaire, ainsi que de l'échappement thermique, deux phénomènes particulièrement problématiques en l'absence d'un champ magnétique global.

ALTERNATIVES LOCALES : MICRO-HABITABILITÉ

Face à l'impossibilité d'une terraformation globale, certains chercheurs, comme Wordsworth, Kerber et Cockell[2], proposent des solutions de micro-terraformation, visant à créer des zones localement habitables. Une approche possible consisterait à recouvrir des surfaces martiennes de dômes d'aérogel de silice, un matériau transparent au rayonnement visible, opaque à l'infrarouge et très isolant. Cela permettrait de réchauffer le sol par effet de serre localisé, de faire fondre la glace souterraine et de maintenir un environnement humide à l'abri du froid extrême. Ces microclimats pourraient ainsi soutenir une vie microbienne ou végétale adaptée, sans toutefois rendre Mars globalement habitable.

PROBLÈMES ÉTHIQUES, JURIDIQUES ET PHILOSOPHIQUES

Même si la terraformation devenait réalisable dans un futur lointain, elle soulèverait d'importantes questions éthiques et sociétales. Modifier une planète entière

[2] Wordsworth R., Kerber L. et Cockell C., « Enabling Martian Habitability with Silica Aerogel via the Solid-State Greenhouse Effect », dans *Nature Astronomy*, n° 3, 2019, p. 898-903.

pour la rendre habitable violerait plusieurs principes fondamentaux de l'éthique environnementale, notamment si une vie indigène – même microbienne – y est découverte.

Les enjeux sont également juridiques : quelle gouvernance pour une planète transformée ? Qui en détiendrait la responsabilité ? Quels droits pour les populations martiennes ? Ces questions rappellent les débats contemporains sur la colonisation, mais, transposées à une échelle interplanétaire, elles prennent une ampleur inédite.

D'un point de vue moral, certains avancent l'argument selon lequel établir une « planète B » permettrait de réduire le risque d'extinction de l'humanité. Toutefois, un tel projet impliquerait de lourdes décisions en matière de sélection des individus, de détournement de ressources terrestres et de priorités sociétales. Il pourrait aussi renforcer les inégalités existantes, en réservant l'accès à Mars à une minorité privilégiée mais confinée, et dont les possibilités biologiques de reproduction et de développement en conditions extraterrestres sont inconnues.

L'IRRÉVERSIBILITÉ ET LA PERTE DE VALEUR INTRINSÈQUE

Transformer Mars reviendrait également à sacrifier une part importante de sa valeur scientifique et patrimoniale. La planète rouge, dans son état naturel, est un témoin précieux des processus planétaires, un laboratoire unique pour comprendre l'histoire du système solaire et peut-être l'apparition de la vie sur une autre planète. La terraformer impliquerait d'effacer une forme de singularité cosmique.

Enfin, sur Terre déjà, le déplacement d'espèces dans des environnements non natifs pose de graves problèmes écologiques. Transposer ce problème à Mars, avec des espèces terrestres potentiellement invasives, rend la critique encore plus aiguë. Toute tentative de terraformation devrait n'être envisagée qu'avec une extrême prudence, à la lumière du principe de précaution et des efforts actuels de protection planétaire.

CHAPITRE 8

L'ESPACE : UN BIEN ET UNE RESPONSABILITÉ COMMUNE ?

Avant de conclure, nous avons ajouté une section distincte du reste du document, plus générale et non spécifiquement centrée sur Mars. Cette partie a été initialement rédigée par Dominique Lambert et a été discutée au sein du Groupe de travail sur l'Éthique du spatial de l'Académie royale de Belgique. Nous estimons que ces réflexions offrent un éclairage pertinent et enrichissent la perspective sur les missions futures, y compris celles à destination de Mars.

L'éthique des activités spatiales entend clarifier les principes qui permettent d'évaluer la légitimité des actions menées dans l'espace extra-atmosphérique. Cette éthique s'inspire en particulier des principes de la Charte des Nations Unies et des idées qui ont présidé à la rédaction du « Traité sur l'espace extra-atmosphérique[1] ».

En simplifiant à l'extrême, on pourrait dire que l'éthique des activités spatiales et le droit qu'elle contribuerait à fonder reposent sur deux principes fondamentaux : d'une part, la protection de la dignité et de l'intégrité des personnes ; d'autre part, la préservation de biens communs à l'humanité tout entière. À ces deux piliers, il conviendrait d'ajouter un troisième : la protection de la vie, quelle qu'en soit l'origine ou la forme. Si une vie microbienne active devait être découverte sur Mars, elle serait probablement considérée comme particulièrement précieuse, peut-être même davantage que certaines formes de vie terrestre, à l'exception notable de celles observées dans des écosystèmes extrêmes comme l'Antarctique. Une telle découverte soulèverait alors une question majeure : cette vie extraterrestre relèverait-elle du statut de bien commun de l'humanité ou, plus encore, d'une responsabilité collective à son égard, au nom d'un devoir éthique élargi au vivant non humain ?

---

[1] Assemblée Générale des Nations Unies, « Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies », *op. cit.*

LE PRINCIPE DE LA DIGNITÉ ET DE L'INTÉGRITÉ DES PERSONNES

Le principe de la dignité et de l'intégrité des personnes impose qu'un humain ne peut jamais être réduit à une chose ou traité simplement comme un moyen en vue d'une fin, mais qu'il possède une valeur en soi. Ce principe fonde celui d'assistance et de sauvetage des équipages en difficulté dans l'espace. Il invite également à réfléchir aux risques que comportent, pour la santé mentale et physique des astronautes, les missions de longue durée qui les éloignent fortement de la Terre. L'astronaute ne peut en aucun cas devenir un simple moyen utilisé à des fins exploratoires, quel que soit l'intérêt de la mission. L'évaluation des risques inévitables ne saurait faire l'économie d'une réflexion approfondie sur le respect de la personne.

Dans la mesure où des robots, de plus en plus autonomes, peuvent accomplir certaines tâches dangereuses ou répétitives dans l'espace, il est légitime, d'un point de vue éthique, de privilégier leur utilisation pour préserver la vie humaine. Cependant, même si ces machines venaient à égaler les humains en efficacité scientifique, cela ne suffirait peut-être pas à écarter toute présence humaine dans l'exploration spatiale. En effet, celle-ci ne se réduit pas à une simple collecte de données: elle engage aussi l'imaginaire collectif, la représentation symbolique et la portée du geste humain dans un monde nouveau. L'exploration spatiale, comme toute entreprise humaine, devrait ainsi concilier la préservation de la vie et la reconnaissance de ce que signifie, pour notre humanité, d'aller là où aucun être humain n'est encore allé.

Bien que l'exploration humaine comporte des risques inhérents, elle ne doit pas être assimilée à une démarche vouée à la destruction inévitable de ceux qui s'y engagent. On peut faire ici une analogie avec les sports dits extrêmes: il est légitime de chercher à repousser ses limites et à explorer l'inconnu, mais il serait contradictoire de s'engager sciemment sur une voie où la survie humaine ne serait pas une priorité. À ce jour, aucun projet sérieux ne prévoit d'envoyer des humains sur Mars dans des conditions telles que leur vie serait délibérément sacrifiée. L'objectif demeure de concilier ambition et précaution, en veillant à ce que chaque mission préserve au maximum la vie et la sécurité des explorateurs.

Enfin, il convient de s'interroger sur les intentions profondes qui peuvent sous-tendre les projets d'exploration spatiale. Si l'ambition de faire progresser les connaissances humaines est indéniablement louable, il est légitime de réfléchir également aux dynamiques de pouvoir ou aux intérêts géopolitiques qui peuvent parfois s'y mêler. De la même manière, il est crucial de porter une attention sou-

tenue au suivi à long terme de la santé des astronautes, notamment une fois de retour sur Terre, afin de comprendre pleinement les impacts physiques et psychologiques de ces voyages.

LA QUESTION DE LA PRÉSERVATION DES BIENS COMMUNS

La question de la préservation des biens communs, ou de ce qui est progressivement reconnu comme tel, repose sur l'idée que certains espaces et ressources appartiennent à l'ensemble de l'humanité et qu'il serait injuste qu'un groupe, une nation ou une entité privée s'en approprie unilatéralement l'usage ou le contrôle. Un bien commun peut désigner une ressource indispensable à la vie humaine, comme l'eau ou l'air, mais aussi un lieu dont la protection est essentielle, que ce soit pour des raisons écologiques, scientifiques ou culturelles.

Deux situations peuvent être distinguées. La première concerne la nécessité de préserver la « propreté » des orbites terrestres ainsi que des sites planétaires sensibles, comme la face cachée de la Lune ou certains endroits sur Mars où la vie aurait pu exister. Cette préservation vise non seulement à garantir un développement durable des activités spatiales, en limitant la pollution par des débris spatiaux, mais aussi à maintenir la possibilité d'observer le cosmos dans des conditions optimales. Dans ce cadre, ni les compagnies privées, ni les forces armées, ni les agences spatiales nationales ou internationales ne peuvent se prévaloir d'un droit unilatéral pour occuper ou contaminer ces sites, car de telles décisions sont encadrées par des principes éthiques, des règles du droit spatial international et des impératifs de préservation à long terme. La seconde situation invite à envisager la protection de ces sites dans une perspective analogue à celle de la préservation des paysages terrestres, montagnes, forêts, mers et sous-sols, qui ont une valeur patrimoniale, esthétique et scientifique. Ici, la notion de protection s'étend également à la Protection planétaire, une discipline scientifique et réglementaire visant à éviter la contamination biologique croisée entre la Terre et les corps célestes. Cette protection ne relève pas directement de l'éthique, mais constitue un impératif pour préserver l'intégrité des milieux extraterrestres et garantir la validité des futures investigations scientifiques. Par exemple, l'introduction accidentelle de micro-organismes terrestres sur Mars pourrait compromettre la recherche de formes de vie indigènes, tandis que la contamination inverse pourrait représenter un risque pour la biosphère terrestre. Ainsi, la préservation des biens communs spatiaux conjugue des enjeux éthiques, juridiques et scientifiques, qui exigent une vigilance collective afin d'assurer que l'exploration spatiale respecte à la fois les

générations présentes et futures, ainsi que la connaissance et la protection de la vie dans l'univers.

La préservation des biens communs spatiaux implique donc une approche éthique, juridique et scientifique visant à protéger les ressources partagées et les environnements fragiles de l'espace. Cette réflexion s'inscrit dans une éthique environnementale élargie au cosmos tout entier. En effet, une exploitation non maîtrisée des sites naturels dans l'espace risquerait de limiter l'humanité à ses seules réalisations matérielles et ambitions, au détriment de sa créativité, de son émerveillement et de sa capacité à se projeter au-delà d'elle-même.

L'exploration spatiale doit donc être pensée à partir d'une triple conception du commun : d'abord, comme un ensemble de ressources et d'espaces que l'humanité peut partager, gérer collectivement et utiliser pour assurer sa survie ; ensuite, comme une dimension irréductible, préservée en tant qu'espace de contemplation et de source d'inspiration, une esthétique hors de toute maîtrise ou exploitation ; enfin, comme une profonde responsabilité et humilité pour préserver, garder intact, ce qui est extraterrestre et donc pas une propriété humaine.

Cette triple dimension du commun se retrouve dans toute éthique environnementale. La mer, par exemple, est à la fois un bien commun indispensable à la vie humaine, permettant pêche et subsistance, mais aussi un espace naturel à préserver, source d'émerveillement et d'inspiration pour artistes et poètes. Qui pourrait nier que ces derniers contribuent, à leur manière, au progrès de l'humanité autant que ceux qui en tirent leur subsistance ?

On retrouve dans l'éthique des activités spatiales l'ensemble des enjeux déjà présents dans l'éthique environnementale terrestre. Certains plaident ainsi pour la préservation intégrale des sites spatiaux, à l'instar des réserves naturelles sur Terre. Cependant, il ne faut pas oublier que de nombreux paysages que nous considérons aujourd'hui comme « naturels » ont été façonnés par l'action humaine et animale, et que ces réserves doivent souvent leur existence à une protection rendue possible par l'intervention technologique. Il est donc probable que l'idée d'une « nature pure », totalement extérieure à l'humain, ressurgira dans le contexte spatial.

Mais au-delà de cette tension entre nature et culture, un autre enjeu mérite d'être abordé : celui d'un respect élargi de la vie, quelle qu'elle soit. Si une forme de vie extraterrestre, même microbienne, venait à être découverte, son extrême rareté en ferait une entité précieuse, digne de protection – peut-être même davantage que certaines formes de vie terrestres, tant elle viendrait questionner notre compréhension du vivant et notre place dans l'univers. Un tel respect suppose de

dépasser une approche strictement anthropocentrée, qui accorde à l'humain une position supérieure dans la hiérarchie des êtres vivants. Il inviterait à reconnaître une valeur intrinsèque à toute forme de vie, indépendamment de son utilité ou de sa proximité avec nous. Dans le contexte d'une éventuelle expansion humaine dans l'espace, il conviendra alors de s'interroger sur le type de relation que nous souhaitons établir avec les milieux rencontrés : une logique d'appropriation ou d'exploitation, ou bien une éthique de la cohabitation, fondée sur la prudence, la responsabilité et une forme d'humilité face à l'altérité cosmique.

Il convient également de souligner que la science spatiale serait compromise si sa mise en œuvre systématique et non régulée conduisait à détruire les objets mêmes qu'elle cherche à étudier. Par exemple, le lancement massif et non maîtrisé de satellites dédiés à un domaine d'observation particulier ou l'occupation sans encadrement responsable de la surface de Mars pour y installer un type unique d'instrument risqueraient, à terme, par les pollutions et perturbations engendrées, de gêner les scientifiques ou de compromettre certaines possibilités d'exploration. L'un des enjeux essentiels de l'éthique des activités spatiales, comme dans les sciences en général, est donc de trouver un équilibre entre les dimensions active et contemplative du commun, qui contribuent toutes deux à soutenir et à faire progresser l'humanité. Ce questionnement est particulièrement important dans le cadre des débats autour de l'exploration martienne.

Mais la préservation des communs nécessite logiquement un dialogue dépassant les intérêts particuliers des nations et des groupes, ce qui implique une entente à l'échelle internationale. Dans ce sens, l'éthique des activités spatiales suppose une exigence de paix et de fraternité, condition *sine qua non* d'un véritable respect des biens communs. On peut distinguer ici deux dimensions complémentaires : la paix comme horizon vers lequel il faut tendre, bien qu'elle ne soit jamais totalement maîtrisable, et la paix comme réalité à construire concrètement, ici et maintenant. L'éthique des activités spatiales doit donc viser cet idéal de paix et rappeler, notamment au nom de la préservation des communs, que ces activités ne sauraient se justifier par une appropriation unilatérale de l'espace visant à asseoir la puissance d'une seule nation.

Cela dit, cette éthique peut aussi soutenir des projets qui, localement, contribuent effectivement à la paix. La Station spatiale internationale ou les collaborations internationales dans l'observation astronomique et cosmologique en sont des exemples, où des acteurs issus de cultures et de contextes différents cohabitent et collaborent, développant une forme de fraternité nécessaire à la poursuite de leurs objectifs communs. Ces initiatives montrent que, malgré les défis, la

paix et la coopération sont possibles au sein même de l'activité spatiale.

Toutefois, il convient de rester vigilant : si la science repose idéalement sur le partage de la connaissance et le dialogue critique et respectueux entre ses praticiens, elle n'est pas toujours à l'abri des tensions nationales ou partisanes. L'éthique de la science demeure ainsi un horizon vers lequel tendre, un engagement collectif et dynamique indispensable à la poursuite de l'idéal scientifique.

L'éthique, comme le droit des activités spatiales, contribue à encadrer les projets d'exploration, d'exploitation et de militarisation de l'espace extra-atmosphérique. Ces cadres s'appliquent aux activités actuelles, mais doivent également permettre d'évaluer dès leur conception la légitimité et la licéité des futurs projets spatiaux[2]. Il est essentiel qu'à l'échelle internationale, les intentions profondes de ces projets soient examinées à la lumière des principes évoqués précédemment : servent-ils des intérêts partisans ou le bien commun ? Par ailleurs, il convient de rappeler la responsabilité des États-nations conformément au « Traité sur l'espace extra-atmosphérique[3] », tout en tenant compte des limites propres à la condition humaine : aucun individu ne devrait être impliqué dans des missions dont les exigences excèdent ce que sa nature physique, psychologique et morale peut supporter.

Il serait pertinent de développer dans le domaine spatial un dispositif analogue à l'article 36 du Premier protocole additionnel aux Conventions de Genève[4], qui impose un contrôle systématique du développement des armes nouvelles afin d'assurer leur conformité au Droit international humanitaire. Une telle mesure permettrait un suivi rigoureux des projets spatiaux dès leur conception, pour vérifier qu'ils respectent la dignité et l'intégrité des personnes, la préservation des biens communs, ainsi que les exigences de paix[5].

---

[2] Arnould J., *Ethics Handbook for the Space Odyssey*, Adélaïde, ATF Press, 2020.

[3] Assemblée Générale des Nations Unies, « Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies », *op. cit.*

[4] Assemblée Générale des Nations Unies, « Protocole additionnel aux Conventions de Genève du 12 août 1949 relatif à la protection des victimes des conflits armés internationaux (Protocole I) », dans *Treaties*, adopté le 8 juin 1977 [en ligne, https://treaties.un.org/doc/publication/unts/volume%201125/volume-1125-i-17512-english.pdf ; consulté le 15/07/2025].

[5] Ceulemans C., Dewyn M., Lambert D. *et al.*, *Robotisation des armées*, Paris, Economica, 2020.

CONCLUSIONS

Les missions humaines vers Mars deviennent progressivement envisageables sur le plan technologique et des choix concrets devront bientôt être faits. Cependant, la capacité de nos sociétés à débattre constructivement de ces projets est fragilisée par le manque de nuance dans les discours dominants. Cette polarisation est accentuée par l'implication de figures politiques clivantes, si bien que l'exploration martienne apparaît parfois comme l'apanage d'un camp idéologique spécifique.

Pour fonder un débat plus constructif, les auteurs de l'ouvrage *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*[1], dont s'inspire largement le présent document, ont mené une analyse rigoureuse des scénarios les plus souvent évoqués : exploration ou exploitation à différentes échelles, colonisation ou encore terraformation de la planète rouge. Leur travail met en évidence d'importantes différences de faisabilité entre ces approches. Il souligne aussi la valeur potentielle de missions humaines bien conçues, tout en alertant sur les risques considérables que comporteraient des projets mal préparés, tant sur les plans technique qu'éthique. C'est également l'objectif de la présente note.

Les conditions actuelles à la surface de Mars sont trop extrêmes pour permettre la survie de toute forme de vie terrestre connue, sans protection contre les radiations, sans pression atmosphérique suffisante pour éviter l'évaporation de l'eau et, dans le cas de nombreuses espèces dont l'homme, sans apport externe d'oxygène. Malgré cela, des missions de courte durée à visée scientifique pourraient être envisagées dans les décennies à venir. Leur mise en œuvre dépendra principalement de la volonté politique et des investissements des grandes puissances spatiales, qu'ils soient publics ou privés.

Néanmoins, plusieurs étapes critiques restent à franchir : faire atterrir des charges utiles massives sur Mars, assurer un habitat étanche et durable, disposer de grandes quantités d'énergie, produire localement de l'eau et du carburant à

[1] Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *op. cit.*

partir de ressources martiennes ou encore garantir une protection efficace contre les rayonnements cosmiques. Ces défis ne sont pas insurmontables, mais tous nécessitent des solutions nouvelles, encore à tester.

Les implications éthiques, juridiques et politiques de ces projets sont majeures. La protection de l'environnement martien, notamment en cas de présence de vie autochtone, en constitue un enjeu central. Toutefois, si ces questions sont abordées avec sérieux et responsabilité, des missions humaines respectueuses pourraient être justifiées par leur potentiel scientifique, leur pouvoir d'inspiration et leur rôle fédérateur.

Le degré de complexité technique, médicale, éthique et sociétale croît fortement avec l'ambition des missions. Il est probable que seuls des avant-postes limités, comparables à des stations de recherche en Antarctique, résisteraient à un examen réaliste et éthique dans un avenir proche. Au-delà, la faisabilité devient incertaine et les bénéfices moins évidents. Les arguments économiques avancés en faveur d'une exploitation martienne restent flous et de vastes efforts sont nécessaires pour imaginer des missions de grande ampleur qui soient éthiquement acceptables. Ces réponses ne peuvent être apportées qu'au cas par cas, en fonction du scénario envisagé.

À l'extrémité la plus ambitieuse du spectre des projets, les réponses sont plus catégoriques. Il est aujourd'hui évident que la terraformation de Mars est irréaliste. Prétendre que Mars, souvent désignée comme une « planète B », pourrait représenter une échappatoire à la crise climatique ou à l'effondrement écologique sur Terre est soit naïf, soit fondamentalement irresponsable. Pour les décennies, voire les siècles à venir, l'unique biosphère capable de soutenir l'humanité restera celle de la Terre.

Cela ne signifie pas que Mars doive être ignorée. Bien au contraire, une exploration sans illusions technologiques ni arrière-pensées idéologiques constitue une entreprise précieuse pour apporter des réponses à des questions scientifiques essentielles. Elle pourrait s'organiser selon un modèle proche de celui de l'Antarctique : des expéditions scientifiques ambitieuses, suivies peut-être de bases de recherche temporaires et, plus tard, plus ou moins permanentes. Rien ne garantit toutefois la réussite d'un tel projet. Les défis sont immenses et leur résolution demandera des ressources considérables, mais surtout de l'ingéniosité, de la coopération et de la lucidité humaines.

Il est indispensable d'acquérir une maturité collective pour discuter de ces sujets avec nuance. Cela implique d'examiner les scénarios un à un, d'éviter les généralisations simplistes et de refuser que l'exploration de Mars devienne un

enjeu partisan. La complexité du sujet exige un débat éclairé, rigoureux et ouvert.

L'exploration et l'exploitation de l'espace extra-atmosphérique représentent un défi éthique majeur pour l'humanité, qui doit apprendre à étendre au cosmos les principes de responsabilité, de justice et de respect déjà développés sur Terre. Protéger les biens communs spatiaux, conjuguer usage rationnel et contemplation, et inscrire ces efforts dans une coopération internationale sincère sont autant de conditions indispensables pour que la conquête spatiale contribue véritablement au progrès humain, sans compromettre la dignité des individus ni la pérennité des environnements qu'elle explore.

Face à l'immensité et à la complexité de cet univers partagé, il revient à chaque acteur, État, scientifique, institution et citoyen, de s'engager dans un dialogue permanent, guidé par l'éthique, pour construire ensemble un avenir spatial où la paix, la fraternité et le respect des communs ne seront pas de simples idéaux, mais des réalités concrètes et durables.

BIBLIOGRAPHIE

Arnould J. et Parent O. (dir.), « Enjeux éthiques et de l'espace », dans *Centre national d'études spatiales*, 2021 [en ligne, https://cnes.fr/sites/default/files/2025-01/spaceibles-en-jeux-ethiques-rapport-final.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Arnould J., *Ethics Handbook for the Space Odyssey*, Adélaïde, ATF Press, 2020.

Arnould J., *Icarus' Second Chance*, Vienne, Springer, 2013.

Arnould J., *La seconde chance d'Icare*, Paris, Éditions du Cerf, 2001.

Assemblée Générale des Nations Unies, « Protocole additionnel aux Conventions de Genève du 12 août 1949 relatif à la protection des victimes des conflits armés internationaux (Protocole I) », dans *Treaties*, adopté le 8 juin 1977 [en ligne, https://treaties.un.org/doc/publication/unts/volume%201125/volume-1125-i-17512-english.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Assemblée Générale des Nations Unies, « Résolution A/RES/1962 (XVIII), Déclaration des principes juridiques régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique », dans *United Nations Office for Outer Space Affairs*, adoptée le 13 décembre 1963 [en ligne, https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_18_1962F.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Assemblée Générale des Nations Unies, « Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies », dans *United Nations Office for Outer Space Affairs*, 1966 [en ligne, https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html ; consulté le 15/07/2025].

Banfield D., Stern J., Davila A. *et al.*, « Mars Science Goals, Objectives, Investigations, and Priorities », dans *Lunar and Planetary Institute*, 2020 [en ligne, https://www.lpi.usra.edu/mepag/about/MEPAGGoals_2020_MainText_Final.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Canup R. M., Christensen P. R., Banaji M. R. *et al.*, *Origins, Worlds, and Life*, Washington, National Academies Press, 2023.

Ceulemans C., Dewyn M., Lambert D. *et al.*, *Robotisation des armées*, Paris, Economica, 2020.

China National Space Administration, « Tiangong I », dans *CNSA*, 2022 [en ligne, https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465715/n6465717/c6840344/content.html ; consulté le 15/07/2025].

Committee on Space Research, « Panels », dans *COSPAR*, 2025 [en ligne, https://cosparhq.cnes.fr/scientific-structure/panels/ ; consulté le 15/07/2025].

Dehant V., Arnould J., Bartik K. *et al.*, « L'espace extra-atmosphérique doit demeurer un patrimoine commun de l'humanité », dans *Daily Science*, 2024 [en ligne, https://dailyscience.be/04/10/2024/lespace-extra-atmospherique-doit-demeurer-un-patrimoine-commun-de-lhumani/ ; consulté le 15/07/2025].

Dehant V., Arnould J., Bartik K. *et al.*, « Manifeste pour une exploration et une utilisation de l'espace mieux contrôlées et plus responsables. Déclarations de l'Académie royale de Belgique », dans *Académie royale de Belgique*, 2024 [en ligne, https://academieroyale.be/Academie/documents/DeclarationGTespace33619.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Dehant V., *Habiter sur Mars ?*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2012.

Dehant V., *Habiter sur une lune du système solaire ?*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2015.

Des Marais D. J., Nuth J. A., Allamandola L. J. *et al.*, « The NASA Astrobiology Roadmap », dans *Astrobiology*, vol. 8, n° 4, 2008, p. 715-730.

Encrenaz T. et Coustenis A., *L'énigme de la vie dans le Cosmos*, Paris, Éditions Eyrolles, 2025.

Mey S. D., « Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap », dans *Destination* Orbite, 2022 [en ligne, https://destination-orbite.net/documentations/Terrae_Novae_2030+strategy_roadmap.pdf ; consulté le 15/07/2025].

National Aeronautics and Space Administration, « Architecture Definition Documents », dans *NASA* [en ligne, https://www.nasa.gov/moontomarsarchitecture-architecturedefinition-documents/ ; consulté le 15/07/2025].

National Aeronautics and Space Administration, « International Space Station », dans *NASA* [en ligne, https://www.nasa.gov/international-space-station/ ; consulté le 15/07/2025].

National Aeronautics and Space Administration, « Moon to Mars Architecture », dans *NASA* [en ligne, https://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/resources/M2M_ACR2024_Architecture-ExecutiveOverview.pdf ; consulté le 15/07/2025]

National Aeronautics and Space Administration, « The Apollo Program », dans *NASA*, 2024 [en ligne, https://www.nasa.gov/the-apollo-program/ ; consulté le 15/07/2025].

Schwartz J. S. J. et Milligan T. (éds.), *The Ethics of Space Exploration*, Cham, Springer, 2016.

Schwartz J. S. J., *The Value of Science in Space Exploration*, Oxford, Oxford University Press, 2020.

Secretariat of the Antarctic Treaty, « Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty », dans *ATS*, 1991 [en ligne, https://www.ats.aq/e/protocol.html ; consulté le 15/07/2025].

Spry A., Siegel B., Bakermans C. *et al.*, « Planetary Protection Knowledge Gap Closure Enabling Crewed Missions to Mars », dans *Astrobiology,* vol. 24, n° 3, 2024, p. 230-274.

The European Space Agency, « International Space Station », dans *ESA* [en ligne, https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station ; consulté le 15/07/2025,].

Verseux C., Gargaud M., Lehto K. *et al.* (éds), *Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement*, Cham, Springer, 2024.

Verseux C., Poulet L., Mason N. *et al.*, « Can We, and Should We, Go to Mars? A Note for Decision-Makers », dans *European Astrobiology Institute*, 2025 [en ligne, https://europeanastrobiology.eu/wp-content/uploads/2025/06/250610_Can-we-and-should-we-go-to-Mars-English-.pdf ; consulté le 15/07/2025].

Wordsworth R., Kerber L. et Cockell C., **«** Enabling Martian Habitability with Silica Aerogel *via* the Solid-State Greenhouse Effect », dans *Nature Astronomy*, n° 3, 2019, p. 898-903.