

Projet AREN - Corpus de ressources

La conquête de Mars.

ControverSciences *et al*

7 Mars 2018

Table des matières

1	Textes à débattre	2
1.1	Pourquoi Elon Musk ne doit pas envoyer l'Homme sur Mars	2
1.2	Pourquoi il faut laisser des gens mourir sur Mars	4
2	Corpus de ressources	6
2.1	Vidéo - Mars One : un aller simple vers Mars ?	6
2.2	Vidéo - Comment prépare-t-on l'arrivée de l'homme sur Mars ?	6
2.3	Vidéo - Poser le pied sur Mars, ça se prépare !	6
2.4	Vidéo - Bientôt un astronaute sur Mars ?	6
2.5	En route vers mars	7

1 Textes à débattre

1.1 Pourquoi Elon Musk ne doit pas envoyer l'Homme sur Mars

- **Lien :** https://www.lexpress.fr/actualite/pourquoi-elon-musk-ne-doit-pas-envoyer-l-homme-sur-mars_1837162.html
- **Auteur :** Thomas Jestin, passionné par l'espace et son exploration. Il publie régulièrement des chroniques de prospective dans la presse, et il est l'auteur du livre Pourquoi Elon Musk ne doit pas envoyer l'Homme sur Mars.
- **Date :** 4 octobre 2016
- **Source :** L'Express est un magazine d'actualité hebdomadaire français. Classé au centre-gauche, le journal revendique souvent son refus d'endosser une étiquette, il se veut aujourd'hui moderniste, favorable à l'économie de marché et au projet européen.

Avec SpaceX, la société privée de voyage spatial d'Elon Musk, le projet de colonisation de Mars devient de plus en plus concret. Mais est-il réellement souhaitable? Pour notre contributeur, un tel voyage aurait des conséquences irréversibles. Elon Musk vient de révéler au grand public les contours de son vaisseau spatial à même d'emmener 100 personnes sur Mars et dont le premier vol habité, si tout fonctionne comme prévu, devrait partir fin 2024 pour se poser sur la surface martienne début 2025. Si l'on peut douter de ce calendrier, il serait bien présomptueux de considérer pour autant que la tâche est impossible compte tenu du rythme des progrès techniques accomplis à ce jour par SpaceX. Tôt ou tard, l'Homme aura la possibilité d'aller fouler Mars. Mais est-ce souhaitable?

Envoyer des hommes sans leurs microbes est impossible

Envoyer des hommes sur Mars accroîtrait démesurément les risques de contamination de la surface par nos milliers de milliards de microbes, ce qui compliquerait drastiquement la recherche de formes de vie martienne. De nombreuses formes d'habitats, c'est-à-dire en biologie des espaces à même d'héberger la vie présente ou passée, sont envisagées. Tout ceci serait fascinant à étudier pour mieux comprendre possiblement comment apparaît la vie et mieux saisir notre place dans l'univers. Envoyer des hommes sans leurs microbes serait impossible. Notre corps en héberge près cent mille milliards, répartis en une dizaine de milliers d'espèces. Notre peau elle-même abrite environ mille milliards de microbes! L'air que nous respirons est aussi rempli de nombreux et invisibles micro-organismes. Les occasions de contamination sont nombreuses: fuites d'air du vaisseau vers l'extérieur à travers le sas, fuites d'air à travers la combinaison des marsonautes, accidents...

Des conséquences irréversibles

Mais le plus gros des risques est celui de crash au sol du module lors de "l'amarsissage". Poser un appareil à la surface de Mars est un exercice des plus périlleux. Près des deux tiers de la quarantaine de missions envoyées vers Mars à ce jour se sont soldées par des échecs. Dans ce scénario du pire, des centaines de milliers de milliards de microbes se retrouveraient à la surface même de l'astre rouge aux abords des lieux du crash. On a longtemps pensé qu'une telle contamination serait brève et réversible, du fait des conditions martiennes hostiles à la vie. Mais la recherche a montré que certains micro-organismes pouvaient résister bien plus que prévu. Alors qu'on croyait qu'ils ne survivaient pas plus d'une minute, un sur un million était toujours viable après un an et demi d'exposition à l'équivalent des rayons solaires reçus par Mars. Du fait des tempêtes de poussière qui balayaient régulièrement Mars, nos microbes auraient vite fait de se retrouver disséminés aux quatre coins de la planète. Alors, pourquoi ne pas continuer à explorer efficacement Mars sans y envoyer des hommes?

Garantir la survie de notre espèce n'est pas nécessaire

Autre argument des partisans de la colonisation de Mars: garantir la survie de notre espèce. Or, ce n'est ni nécessaire ni suffisant. Elon Musk redoute qu'une catastrophe vienne éradiquer notre espèce sur Terre, mais en y regardant de plus près, soit ces catastrophes ne sont pas en mesure de nous tuer jusqu'au dernier (guerre nucléaire, épidémie, météorite, éruption volcanique), soit elles sont d'une nature telle (comme l'intelligence artificielle) qu'il n'y aucune raison de penser qu'une colonie sur Mars serait épargnée. Elon Musk invoque souvent en premier lieu le risque qu'un astéroïde vienne percuter notre planète et annihile notre espèce du même coup, comme ce fut le cas avec l'extinction des dinosaures il y a 66 millions d'années. Pourtant, aucun astéroïde d'une taille à même d'exterminer aujourd'hui l'humanité sur Terre, n'a impacté ni la Terre, ni la Lune, ni Mars, ni Mercure depuis la fin du grand bombardement tardif il y a des milliards d'années. Notre système solaire s'est très largement apaisé et rien ne justifie de penser que cela devrait changer. Qui plus est, pour une fraction du coût de construction d'une colonie sur Mars, nous pourrions investir dans les moyens d'identifier suffisamment à l'avance et détourner les astéroïdes susceptibles de croiser la Terre.

Rien ne presse!

L'exploration humaine de Mars ne semble donc pas justifiée face à ce que l'on risque de perdre au change, à savoir la chance unique de comprendre -grâce à nos robots- ce qu'il s'est passé sur une planète qui a eu des océans pendant un milliard d'années. La vie y est-elle apparue? Que la réponse soit positive ou non, dans tous les cas, elle sera fascinante. Que de hardis explorateurs souhaitent prendre des risques avec leur propre vie, admettons, c'est leur choix. Mais compromettre sans retour une opportunité scientifique unique aussi importante est une décision qui ne peut être laissée à l'appréciation de quelques individus, aussi fortunés, audacieux et ingénieux soient-ils! Il appartient à la communauté mondiale de se prononcer après un vif et long débat bien informé. Pourquoi nous hâter? Rien, absolument rien ne presse. Aucun danger imminent à l'horizon ne menace l'humanité d'extinction. Prenons le temps d'étudier Mars en long, en large et en travers avec nos machines qui le font déjà plus économiquement que les hommes, et le feront de mieux en mieux. Et ne pas envoyer l'Homme sur Mars ne doit pas nous empêcher de continuer à prospérer dans l'espace où tant reste à faire. Peut-être déjà avec un retour de l'homme sur la Lune?

1.2 Pourquoi il faut laisser des gens mourir sur Mars

- **Lien :** <http://leplus.nouvelobs.com/contribution/1560187-pourquoi-il-faut-laisser-des-gens-mourir-sur-mars.html>
- **Auteur :** Jean-Paul Fritz, écrivain et journaliste freelance principalement sur des sujets scientifiques.
- **Date :** 18 septembre 2016
- **Source :** Le Nouvel Observateur est un magazine d'actualité hebdomadaire français est classé à gauche, avec une ligne « sociale-démocrate ».

Mauvaise nouvelle pour les rêveurs : s'installer sur Mars, c'est dangereux. Déjà, pour y aller, il faut survivre intact au voyage. Les radiations cosmiques représentent un risque pour la santé, et il vaut mieux que le vaisseau de transport soit bien protégé. En plus, il y a les météorites. Même petites, elles peuvent faire des trous dans un habitacle, et vous n'auriez pas envie d'être exposés à une déperdition d'atmosphère. On ajoutera à ça la nécessité de vivre à plusieurs dans un espace très confiné (bien pire que sur la station spatiale) durant des mois, et pour ceux qui voudront revenir, la perspective de remettre ça au voyage retour. De quoi créer des problèmes psychologiques intenses, pour ne pas dire des conflits ouverts. Un combat de boxe en apesanteur, ça doit être difficile à arbitrer.

Le stratégique lieu d'installation

L'installation, ensuite. Que ce soit pour une mission d'exploration ou une colonisation, il va falloir des bâtiments abrités. Car Mars est loin d'être un paradis. Son atmosphère est ténue, il faut donc un lieu étanche pour y respirer. Le lieu en question doit également être protégé des radiations, car contrairement à la Terre, il n'y a pas de ceintures protectrices dans la haute atmosphère. Pour les mêmes raisons, il faudra limiter les sorties en scaphandre : il y a des limites à l'irradiation cumulée qu'un humain peut supporter. On va supposer que le lieu d'installation de la colonie est proche d'un glacier, ou tout au moins d'une source importante et accessible de glace pour fournir l'eau indispensable...pour à peu près tout. L'eau permet de fabriquer l'air respirable, de nourrir les petites plantes, et même de fournir un éventuel carburant pour les promenades exploratoires variées... et même un générateur électrique. Il faudra aussi des panneaux solaires en quantité, et peut-être un générateur nucléaire, au cas où. Car l'énergie sera aussi indispensable que l'eau, que ce soit pour le chauffage ou pour faire fonctionner les divers appareils assurant la survie de la colonie.

Produire des ressources locales

La nourriture, bien sûr. Il faudra la cultiver sur place, en prenant bien garde aux métaux lourds présents en abondance dans le sol martien. La bonne nouvelle, c'est que les cultures réalisées sur Terre dans la reproduction d'un terreau de Mars ont donné de bons résultats, et les légumes sont comestibles. Mais les colons seront à la merci d'une année de mauvaises récoltes. La plupart des éléments indispensables devront provenir de Mars. Les imprimantes 3D et le régolithe (sol martien) permettront de fabriquer beaucoup de choses, mais il faudra extraire les minéraux, ce qui implique... des mines et des usines, même petites pour commencer. Le plus délicat, ce sera les composants électroniques. Sur Terre, ils sont faciles à fabriquer, mais sur Mars... il faut espérer que les nouvelles technologies d'impression se montreront à la hauteur, mais là encore, il faudra des métaux. En cas de panne d'un composant essentiel, si les pièces de rechange amenées de la Terre sont épuisées (elles seront nécessairement en quantité limitée vu les coûts d'acheminement), cela pourrait menacer la survie de membres de la colonie. Il sera également nécessaire de s'adapter à la gravité, qui n'est que du tiers de celle que nous avons sur Terre, et on n'en connaît pas les conséquences physiques sur le long terme. Enfin, les problèmes psychologiques et organisationnels liés à une vie entière dans un espace restreint et clos seront bien pires que les quelques mois de voyage.

Refuser le risque...

Tous ces éléments sont autant de causes possibles de décès sur Mars, voire d'extinction temporaire d'une colonie (jusqu'à l'arrivée des colons suivants). La bonne nouvelle, c'est qu'ils semblent tous surmontables avec les technologies actuelles, le tout est de les mettre au point avant de partir... et de s'autoriser une marge d'erreur et d'improvisation sur place. Les colons martiens devront donc être des émules de McGyver et de bons agriculteurs, entre autres. Le hic, c'est qu'aujourd'hui les grandes agences spatiales, NASA en tête, ont l'habitude d'envoyer leurs astronautes dans des lieux où ils peuvent espérer être secourus, à portée de la Terre, même si les catastrophes comme celles des navettes Challenger et Columbia ont démontré que le risque est toujours là.

... ou l'accepter

Il n'en demeure pas moins que les normes de sécurité sont conçues pour des explorateurs, astronautes professionnels et scientifiques en missions temporaires, pas pour des aventuriers se lançant dans un grand bond en avant. L'objectif premier, c'est de faire en sorte qu'un astronaute qui part de la Terre en revienne en vie. Si l'on avait appliqué des principes similaires au 16ème siècle, les navires espagnols seraient toujours à croiser prudemment au large des côtes des Bermudes et les frégates anglaises ravitailleraient avec parcimonie les quelques bases d'exploration de la côte est de l'Amérique du Nord. Bien entendu, il ne s'agit pas là d'ériger en modèle un processus qui a conduit à des génocides culturels, des déportations en masses, des conversions forcées au christianisme et à l'esclavage, sans parler du pillage en règle des ressources naturelles. Mais on peut au moins tirer des leçons de l'histoire, d'autant que sur Mars il n'y a pas de vie intelligente qui pourrait en pâtir. La notion de risque acceptable est différente pour une colonisation que pour une exploration.

Mars aura ses cimetières

La colonisation est risquée. Les pertes en vies humaines sont non seulement prévisibles, mais elles font partie du processus. Ceux qui se lancent dans de telles aventures le savent, et sont prêts à prendre ce risque. Si on ne l'admet pas, on ne s'établira pas sur Mars avant plusieurs siècles, sans parler d'autres endroits du système solaire ou au-delà. Le futur colon martien prendra un ticket aller simple. Il ne sera pas astronaute, sinon de manière temporaire, le temps du voyage. Mais il devra avoir des compétences en matière de survie sur le terrain, et être prêt à mourir bêtement à cause d'une panne de circuit, une fuite d'air, une irradiation trop importante, ou parce qu'une récolte entière sera perdue. Il ne fera pas "un petit pas pour l'homme, un grand pas pour l'humanité". Les colons ne feront que de petits pas, tous ensemble. Ce n'est que leur oeuvre collective qui, avec le temps et des cimetières martiens bien remplis, aboutira à un établissement permanent sur la planète rouge. Ce sera là un prolongement naturel du chemin qui a mené nos ancêtres hors d'Afrique par vagues successives, pour s'installer sur des terres inhospitalières, les domestiquer, les façonner à leur usage et, au final, y prospérer. Ou y mourir.

2 Corpus de ressources

2.1 Vidéo - Mars One : un aller simple vers Mars ?

- **Lien :** <https://www.youtube.com/watch?v=i2QtmWFRP7c>
- **Auteur :** Témoignage de Jacques Arnould, chargé de mission sur les questions éthiques au CNES.
- **Date :** 20 mai 2015
- **Durée :** 3 minutes 31 secondes
- **Description :** Le projet Mars One prévoit d'envoyer vers Mars une expédition humaine en 2023. Pas moins de 200 000 candidats se sont portés volontaires à travers le monde. Pourquoi un tel engouement?
- **Source :** Le Centre national d'études spatiales (CNES) propose aux pouvoirs publics la politique spatiale de la France et la met en œuvre dans 5 grands domaines stratégiques: Ariane, les Sciences, l'Observation, les Télécommunications et la Défense. De part son activité civil et militaire, le CNES est placé sous la tutelle conjointe des ministères de la Recherche et des Armées.

2.2 Vidéo - Comment prépare-t-on l'arrivée de l'homme sur Mars ?

- **Lien :** <https://www.youtube.com/watch?v=SvEqNH4aLjo>
- **Auteur :** Témoignage de Sylvestre Maurice, astrophysicien, planétologue et co-responsable de l'instrument ChemCam sur Curiosity
- **Date :** 5 juillet 2016
- **Durée :** 2 minutes 41 secondes
- **Description :** Comment les missions robotiques actuelles préparent l'arrivée de l'homme sur Mars.
- **Source :** Centre national d'études spatiales (CNES)

2.3 Vidéo - Poser le pied sur Mars, ça se prépare !

- **Lien :** <https://www.youtube.com/watch?v=m85lIGR-P0k>
- **Auteur :** CNES
- **Date :** 29 juillet 2016
- **Durée :** 3 minutes 26 secondes
- **Description :** En France, plusieurs organismes étudient la physiologie humaine dans la perspective d'une mission de plusieurs années dans l'espace pour les astronautes qui iront fouler le sol martien.
- **Source :** Centre national d'études spatiales (CNES)

2.4 Vidéo - Bientôt un astronaute sur Mars ?

- **Lien :** <https://www.youtube.com/watch?v=AdduX7PV3g0>
- **Auteur :** Témoignage de François Spiero, responsable des vols habités au CNES
- **Date :** 16 novembre 2016
- **Durée :** 2 minutes 38 secondes
- **Source :** Centre national d'études spatiales (CNES)

2.5 En route vers mars

- **Lien :** <https://www.pourlascience.fr/sd/spatial/en-route-vers-mars-6688.php>
- **Auteur :** Damon Landau et Nathan Strange travaillent au Jet Propulsion Laboratory pour la nasa.
- **Date :** 23 mars 2012
- **Source :** Pour La Science est la version française du mensuel Scientific American. C'est une revue de vulgarisation scientifique dans toutes les disciplines, dont les articles sont signés par les chercheurs eux-mêmes.

En route vers Mars

Le programme spatial habité pourrait s'inspirer de l'exploration planétaire robotisée pour transporter des astronautes vers des astéroïdes, puis vers Mars, rapidement et à faible coût.

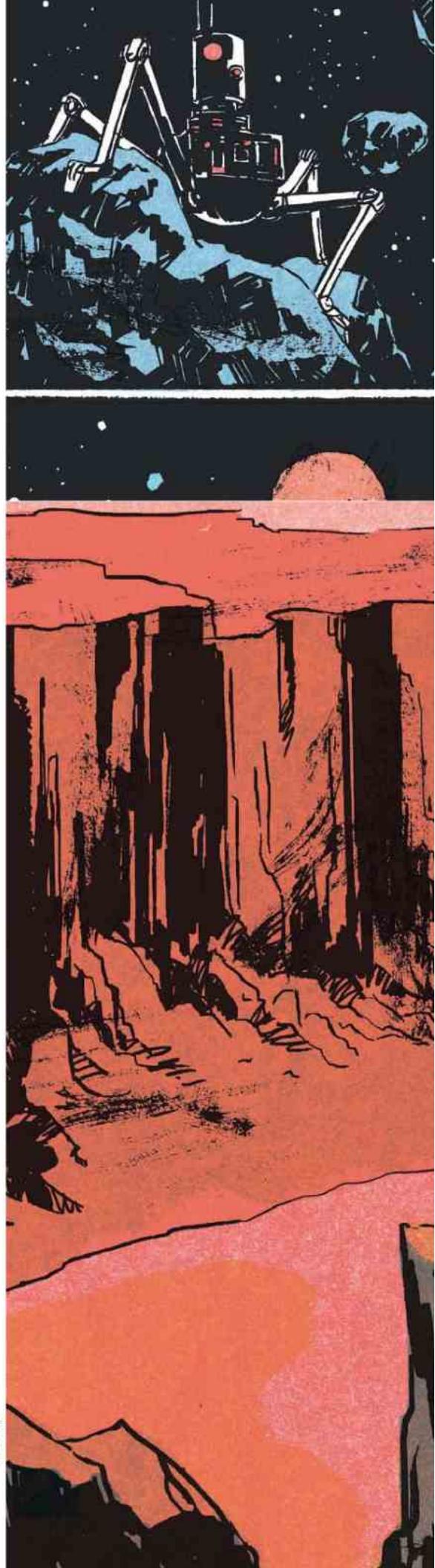
Damon LANDAU
et Nathan STRANGE
travaillent au Jet Propulsion Laboratory pour la NASA.

En octobre 2009, un petit groupe de spécialistes de l'exploration spatiale robotisée, dont nous faisions partie, a décidé de s'aventurer hors des sentiers battus en imaginant différentes approches pour envoyer des hommes dans l'espace. Cette initiative était motivée par les conclusions de la commission *Augustine*, un comité d'experts mis en place par le président Barack Obama pour faire le point sur les projets à venir. La commission avait conclu que le programme américain de vols habités était dans une impasse. Nous avons voulu déterminer si le programme d'exploration robotisée, allant de Mercure aux confins du Système solaire, pouvait apporter des solutions techniques à certains des défis politiques et budgétaires auxquels la NASA était confrontée.

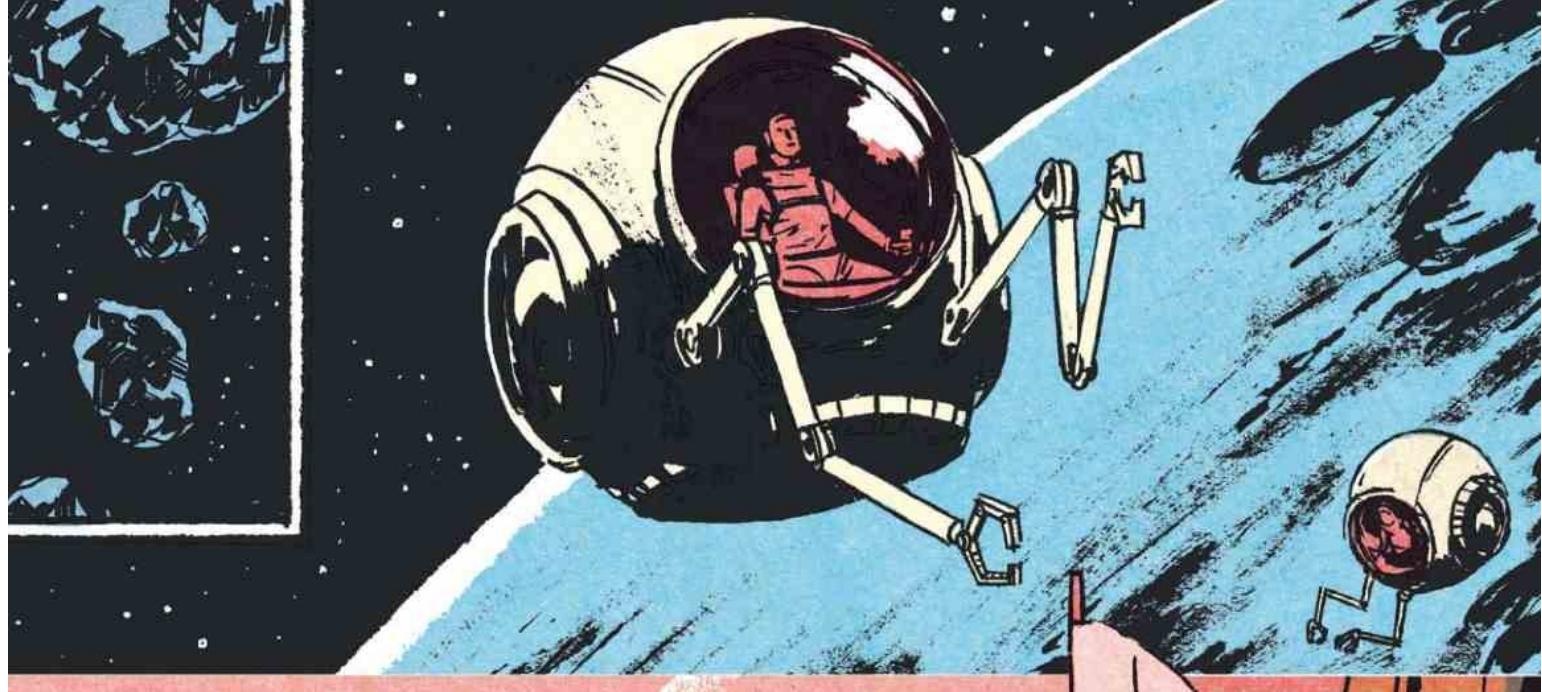
2001, l'*Odyssée de l'espace*

Nous avons imaginé utiliser des moteurs ioniques pour acheminer les composants d'une base lunaire ; fournir de l'énergie à distance aux rovers, des véhicules robotisés envoyés sur la lune martienne Phobos ; placer à l'avance des fusées d'appoint chimiques le long d'une trajectoire interplanétaire, afin que les astronautes puissent les récupérer en chemin ; remplacer les combinaisons spatiales par des capsules d'exploration similaires à celles du film *2001, l'Odyssée de l'espace*. Par exemple, nous avons calculé que la propulsion électrique (par un moteur ionique ou des techniques apparentées) réduirait considérablement la masse du vaisseau pour les missions habitées vers des astéroïdes et vers Mars.

C'était comme un retour à l'effervescence qui régnait à la NASA dans les années 1960 ! Pendant six mois, nous avons rencontré des spécialistes qui s'intéressaient à notre approche, et nous nous sommes renseignés sur les expériences conduites par la NASA : des essais de moteurs électriques aux



Patrick Leger



LA CONQUÊTE de Mars se ferait en trois grandes étapes : vers des astéroïdes, puis Phobos, un satellite de Mars, et enfin la planète rouge.

panneaux solaires légers à haut rendement.

Nous avons combiné les propositions les plus prometteuses avec des stratégies éprouvées pour développer un projet visant à envoyer dès 2024 des astronautes sur un astéroïde. Cette approche découpe la tâche globale en une série d'étapes de complexité croissante. Le principal objectif est que le programme habité reste flexible et qu'il se fonde sur les techniques mises en œuvre dans le programme d'exploration robotique. Précisons que ce n'est qu'un scénario possible parmi d'autres également à l'étude.

Le rapport de la commission *Augustine* a déclenché une bataille politique féroce, culminant avec la décision de déléguer une bonne partie de la tâche de lancement des astronautes en orbite à des compagnies privées. La NASA peut maintenant se concentrer sur l'innovation. Mais comment avancer sans le soutien politique et les ressources dont elle jouissait pendant les glorieuses années des missions *Apollo* ?

L'exploration robotisée suit une approche progressive : on développe un ensemble de techniques qui permettent de préparer des missions de plus en plus ambitieuses. Au lieu de reposer sur une stratégie du « tout ou rien » avec un objectif unique, le programme d'exploration robotisée s'appuie sur des combinaisons innovantes de technologies qui permettront d'atteindre des objectifs variés.

Des alternatives

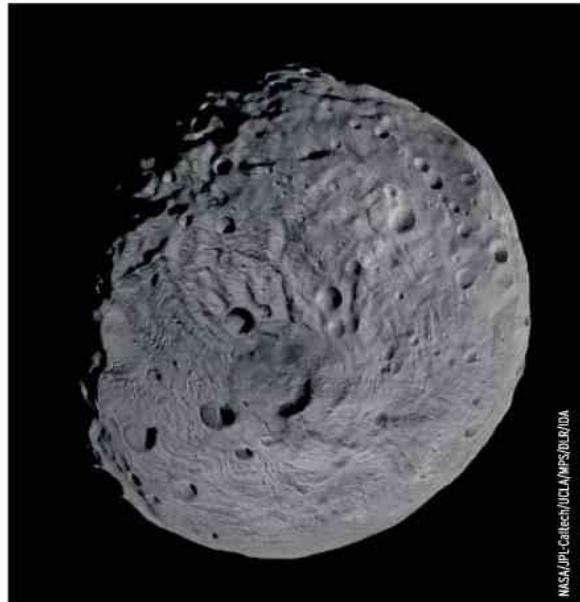
La solution fondée sur des remorqueurs à propulsion électrique pour effectuer des vols habités vers la Lune puis vers des astéroïdes comme étapes préparatoires est l'une des voies possibles pour une mission martienne habitée? C'est celle décrite par les auteurs, mais elle est loin de faire l'unanimité dans la communauté spatiale.

Un reproche que l'on peut faire à ce scénario est que toutes ces étapes ne sont pas techniquement indispensables pour la réalisation d'une mission martienne habitée et pourraient donc consommer du temps et de l'argent par rapport à un scénario plus direct.

Selon le type de propulsion retenu (le choix qui, bien que structurant, ne fait toujours

pas consensus), il pourrait être notamment plus pertinent de tester certaines technologies directement sur Mars, par exemple lors d'une mission robotique de collecte d'échantillons : ce peut être l'aérocapture, la production d'ergols *in situ* à partir de l'atmosphère, l'utilisation de ressources du sol de Mars...

Des initiatives internationales visant à une vision commune pour l'exploration habitée existent, c'est le cas de l'ISECG (*l'International Space Exploration Coordination Group*), qui inclue les principales agences spatiales mondiales, dont le CNES, mais aussi le groupe d'étude *Global Human Mars System Missions Exploration - Goals, Requirements and Technologies*, de l'*International Academy of Astronautics*.



L'ASTÉROÏDE VESTA est étudié, depuis juillet 2011, par la sonde robotisée *Dawn* de la NASA. Cette sonde utilise des moteurs ioniques à très haut rendement, comme cela pourrait être un jour le cas pour les missions interplanétaires habitées.

Pour certains, étant donné les bons résultats obtenus avec l'exploration robotisée, nous ne devrions tout simplement pas envoyer d'hommes dans l'espace. Si le seul objectif de la NASA était la découverte scientifique, les sondes robotisées seraient certainement moins chères et moins risquées. Mais telle n'est pas la seule mission de la NASA : la connaissance n'est qu'un des aspects de la curiosité de l'esprit humain. Si l'exploration spatiale suscite un tel engouement, c'est parce qu'elle apporte sa part de rêve. Les sondes robotisées correspondent à la première phase de l'exploration du Système solaire. Les missions habitées constitueront la deuxième, et la troisième

sera celle de l'aventure spatiale que tenteront les Terriens en quête d'aventure. Les capsules lancées vers la station spatiale et les vols suborbitaux seront les premiers maillons de cette reconquête spatiale.

Des missions flexibles avant tout

Nous recommandons trois grands principes. Le premier est celui des « destinations intermédiaires reconfigurables » que la commission *Augustine* a suggéré et que le président B. Obama a accepté. Avec cette stratégie, l'itinéraire de la Terre à Mars n'est pas fixé à l'avance, mais divers chemins sont envisageables. Nous commencerions par les destinations proches, tels les points de Lagrange (des endroits où le mouvement des objets est stabilisé par les forces gravitationnelles) et les astéroïdes évoluant à proximité de la Terre. Les destina-

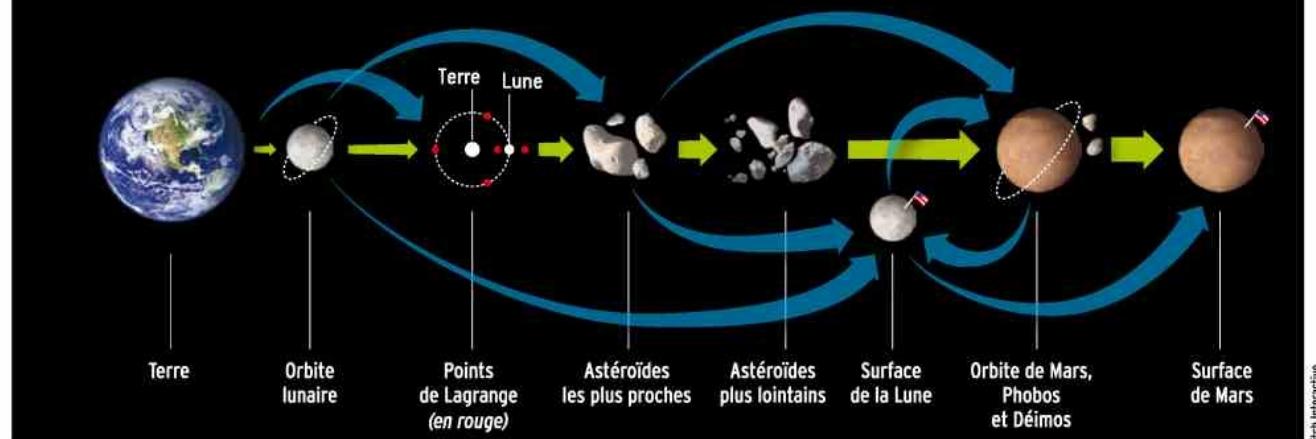
L'actualité des scénarios de mission martienne habitée est plutôt riche, car on note également depuis quelques années des initiatives privées volontaristes. Par exemple, le projet *Inspiration Mars* proposé par Denis Tito qui consiste à envoyer deux astronautes vers Mars en 2021 sur une trajectoire à retour libre : elle revient naturellement vers la Terre, sans manœuvre spécifique, après un survol de Mars. De même, Elon Musk, le dirigeant de la Société *Space-X* affiche un intérêt personnel pour des missions martiennes habitées et développerait à cet effet des moteurs à oxygène liquide et à méthane.

Elsa CLIQUET,
CNES - Direction des lanceurs

TOUS LES CHEMINS MÈNENT À MARS

Dans le passé, le programme spatial habité américain avait adopté une approche monolithique : il se concentrait sur une cible spécifique, avec un seul système pour s'y rendre. Aujourd'hui, l'approche est différente. L'objectif est de se lancer dans l'espace interplanétaire avec des missions progressivement plus complexes, telles que le

programme proposé par les auteurs (flèches vertes) et ses variantes (flèches bleues). La liste des destinations est présentée par ordre de difficulté croissante. Le déroulement des missions et le choix des stratégies pourraient être modifiés si des difficultés techniques surgissaient ou si les fonds alloués à la mission étaient réduits.



Pitch Interactive

tions reconfigurables requièrent de nouveaux moyens de transport, notamment la propulsion électrique. Nous proposons les moteurs à effet Hall (un type de moteur ionique) alimentés par des panneaux solaires.

Un système de ce type a propulsé la sonde *Dawn* vers l'astéroïde géant Vesta (*voir la figure page ci-contre*) et la conduira, en 2015, jusqu'à la planète Cérès. Là où les moteurs chimiques classiques des fusées produisent une poussée puissante, mais brève, les moteurs électriques éjectent un flux de gaz modéré, mais régulier. Les systèmes fondés sur l'alimentation électrique ont une consommation de carburant réduite. Cependant, ces moteurs ont une poussée plus faible, ce qui allonge la durée des missions.

On imagine souvent à tort que la propulsion électrique est trop lente pour les missions spatiales habitées, mais on peut éviter cette difficulté. Par exemple, en utilisant des remorqueurs robotisés à propulsion électrique pour placer les fusées chimiques d'appoint en quelques étapes clefs d'une trajectoire ; quand le chemin est tracé, les astronautes se mettent en route et récupèrent les fusées d'appoint à mesure qu'ils progressent. Ainsi, les missions bénéficient du rendement énergétique de la propulsion électrique, tout en conservant l'avantage de la propulsion chimique en termes de vitesse.

De surcroît, la propulsion électrique permet d'économiser des fonds. Puisque le vaisseau n'a pas besoin de transporter autant d'ergol (un mélange de comburant et de combustible), sa masse totale au lancement est réduite de 40 à 60 pour cent. Or, le coût des missions spatiales est directement

proportionnel à la masse initiale propulsée. Ainsi, diviser la masse par deux réduirait le coût de moitié.

Des tremplins vers Mars

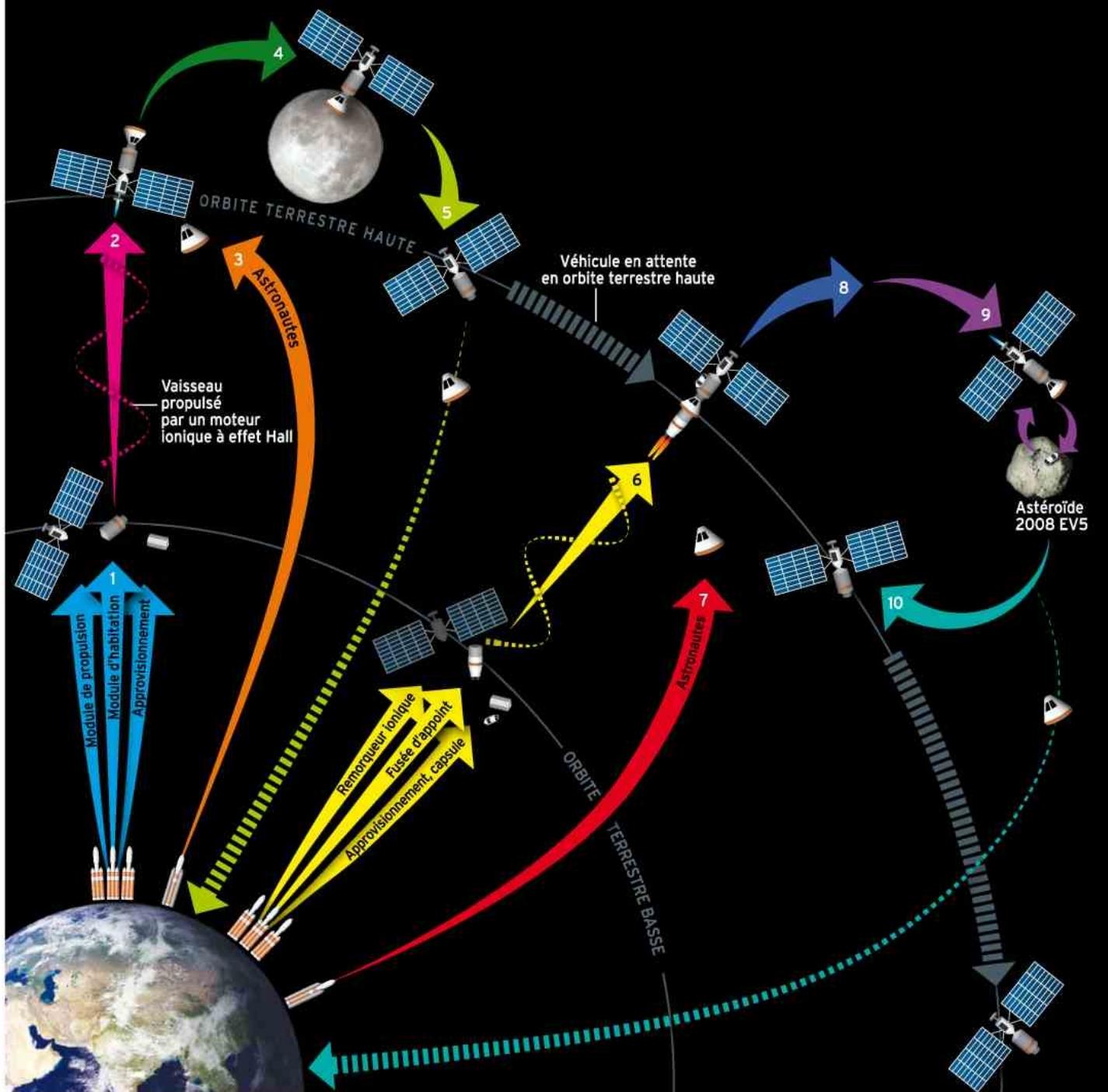
Pourquoi vouloir atteindre un astéroïde alors que l'objectif est Mars ? Parce qu'il y en a des milliers parsemés entre la Terre et Mars, et qu'ils constituent autant de tremplins vers l'espace lointain. Mais aussi parce que la gravité y est si faible qu'atterrir sur l'un d'eux demande moins d'énergie que pour atteindre la surface de la Lune ou de Mars. Il est difficile de monter une longue expédition interplanétaire (6 à 18 mois), et l'on recherche tous

Pourquoi atteindre un astéroïde plutôt que Mars ? Parce qu'il y en a des milliers et qu'ils constituent autant de tremplins vers l'espace lointain.

les moyens d'économiser l'énergie et de réduire les difficultés techniques. Par ailleurs, sur Mars, mais aussi sur les astéroïdes, les astronautes seront soumis à l'impesanteur (la pesanteur sur Mars est de l'ordre du tiers de la pesanteur sur Terre) et exposés aux effets des rayonnements de l'espace : si nous réussissons à les protéger contre ces effets délétères sur un astéroïde, nous saurons comment faire sur Mars. Or, aujourd'hui, la question reste ouverte. À mesure que la NASA apprendra comment gérer les risques liés à l'exploration de l'espace lointain, elle perfectionnera les véhicules destinés aux missions martiennes.

FRANCHIR LA BARRIÈRE DE L'ESPACE PROFOND

Le programme proposé par les auteurs pour l'exploration interplanétaire met l'accent sur la flexibilité des missions. Plutôt que des vaisseaux à usage unique, tels que les missions Apollo vers la Lune, et la plupart des missions interplanétaires antérieures, la NASA et ses partenaires construiront un véhicule interplanétaire qui pourrait être utilisé plusieurs fois. Il pourrait être prêt à décoller dès 2024. L'assembler, le tester et le lancer serait un processus à étapes multiples. Entre les vols, le vaisseau serait « garé » en orbite terrestre haute.



1 MISE EN ORBITE ET ASSEMBLAGE DES ÉLÉMENTS DU VAISSEAU

Deux modules (le moteur ionique solaire et le module d'habitation) seront lancés séparément en orbite terrestre basse à bord de lanceurs publics ou privés. Les contrôleurs au sol les assembleront à distance comme une station spatiale. Un troisième lanceur assurera l'avitaillement du véhicule pour l'étape suivante.

2 MIGRATION EN ORBITE TERRESTRE HAUTE

Le moteur ionique ne sera pas assez puissant pour que le vaisseau se libère de son orbite terrestre d'un seul coup, mais il le poussera lentement vers une orbite plus éloignée. À ce stade, les astronautes n'auront pas encore besoin de se trouver à bord, ce qui leur évitera l'irradiation et l'ennui d'un voyage de deux ans.

**3 ARRIVÉE DES ASTRONAUTES**

Quand le vaisseau aura atteint une orbite haute qui lui permettra d'échapper à la gravité terrestre, les astronautes le rejoindront à bord d'une petite fusée rapide.

4 MISSION LUNAIRE

Pour mettre le vaisseau à l'épreuve, les astronautes le dirigeront vers une orbite lunaire. Ce voyage sera plutôt un vol d'essai, mais il permettra aussi d'accumuler des résultats scientifiques en utilisant une flotte de robots d'exploration.

5 RETOUR EN ORBITE TERRESTRE HAUTE ET FIN DE LA MISSION POUR LES ASTRONAUTES

Après un vol d'essai de six mois, par exemple, les astronautes redirigeront le véhicule interplanétaire vers une orbite terrestre haute, puis poursuivront leur route vers la Terre. Ils amerriront dans une capsule de type *Apollo*.

6 RAVITAILLEMENT DU VAISSEAU

Pour aider le vaisseau à s'échapper de l'orbite terrestre, les contrôleurs au sol enverront une petite fusée d'appoint à l'aide d'un remorqueur interorbital à propulsion ionique.

7 NOUVEL ÉQUIPAGE D'ASTRONAUTES

Quand la fusée sera attachée au véhicule interplanétaire, un autre équipage d'astronautes décollera à bord d'une fusée classique.

8 SE LIBÉRER DE LA GRAVITÉ TERRESTRE

Le véhicule interplanétaire se mettra en orbite elliptique et, au moment où il sera au plus près de la Terre, la fusée d'appoint sera utilisée. Le vrai voyage commencera.

**9 MISSION VERS UN ASTÉROÏDE**

Le moteur ionique prendra le relais et poussera lentement le vaisseau vers sa première cible, peut-être l'astéroïde 2008 EV5. Le voyage aller durera six mois. L'équipage passera un mois à explorer l'astéroïde dans des capsules spatiales.

10 RETOUR DU VÉHICULE EN ORBITE TERRESTRE ET DES ASTRONAUTES SUR TERRE

Le vaisseau allumera son moteur ionique et prendra la direction de la Terre. Six mois plus tard, l'équipage amerrira dans la capsule utilisée pour monter en orbite. Le vaisseau sera piloté à distance et reviendra en orbite terrestre haute.

Plusieurs astéroïdes intéressants pourraient être visités par des astronautes avec des temps de vol allant de six mois à un an et demi en utilisant un système de propulsion électrique de 200 kilowatts, ce qui serait un progrès non négligeable par rapport à nos capacités actuelles. Ainsi, la Station spatiale internationale est dotée de 260 kilowatts produits par des panneaux solaires. Une telle mission franchirait la barrière de l'espace lointain, tout en constituant une étape essentielle vers les temps de vol de deux à trois ans et des dispositifs à 600 kilowatts requis pour l'exploration martienne.

Par ailleurs – c'est le deuxième principe de notre projet –, la NASA ne sera pas obligée d'inventer des systèmes complètement nouveaux, comme c'était le cas dans les années 1960. Si certains dispositifs, notamment ceux adaptés à l'impesanteur et ceux qui protègent contre les rayonnements spatiaux, nécessiteront de nouvelles recherches, le reste des équipements dérivera directement de dispositifs existants. Le véhicule spatial sera assemblé en combinant quelques modules spécialisés : la structure, les panneaux solaires et les équipements permettant de vivre dans l'espace dériveront de modèles qui ont déjà été utilisés sur la Station spatiale internationale. De nombreuses agences spatiales étrangères et entreprises privées ont des compétences avérées dans ces domaines, que la NASA pourra mettre à contribution.

Un nouveau lanceur lourd

Enfin – c'est le troisième principe –, il faudra concevoir un programme qui continuera à aller de l'avant même si une composante rencontre des difficultés ou prend du retard. Ce principe devra être appliqué à la composante la plus controversée de la politique spatiale adoptée par le Congrès américain, la fusée de lancement qui acheminera l'équipage et les véhicules d'exploration. Le Congrès a demandé à la NASA de construire un nouveau lanceur lourd, le SLS (*Space Launch System*). Comme annoncé en septembre 2011, la NASA projette de développer ce véhicule par étapes, en commençant par la moitié environ de la puissance du *Saturn V* d'*Apollo*, et d'augmenter progressivement la capacité de lancement jusqu'à dépasser celle de *Saturn V*. Le premier lanceur SLS, couplé à la capsule Orion en cours de développement, pourra véhiculer les astronautes pour des excursions de trois semaines vers l'orbite lunaire ou les points de Lagrange, mais pas plus loin en l'état.

Heureusement, les voyages vers l'espace lointain pourront commencer avant que le SLS ne soit achevé. Les préparatifs débuteront

avec la conception des équipements où vivront les astronautes et des systèmes de propulsion électrique qui seront nécessaires pour voyager au-delà de la Lune. En faisant de ces systèmes une des principales priorités, alors même que les nouveaux lanceurs sont encore en cours de développement, la NASA sera en mesure d'améliorer le SLS afin qu'il soit mieux adapté aux missions lointaines. Ces composantes pourront même être transportées par des lanceurs commerciaux internationaux et être ensuite assemblées en orbite, comme l'ont été la Station spatiale internationale et la station Mir. Avec la flexibilité offerte par les diverses options, la NASA pourra

inclure davantage d'explorations dans son budget de plus en plus réduit.

Un voyage inaugural vide

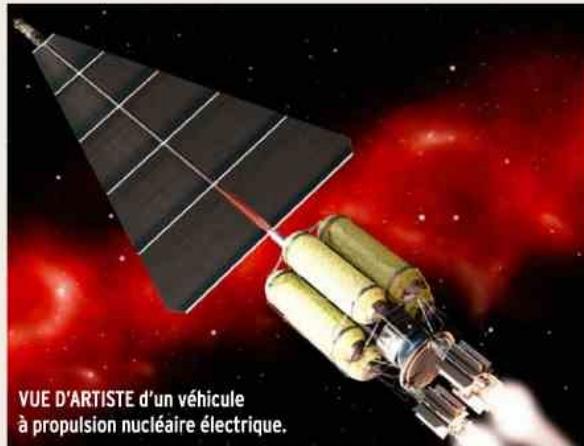
Dans notre projet, la renaissance de la NASA commencera par la construction du véhicule spatial. La version la plus simple comprend deux modules : un moteur ionique à alimentation solaire pour la propulsion et un nouvel espace habitable. Les modules seront envoyés en orbite terrestre basse par le SLS. Une autre solution sera d'utiliser trois lanceurs commerciaux : deux pour les composants de la navette et un pour les différentes pièces.

QUELLE PROPULSION POUR LES MISSIONS MARTIENNES ?

Le CNES étudie depuis plusieurs années de nombreux scénarios pour propulser une mission martienne habitée. Nos études confirment que pour envoyer six astronautes en s'appuyant uniquement sur de la propulsion chimique classique, il faudrait lancer plus de 1 000 tonnes en orbite basse terrestre.

Le scénario Mars Direct, qui propose d'utiliser l'atmosphère de Mars pour s'insérer en orbite martienne et pour produire les ergols du trajet retour, annonce des masses au départ de l'orbite terrestre nettement plus attractives, limitées à quelques centaines de tonnes (230 tonnes dans les cas les plus optimistes, pour un équipage de quatre astronautes, ce qui serait réalisable avec deux lanceurs lourds de type SLS). Toutefois, selon notre analyse, la manœuvre d'aérocapture telle qu'elle est proposée dans ce scénario est trop ambitieuse d'un point de vue technique, notamment à cause de la taille et de la masse du véhicule à freiner (précision du guidage, tenue des matériaux au frottement atmosphérique) et pour des raisons physiologiques, car les astronautes subiraient d'importantes décélérations. Nous étudions cependant avec intérêt des scénarios en propulsion chimique reprenant quelques idées de Mars Direct. Réduire le nombre d'astronautes, et donc la taille et la masse des véhicules, fait également partie des réflexions en cours dans le milieu.

L'utilisation de la propulsion nucléaire thermique est une autre option envisagée par les Américains pour réduire la masse d'ergol nécessaire à la mission et donc la masse initiale au départ de l'orbite terrestre. En effet, l'impulsion spécifique de la propulsion nucléaire thermique, dont le principe est de chauffer de l'hydrogène par un réacteur nucléaire avant de l'accélérer dans une tuyère, est deux fois supérieure à celle de la propulsion chimique cryotechnique. Cependant, même si des programmes de développement de moteurs nucléaires (Nerva, Rover) ont été conduits dans les années 1960 et 1970 aux États-Unis et en Russie, ce type de propulsion, qui n'a jamais servi dans l'espace, est complexe à tester au sol (car il faut traiter l'hydrogène irradié sortant du moteur). Avec ces types de propulsion, les trajets aller et retour durerait environ six mois, avec un séjour planétaire de 500 à 600 jours. Il est possible de réduire la durée globale de la mission à un an et demi en utilisant un autre type de trajectoire (de type « opposition »), mais les trajets interplanétaires, pendant lesquels les astronautes seront exposés au rayonnement cosmique, dureront alors huit à neuf mois, et le séjour sur Mars ne sera plus que de un à deux mois.



VUE D'ARTISTE d'un véhicule à propulsion nucléaire électrique.

CNES / A.Szamej

Le CNES s'intéresse aussi à la propulsion électrique de très forte puissance pour les missions martiennes habitées, principalement selon deux axes : les trajectoires Terre-Mars en poussée continue et les technologies envisageables pour la génération de puissance. Les trajectoires envisagées se décomposent en plusieurs phases : une phase de spirale continue ou bien d'arcs de poussée (moins consommateurs, mais plus lents) en orbite terrestre, puis une phase de poussée continue interplanétaire : on accélère jusqu'à mi-chemin, puis on « freine » sur le reste de la trajectoire (on inverse en fait la direction de la poussée) et, enfin, une phase de freinage final en spirale pour insérer le vaisseau sur une orbite martienne. Dans ce type de scénario, les astronautes ne sont envoyés qu'une fois le véhicule arrivé sur une orbite terrestre très haute, juste avant le grand arc de poussée interplanétaire.

Combiner propulsion solaire électrique pour la montée en orbite elliptique et propulsion chimique pour le trajet vers Mars est une idée qui n'est pas nouvelle (elle était déjà la solution de référence de la NASA en 1998), mais qui est pertinente pour - une fois encore - réduire la masse à placer en orbite terrestre.

Si on envisage d'effectuer tout le trajet en propulsion électrique en restant à des valeurs de puissance accessibles avec des panneaux solaires, comme cela est suggéré dans l'article, les temps de trajet seront plus longs qu'avec la propulsion chimique classique, augmentant ainsi la durée d'exposition de l'équipage aux conditions difficiles de cette phase. Il existe une autre approche d'utilisation de la propulsion électrique qui consiste,

Le voyage inaugural sera... le moins intéressant. Pendant deux ans, le vaisseau, sans équipage et piloté à distance, suivra une lente spirale à partir de l'orbite terrestre basse, traversant les ceintures (intérieure et extérieure) de radiations de Van Allen pour atteindre une orbite terrestre haute, un voyage peu gourmand en ergol, mais trop long et radioactif pour les astronautes. Quand le vaisseau sera en orbite haute, il pourra entreprendre des manœuvres de survol lunaire et se préparer à une nouvelle mission. Les astronautes rejoindront le vaisseau en décollant à bord d'une fusée à propulsion chimique classique.

au contraire, à réduire le plus possible la durée des voyages. La clef de la réduction du temps de trajet réside dans la substitution des panneaux solaires, qui ne peuvent pas fournir plus de quelques centaines de kilowatts, par un réacteur nucléaire qui alimentera les propulseurs électriques avec une puissance de plusieurs mégawatts.

En poussant ce raisonnement à l'extrême, certains pensaient même que la durée du trajet pourrait être réduite à moins de 40 jours. C'était le cas de l'ex-astronaute américain Chang-Diaz, dont la Société *Ad-Astra* a étudié la possibilité d'une mission de 39 jours s'appuyant sur quatre réacteurs de 50 mégawatts électriques pour déposer un module de 20 tonnes en orbite martienne ! Les études que nous avons menées depuis plusieurs années sur ce sujet, notamment avec l'*ONERA*, ont montré qu'on ne peut malgré tout pas raisonnablement espérer réduire le temps de trajet à moins de trois à quatre mois.

Cependant, d'autres pistes intéressantes se dégagent. Ainsi, avec un seul réacteur de 20 mégawatts, il serait possible de véhiculer des astronautes vers Mars en quatre mois, tout en ayant une masse au départ accessible en trois à cinq tirs de lanceurs lourds.

Nous étudions aussi des scénarios intermédiaires pour lesquels la durée de mission serait la même qu'en propulsion chimique, mais où la propulsion électrique à forte puissance permettrait de réduire le nombre de lanceurs nécessaires, de bénéficier d'options de retour prématué intéressantes et, surtout, d'avoir des fenêtres de départ nettement plus flexibles que celles accessibles en propulsion chimique, qui durent en général un mois au maximum, et n'existent que tous les deux ans environ.

Pour le moment, le scénario de référence n'est pas encore établi. La diversité et la richesse des solutions possibles promettent encore de longues heures de réflexion aux ingénieurs !

Élisa Cliquet, CNES - Direction des lanceurs

Pour un vol d'essai, les astronautes placeront le véhicule sur une orbite qui restera presque toujours au-dessus du pôle Sud de la Lune. De là, ils pourront contrôler une flotte de robots d'exploration et étudier la composition d'anciens dépôts de glace dans les cratères toujours à l'ombre du bassin d'Aitken. Une telle mission offrira les conditions d'une exploration au long cours, tout en restant à quelques jours de la Terre, un gage de sécurité évidente. Après le retour de l'équipage sur Terre, le véhicule interplanétaire restera en orbite terrestre haute, en attente d'un ravitaillement et d'une vérification pour sa première mission vers un astéroïde.

Nous avons étudié tout un éventail de missions de ce type. Certaines déposeraient les astronautes sur de petits objets (de moins de 100 mètres de diamètre) juste au-delà de la Lune et les reconduiraient sur Terre en moins de six mois. D'autres s'aventurerait jusqu'à de gros objets (plus de un kilomètre de diamètre) presque aussi éloignés que Mars et les réachemineraient vers la Terre en deux ans. Se contenter de travailler à une mission plus simple risquerait de limiter les défis et n'apporterait pas d'innovation technique notable.

Mission : 2008 EV5

À l'inverse, tout miser sur une mission plus ambitieuse pourrait retarder à jamais toute exploration intéressante en fixant des objectifs hors de portée. Notre plan se situe entre ces deux extrêmes. Il s'agit d'un voyage aller-retour qui durerait un an, avec un lancement en 2024, et où les astronautes passerait 30 jours à explorer l'astéroïde 2008 EV5. Cet objet, de 400 mètres de diamètre environ, intéresse beaucoup les planétologues : c'est un astéroïde carboné de type C, éventuel vestige de la formation du Système solaire.

Pour échapper à la gravité terrestre, on combinera propulsion ionique et alimentation chimique. Cette combinaison réduira de 40 pour cent la quantité de carburant nécessaire pour échapper au champ d'attraction gravitationnelle de la Terre par rapport à un système entièrement chimique. Une fois que les astronautes auront quitté l'attraction terrestre, les propulseurs à effet Hall s'allumeront et pousseront le véhicule vers sa destination. Parce que le moteur ionique fournit une poussée continue, il se prête à une utilisation flexible.

Les concepteurs de missions pourront développer un ensemble de trajectoires de repli si un dysfonctionnement devait survenir. Ce fut le cas de la mission robotisée japonaise *Hayabusa*, chargée d'étudier l'astéroïde Itokawa, au cours de laquelle plusieurs défaillances ont été résolues grâce à ses moteurs ioniques. Si des problèmes techniques ou budgétaires nous empêchaient de livrer le véhicule interplanétaire à temps pour atteindre l'astéroïde 2008 EV5, nous pourrions choisir une autre cible.

Si nous rencontrions des difficultés, nous nous adapterions. Par exemple, si les carburants très performants étaient trop difficiles à stocker dans l'espace lointain, nous passerions à des carburants moins efficaces et ajusterions la mission.

Dans notre projet, les astronautes auront un mois pour explorer l'astéroïde. Des capsules d'exploration, inspirées des bathyscaphes, pourraient remplacer les combinaisons spatiales, qui sont encombrantes et rendent pénibles les sorties dans l'espace. Une capsule avec des bras de manipulation robotisés réduit non seulement les difficultés, mais offre aussi un habitat pour manger et se reposer. Dans une capsule, un astronaute se déplacerait pendant plusieurs jours d'affilée. La NASA développe déjà un véhicule d'exploration spatial qui pourra être utilisé comme capsule autour des astéroïdes, et le même modèle serait ensuite adapté pour un rover de surface pour la Lune ou Mars.

Les lunes d'abord

Les astronautes commenceront alors leur mission scientifique à la recherche de minéraux inhabituels et d'échantillons qui pourraient dater des premiers jours du Système solaire. Dans la mesure du possible, l'équipage sera composé d'astronautes qui auront à la fois les connaissances scientifiques et les compétences techniques indispensables pour résoudre les difficultés auxquelles ils risquent d'être confrontés pendant le voyage.

Au bout d'un mois, une petite impulsion du moteur ionique suffira pour éloigner le vaisseau de l'astéroïde, et le voyage vers la Terre, d'une durée de six mois, commencera. Quelques jours avant d'atteindre la Terre, l'équipage montera à bord d'une capsule, se séparera du vaisseau principal et mettra le cap vers le site d'amerrissage. La manœuvre pour se mettre directement en orbite autour de la Terre étant très coûteuse en énergie, le vaisseau, vide, continuera sur son orbite autour du Soleil. Son énergie diminuera progressivement de façon à ce qu'il revienne en orbite terrestre un an plus tard pour attendre sa prochaine mission. Son moteur ionique et son module d'habitat seront réutilisés plusieurs fois.

Après plusieurs missions d'un an vers des astéroïdes, des améliorations des équipements et des boucliers de protection contre les rayonnements ouvriront la voie vers Mars. La première mission martienne pourrait en fait ne pas se poser sur la planète rouge : elle explorerait ses deux lunes, Phobos et Deimos. Une telle mission durerait deux ans et demi au total. Mais pourquoi donc se donner tout ce mal pour aller jusqu'à Mars sans s'y arrêter ? Parce que se poser et redécoller sont des tâches extrêmement complexes. Des missions vers les lunes martiennes permettraient aux astronautes

de se roder pour les voyages interplanétaires avant de tenter l'épreuve de se poser sur Mars, de s'y promener et de redécoller.

Produire du carburant sur Mars

Les ingénieurs ont déjà proposé diverses stratégies pour optimiser la flexibilité et minimiser le coût d'une mission vers Mars. Dans les plus convaincantes, les habitats et les systèmes d'exploration seraient installés à l'avance pour servir de base opérationnelle dès l'arrivée des astronautes. Cet équipement serait acheminé par transport (ionique) lent. Sur Mars, il produirait du carburant soit à partir du dioxyde de carbone atmosphérique mélangé à de l'hydrogène apporté de la Terre, pour libérer du méthane et de l'oxygène, soit en électrolytant de

La première mission martienne pourrait en fait ne pas se poser sur la planète rouge : elle explorerait ses deux lunes, Phobos et Deimos.

l'eau du sous-sol gelé, pour donner de l'hydrogène liquide et de l'oxygène. En évitant de décoller de la Terre avec le carburant nécessaire au retour (il serait produit sur Mars), on réduirait notamment la masse lancée de la Terre (scénario Mars Direct).

Le mouvement relatif de la Terre et de Mars donnera aux astronautes environ une année (terrestre) et demi avant que les planètes ne retrouvent leur alignement : ils auront tout le temps d'explorer la planète rouge. À la fin de leur séjour, ils monteront à bord d'une fusée remplie du carburant produit sur place, se propulseront en orbite martienne, rejoindront un véhicule interplanétaire utilisé pour la campagne vers les astéroïdes et reviendront sur Terre. Le véhicule pourra même être placé sur une trajectoire cyclique qui fera la navette entre la Terre et Mars, utilisant la gravitation pour se propulser sans énergie.

Même en déposant à l'avance du matériel, un vaisseau martien et sa fusée de retour seront extrêmement lourds et auront besoin pour décoller du plus gros des lanceurs SLS prévus. L'approche par étapes que nous recommandons permettra à la NASA de se concentrer sur la résolution des problèmes véritablement ardu, tels que la protection contre les rayonnements.

Aujourd'hui, les principaux obstacles à l'exploration ne sont pas techniques, mais financiers : il s'agit de trouver comment en faire toujours plus avec toujours moins. C'est la condition pour que l'exploration spatiale trouve son second souffle. Avec pour objectif passionnant d'aller flâner parmi les planètes.

articles

- D. LANDAU et N. STRANGE, *Near-Earth asteroids accessible to human exploration with high-power electric propulsion*, Conférence des spécialistes en astronautique AAS/AIAA, Girdwood, 2011.
<http://tinyurl.com/ElectricPath>

- J.-R. BROPHY et al., *300-kW solar electric propulsion system configuration for human exploration of near-Earth asteroids*, 47^e conférence Joint Propulsion AIAA/ASME/SAE/ASEE, San Diego, 2011.
<http://tinyurl.com/300kWSEP>

- E. CHOUERI, *L'essor des moteurs à plasma*, in *Pour la Science*, n° 379, mai 2009.
http://bit.ly/pls379_plasma