couches peintes sur lesquelles de minces feuilles d'or étaient déposées pour la réalisation de fonds dorés, étaient généralement étendues à la colle de peau, et non avec du blanc d'œuf ainsi que le recommandait Cennino Cennini.

Ces études par des colorations révèlent des évolutions des techniques picturales telle l'utilisation d'émulsions. L'utilisation de liants qui mélangent huile siccative et protéines sous forme d'émulsion facilite l'étalement et accélère le séchage, tout en améliorant la représentation des chairs ou des couleurs claires (les couches ne jaunissent pas). Ces liants émulsionnés ont été utilisés par de nombreuses écoles artistiques : par les Italiens (Raphaël, Léonard de Vinci, etc.), par les Espagnols du Siècle d'Or, par les Flamands tels que Rubens.

L'action du «Noir Amido» sur un microprélèvement de peinture issu du poignet du jeune homme du tableau *La Diseuse de Bonne Aventure* du Caravage révèle des amas de protéines de taille comprise entre 2 et 10 micromètres qui apparaissent fortement colorées en bleu au sein de la matrice huileuse, demeurée claire. Cette technique de coloration *in situ* permet de caractériser la taille des amas, la finesse et l'homogénéité de leur répartition, lesquelles sont caractéristiques de chaque artiste. Ainsi l'émulsion utilisée par Le Nain pour représenter un rehaut de la nappe blanche dans *Les pèlerins d'Emmaüs* diffère de celle utilisée par Le Caravage, aussi bien par la taille des amas que par leur répartition.

La technique de coloration mise au point révèle ainsi l'art des peintres, mais elle peut évidemment dépister aussi les contrefaçons. Nous l'utilisons aujourd'hui pour analyser le vieillissement des couches peintes.

Cécile CREN-OLIVÉ, Jean-Marie AUBRY, Christian ROLANDO, Élisabeth. MARTIN,
Université de Lille et L. R. M. F.

Les neuropuces

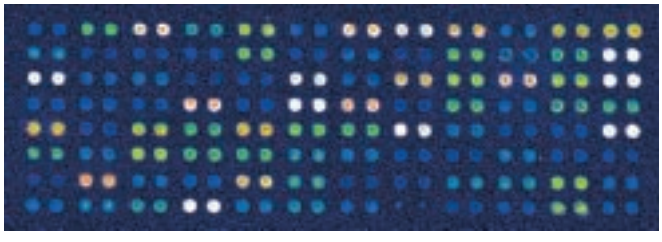
Toutes les cellules du cerveau sont différentes ! Aux débuts de la neurologie, l'anatomie constituait le seul critère de différenciation : par exemple, on a ainsi distingué les neurones pyramidaux, dont le corps cellulaire a la forme d'une pyramide. Puis, avec le développement de l'électrophysiologie, les neurones ont été classés selon les propriétés du signal électrique qui parcourt leur axone : chaque neurone est caractérisé par les propriétés physiques du signal électrique qu'il véhicule. Enfin, avec l'avènement de la biologie moléculaire, les neurones ont été définis par les molécules qu'ils synthétisent et, notamment, par les neuromédiateurs qui permettent au signal électrique de franchir les espaces – les synapses – qui séparent les neurones. Toutefois, chacune de ces méthodes n'autorise la distinction que de groupes de neurones qui, malgré des points communs, sont différents.

En utilisant des biopuces, capables de détecter des dizaines de molécules simultanément, l'équipe de Jean Rossier, de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, a perfectionné l'analyse moléculaire des cellules nerveuses et mis au point des méthodes d'étude des gènes exprimés. Depuis quelques années, l'électrophysiologie et la biologie moléculaire ont allié leur pouvoir pour l'étude des neurones : on enregistre le signal électrique qui parcourt le neurone dont on aspire ensuite le contenu ; on y identifie les ARN messagers qui reflètent l'activité des gènes. Selon les besoins des cellules, les gènes sont transcrits sous forme d'ARN messagers, à partir desquels les protéines sont synthétisées. Lorsqu'on caractérise les ARN messagers présents, on connaît les protéines synthétisées par une cellule à instant donné.

Jusqu'à présent, chaque ARN messager prélevé était recopié en grand nombre, sous forme d'ARN complémentaire, par une technique nommée PCR. Les molécules amplifiées étaient identifiées par une méthode qui limitait l'analyse à 30 ADN différents. Des biopuces, nommées ici neuropuces, ont remplacé cette méthode : ce sont des plaques de verre d'environ un centimètre carré sur lesquelles sont greffés 96 fragments d'ADN parfaitement connus (on connaît également la position de chacun d'eux sur la puce), par exemple, des gènes de neuropeptides, d'enzymes de synthèse de neuromédiateurs, ou encore, de sous-unités de récepteurs. Parmi les différentes méthodes de fixation, les neurobiologistes ont choisi d'utiliser une «colle moléculaire» de polylysine (la lysine est l'un des acides aminés qui constituent les protéines) ; les molécules d'ADN s'y fixent. Synthétisés à partir des ARN messagers et amplifiés par PCR, les ADN à analyser sont marqués par des molécules fluorescentes. Les ADN libres ainsi marqués sont déposés sur une neuropuce ; ils se fixent sur les fragments d'ADN qui leurs sont complémentaires ; l'excès des ADN non fixés est ensuite éliminé par un lavage et on observe la fluorescence de la puce. Les régions fluorescentes indiquent la fixation d'un fragment d'ADN complémentaire. De plus, l'intensité de cette fluorescence rend compte de la quantité d'ARN messagers.

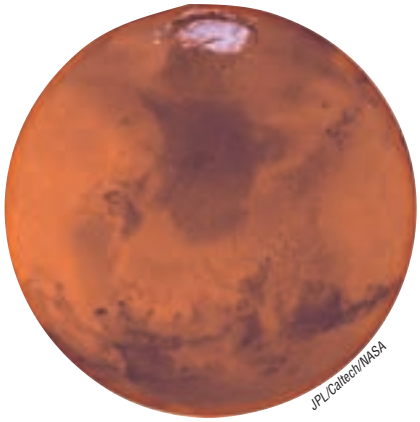
Grâce aux neuropuces, J. Rossier a montré que les interneurones (des neurones à axones courts qui véhiculent l'information sur de petites distances) du néocortex (les couches extérieures du cerveau), dont le signal électrique est irrégulier, sécrètent un neuromédiateur nommé peptide vasomoteur intestinal ; on savait que ce peptide est un régulateur du métabolisme et du flux sanguin intestinal et l'on a découvert qu'il a une action comparable dans le cerveau.

Les pharmacologues supposent maintenant que le fonctionnement de ces interneurones serait altéré dans plusieurs maladies neuropsychiatriques. Grâce aux biopuces, utilisées également pour l'identification rapide de virus ou de bactéries pathogènes, les analyses moléculaires qui requéraient plusieurs jours et manquaient de précision s'effectuent aujourd'hui en quelques heures et sont plus fiables.



Les ARN messagers du cerveau d'un rat ont été recopiés en ADN et amplifiés par PCR. Le produit de l'amplification a été rendu fluorescent et déposé sur une lame de verre où sont attachés des fragments de 96 gènes de la neurotransmission. Après lavage, la fixation des ADN est révélée par la fluorescence. L'intensité de celle-ci est visualisable arbitrairement suivant l'échelle des couleurs de l'arc-en-ciel : bleu pour les gènes faiblement transcrits en ARN, et par ordre croissant, vert, jaune, rouge et blanc pour les gènes les plus fortement exprimés.

Pourquoi aller sur Mars?


JPL/Caltech/NASA

GLENN ZORPETTE

L'objectif principal des missions sur Mars est la recherche de la vie. Cet objectif justifie-t-il l'envoi d'une mission habitée?

L'exploration du Globe a duré des siècles, des premiers périples méditerranéens jusqu'aux explorations arctiques et antarctiques, au début du XXe siècle, en passant par les voyages de Christophe Colomb. Ce dernier partit vers l'Ouest à la recherche de meilleures routes commerciales avec l'Orient, mais il voulait aussi montrer la grandeur de l'Espagne. De même, la conquête de la Lune joua un rôle symbolique important lors de la guerre froide. Si les grandes explorations ont ainsi mêlé les intérêts commerciaux, politiques et militaires, les explorateurs ont toujours contribué aux sciences (biologie animale ou végétale, ou géologie). Ainsi, notre compréhension de l'histoire géologique de la Lune résulte pour une grande partie des missions *Apollo*.

Aujourd'hui, Mars est une nouvelle *terra incognita*. Les perspectives d'un gain financier à court terme étant douteuses, la guerre froide reculant dans les mémoires et la coopération internationale étant nécessaire aux grands projets spatiaux, d'autres impératifs que le profit ou le nationalisme seront nécessaires pour que les hommes impriment leurs pas sur la surface de la planète rouge. La science, et elle seule, sera-t-elle enfin le moteur de l'exploration?

Cette question en amène d'autres : sur Mars, pour quelles expériences les êtres humains sont-ils indispensables ? Ces expériences fourniraient-elles des résultats qui justifieraient l'envoi d'êtres humains dans l'espace interplanétaire ?

De l'eau et des fossiles

Avec Mars, les enjeux scientifiques sont considérables. La question de l'existence de vie sur Mars ou celle d'une vie éteinte ont été ravivées par des observation des dernières missions : de l'eau liquide a probablement coulé en abondance sur la planète rouge, et des fossiles de bactéries auraient été emportés jusqu'à la Terre dans une météorite martienne. Une indication claire de vie, passée ou présente, sur Mars aiderait à comprendre dans quelles conditions la vie peut apparaître ; si l'on établissait qu'elle est apparue indépendamment sur la Terre et sur Mars, les exobiologistes seraient conduits à penser que la vie existe ailleurs dans l'Univers.

Pourquoi penser que Mars avait de l'eau liquide à sa surface ? En 1999, la sonde *Mars Global Surveyor*, en orbite autour de la planète rouge depuis 1997, a photographié un chenal qui aurait été creusé par l'érosion de l'eau durant des milliers d'années. Cette découverte fait suite au succès de la petite sonde robotisée *Mars Pathfinder*, qui se posa sur la planète en juillet 1997.

Cette dernière semblait montrer que la NASA avait raison de changer sa stratégie, en abandonnant les missions ambitieuses pour des missions plus nombreuses, plus simples et moins chères *(cheaper, faster, better)*. Malheureusement l'envoi des deux engins suivants échoua. La perte de *Mars Climate Orbiter* et de *Mars Polar Lander* ont rappelé amèrement que même des missions robotisées relativement simples peuvent échouer.

Bien que la NASA n'ait pas de mandat officiel pour envoyer des astronautes sur Mars, certaines des missions robotisées prévues devaient effectuer des expériences qui prépareront des missions habitées. Après le succès de *Mars Pathfinder*, des équipes de la NASA évoquaient une mission habitée vers 2020. Un tel calendrier paraît aujourd'hui optimiste.

Plutôt que de s'apitoyer sur les récents échecs, les partisans de l'exploration humaine se fondent sur les analyses controversées des météorites martiennes et sur les résultats étonnants de *Mars Global Surveyor* pour envisager les découvertes et les progrès qu'accompliraient des scientifiques sur Mars. Selon Robert Zubrin, par exemple, on ne résoudra la question de l'évolution de la vie sur Mars que si des hommes s'y rendent, car la recherche de fossiles requiert des capacités qui dépassent celles des robots motorisés actuels : qui mieux qu'un être humain explorera de grandes superficies, piochera, échantillonnera des roches, analysera les différentes couches géologiques et brossera la poussière pour faire finalement apparaître le fossile convoité ?

L'exploration complète de Mars à l'aide de robots demanderait des décennies, voire des siècles : de nombreuses missions robotisées et, donc, de lancements seraient nécessaires ; or, en augmentant le nombre de lancements, on augmente considérablement le temps que prendrait un programme robotisé, car on ne peut lancer de fusées vers Mars que tous les 26 mois terrestres, lorsque les planètes sont situées

1. LES PREMIERS PAS SUR MARS seront bien plus difficiles que sur la Lune si la surface de la planète rouge est balayée par des tempêtes de poussières. On envisage aujourd'hui un module de descente *(à gauche)* distinct du véhicule de remontée *(à l'arrière-plan)*, qui reconduira les astronautes vers le vaisseau orbital, pour le voyage de retour.

Pat Rawlings

de manière que le trajet dure moins d'un an. Certains doutent qu'un programme conservera l'intérêt du public et des élus s'il dure des décennies.

D'autres partisans des vols habités les justifient en observant que la vie est probablement sous la surface de Mars : l'atmosphère contient des traces d'un composé fortement oxydant, peut-être du peroxyde d'hydrogène, de sorte que les couches supérieures du sol martien sont dépourvues de matière organique. On devra rechercher les micro-organismes en profondeur, là où la matière organique est protégée du composé oxydant et des rayonnements ultraviolets du Soleil. Les prochaines sondes emporteront de quoi forer plusieurs centimètres de roche ou creuser à quelques mètres de profondeur dans le sol. Toutefois, si la vie n'apparaît pas à ces faibles profondeurs, on ne pourra clore le dossier de la vie sur Mars avant d'avoir creusé à plusieurs centaines de mètres, voire à quelques kilomètres, sous la surface. Comment automatiser de tels forages?

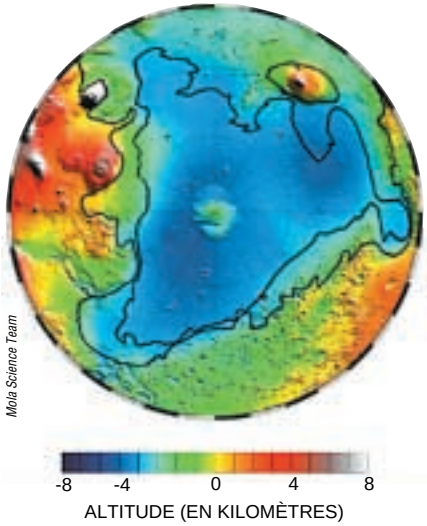
La communauté scientifique reconnaît généralement qu'une mission habitée sur Mars ferait progresser la planétologie, mais on débat de l'intérêt d'une telle mission par rapport à des missions robotisées. La comparaison est difficile, parce que les techniques évoluent rapidement. Quelles seront les capacités des robots dans cinq ou dix ans, par exemple? Aujourd'hui, les robots disponibles ne peuvent pas chercher les fossiles de micro-organismes. Le petit robot *Sojourner*, apporté par *Mars Pathfinder*, n'a voyagé que 106 mètres autour du site d'atterrissage avant que *Mars Pathfinder* n'arrête de relayer les communications, et les meilleurs microprocesseurs de ce genre de robot n'ont pas même l'intelligence d'une fourmi.

La télécommande de robots mobiles, munis de capteurs et de manipulateurs, semblait initialement intéressante, mais le délai de communication aller et retour avec Mars est de 40 minutes, ce qui semble insuffisant pour un travail de terrain sérieux.

Certes, les missions spatiales habitées sont coûteuses : envoyer des êtres humains sur Mars coûterait 130 à 360 milliards de francs. Toutefois, selon R. Zubrin, même si les missions habitées sont près de dix fois plus chères que les missions automatiques, elles sont plus rentables : une mission habitée ramènerait 100 fois plus d'échantillons ramassés sur une superficie 10 000 fois supérieure.

Évidemment, cette idée des vols habités ne fait pas l'unanimité : Arden Albee, de l'Institut de technologie de Californie, estime que l'envoi d'humains est difficilement justifiable, et une étude effectuée en 1986 par le Comité pour l'exploration du Système solaire de la NASA a établi qu'une mission robotisée aurait pu collecter tous les échantillons géologiques lunaires ramassés lors de la mission *Apollo 15*. En un jour de cette mission, les astronautes David Scott et James Irwin ont conduit un véhicule sur 11,2 kilomètres, prélevant des échantillons en cinq points ; ils ont ramassé 45 roches, 17 échantillons de sol meuble et huit carottes de sol. En 155 jours, un robot automobile aurait effectué le même travail. Pendant la majeure partie du temps, le robot serait resté immobile tandis que les experts, sur Terre, auraient planifié la manœuvre suivante. Le prélèvement d'échantillons en lui-même aurait pris 70 jours, durant lesquels le robot n'aurait roulé que 31 heures.

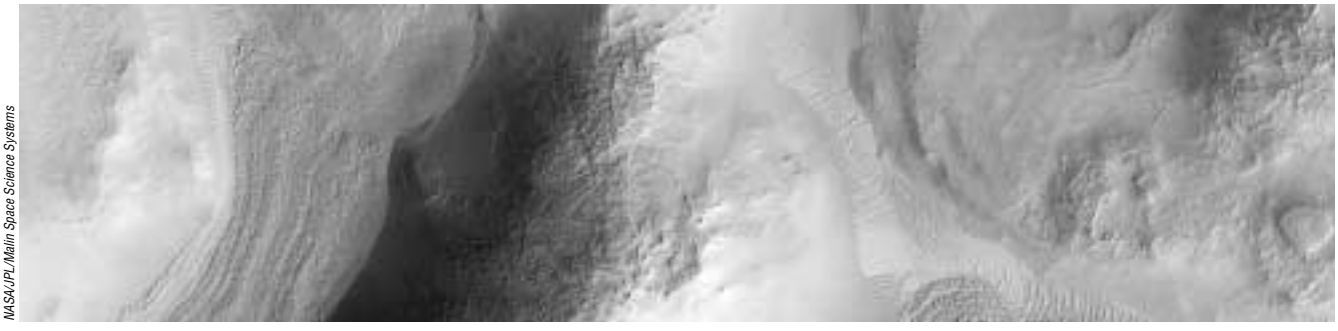
Toutefois Mars n'est pas la Lune. L'énorme territoire de la planète rouge, avec ses formations géologiques éton-



Mola Science Team

Avec l'autorisation de Smith et al. © 1999 AAAS

2. UN OCÉAN a peut-être recouvert le pôle Nord de Mars jusqu'à une profondeur moyenne de quelques centaines de mètres. Les lignes noires, sur l'image en haut à gauche, indiquent les rivages possibles, et l'échelle de couleur montre l'altitude en kilomètres. Une projection des altitudes le long du méridien 0 degré de longitude *(ci-dessus)* indique que le pôle Sud de Mars est environ six kilomètres plus haut que le pôle Nord, d'où la possibilité pour l'eau de s'écouler du Sud vers le Nord.



NASA/JPL/Malin Space Science Systems

3. CETTE IMAGE très précise de la surface de Mars a été prise le 1er janvier 2000. Elle montre des structures inhabituelles formées par des mécanismes inconnus. Nommée *Nilosyrtis Mensae*, la zone représentée est dans l'hémisphère Nord martien.

nantes et son climat inhospitalier, sera vraisemblablement exploré par une combinaison d'hommes et de machines. Pascal Lee et ses collègues du Centre Ames de la NASA préparent cette exploration en étudiant le cratère Haughton, dans le Nord canadien. Dans ce désert glacé, ils testent les techniques qui seront utilisées par les futurs explorateurs de la planète rouge. Dans leur quête d'échantillons, P. Lee et ses collègues ont parcouru des centaines de kilomètres et gravi d'innombrables affleurements, dont la plupart n'auraient pu être franchis par un robot non spécialisé.

Coopération pour Mars

L'exploration et la découverte sont deux processus itératifs dont seul l'adaptabilité humaine et la mobilité viendront à bout en un temps raisonnable. Cependant, des machines semi-autonomes seront nécessaires pour effectuer les tâches trop laborieuses ou dangereuses pour les hommes, comme les reconnaissances aériennes, la construction de dépôts, de caches et d'abris pour des longues excursions sur le terrain, et le transport et la conservation des grandes quantités d'échantillons que les géologues ramasseront.

Qui se chargera d'envoyer des hommes sur Mars? Le nationalisme n'est pas un moteur suffisant dans ce cas, car l'envoi d'hommes sur Mars est au-delà des possibilités d'un seul pays. En revanche, on peut imaginer qu'un groupe de nations industrialisées cherchera la gloire en allant sur Mars. Ainsi l'exploration de l'espace profiterait d'un «extranationalisme».

On peut également imaginer que des grandes entreprises contribuent à ce genre de projet, afin de se faire de la publicité, de bénéficier des avancées techniques obtenues au cours du projet ou de vendre les droits de retransmission télévisuelle. De nombreuses aventures humaines, des Jeux olympiques au récent tour du monde en ballon, ont bénéficié du soutien d'entreprises privées. Un projet de 350 milliards de francs éclipserait tous les autres. Est-ce trop cher payer pour laisser une marque indélébile dans l'histoire.

Glenn ZORPETTE est journaliste à la revue *Scientific American*.

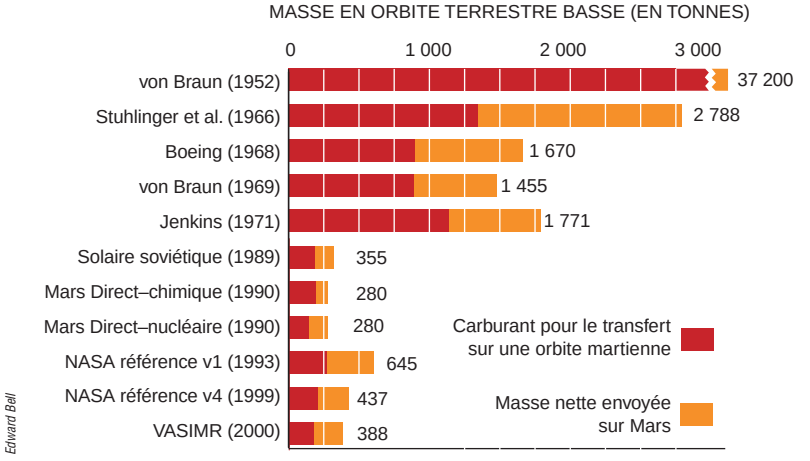
Comment aller sur Mars

GEORGE MUSSER • MARK ALPERT

Les solutions techniques pour aller sur Mars sont nombreuses. La difficulté sera de choisir la meilleure.

La difficulté d'un voyage vers Mars a de quoi décourager les plus entreprenants : la planète ne s'approche jamais à moins de 80 millions de kilomètres de la nôtre, de sorte qu'un aller et retour prendrait plusieurs années. Les ingénieurs ont des solutions pour envoyer des hommes sur la planète rouge et les faire ensuite revenir sains et saufs, mais le coût d'un tel projet est considérable.

Le coût d'une mission sur Mars dépend essentiellement de la masse du véhicule spatial, car un engin spatial léger nécessite moins de carburant. Ce dernier ne coûte pas cher en lui-même : c'est le coût du lancement en orbite terrestre qui est proportionnel à la masse du véhicule, laquelle est à 80 pour cent constituée de carburant. Tous les projets de missions vers Mars se sont souciés de minimiser la masse du véhicule sans compromettre la sécurité ou l'intérêt scientifique. En 1952, Wernher von Braun envisageait la construction d'une armada de véhicules spatiaux propulsés par des fusées chimiques classiques ; il estimait que la masse totale au décollage atteindrait 37 200 tonnes. Ne serait-ce que placer une telle flotte en orbite terrestre coûterait des milliers de milliards de francs. Depuis, les ingénieurs ont imaginé des allégements par l'utilisation de fusées nucléaires ou électromagnétiques à meilleur rendement, par la réduction du nombre d'astronautes, par la réduction du niveau de redondance des équipements et par la fabrication du carburant de retour sur Mars *(voir la figure 1)*.



Edward Bell

1. LA MASSE DES ENGINS des missions proposées pour atteindre Mars, déterminante pour le coût, a progressivement diminué. Chaque estimation de la masse d'une mission, donnée au départ pour une orbite terrestre basse, inclut l'équipage et les vols nécessaires pour une équipe d'astronautes (véhicule de l'équipage, cargo, carburant, etc.).

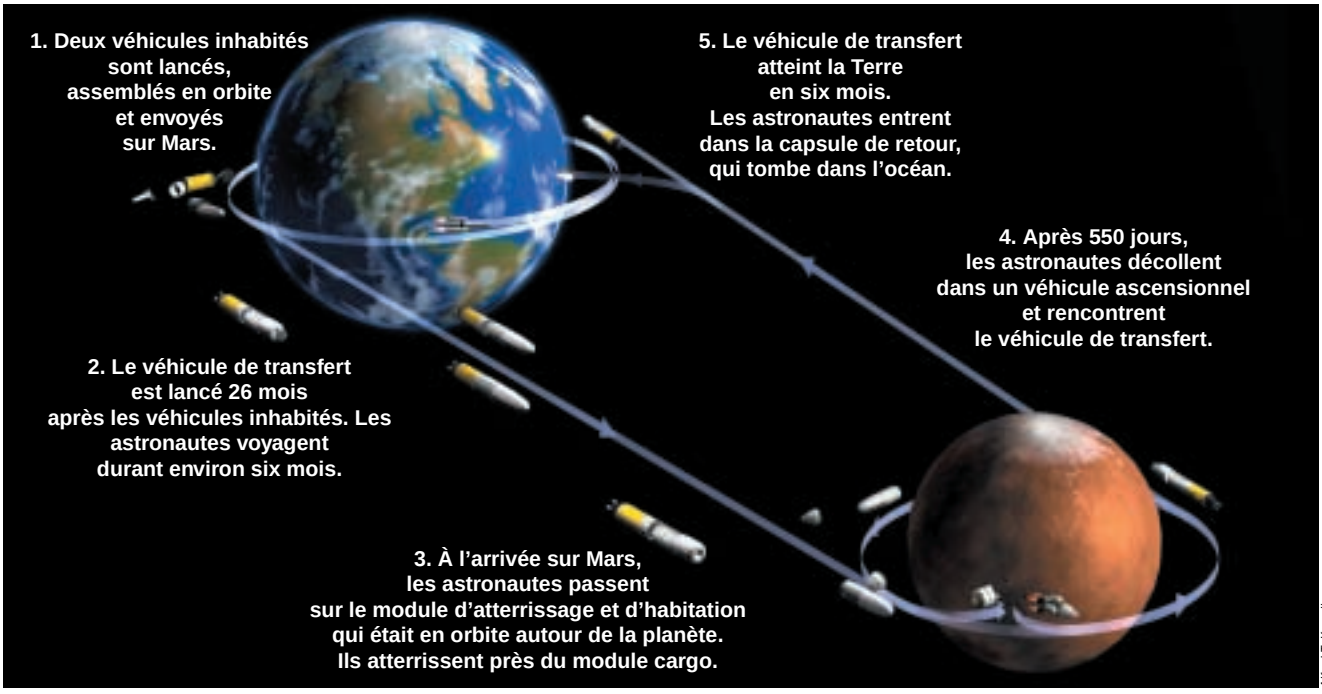
Aujourd'hui, la mission la plus simple, *Mars Direct*, coûterait 100 milliards de francs en frais initiaux, répartis sur une décennie, plus dix milliards de francs par mission (voir *Un direct pour Mars*, page 38). Le projet de la NASA, nommé «mission de référence», reprend plusieurs idées de *Mars Direct*, mais coûte environ deux fois plus cher, avec une sécurité accrue et un équipage plus nombreux (six astronautes au lieu de quatre).

Ce projet envisage trois engins spatiaux : un module automatique de matériel qui dépose un véhicule ascensionnel et une usine de carburant à la surface de Mars ; un module habitable inoccupé, qui se place en orbite martienne ; et un module de transfert de l'équipage, qui, une fois les deux premiers arrivés à destination, se mettra en route lorsque Mars et la Terre seront à nouveau alignés, 26 mois après les premiers lancements. Le module de transfert emmènerait les astronautes vers Mars et s'amarrerait au module habitable. Les astronautes changeraient de vaisseau, descendraient sur la surface, y resteraient 500 jours, puis repartiraient avec le véhicule ascensionnel. Le module de transfert, qui aurait attendu en orbite, les ramènerait sur la Terre. Tous les 26 mois partirait un nouveau trio d'engins spatiaux, afin de construire finalement une base permanente.

Un tel programme coûterait moins cher que la Station spatiale internationale ou que le programme *Apollo*. Toutefois, la NASA ayant la réputation de dépasser ses budgets, de nombreux partisans des missions vers Mars se sont réunis dans diverses organisations, comme l'Association Planète Mars *(Mars Society)*, afin de mettre au point d'autres projets.

Le plus avancé est celui qui émane de *ThinkMars*, un groupe d'étudiants de l'Institut de technologie du Massachusetts et de l'Université Harvard. Ce groupe propose la création d'une société à but lucratif pour gérer le projet Mars, en sous-traitant les diverses tâches à des sociétés privées et aux centres de recherche de la NASA. Les gouvernements de différents pays achèteraient des places ou de l'espace pour des expériences à prix réduit. Le reste du financement proviendrait de la vente de publicité, de droits de retransmission télévisuelle et de brevets issus des recherches.

Après avoir montré qu'une mission habitée est techniquement faisable, les partisans de ce type d'opérations cherchent aujourd'hui à convaincre les contribuables, les élus et les industriels.



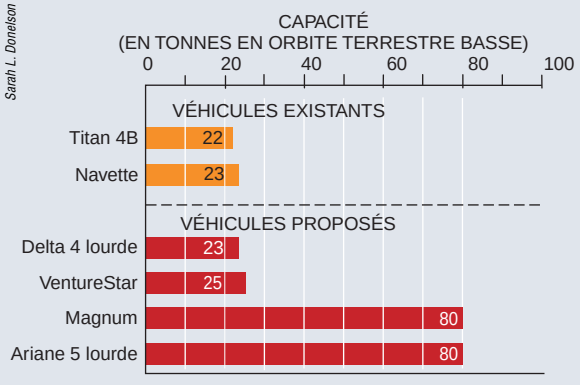
Alfred T. Kamajian

2. LA MISSION de référence de la NASA.

Lancement et assemblage

Toute expédition pour Mars commence par le lancement du véhicule spatial en orbite terrestre basse (à une altitude de 200 à 500 kilomètres). Le problème principal est que tout engin habité à propulsion chimique doit avoir une quantité énorme de carburant pour aller jusqu'à Mars, de sorte qu'il sera extrêmement lourd : au moins 130 tonnes, peut-être même le double. Aucun lanceur spatial actuel ne place une telle masse en orbite. Les navettes spatiales et les fusées de grande capacité, tel *Titan 4B*, emportent des charges utiles de 25 tonnes au maximum. De surcroît, avec des coûts actuels de lancement par la navette qui atteignent 100 millions de francs par tonne, le coût d'un engin spatial pour Mars est prohibitif.

Sarah L. Donelson



LES LANCEURS ACTUELS sont insuffisants pour assurer une mission humaine sur Mars. Propulser un vaisseau de 130 tonnes en orbite terrestre nécessiterait six lancements d'*Ariane 5*, de *Titan 4B*, d'une navette spatiale, de *Delta 4 Heavy* ou de *VentureStar*, mais seulement deux lancements de la fusée *Magnum* ou d'*Ariane 5* version lourde.

Les sociétés aérospatiales mettent au point des fusées plus rentables et des lanceurs réutilisables, mais aucun n'enverrait en orbite une charge utile de 130 tonnes. La fusée *Saturne 5* de l'époque d'*Apollo* ferait l'affaire, tout comme la fusée russe *Energia*, mais les lignes de fabrication de ces lanceurs ont été démantelées. Selon toute vraisemblance, le véhicule spatial martien devra être lancé par étapes, puis assemblé en orbite, de préférence grâce à des manœuvres d'amarrage commandées à partir de la Terre. Une navette spatiale transporterait ensuite l'équipage jusqu'au véhicule assemblé.

Afin de minimiser le nombre de lancements et de rendez-vous en orbite, les ingénieurs de la NASA ont conçu une fusée, nommée *Magnum*, qui emmènerait 80 tonnes en orbite. Ainsi, deux lancements suffiraient pour le déploiement du véhicule pour Mars (le diagramme ci-contre compare les lanceurs). La fusée *Magnum* utiliserait les mêmes pas de tir et les mêmes fusées d'appoint à poudre que les navettes spatiales. Ces dernières pourraient être attachées à une nouvelle fusée bi-étage équipée de trois moteurs RD0120, de conception russe. La fusée *Magnum* emporterait une charge utile de 28 mètres de long, et le revêtement de l'étage supérieur de la fusée servirait également d'écran thermique pour le véhicule martien. La réutilisation de matériel existant réduirait le coût de cette fusée : environ 12 milliards de francs pour la conception et 12 millions de francs par tonne de charge utile à chaque lancement (des coûts dix fois inférieurs à ceux de la navette spatiale). Par ailleurs, on peut construire un lanceur encore plus puissant à partir des composantes de la navette spatiale. *Ares*, ce nouveau lanceur, utiliserait un moteur d'étage supérieur à forte poussée pour placer le véhicule habité directement sur une trajectoire vers Mars.

En Europe, le Centre national d'études spatiales a étudié en 1991 une version lourde du lanceur *Ariane 5* : quatre boosters au lieu de deux, cinq moteurs SNECMA *Vulcain* au lieu d'un sur le corps central, un deuxième étage cryotechnique équipé d'un moteur *Vulcain*. Cette fusée serait capable de mettre plus de 80 tonnes en orbite basse et d'envoyer 26 tonnes vers Mars. Ce lanceur a plutôt été dimensionné pour des opérations lunaires, mais il entre dans la catégorie des lanceurs lourds susceptibles d'utilisation pour les opérations martiennes. Sa charge utile pourrait être nettement plus élevée, compte tenu des améliorations qui seront apportées aux éléments du lanceur *Ariane 5* d'ici là.

Les systèmes de propulsion

Comment propulser un véhicule spatial habité, d'une orbite terrestre jusqu'à Mars ? Les différents systèmes proposés ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le principal compromis technique est entre la poussée de la fusée et son rendement énergétique. Les systèmes à forte poussée communiquent une accélération supérieure, mais ils consomment en général plus de carburant. Les systèmes à faible poussée prennent plus lentement de la vitesse, mais ils consomment moins. Les deux systèmes sont complémentaires : les fusées à forte poussée transporteraient rapidement les astronautes, tandis que les systèmes à faible poussée convoieraient plus lentement du matériel ou des modules d'habitation vides.

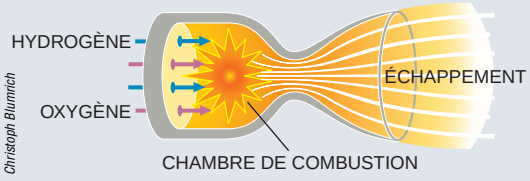
CODE DE COULEURS

- CARBURANT
- COURANT ÉLECTRIQUE
- CHAMP MAGNÉTIQUE
- OXYGÈNE

LA PROPULSION CHIMIQUE

La propulsion chimique est une technique éprouvée : la combustion de l'hydrogène et de l'oxygène produit des gaz dont la détente pousse la fusée. Elle engendre une poussée supérieure à celle de la plupart des autres techniques, mais avec un rendement inférieur. Les fusées chimiques nécessiteraient des quantités prodigieuses de carburant pour propulser un véhicule habité vers Mars. L'un des projets envisagés nécessite, en orbite terrestre basse, un engin de 233 tonnes, dont 166 tonnes d'hydrogène et d'oxygène liquides. Ses sept moteurs RL-10 (un moteur classique utilisé sur de nombreuses fusées américaines) seraient disposés en trois étages de propulsion. Le premier étage enverrait le véhicule en orbite elliptique haute autour de la Terre ; le deuxième placerait le véhicule sur une trajectoire vers Mars ; et le troisième le ferait retourner vers la Terre à la fin de la mission. Chaque étage serait mis à feu pendant quelques minutes seulement, puis serait largué.

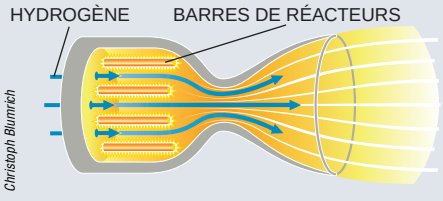
Poussée : 110 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 4,5 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 minutes
Fraction de masse : 55 pour cent



LA PROPULSION THERMONUCLÉAIRE

Dans les années 1960, le gouvernement américain a construit et testé au sol des fusées thermonucléaires dans le cadre du programme *Rover/NERVA*. Dans ces moteurs, un flot d'hydrogène liquide traverse un réacteur à cœur nucléaire solide, où le gaz est chauffé à plus de 2 500 °C avant d'être éjecté à grande vitesse par la tuyère de la fusée. La propulsion nucléaire fournit deux fois plus de quantité de mouvement par kilogramme de carburant que les fusées chimiques les plus performantes, et les réacteurs produisent de l'électricité pour le véhicule spatial. Un vaisseau habité de 170 tonnes, avec trois moteurs nucléaires et environ 90 tonnes d'hydrogène liquide, atteindrait Mars en six ou sept mois. Toutefois le public s'oppose à l'envoi dans l'espace d'un réacteur nucléaire : plusieurs systèmes de propulsion qui utilisent également des réacteurs nucléaires ont été aujourd'hui écartés.

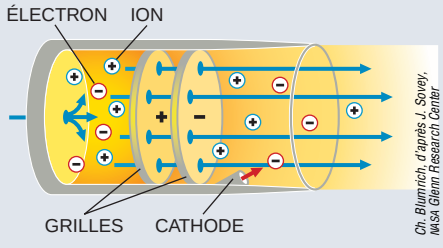
Poussée : 67 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 9 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 27 minutes
Fraction de masse : 32 pour cent



LA PROPULSION IONIQUE

Conçue dans les années 1950, la propulsion ionique est l'une des techniques qui utilisent les champs électriques (plutôt que la chaleur) pour éjecter le gaz propulseur. Un gaz, comme le césium ou le xénon, passe dans une chambre où il est ionisé par un canon à électrons semblable à celui des tubes cathodiques des téléviseurs. Une tension électrique appliquée entre deux grilles de métal extrait les ions positifs, qui traversent la grille et sont éjectés dans l'espace. Simultanément une cathode, à l'arrière du moteur, évacue les électrons dans le faisceau d'ions, de manière que le véhicule spatial n'accumule pas des charges négatives. En 1998, la sonde *Deep Space 1* était équipée d'un tel moteur. Celui-ci a consommé 2,5 kilowatts d'énergie solaire et produit une poussée faible (0,1 newton, c'est-à-dire la force d'un souffle humain), mais longue (plusieurs mois). Malheureusement, les grilles, qui à la fois accélèrent et retiennent les particules, ne peuvent être dimensionnées pour des moteurs de puissance voisine du mégawatt, requis pour les missions habitées vers Mars. De surcroît, un système de propulsion ionique nécessiterait de l'énergie produite par des réacteurs nucléaires, car des panneaux solaires de plus de 100 kilowatts seraient probablement difficiles à manier.

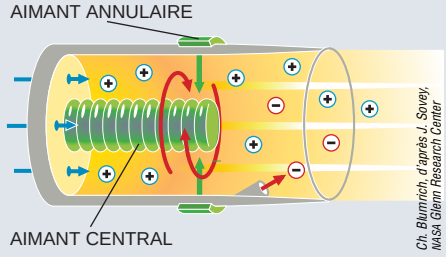
Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 30 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 79 jours
Fraction de masse : 22 pour cent



LA PROPULSION À EFFET HALL

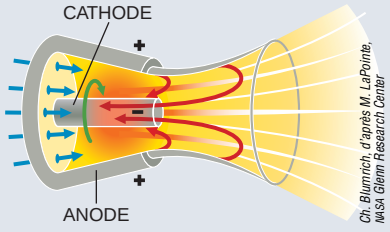
Comme les systèmes de propulsion ionique, les moteurs à effet Hall utilisent un champ électrique pour accélérer des particules chargées positivement (en général, des noyaux de xénon). Le moteur crée différemment le champ électrique : un anneau d'aimants engendre d'abord un champ magnétique radial, qui fait circuler les ions autour de lui. Ce déplacement crée alors un champ électrique axial, qui assure l'éjection. Contrairement à la propulsion ionique classique, ce système ne comporte pas de grille et pourrait être agrandi plus facilement. Le rendement est inférieur, mais un second étage de propulsion l'améliorerait. Des petits moteurs-fusées à effet Hall volent sur des satellites russes depuis le début des années 1970 et la technique a récemment été adoptée par les États-Unis. Les derniers systèmes construits par les Russes consomment environ cinq kilowatts et engendrent une poussée de 0,2 newton. De son côté, l'Europe dispose du moteur SNECMA PPS1350 d'une poussée de 0,08 newton.

Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 15 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 90 jours
Fraction de masse : 38 pour cent



LA PROPULSION MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE

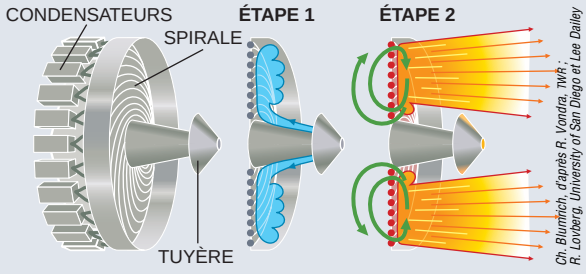
Ces moteurs accélèrent des particules chargées en utilisant des champs magnétiques plutôt que des champs électriques. Le système est composé d'une anode creuse, avec tige centrale formant cathode. Une différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes ionise le gaz propulseur. Cette ionisation engendre un puissant courant électrique radial, qui s'écoule à travers le gaz et le long de la cathode. Ce courant engendre un champ magnétique circulaire, qui interagit avec le courant passant dans le gaz et accélère les particules dans une direction perpendiculaire aux deux, c'est-à-dire axiale. Le gaz propulseur peut être de l'argon, du lithium ou de l'hydrogène, par ordre croissant de rendement. Après s'être intéressée par intermittence à ce système pendant des décennies, la NASA a repris les travaux sur la propulsion magnétohydrodynamique en 1999. À la suite des recherches menées à l'Université de Princeton et dans des centres russes, japonais et allemands, la NASA a construit un prototype de un mégawatt, où le courant circule par impulsions de deux millisecondes.



Poussée : 100 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 20 à 100 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 à 25 jours
Fraction de masse : 6,7 à 31 pour cent

LES MOTEURS À INDUCTION PULSÉE

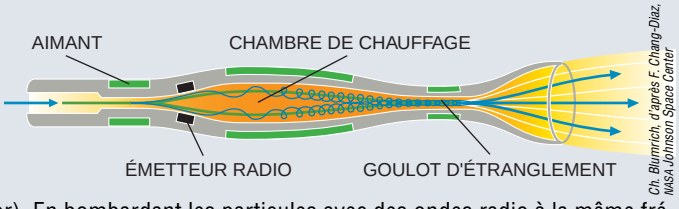
Le moteur à induction pulsée, qui retrouve les faveurs de la NASA, se fonde sur la création rapide de champs magnétiques et électriques perpendiculaires. Une tuyère éjecte d'abord une bouffée de gaz (en général, de l'argon), qui s'étale contre une spirale de fil électrique d'environ un mètre de diamètre. Une batterie de condensateurs produit alors, dans la spirale, une décharge de courant pendant environ dix millisecondes. Le champ magnétique radial créé par l'impulsion engendre un champ électrique circulaire dans le gaz, qu'il ionise et dont il accélère les particules dans la direction opposée à celle de l'impulsion électrique initiale. Comme leur déplacement est perpendiculaire au champ magnétique, ces particules sont éjectées dans l'espace. Contrairement à d'autres propulseurs électromagnétiques, ce système ne requiert pas d'électrodes, qui ont tendance à s'user, et l'on augmente la puissance en augmentant la fréquence des impulsions. On obtiendrait une puissance de un mégawatt, en émettant les impulsions 200 fois par seconde.



Poussée : 20 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 50 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 110 jours
Fraction de masse : 14 pour cent

VASIMR

Le VASIMR (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, ou «fusée à magnétoplasma à impulsions spécifiques variables») comble la lacune entre les systèmes à forte et à faible poussée. De l'hydrogène est d'abord ionisé par des ondes radio, puis guidé vers une chambre centrale où l'on fait régner un champ magnétique. Là, les particules longent les lignes de champ magnétique en tournant autour d'elles à une fréquence qui ne dépend que de leur charge électrique et de leur masse (la fréquence de Larmor). En bombardant les particules avec des ondes radio à la même fréquence, on les chauffe jusqu'à des températures de dix millions de degrés. Une tuyère magnétique transforme enfin le déplacement en spirale en déplacement axial, ce qui engendre la poussée. En réglant le chauffage et le convertisseur magnétique de sortie, le pilote commande la vitesse d'éjection. Le mécanisme est analogue à celui du levier de vitesse d'une voiture. En fermant l'étranglement de sortie, la fusée passe «en cinquième» : on réduit le nombre de particules excitées (et donc la poussée), mais on augmente leur température (et donc la vitesse d'éjection). L'ouverture de l'étranglement correspond à «la première» : poussée forte, mais rendement faible. Un véhicule spatial utiliserait une faible vitesse et un dispositif de chauffage pour quitter l'orbite terrestre, puis passerait en «cinquième» pour la croisière interplanétaire. La NASA prévoit un vol d'essai avec un système de dix kilowatts en 2004 ; les missions vers Mars nécessiteraient dix mégawatts.



	«Première»	«Cinquième»
Poussée :	1 200 newtons	40 newtons
Vitesse d'éjection des gaz :	10 kilomètres par seconde	300 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique :	2,1 jours	53 jours
Fraction de masse :	46 pour cent	2,4 pour cent

LES VOILES SOLAIRES

Les voiles solaires sont poussées par la faible pression de la lumière solaire. Pour transporter 25 tonnes en un an, de la Terre sur Mars, une voile devrait avoir une surface d'au moins quatre kilomètres carrés et une densité de un gramme par mètre carré. On fabrique aujourd'hui des fibres de carbone presque aussi fines qu'un cheveu, qui feraient ainsi des voiles très légères, mais comment déployer une structure aussi grande et aussi fragile ? En 1993, le Consortium spatial russe *Regatta* a déployé le miroir spatial *Znamya* de 300 mètres carrés, mais, lors d'un second essai en 1999, il s'est emmêlé. La NASA a récemment financé un concept similaire pour une «voile» magnétique qui capterait le vent solaire, les particules chargées émises par le Soleil, plutôt que la lumière solaire.

Poussée : 9 newtons par kilomètre carré (à la distance de la Terre au Soleil)
Vitesse d'éjection des gaz : pas de gaz
Temps de combustion spécifique : 58 jours

Quelle route prendre pour aller sur Mars?

Pour les fusées à forte poussée, la trajectoire la plus économique est l'orbite de transfert de Hohmann. Cette ellipse, tangente aux orbites de la Terre et de Mars, utilise au maximum le mouvement orbital des planètes pour accélérer le véhicule spatial. Celui-ci serait lancé lorsque Mars est en avant de la Terre d'un angle d'environ 45 degrés (ce qui se produit tous les 26 mois). Il quitterait la Terre et arriverait sur Mars de l'autre côté du Soleil par rapport à la position initiale de la Terre *(voir la figure 3a)*. Une telle configuration des planètes forme ce que les astronomes nomment une conjonction. Pour revenir, les astronautes attendraient que Mars soit en avant de la Terre d'un angle de 75 degrés, placeraient leur véhicule sur un arc rentrant et laisseraient la Terre le rattraper.

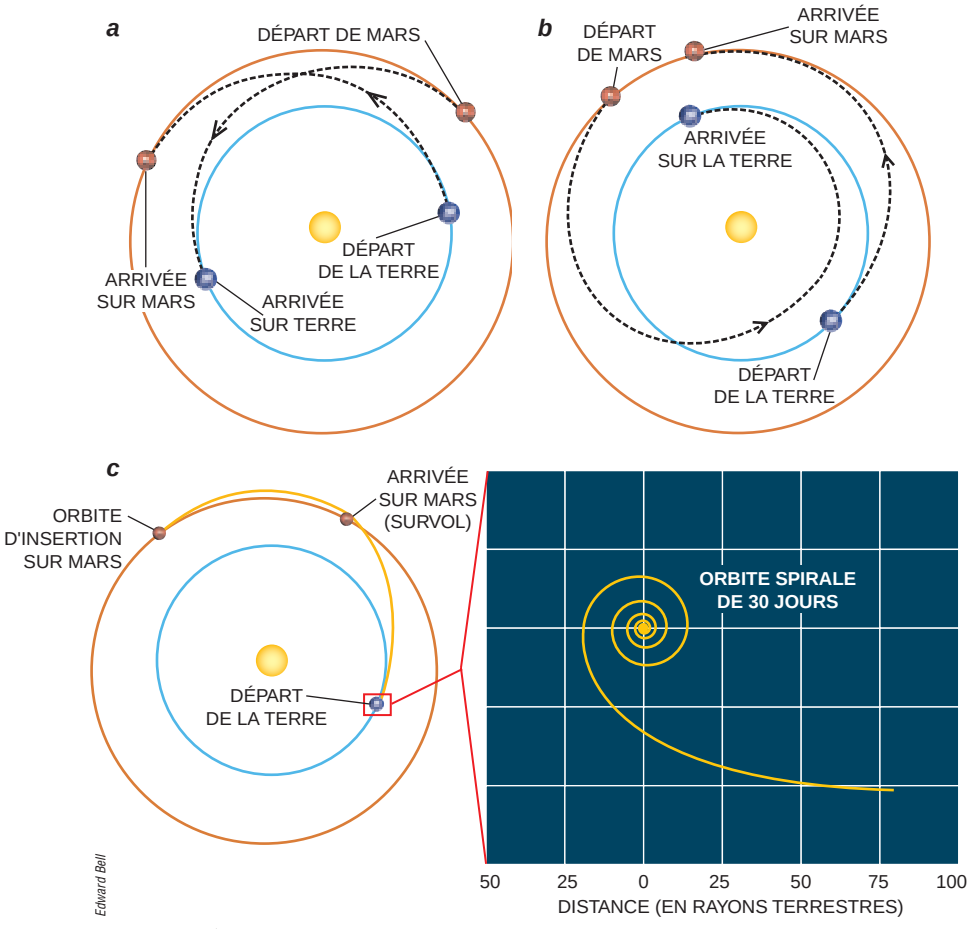
Chaque étape nécessite deux phases d'accélération. À partir de la surface terrestre, une pointe de vitesse à 11,5 kilomètres par seconde permet au véhicule de se libérer de l'attraction terrestre et d'entrer en orbite de transfert. Une autre solution consiste à partir d'une orbite terrestre basse sur laquelle l'engin spatial tourne déjà à une vitesse élevée ; les moteurs doivent alors lui communiquer une vitesse additionnelle de 3,5 kilomètres par seconde. À l'approche de Mars, des rétrofusées ou un freinage dans l'atmosphère doivent ralentir le vaisseau spatial d'environ deux kilomètres par seconde pour entrer en orbite ou de 5,5 kilomètres par seconde pour se poser. Le retour est l'inverse de l'aller.

L'aller et le retour durerait un peu plus de deux ans et demi : 260 jours pour chaque étape de voyage interplanétaire et 460 jours de séjour sur Mars. Les principaux projets, tels *Mars Direct* et la mission de référence de la NASA, privilégient les trajectoires de type conjonction, mais abrègent le voyage en consommant un peu de carburant supplémentaire pendant le voyage. Une programmation minutieuse permet également d'assurer que le vaisseau retournera vers la Terre de façon naturelle en cas de défaillance des moteurs.

Pour raccourcir le voyage, les ingénieurs de la NASA étudient les trajectoires de type opposition *(voir la figure 3b)*, ainsi nommées parce que la Terre s'approche au plus près de Mars (une configuration que les astronomes nomment opposition) à un moment donné de la mission. Ces trajectoires requièrent une accélération supplémentaire, appliquée en cours de route. Le voyage durerait alors un an et demi : 220 jours pour l'aller, 30 jours de séjour sur Mars et 290 jours pour le retour. Le trajet retour piquerait vers le Soleil, utilisant éventuellement l'attraction gravitationnelle de Vénus, et reviendrait vers la Terre par derrière. La séquence pourrait être inversée de sorte que l'aller soit le voyage le plus long. Avec les fusées prévues, ces trajectoires imposent un trop long trajet pour un séjour aussi court, mais elles seraient intéressantes si l'on utilisait des fusées nucléaires très puissantes ou des navettes circulant en permanence entre les orbites de la Terre et de Mars sans jamais s'y arrêter.

Les fusées électriques à faible poussée économisent du carburant, mais elles ne sont pas assez puissantes pour libérer le véhicule de l'attraction terrestre en une seule impulsion. Elles doivent élargir lentement leur orbite, en tournant en spirale autour de la Terre, comme une voiture qui gravit une montagne. Elles atteindraient la vitesse de libération en un an, de sorte que l'équipage serait exposé trop longtemps au rayonnement des ceintures de Van Allen qui entourent la Terre. Ces fusées à faible poussée pourraient uniquement convoyer du matériel.

Un moteur VASIMR ouvre d'autres possibilités. En restant en «première» (poussée élevée, mais faible rendement), il peut tourner en spirale pour quitter l'orbite terrestre en 30 jours. Le voyage interplanétaire durerait 85 jours supplémentaires. Durant la première moitié de ce voyage, la fusée fonctionnerait en «cinquième», puis, à mi-parcours, la fusée serait retournée et commencerait à ralentir en rétrogradant. À l'approche de Mars, une partie du vaisseau se détacherait pour se poser sur Mars, tandis que le reste (y compris le module pour le vol de retour) passerait à côté de la planète, continuerait à ralentir et entrerait en orbite martienne 131 jours plus tard *(voir la figure 3c)*.



3. LES DIFFÉRENTES ORBITES pour se rendre sur Mars : les trajectoires de type conjonction *(a)*, opposition *(b)* et insertion à faible poussée *(c)*.

La sécurité des astronautes

Des êtres humains survivront-ils à l'aller et retour vers Mars? Les ingénieurs du Centre spatial de Houston améliorent sans cesse l'efficacité et la fiabilité des systèmes actuels. Sur la Terre, des volontaires ont passé jusqu'à trois mois dans une chambre close avec laquelle on testait de nouvelles techniques de recyclage de l'air et de l'eau. À des méthodes physiques et chimiques s'ajoutaient des méthodes de régénération biologique, telle la transformation des excréments solides en fertilisants pour faire pousser du blé, qui fournissait de l'oxygène et du pain.

Les ingénieurs cherchent également à minimiser les effets d'une exposition prolongée à l'impesanteur. Les astronautes séjournant plusieurs mois en orbite terrestre perdent une importante quantité de masse osseuse, et souffrent de divers autres maux (voir *Le corps humain en impesanteur,* par Ronald White, *Pour la Science*, novembre 1998). On éviterait cette ostéoporose en faisant lentement tourner le vaisseau spatial durant son voyage interplanétaire.

Dans plusieurs projets, un câble ou une armature relie la capsule de l'équipage à un contrepoids, un étage de fusée qui a déjà brûlé, par exemple. Une rotation par minute au bout d'un rayon de 340 mètres de long assure une gravité de 0,38 *g* (0,38 fois la pesanteur terrestre), similaire à celle qui règne à la surface de Mars. En doublant la vitesse, on raccourcirait le bras d'un facteur quatre, mais on augmenterait la force de Coriolis, qui désorienterait les astronautes lors de leur déplacement à l'intérieur du vaisseau.

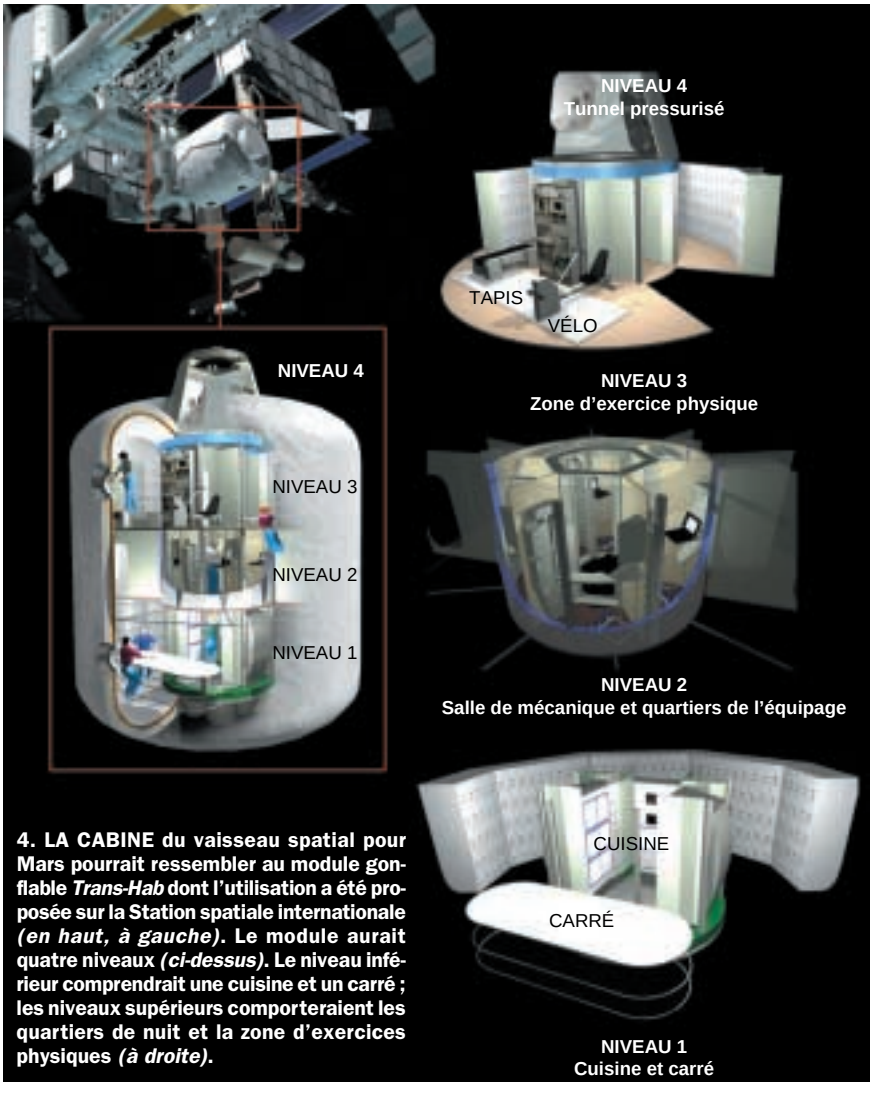
Cependant, la rotation du vaisseau complique les procédures de manœuvre et de communications ; aussi les médecins examinent-ils d'autres solutions, comme des exercices physiques spécifiques, des compléments alimentaires et l'utilisation de chaises centrifugeuses.

Ils se préoccupent également des rayonnements que recevrait l'équipage. Au rayonnement cosmique (les noyaux de haute énergie qui traversent en continu notre Galaxie) s'ajouterait celui des éruptions solaires, c'est-à-dire les intenses flux de protons qui sont périodiquement éjectés par le Soleil.

Le rayonnement cosmique a une énergie supérieure à celle des protons des éruptions solaires, de sorte qu'il est plus difficile à arrêter. À bord d'un vaisseau spatial, derrière une paroi d'aluminium de six centimètres d'épaisseur, la dose serait réduite de 20 pour cent par rapport à la même dose sans paroi. Les radiobiologistes estiment que cette exposition n'augmenterait le risque d'un décès par cancer dans les 30 ans que de quelques pour cent. Des pilules contenant des composés antioxydants pourraient diminuer ce risque.

Le rayonnement des éruptions solaires est dangereux, car il survient par jets imprévisibles qui déposent en une seule fois des doses mortelles sur la peau et les organes internes. Une éruption au moins a lieu tous les 11 ans, vers le maximum d'activité du cycle solaire, et des tempêtes un peu moins fortes sont enregistrées tous les deux ans. Les astronautes en orbite terrestre sont protégés par le champ magnétique de la Terre, qui piège et réfléchit les protons, mais pas les voyageurs qui seraient en route vers la Lune et vers Mars.

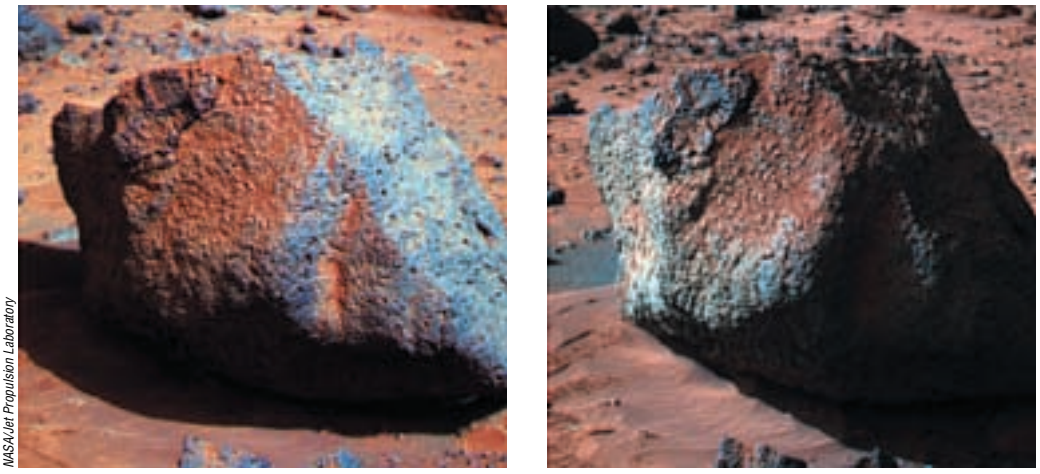
On sait arrêter les particules : les meilleurs écrans sont en matériaux riches en hydrogène, tel le polyéthylène ou l'eau ; des atomes plus lourds ne sont pas aussi efficaces, car les protons qui les heurtent déplacent leurs neutrons, ce qui déclenche une dangereuse cascade de rayonnement. Une épaisseur d'eau de dix centimètres réduirait la dose reçue lors des éruptions les plus fortes. Les concepteurs de missions ont proposé de créer un écran contre les tempêtes d'éruptions solaires sur le vaisseau en stockant l'eau destinée aux astronautes dans des poches qui entourent leurs quartiers de nuit. Grâce aux satellites d'observation du Soleil, on préviendrait les astronautes en cas d'éruption imminente.



4. LA CABINE du vaisseau spatial pour Mars pourrait ressembler au module gonflable *Trans-Hab* dont l'utilisation a été proposée sur la Station spatiale internationale *(en haut, à gauche)*. Le module aurait quatre niveaux *(ci-dessus)*. Le niveau inférieur comprendrait une cuisine et un carré ; les niveaux supérieurs comporteraient les quartiers de nuit et la zone d'exercices physiques *(à droite)*.

NASA

L'environnement martien



5. YOGI, la roche la plus photographiée par la sonde *Mars Pathfinder* en 1997, a un aspect très différent le matin *(à gauche)* et l'après-midi *(à droite)*, en raison des variations de la lumière martienne.

Si les astronautes débarquent un jour sur Mars, ils percevront immédiatement les différences avec la Terre : la faible gravité de la Terre modifiera leur démarche. La cadence de la marche étant gouvernée par la gravité (comme la cadence d'un pendule), la vitesse de progression des astronautes sera environ 60 pour cent de celle qu'ils auraient sur Terre, tout en brûlant le même nombre de calories.

Dans l'atmosphère ténue de Mars (équivalente à celle de la Terre à une altitude de 35 kilomètres), la température et la pression varient vite et beaucoup, mais les caractéristiques météorologiques sont généralement uniformes. Bien que le vent atteigne 100 kilomètres par heure, la force qu'il exerce est faible, en raison de la faible densité de l'atmosphère. Les astronautes verraient du brouillard, du givre et de minces nuages bleus tôt le matin. Le ciel change de couleur selon le lieu et le moment de l'observation. Le lever et le coucher du Soleil sont bleus ; sinon, le ciel est couleur caramel. La lumière crée des illusions d'optique. En raison de la proportion variable de lumière solaire directe et d'une lueur indirecte des cieux, la couleur des roches diffère selon l'heure de la journée *(voir ci-dessus)*.

Mars est ennuyeusement plate. Les Pics jumeaux, sur le site de *Mars Pathfinder*, ont à peine 50 mètres d'altitude et sont pourtant clairement visibles à un kilomètre de distance. Même le mont Olympe, la plus haute montagne du Système solaire, avec ses 22 kilomètres d'altitude, ne présente qu'une pente moyenne de quelques pour cent. La topographie devient plus intéressante sur les bords de *Valles Marineris*, une région de gorges et de canyons.

En raison de l'absence de relief, les astronautes verraient que Mars est plus petite que la Terre : la distance à l'horizon est proportionnelle à la racine carrée du rayon de la planète. Deux personnes de 1,70 mètre se verraient à une distance de sept kilomètres. L'horizon est également la limite des communications radio directes sur Mars, qui est dépourvue d'ionosphère. Les astronautes auraient besoin de satellites relais.

Les poussières martiennes pourraient gêner considérablement les astronautes qui séjourneraient sur la planète rouge. Mars est couverte de poussières d'environ deux micromètres de diamètre, comparables aux particules de la fumée de cigarette. La poussière collerait aux combinaisons spatiales, rayerait les visières des casques, provoquerait des courts-circuits électriques, décaperait les instruments et encrasserait les moteurs. Sur la Lune, également très poussiéreuse, les combinaisons fuyaient après deux jours d'utilisation. De surcroît, les analyses de la sonde *Viking* indiquent que les particules sont enrobées de produits chimiques corrosifs tel le peroxyde d'hydrogène. Bien qu'en faible concentration, ces composés détérioreraient lentement les joints en caoutchouc.

Si une petite proportion des particules est constituée de quartz, comme le laissent supposer les résultats de *Mars Pathfinder*, une autre menace pèse sur les astronautes : la silicose, une maladie pulmonaire qui tue chaque année plusieurs milliers de mineurs et d'ouvriers du bâtiment. Pour conserver leur habitacle exempt de poussières, les astronautes devraient se nettoyer soigneusement avant d'y entrer. Cela ne serait pas facile : aimantées et chargées électriquement, les poussières collent partout. Les astronautes pourraient porter des combinaisons constituées de deux couches, dont la couche externe serait laissée dans un sas spécial, hors de la cabine principale.

Enfin la production d'électricité pâtirait également de ces poussières. Sur *Mars Pathfinder*, la production de courant des panneaux solaires diminuait de un pour cent tous les trois jours, à mesure que de la poussière s'y accumulait. Une tempête de poussière réduirait de moitié la production de courant. C'est pourquoi une mission pourrait nécessiter un réacteur nucléaire de 100 kilowatts.

Les microbes qui accompagneraient inévitablement les astronautes sur Mars compliqueraient la recherche de vie martienne. Inversement, d'éventuels organismes martiens risqueraient d'arriver vers la Terre, au retour d'une mission. Ces organismes ne provoqueraient probablement pas de maladies chez l'homme ou chez d'autres espèces (la plupart des biologistes pensent qu'ils seraient trop différents des formes de vie terrestres), mais le risque d'une catastrophe globale n'est pas nul. La NASA étudie un système de bio-isolement pour les échantillons rapportés, mais la décontamination des astronautes est impossible. Durant le programme *Apollo*, les quarantaines étaient contraignantes, controversées et pas infaillibles. En 1992, les experts ont recommandé que l'on établisse l'existence de vie active ou dormante sur Mars avant d'y envoyer des astronautes ; ainsi les astronautes sauraient quelles régions de la planète peuvent être explorées en toute sécurité et quelles précautions ils devront prendre ailleurs pour éviter un contact direct avec une éventuelle forme de vie martienne.

George MUSSER et Mark ALPERT sont journalistes à la revue *Scientific American*.

Un direct pour Mars

ROBERT ZUBRIN

Comment réduire les coûts de l'envoi d'astronautes sur la planète rouge.

«L'espace est là, et nous allons y monter.» Par ces mots prononcés en 1962, John Kennedy lançait le programme d'exploration de la Lune. Toutefois, pendant plus de 30 ans après l'alunissage d'*Apollo*, le programme spatial américain a manqué de vision cohérente sur ce que devrait être la prochaine étape. Je soutiens que l'exploration humaine de Mars et sa colonisation sont clairement les meilleurs objectifs.

Ce but n'est pas inaccessible. Toutes les techniques nécessaires pour envoyer des hommes sur Mars existent. Nous pouvons atteindre la planète rouge à l'aide d'un vaisseau de taille relativement réduite, lancé par des fusées analogues à celles qui emmenèrent les astronautes vers la Lune voilà plus d'un quart de siècle. La clef du succès est la stratégie qui fut celle de nombreux explorateurs du Globe : voyager léger et utiliser les ressources du pays. La première mission habitée vers Mars pourrait atteindre la planète dans moins d'une décennie. Voici comment se déroulerait cette mission, que j'ai nommée *Mars Direct*.

Projetons-nous dans quelques années, en 2005 par exemple. Un lanceur lourd, d'une puissance équivalente à celle des fusées *Saturne 5* de l'époque *Apollo*, décolle de cap Canaveral, en Floride. Lorsque le vaisseau est suffisamment haut, l'étage supérieur se détache du propulseur usagé, allume son moteur et expédie une charge utile inhabitée de 45 tonnes en direction de Mars.

Cette charge utile est le véhicule de retour qui ramènera les astronautes sur Terre. Ce véhicule transporte six tonnes d'hydrogène liquide, des compresseurs, une unité de traitement chimique automatique, quelques robots automobiles scientifiques de taille modeste, et un petit réacteur nucléaire de 100 kilowatts monté à l'arrière d'un robot automobile plus grand, alimenté par un mélange de méthane et d'oxygène. Le véhicule a des réservoirs de méthane et d'oxygène pour le retour, mais ils sont alors vides.

Huit mois après le décollage, le véhicule de retour arrive près de Mars, ralentit par «aérofreinage», une technique qui utilise le frottement de son bouclier thermique contre l'atmosphère de la planète. Le vaisseau se place en orbite autour de Mars, puis se pose sur la surface en utilisant un parachute et des rétrofusées. Dès que le vaisseau touche le sol, les ingénieurs du centre de commande sur la Terre pilotent le grand robot automobile et l'éloignent de quelques centaines de mètres. Les contrôleurs de mission activent alors le réacteur nucléaire, qui fournira l'énergie aux compresseurs et à l'unité de traitement chimique.

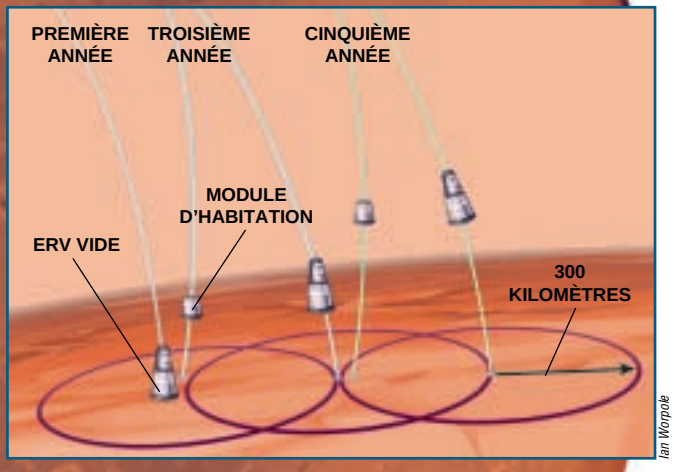
Dans cette unité, de l'hydrogène apporté de la Terre réagit avec l'atmosphère martienne, composée à 95 pour cent de dioxyde de carbone (CO_2) : on obtient de l'eau (H_2O) et du méthane (CH_4). Grâce à cette méthanation locale, inutile d'emmener et d'entreposer de l'hydrogène liquide pour le voyage de retour. Le méthane est liquéfié et entreposé, et les molécules d'eau sont électrolysées, c'est-à-dire dissociées en hydrogène et en oxygène. L'oxygène est conservé pour un usage ultérieur, tandis que l'hydrogène est recyclé par l'unité de traitement chimique, où il crée à nouveau de l'eau et du méthane.

Au total, ces deux réactions de méthanation et d'électrolyse fournissent 48 tonnes d'oxygène et 24 tonnes de méthane, qui seront les carburants du véhicule de retour. Pour assurer une combustion efficace du mélange méthane-oxygène, 36 tonnes supplémentaires d'oxygène doivent être produites, par dissociation du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne.

JPL/Caltech/NASA

1. L'ENVOI D'ASTRONAUTES SUR MARS permettrait la recherche de signes de vie sur la planète rouge *(cartouche supérieur)*. Dans le projet *Mars Direct*, un véhicule de retour sur Terre se posera d'abord sur la planète, afin de préparer l'arrivée des astronautes, deux ans plus tard *(cartouche du milieu)*. De nouvelles missions auront lieu tous les deux ans, établissant une série de camps de base comme ceux qui sont représentés ici *(cartouche inférieur)*.

SAIC ; Pat Rawlings



Ian Worpole

Robert Murray, Pioneer Astronautics

Après dix mois de telles réactions, 108 tonnes de méthane et d'oxygène auront été produites, soit 18 fois plus que de matière première apportée pour les produire.

Le voyage de retour consommera 96 tonnes de carburant, laissant 12 tonnes pour le fonctionnement des robots automobiles. Des réserves complémentaires d'oxygène seront aussi fabriquées, pour la respiration et la production d'eau.

Cette première base martienne fonctionnant avec succès, deux autres fusées quittent le cap Canaveral pour Mars en 2007. L'une d'elles emporte un véhicule de retour inhabité, identique à celui qui a été lancé en 2005. L'autre emporte un équipage de quatre hommes et femmes, et des provisions pour trois ans. Il transporte également un véhicule automobile pressurisé, fonctionnant au mélange méthane-oxygène, qui permettra aux astronautes d'explorer la surface martienne en bras de chemise.

L'arrivée

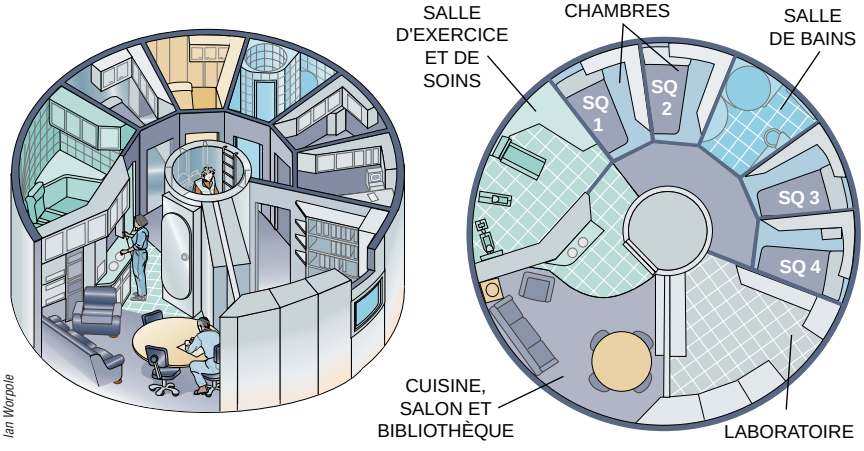
Durant le voyage, une gravité artificielle égale à celle de Mars (4/10 de la gravité terrestre) règne dans le module d'habitation, grâce à sa mise en rotation autour d'un propulseur usagé maintenu par un câble. Ainsi, les effets d'une gravité nulle sur la condition physique des astronautes ne sont plus à craindre. Le rayonnement des éruptions solaires, composé de protons d'une énergie d'environ un million d'électronvolts, est arrêté par une dizaine de centimètres d'eau ou de provisions. La dose résiduelle de rayons cosmiques pour les deux ans et demi de mission fait courir un risque statistique de cancer d'environ un pour cent, égal au risque de cancer qu'aurait un fumeur qui ne changerait pas sa façon de vivre pendant une période équivalente à la mission.

En abordant Mars, le module habité abandonne le câble et le propulseur usagé, «aérofreine» et se pose sur la base ouverte en 2005. Des balises déposées sur le site permettent au vaisseau de se poser au bon endroit, mais, même si l'atterrissage se fait à des dizaines, voire à des centaines de kilomètres de là, les astronautes peuvent revenir à la base avec leur véhicule automobile. Dans le cas improbable où ils atterriraient à des milliers de kilomètres, le second véhicule de retour, lancé en même temps que le module habité, peut servir de système de secours. Et, au pire, les rations supplémentaires du module habité assureraient la survie de l'équipage jusqu'à ce qu'un troisième véhicule de retour soit lancé, en 2009.

Toutefois, avec les techniques actuelles, le risque d'un atterrissage au mauvais endroit est faible. En supposant que les astronautes atteignent le site 2005 comme prévu, le second véhicule de retour se pose à quelques centaines de kilomètres de là. Comme le premier, il commence à synthétiser des carburants, afin de préparer la mission de 2009 qui, à son tour, partira avec un autre véhicule de retour pour ouvrir une troisième base sur Mars.

Ainsi, les nations qui participeraient au projet *Mars Direct* lanceraient deux fusées lourdes tous les deux ans : une pour envoyer une équipe de quatre personnes habiter sur Mars, et l'autre pour préparer une nouvelle base pour la mission suivante. Le rythme moyen de un lancement par an ne représente qu'environ 15 pour cent de la cadence de lancement des navettes spatiales américaines. Grâce à la stratégie d'utilisation des ressources martiennes proposées par *Mars Direct*, la perspective du voyage habité vers Mars quitte le domaine des projets grandioses, dignes de la science-fiction, et accède à un niveau de difficulté comparable à celui des missions *Apollo* vers la Lune.

Les astronautes envoyés sur Mars séjournent sur place pendant un an et demi, et explorent la surface à l'aide des véhicules automobiles. Grâce à une réserve de carburant de 12 tonnes pour ces engins, les astronautes peuvent parcourir plus de 24 000 kilomètres pendant leur séjour, une mobilité suffisante pour une recherche sérieuse d'une vie présente ou éteinte.



2. UNE HABITATION dans l'espace interplanétaire et sur Mars. La partie supérieure, représentée ici, comporte les quartiers de repos pour quatre personnes, ainsi qu'un laboratoire, une bibliothèque, une cuisine et un gymnase. Un abri anti-éruptions solaires occupe le centre. Le pont inférieur *(non représenté)* sert de garage, d'atelier et d'entrepôt. Pendant le voyage vers Mars, un système de rotation communique une gravité artificielle.

BESOINS CONSOMMABLES POUR UNE MISSION *MARS DIRECT* AVEC UN ÉQUIPAGE DE QUATRE PERSONNES

	Besoins quotidiens par personne (en kilogrammes)	Pourcentage recyclé	Masse totale pour un vol aller de 200 jours (en kilogrammes)	Total pour un séjour de 600 jours en surface (en kilogrammes)
Oxygène	1,0	80	160	0
Nourriture lyophilisée	0,5	0	400	1 200
Nourriture complète	1,0	0	800	2 400
Eau potable	4,0	80	0	0
Eau à usage domestique	26,0	90	2 080	0
Total	**32,5**	**87**	**3 440**	**3 600**

Répartition des masses pour une mission Mars Direct

Élément ERV	Masse en tonnes
• Structure de la cabine	3,0
• Systèmes de survie	1,0
• Consommables	3,4
• Panneaux solaires (5 kilowatts d'électricité)	1,0
• Systèmes de contrôle d'attitude	0,5
• Communications et gestion de l'information	0,1
• Mobiliers et aménagement	0,5
• Combinaisons spatiales (4)	0,4
• Équipements de rechange et marge (16 pour cent)	1,6
• Bouclier d'aérofreinage	1,8
• Véhicule automobile	0,5
• Réserve d'hydrogène	6,3
• Étages de propulsion	4,5
• Unité de production de propergol	0,5
• Réacteur nucléaire (100 kilowatts d'électricité)	3,5
• Masse totale de l'ERV	28,6

Module d'habitation	Masse en tonnes
• Structure de l'habitat	5,0
• Systèmes de survie	3,0
• Consommables	7,0
• Panneaux solaires (5 kilowatts d'électricité)	1,0
• Systèmes de contrôle d'attitude	0,5
• Communications et gestion de l'information	0,2
• Mobiliers et aménagement	1,0
• Combinaisons spatiales (4)	0,4
• Équipements de rechange et marge (16 pour cent)	3,5
• Véhicule automobile pressurisé	1,4
• Véhicules automobiles ouverts (2)	0,8
• Équipement de laboratoire	0,5
• Équipement scientifique de terrain	0,5
• Équipage	0,4
• Masse totale de l'ERV	25,2

3. LE VÉHICULE DE RETOUR SUR TERRE (ERV) décolle de la surface de Mars avec un équipage de quatre personnes. Les charges utiles de ce véhicule et du module habité sont détaillées dans le tableau.

Avec ce projet, personne ne reste en orbite, de sorte que tous les astronautes bénéficient de la gravité martienne et de la protection contre le rayonnement assurée par l'atmosphère. En conséquence, le retour sur Terre n'est pas urgent, contrairement aux projets qui comprennent un vaisseau-mère orbital et de petites expéditions sur la surface. À la fin de leur séjour, les astronautes reviennent par vol direct à bord du véhicule de retour. La série de missions constituera une chaîne de petites bases sur la planète, ouvrant de larges zones de Mars à une exploration humaine continue et, finalement, à une colonisation.

Planète Mars

En 1990, lorsque nous avons soumis le projet *Mars Direct* pour la première fois, la NASA le jugea excessivement novateur. Depuis, le groupe chargé de la conception des missions habitées vers Mars a décidé de le réexaminer.

En 1994, des chercheurs de ce groupe ont évalué les coûts d'un programme analogue à *Mars Direct*, mais deux fois plus ambitieux : le budget serait de 250 milliards de francs. En 1989, ce même groupe avait estimé le coût d'une approche classique fondée sur l'assemblage orbital d'un vaisseau unique à 3 000 milliards de francs. Avec une conception de la mission plus rigoureuse, je pense que notre projet coûterait 120 à 180 milliards de francs. Réparti sur dix ans, ce montant constituerait une dépense annuelle d'environ 20 pour cent du budget de la NASA, ou de un pour cent du budget militaire américain.

Afin de mobiliser le public pour l'exploration de Mars – par des systèmes automatiques et par des astronautes – et afin de chercher des crédits privés pour organiser les missions, nous avons créé l'Association Planète Mars *(Mars Society)* en 1998. Le premier projet de l'association est la construction d'une base de simulation martienne, dans le cratère d'impact météoritique Haughton, sur l'île Devon, dans l'Arctique canadien. La base MARS (*Mars Arctic Research Station*, soit «station de recherche arctique pour Mars»), située dans une région au climat et à la géologie similaires à ceux de Mars, servira aux tests des tactiques d'exploration humaine et des équipements, dont les modules d'habitation, les engins mobiles de surface, les systèmes photovoltaïques et des dispositifs de forage spécialisés. La base MARS sera opérationnelle à l'été 2000.

Grâce à ce projet, nous augmenterons la confiance des investisseurs dans nos programmes, afin de contribuer au financement des missions automatiques vers Mars et à celui des expéditions humaines. Notre premier objectif est de montrer aux gouvernements pourquoi l'exploration de Mars est intéressante.

Je crois qu'un jour des millions de gens vivront sur Mars. Quelle langue parleront-ils ? Quelles valeurs et quelles traditions emporteront-ils quand, de Mars, ils iront ailleurs dans le Système solaire et au-delà ? Quand ils penseront à notre époque, quelle autre entreprise du passé leur semblera aussi importante que celle de l'Association Planète Mars ? Nous avons aujourd'hui l'opportunité d'être les fondateurs d'une nouvelle branche de la famille humaine et d'imprimer notre marque au futur. C'est un privilège inestimable.

Robert ZUBRIN est président de la *Mars Society* et fondateur de la Société *Pioneer Astronautics*.

Mars via ses lunes

FRED SINGER

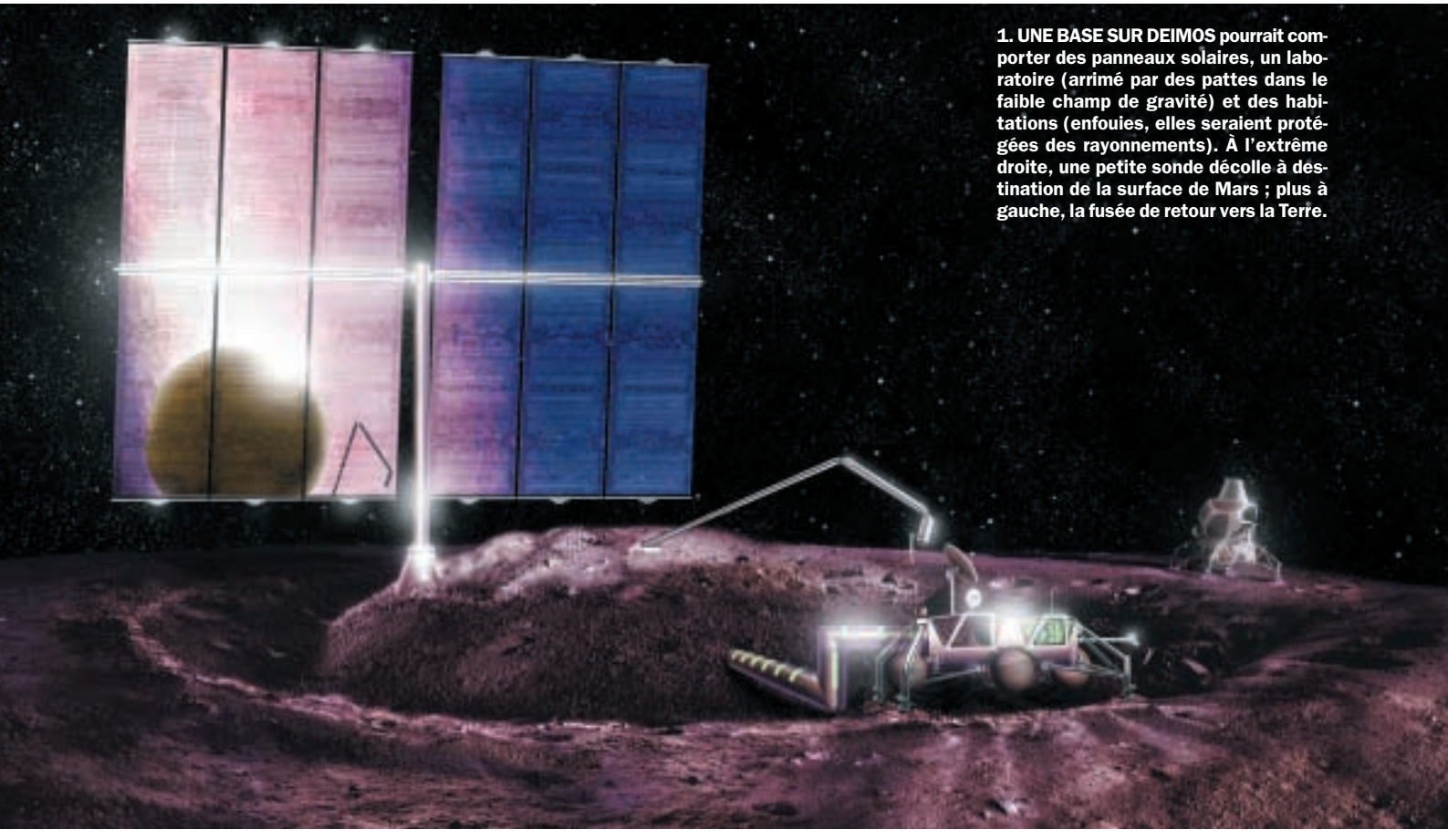
Phobos et Deimos, satellites de Mars, pourraient être des bases intermédiaires, à partir desquelles on explorerait la planète rouge.

Depuis 30 ans, le débat qui oppose les partisans des vols habités à ceux des missions automatiques n'a guère changé. Toutefois, au fil des ans, certains de ceux qui étudient les satellites robotisés ont adopté une attitude plus modérée : dans certaines circonstances, l'envoi d'êtres humains dans l'espace est plus rentable que le lancement de robots. L'exploration de Mars serait plus facile et plus fructueuse avec des vols habités.

En effet, les astronautes ont l'avantage de pouvoir explorer Mars en temps réel, sans délais de communication, et concevoir de nouvelles expériences dans le prolongement de résultats antérieurs. Les robots, même après plusieurs décennies de recherches, ne se débrouillent pas sans intervention humaine. Doit-on toutefois envoyer des astronautes jusqu'à la surface de Mars? Cette solution évidente n'est pas nécessairement la meilleure. Lors de la première conférence «Plaidoyer pour Mars», en 1981, l'une des conclusions les plus hardies fut que les lunes martiennes, Phobos et Deimos, pourraient servir de têtes de pont relativement peu coûteuses.

La plupart des projets prévoient l'utilisation de deux engins spatiaux. Le premier déposerait sur Mars, ou dans son voisinage, du carburant et d'autres équipements lourds, tels des modules de rechange et des véhicules de retour. La durée du trajet n'étant pas cruciale, ce vaisseau naviguerait par propulsion électrique et assistance gravitationnelle. Au contraire, l'engin qui conduirait les astronautes devrait être le plus rapide possible, afin que ses occupants ne s'attardent pas près des ceintures de radiations qui entourent la Terre et qu'ils ne manquent pas de vivres et d'oxygène. Les fusées qui emporteraient les astronautes doivent avoir un moteur chimique.

Après le rendez-vous de l'engin habité et du vaisseau cargo près de la planète rouge, le déroulement des opérations diffère selon les programmes. Dans l'ordre de difficulté et de coût croissants, les six solutions sont : un survol de Mars analogue aux premières mis-

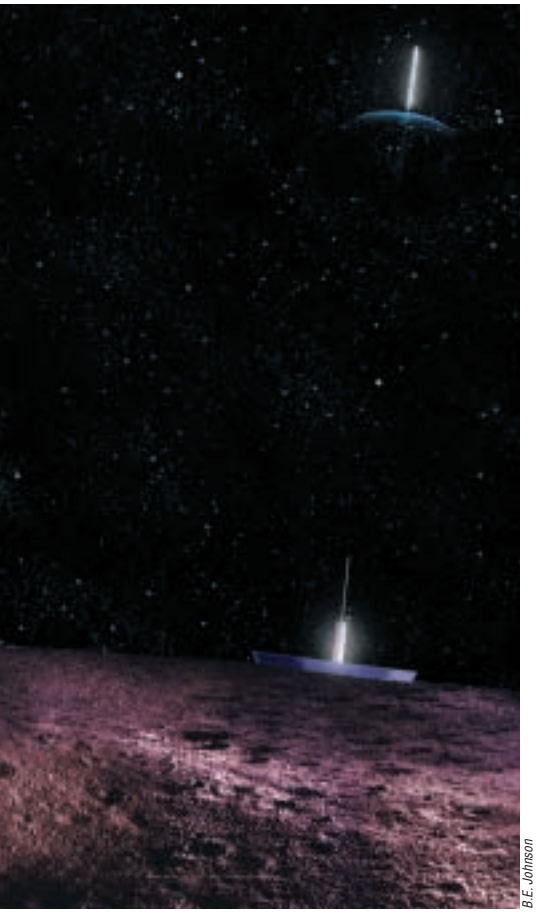


1. UNE BASE SUR DEIMOS pourrait comporter des panneaux solaires, un laboratoire (arrimé par des pattes dans le faible champ de gravité) et des habitations (enfouies, elles seraient protégées des rayonnements). À l'extrême droite, une petite sonde décolle à destination de la surface de Mars ; plus à gauche, la fusée de retour vers la Terre.

sions *Apollo*, suivi d'un retour immédiat vers la Terre ; un orbiteur martien autorisant un séjour prolongé près de la planète ; une mission Phobos-Deimos (Ph-D), qui comprend un transfert sur une orbite circulaire équatoriale, avec un alunissage et la constitution d'une base sur l'une des lunes de Mars, de préférence Deimos ; une mission hybride (Ph-D+) qui comporte aussi un bref séjour sur la surface de Mars ; un atterrissage sur Mars, avec un séjour de plus longue durée et un programme complet de recherche ; enfin, un séjour prolongé sur Mars, pendant lequel les astronautes érigent des structures permanentes et entament un séjour continu sur la planète.

Je crois que la première mission habitée doit être ambitieuse – l'aventure fait partie de l'attrait –, mais pas trop, surtout financièrement. Les missions Ph-D et Ph-D+ équilibrent remarquablement les coûts et les bénéfices.

Deimos conviendrait très bien à l'établissement d'une base pour l'étude de Mars : de là, les astronautes pourraient envoyer des sondes atmosphériques, des engins foreurs et des robots automobiles, qu'ils dirigeraient ensuite sur toute la surface de Mars. L'orbite quasi synchrone de cette lune permet de conserver le contact avec un véhicule pendant près de 40 heures d'affilée. Phobos, plus proche de la planète, tourne plus vite et ne possède pas cet avantage. Cependant, quelle que soit la lune retenue, les astronautes pourraient analyser les échantillons récoltés sans craindre de contaminer la Terre par des formes de vie martiennes.


B.E. Johnson

L'absence d'atmosphère sur ces satellites est un autre avantage : on manipulerait plus facilement des instruments de laboratoire qui ne fonctionnent que sous vide, comme des spectromètres de masse ou des microscopes électroniques. En se déplaçant sur le satellite – ce qui est aisé en raison de la gravité minime –, les astronautes se protégeraient des éruptions solaires et des chutes de météorites. En outre, les satellites martiens sont des corps fascinants par eux-mêmes. Des échantillons prélevés directement sur ces corps permettraient d'étudier leur origine.

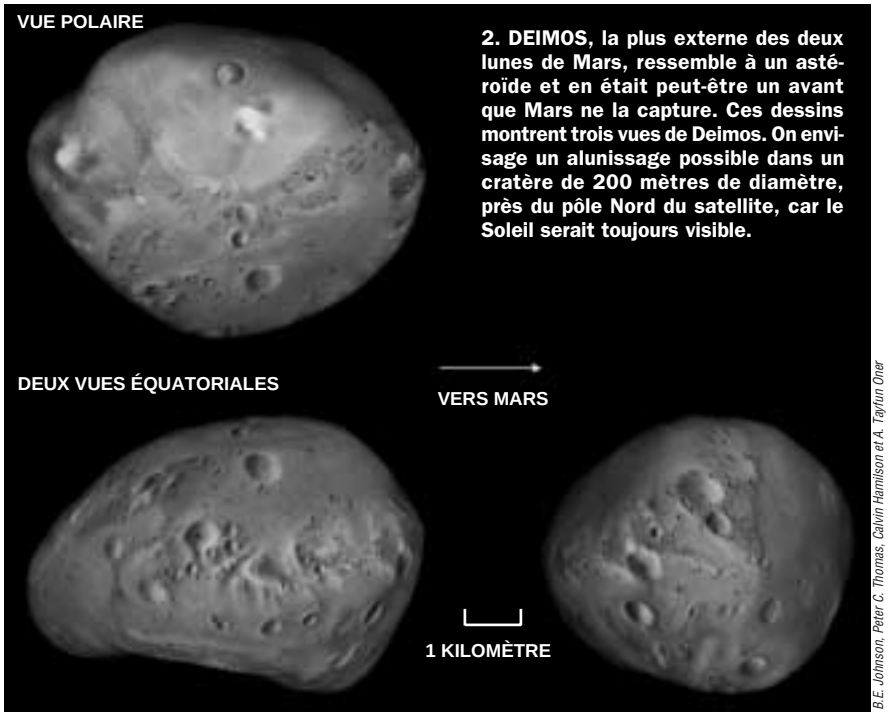
Une base habitée à la surface de Mars serait bien plus difficile à gérer. Les véhicules déployés ailleurs sur la planète devraient toujours être télécommandés, ce qui nécessiterait un relais de commande par des satellites. La récolte d'échantillons loin de la base serait plus difficile. Des batteries d'appoint lourdes ou des générateurs nucléaires seraient indispensables pour alimenter la base pendant la nuit ou pendant les tempêtes de poussière.

La plupart des avantages d'un vol habité vers Mars, tant sur le plan de la science que sur celui de l'aventure, seraient obtenus par des vols habités vers les satellites martiens. Une petite navette suffirait, au lieu d'un module d'atterrissage élaboré, ce qui réduirait les coûts de la mission. Venant d'une base établie en orbite, les astronautes seraient en mesure de sélectionner le site d'arrivée sur Mars avec plus de flexibilité, alors que l'équipage d'un gros module d'atterrissage martien devrait jouer la sécurité, choisissant un site propice au lancement du voyage de retour vers la Terre.

Dans un avenir plus lointain, les satellites pourraient servir de haltes pour descendre sur Mars ou en remonter à l'aide de câbles. Les climatologues installés sur Deimos pourraient mener sans danger des expériences climatologiques, comme l'altération du climat ou la fusion des calottes polaires afin de tester les techniques de «terraformage» de Mars ou d'atténuation des changements de climat sur la Terre.

Les coûts et les bénéfices des divers scénarios restent difficiles à estimer, mais une enquête m'a montré que le projet Ph-D+ a la faveur des experts en missions martiennes. Toute la science, plus vite et moins cher ! Cette mission serait une bonne première étape pour établir une base et une colonie sur Mars.

Fred SINGER est professeur de planétologie à l'Université George Mason.



2. DEIMOS, la plus externe des deux lunes de Mars, ressemble à un astéroïde et en était peut-être un avant que Mars ne la capture. Ces dessins montrent trois vues de Deimos. On envisage un alunissage possible dans un cratère de 200 mètres de diamètre, près du pôle Nord du satellite, car le Soleil serait toujours visible.

B.E. Johnson, Peter C. Thomas, Calvin Hamilson et A. Tayfun Oner

Un autobus entre les planètes

JAMES OBERG • BUZZ ALDRIN

Grâce aux techniques d'assistance gravitationnelle, les coûts des trajets entre la Terre et Mars seraient considérablement réduits.

Grâce aux fusées à propulsion chimique, l'humanité a fait ses premiers pas dans l'espace. L'un de nous (B. Aldrin), porté jusqu'à la Lune par l'une d'entre elles, connaît leurs mérites, mais il sait aussi qu'elles n'emporteront pas les astronautes très au-delà du satellite naturel de la Terre.

Pour emmener un équipage sur Mars à l'aide de moteurs chimiques et en revenir, il faudrait tant de carburant que la plupart des projets envisagent sa production à la surface de Mars. Cette opération complique les mission projetées. Les fusées à propulsion plasmique, bien plus puissantes, n'équiperont sans doute pas de vaisseau habité avant une décennie.

Pourquoi, alors, ne pas accroître l'autonomie des fusées à propulsion chimique en profitant des forces gravitationnelles des corps célestes? Si l'on faisait passer les engins spatiaux tout près des planètes, le champ gravitationnel de celles-ci modifierait la vitesse de l'engin. On a souvent utilisé cette méthode pour accélérer une sonde lancée vers les planètes du Système solaire qui, autrement, auraient été inaccessibles.

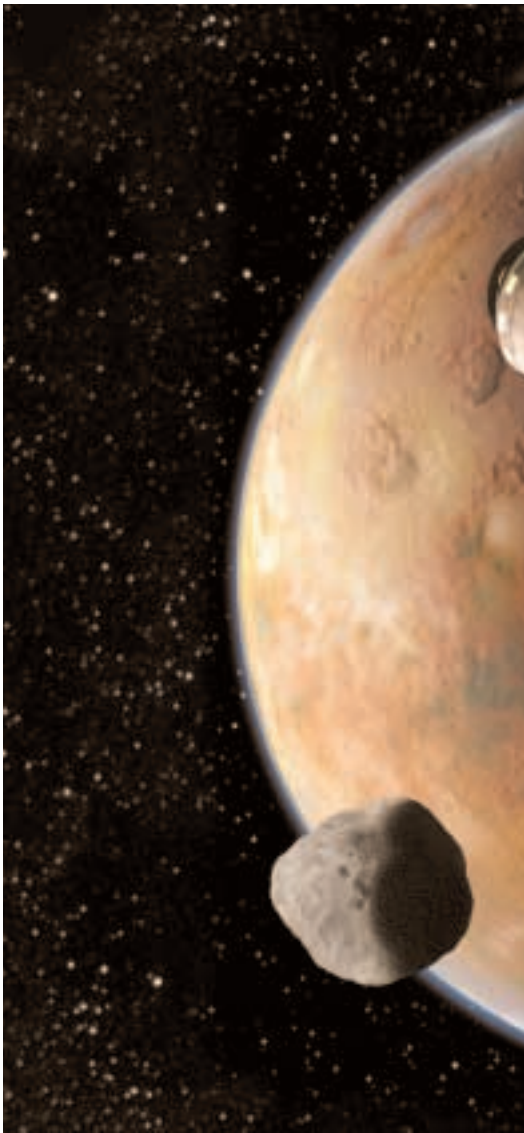
Les contrôleurs de mission commencèrent à employer l'assistance gravitationnelle dans les années 1970. Lors de la mission *Mariner 10*, lancée vers Mercure, on utilisa le champ gravitationnel de Vénus ; *Pioneer 11*, vers Saturne, profita de Jupiter ; et *Voyager 1*, catapulté par le champ gravitationnel prodigieux de Jupiter, erre aujourd'hui dans l'espace interstellaire à la vitesse de 62 000 kilomètres par heure. Même si, entre la Terre et Mars, il n'existe pas d'objets de taille adéquate, la trajectoire entre les deux planètes peut être calculée de manière à bénéficier de leur gravité.

Rebond sur un mur gravitationnel

Une manœuvre d'assistance gravitationnelle s'apparente au rebond d'une balle sur un mur : l'engin spatial est comme la balle, et la planète comme le mur. Dans le cas de la balle, sa vitesse après le rebond augmente ou diminue selon que le mur s'approche ou s'éloigne de la balle au moment du choc. La relation entre les vitesses résulte de la conservation de la quantité de mouvement. La variation de la quantité de mouvement du ballon est égale à la variation inverse de la quantité de mouvement du mur. Si le mur avance vers la balle, la balle prend de la vitesse au mur, qui ralentit un tout petit peu (car il est bien plus massif que la balle).

Ainsi, lors d'une manœuvre d'assistance gravitationnelle, le vaisseau spatial entre en «collision» élastique avec le champ gravitationnel de la planète. Si la planète se meut dans la même direction que l'engin lorsque celui-ci s'approche de la planète, la vitesse du véhicule après «rebond» sera supérieure à sa vitesse d'approche. Comme dans le cas de la balle qui rebondit contre un mur, la quantité de mouvement est conservée : la quantité de mouvement de la planète change autant que celle du vaisseau. Cependant, en raison de l'immense différence de masse, la vitesse de la planète ne varie pas de manière appréciable.

Plus la planète est massive, plus la trajectoire de la sonde peut être modifiée. Jupiter, qui est la planète la plus massive du Système solaire, peut modifier la trajectoire d'une sonde de 160 degrés. Par cette méthode, non seulement les contrôleurs de vol peuvent modifier la vitesse et la direction d'une sonde dans le plan orbital, mais ils peuvent aussi catapulter l'engin dans un plan orbital différent de celui de l'orbite de la planète autour du Soleil (grâce à l'assistance gravitationnelle de Jupiter, la sonde *Ulysse* a quitté le plan orbital des planètes en 1992).



Don Dixon

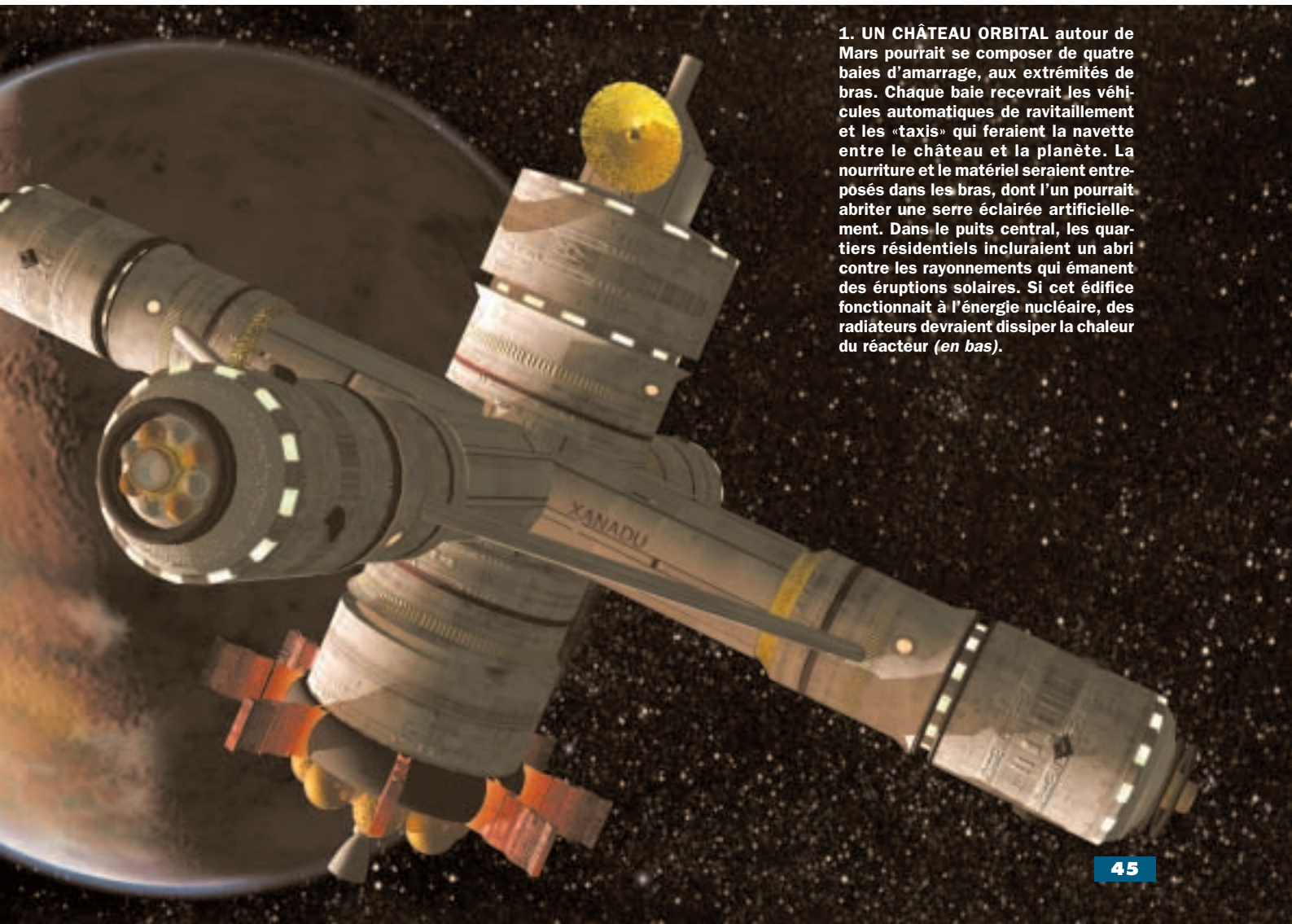
Comment l'assistance gravitationnelle contribuerait-elle à conduire des êtres humains vers Mars? Elle pourrait mettre en mouvement un vaisseau spatial qui fera la navette entre la Terre et Mars. Cet «astrobus», qui ne ralentira pas pour se mettre en orbite autour de Mars, n'aura pas besoin de s'arracher à la planète pour revenir sur Terre : il sera sur une trajectoire cyclique autour des deux planètes. Ce concept est attrayant, car il minimise le recours à des manœuvres propulsives, ce qui diminue les quantités de carburant à emporter.

Des châteaux parmi les étoiles

Le concept de l'astrobus date du début des années 1980. Alan Friedlander et John Niehoff, de la Société *Science Applications International*, ont décrit un système où plusieurs stations spatiales (qu'ils nommaient châteaux) occuperaient des orbites héliocentriques qui se rapprocheraient périodiquement de la Terre et de Mars. Les astronautes habiteraient ces châteaux pendant la croisière interplanétaire, qui durerait au moins deux ans. Lors des rencontres avec Mars ou avec la Terre, les voyageurs utiliseraient des véhicules plus légers – des «taxis» –, pour se déplacer entre un château et la planète. Les châteaux seraient réapprovisionnés à l'aide de fusées propulsées par des moteurs efficaces, tels les moteurs ioniques, mais trop lents pour des passagers humains. Le voyage à bord du taxi entre un château et la planète prendrait moins d'une semaine.

Initialement, J. Niehoff et A. Friedlander avaient prévu que les châteaux tourneraient autour du Soleil, de manière à croiser la Terre environ tous les cinq ans et Mars tous les 3,75 ans. Puis on a trouvé un moyen pour que les astrobus rencontrent la Terre tous les trois ans et Mars tous les 7,5 ans. Aucune de ces orbites ne serait modifiée lors des rencontres planétaires. Une fois placés sur la trajectoire adéquate, ces châteaux suivent leur orbite de manière balistique, sans propulsion ou assistance gravitationnelle. En 1985, B. Aldrin a proposé une orbite pour l'astrobus qui utiliserait l'assistance gravitationnelle à chaque survol de la Terre. De la même façon que précédemment, ces châteaux tourneraient autour du Soleil. Avec ces orbites, chaque planète est approchée tous les 2,7 ans, et le temps de transit entre planètes ne dépasse pas six mois. Pour maintenir l'astrobus sur cette orbite avantageuse, des phases de propulsion sont nécessaires. Toutefois, comme ces manœuvres n'ont pas besoin d'être particulièrement rapides, elles peuvent être effectuées par des systèmes de propulsion de haut rendement et de faible poussée.

En outre, l'une des manœuvres les plus délicates est obtenue par assistance gravitationnelle. L'intervalle de temps séparant les rencontres entre l'astrobus et Mars n'est pas un multiple exact de l'année martienne. Ainsi, la planète occupe, par rapport au Système solaire, une position différente chaque fois que l'astrobus s'apprête à faire son approche. Pour cette raison, il faut continuellement ajuster l'orbite de l'astrobus pour qu'il croise la planète. En termes techniques,



1. UN CHÂTEAU ORBITAL autour de Mars pourrait se composer de quatre baies d'amarrage, aux extrémités de bras. Chaque baie recevrait les véhicules automatiques de ravitaillement et les «taxis» qui feraient la navette entre le château et la planète. La nourriture et le matériel seraient entreposés dans les bras, dont l'un pourrait abriter une serre éclairée artificiellement. Dans le puits central, les quartiers résidentiels incluraient un abri contre les rayonnements qui émanent des éruptions solaires. Si cet édifice fonctionnait à l'énergie nucléaire, des radiateurs devraient dissiper la chaleur du réacteur *(en bas)*.

les contrôleurs de mission doivent tourner suffisamment la ligne des apsides (la ligne joignant le point de l'orbite le plus éloigné du Soleil à celui le plus proche) de l'orbite de l'astrobus de sorte que la trajectoire coïncide avec la position de Mars lors de la rencontre suivante. Ce décalage peut s'obtenir presque uniquement par assistance gravitationnelle de la Terre.

En raison de son orbite allongée, l'astrobus croise la Terre et, surtout, Mars à vitesse relativement élevée. Ce serait gênant si l'on devait freiner l'astrobus massif en vue d'une rentrée atmosphérique. L'utilisation de taxis légers pour aller vers les planètes supprime ce problème.

Quel serait le coût d'une mission fondée sur l'emploi d'astrobus? Les missions de ce genre nécessiteront de nombreuses infrastructures en orbite. Cependant, une fois en place, un astrobus pourra conduire des dizaines, voire des centaines d'astronautes vers Mars.

Des astrobus améliorés

B. Aldrin a affiné ses idées sur les astrobus et sur l'exploration de Mars. Dans son dernier projet, les astrobus suivent des trajectoires qui croisent les planètes à des vitesses inférieures, accordant plus de temps et de flexibilité aux voyages entre l'astrobus et les planètes. Au lieu d'une simple séquence de rencontres alternées Terre-Mars-Terre-Mars, il prévoit un «temps de repos» près de Mars et de la Terre.

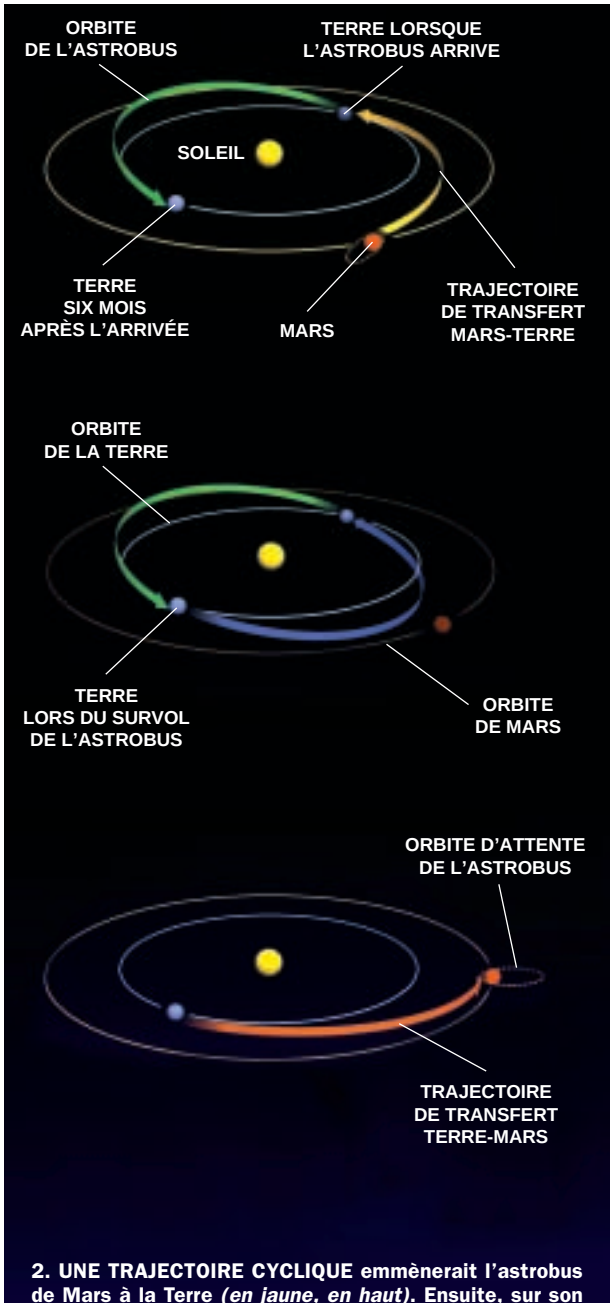
Dans ce projet, le passage unique près de la Terre devient une série de rencontres Mars-Terre-Terre-Terre-Terre-Mars *(voir la figure 2)*. Durant la portion terrestre de la trajectoire, l'astrobus demeure sur une orbite héliocentrique, comme la Terre, mais, tous les six mois, il survole la Terre en utilisant le champ gravitationnel de la planète pour ajuster son orbite en vue de la rencontre suivante. Le survol de Mars comporte aussi une période durant laquelle l'astrobus attend que la Terre soit en bonne position pour le retour. La trajectoire se répète tous les 52 mois, laps de temps pendant lequel la Terre et Mars sont deux fois en conjonction.

Pour accomplir les manœuvres de survol bisannuel de la Terre, les contrôleurs profiteraient de la gravité terrestre afin de décaler le plan orbital du vaisseau spatial autour du Soleil vers un autre plan incliné de plus de dix degrés par rapport à celui de la Terre, mais avec la même période orbitale que la Terre (un an). Cette stratégie utilise trois manœuvres consécutives (ou une rencontre de six mois suivie ou précédée d'une autre rencontre de 12 mois), suivies d'une assistance gravitationnelle vers la partie martienne du trajet. La NASA prévoit d'utiliser la trajectoire de rencontre Terre-Terre de six mois pour la mission *Mars Sample Return* prévue pour 2005 et pour la mission scientifique *CONTOUR* du programme *Discovery*.

L'introduction d'un temps de repos près de Mars présente de nombreuses difficultés. Avec un astrobus de la masse envisagée et avec les vitesses d'approche prévues, Mars n'est pas suffisamment massive pour dévier la trajectoire de l'astrobus ne serait-ce que de dix degrés. Probablement les contrôleurs devront-ils utiliser l'assistance gravitationnelle de Mars, plus une petite phase propulsive, afin de tourner le vaisseau spatial vers le Système solaire interne. Le véhicule rencontrera alors Vénus et exploitera la gravité de cette planète, semblable à celle de la Terre, pour se rediriger en vue d'une nouvelle rencontre avec Mars.

Dennis Byrnes, du Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena, a récemment analysé des options de trajectoire similaires. Il a vérifié la faisabilité d'un système fondé sur trois astrobus qui suivent une trajectoire couvrant trois périodes synodiques (environ 78 mois) avec cinq survols de la Terre, espacés d'un an, entre rencontres martiennes. Un tel système permettrait de faire un voyage de la terre à Mars, ou *vice versa*, tous les 26 mois.

Les études de l'opportunité de l'astrobus par les spécialistes des missions spatiales ne font que commencer. Grâce à leurs idées, constamment améliorées, il devient probable qu'un jour l'humanité utilisera ce concept remarquablement flexible et robuste pour atteindre la planète rouge, non pas pour un voyage, mais pour une multitude de voyages.

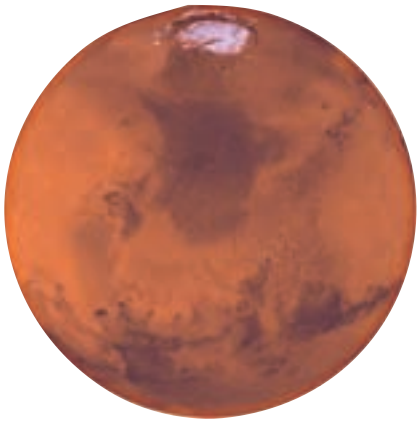


Slim Films

2. UNE TRAJECTOIRE CYCLIQUE emmènerait l'astrobus de Mars à la Terre *(en jaune, en haut)*. Ensuite, sur son orbite héliocentrique, l'engin spatial rencontrerait périodiquement la Terre *(en vert et en bleu, en haut et au centre)*, où il profiterait de la gravité terrestre pour ajuster sa trajectoire. À son retour près de Mars, il adopterait une orbite d'attente allongée *(en bas)*.

James OBERG et Buzz ALDRIN ont travaillé à la NASA.

Un moral jusqu'au ciel



SARAH SIMPSON

Suffit-il d'avoir l'«étoffe des héros» pour garder le moral durant les longs voyages interplanétaires ?

Quand il arriva dans le sas d'entrée de la station *Mir*, l'astronaute australien Andy Thomas comprit que ce serait dur. Il avait l'impression d'entrer dans un puits de mine sombre. Le boyau s'ouvrit finalement sur un compartiment exigu, dont le plafond et les murs étaient maculés de taches de café, là où ils n'étaient pas déjà couverts de boîtes métalliques, de livres et de tuyaux enchevêtrés. Avec deux autres astronautes, A. Thomas resterait confiné dans ce réduit cinq mois durant.

Ces cinq mois ne sont rien en comparaison d'une mission aller et retour sur Mars ; les astronautes seraient cloîtrés dans une capsule jusqu'à huit mois d'affilée et isolés du reste du monde pendant deux ans et demi. Voir les mêmes visages jour après jour,

NASA

DES ASTRONAUTES CLOÎTRÉS, comme cette équipe à bord de la navette spatiale *Atlantis* en janvier 1997, risquent de ne pas être aussi joyeux durant un voyage de six mois vers Mars.

subir les malaises et la désorientation de l'impesanteur, ne jamais avoir un moment seul... Nombre de familles se défont pour moins que cela. Le voyage vers Mars, qui devrait être une immense aventure humaine, se transformerait en échec cuisant si les concepteurs de missions ne trouvaient pas des moyens d'empêcher les explorateurs de l'espace de s'entre-déchirer.

Selon A. Thomas, la volonté suffit à conserver une ambiance supportable lors d'une mission de dix jours, mais des missions plus longues deviendront insupportables sans précautions particulières. Tout comme les ingénieurs veillent à ne pas en demander trop au matériel (en intégrant des marges de sécurité et de nombreux systèmes de secours), il ne faut pas en demander trop aux hommes. Il ne suffit pas de dire : les astronautes qui iront sur Mars ont reçu l'entraînement adéquat, donc ils peuvent tout supporter. Le risque est trop grand. Les individus que l'on enverra sur Mars seront certes spéciaux, mais ce ne seront pas des dieux.

Une analyse des missions passées révèle les difficultés possibles. Le surmenage a conduit l'équipage de la station spatiale *Skylab* à la révolte lors de la troisième et dernière rotation de l'équipage, qui a commencé en novembre 1973 : les trois hommes avaient pris du retard sur le programme et ils se sont accordé une journée de repos, désobéissant ainsi aux instructions des contrôleurs au sol. La station spatiale *Mir* fut également le théâtre de tensions, selon des rapports d'astronautes et de cosmonautes qui y séjournèrent. Les différences linguistiques et culturelles amplifient le stress : les Américains se plaignaient du comportement autoritaire des Russes, les Russes se plaignaient de l'ego exacerbé de certains de leurs visiteurs.

Ces difficultés ne surprennent aucun de ceux qui ont connu un confinement similaire dans les sous-marins nucléaires, sur les plates-formes pétrolières off-shore et dans les stations de l'Antarctique. Le psychologue Jack Stuster, qui a fait des études de comportement pour la NASA, cite l'histoire d'un mécanicien d'une petite base de la marine américaine, en Antarctique, qui déprima tant qu'il négligea le seul générateur de l'installation. Si le médecin ne l'avait pas aidé, son état aurait pu condamner l'ensemble du personnel.

Les conflits interpersonnels sont les problèmes les plus fréquents. Le sentiment d'être exclu d'un groupe ou l'exaspération due à la répétition de la même blague conduisent à de graves conflits en cas de promiscuité. Ces problèmes ont rarement compromis des missions, mais, durant un voyage vers Mars, les dissensions dans un équipage seraient désastreuses.

Les psychologues cherchent des moyens objectifs de détecter le plus tôt possible les défaillances. Les auto-évaluations des astronautes sont peu efficaces : des professionnels entraînés peuvent affirmer qu'ils vont bien alors qu'ils sont incapables de travailler. Il est étonnant de voir à quel point les gens surestiment leur capacité à surmonter ces problèmes ou même oublient de s'y préparer. Parmi les six astronautes qui séjournèrent à bord de *Mir*, certains n'emportèrent pas suffisamment de bagages pour occuper leur temps libre, d'où un ennui qui engendra un traumatisme de réclusion et une irascibilité exacerbée. Pour ne pas être confronté à ces problèmes, A. Thomas emporta des crayons et du papier, de sorte qu'il put s'adonner au dessin. Lors du voyage vers Mars, la sous-occupation et l'ennui seront un problème. Les Russes ont mis au point une batterie de tests visant à surveiller une baisse de performance, signe de problèmes éventuels.

Le succès d'une mission résultera d'une sélection des membres d'équipage. La sélection psychologique n'est pas toujours prise en compte, mais pour des vols longs, elle sera indispensable. Dans un premier temps, l'entretien psychologique permet d'éliminer les problèmes pathologiques, mais rien ne remplace les simulations. Les Européens et les Russes ont déjà procédé à des simulations longues : 60 jours d'isolement pour quatre personnes et 135 jours par une simulation de séjour sur *Mir*. Actuellement, une simulation de séjour dans la Station spatiale internationale s'organise à Moscou. Avant les vols pour Mars, les hivernages en Antarctique seraient un bon test.

Sarah SIMPSON est journaliste à la revue *Scientific American*.

PLANETE MARS
l'association

section française de la Mars Society

partez à la découverte d'un nouveau monde

prenez part à cette grande aventure humaine

restez au contact de l'événement

les missions
les découvertes
les projets...

bulletin
conférences
site et liens internet
forum de discussion

association "Planète Mars"
http://www.planete-mars.com
28, rue de la Gaité 75014-Paris