

les conditions d'une exploration au long cours, tout en restant à quelques jours de la Terre, ce qui présentera une sécurité évidente. Après le retour de l'équipage sur Terre, le véhicule interplanétaire restera en orbite terrestre haute, en attente d'un ravitaillement et d'une vérification pour sa première mission vers un astéroïde.

Nous avons étudié tout un éventail de missions de ce type. Certaines déposeraient les astronautes sur de petits objets (de moins de 100 mètres de diamètre) juste au-delà de la Lune, et les reconduiraient sur Terre en moins de six mois. D'autres s'aventureraient jusqu'à de gros objets (plus de un kilomètre de diamètre) presque aussi éloignés que Mars et les réachemineraient vers la Terre en deux ans. Se contenter de travailler à une mission plus simple risquerait de limiter les défis et n'apporterait pas d'innovation technique notable. À l'inverse, tout miser sur une mission plus ambitieuse pourrait retarder à jamais toute exploration intéressante en fixant des objectifs hors de portée. Notre

plan se situe entre ces deux extrêmes. Il s'agit d'un voyage aller-retour qui durerait un an, avec un lancement en 2024, et où les astronautes passeraient 30 jours à explorer l'astéroïde 2008 EV5. Cet objet, de 400 mètres de diamètre environ, intéresse beaucoup les planétologues : c'est un astéroïde carboné de type C, éventuel vestige de la formation du Système solaire.

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

cas de la mission robotisée japonaise *Hayabusa*, chargée d'étudier l'astéroïde Itokawa, au cours de laquelle plusieurs défaillances ont été résolues grâce à ses moteurs ioniques. Si des problèmes techniques ou budgétaires nous empêchaient de livrer le véhicule interplanétaire à temps pour atteindre l'astéroïde 2008 EV5, nous pourrions choisir une autre cible. Si nous rencontrons des difficultés, nous nous adapterons. Par exemple, si les carburants très performants sont trop difficiles à stocker dans l'espace lointain, nous passerons à des carburants moins efficaces et ajusterons la mission.

Dans notre projet, les astronautes auront un mois pour explorer l'astéroïde. Des capsules d'exploration, inspirées des bathyscaphes, pourraient remplacer les combinaisons spatiales, qui sont encombrantes et rendent pénibles les sorties dans l'espace. Une capsule avec des bras de manipulation robotisés réduit non seulement les difficultés, mais offre aussi un habitacle pour manger et se reposer. Dans une capsule, un astronaute se déplace-

Quelle propulsion pour les missions martiennes ?

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

Le scénario *Mars Direct*, qui propose d'utiliser l'atmosphère de Mars pour s'insérer en orbite martienne et pour produire les ergols du trajet retour, annonce des masses au départ de l'orbite terrestre nettement plus attractives, limitées à quelques centaines de tonnes (230 tonnes dans les cas les plus optimistes pour un équipage de quatre astronautes, ce qui serait réalisable avec deux lanceurs lourds de type SLS). Toutefois, selon notre analyse, la manœuvre d'aéro-capture telle qu'elle est proposée dans ce scénario est trop ambitieuse, d'un point de vue technique (précision du guidage, tenue des matériaux au frottement atmosphérique) et pour des raisons physiologiques, car les astronautes subiraient d'importantes décélérations. Nous étudions cependant avec intérêt des scénarios en propul-

sion chimique reprenant quelques idées de *Mars Direct*.

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



Vue d'artiste d'un véhicule à propulsion nucléaire électrique.

CNES / A. Samois

mais les trajets interplanétaires, pendant lesquels les astronautes seront exposés au rayonnement cosmique, dureront alors huit à neuf mois et le séjour sur Mars ne sera plus que de un à deux mois.

Le CNES s'intéresse aussi à l'utilisation de la propulsion électrique de très forte puissance pour les missions martiennes habitées, principalement selon deux axes : les trajectoires Terre-Mars en poussée continue et les technologies envisageables

pour la génération de puissance. Les trajectoires envisagées se décomposent en plusieurs phases : une phase de spirale continue ou bien d'arcs de poussée (moins consommateurs, mais plus lents) en orbite terrestre, puis une phase de poussée continue interplanétaire : on accélère jusqu'à mi-chemin, puis on « freine » sur le reste de la trajectoire (on inverse en fait la direction de la poussée), et enfin une phase de freinage final en spirale pour insé-

rait pendant plusieurs jours d'affilée. La NASA développe déjà un véhicule d'exploration spatiale qui pourra être utilisé comme capsule autour des astéroïdes, et le même modèle serait ensuite adapté pour un rover de surface pour la Lune ou Mars.

Les avantages des capsules

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

À la fin du mois, une petite impulsion du moteur ionique suffira pour éloigner le vaisseau de l'astéroïde et le voyage vers la Terre, d'une durée de six mois, com-

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

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

Parce que se poser et redécoller sont des tâches extrêmement complexes. Des missions vers les lunes martiennes permettraient aux astronautes de se roder pour les voyages interplanétaires avant de tenter l'épreuve de se poser sur Mars, de s'y promener et de redécoller.

Les ingénieurs ont déjà proposé diverses stratégies pour optimiser la flexibilité et minimiser le coût d'une mission vers Mars. Dans les plus convaincantes, les habitats et les systèmes d'exploration seraient installés à l'avance pour servir de base opérationnelle dès l'arrivée des astronautes. Cet équipement serait acheminé par transport (ionique) lent. Sur Mars, il produirait du carburant soit à partir du dioxyde de carbone atmosphérique mélangé à de l'hydrogène apporté de la Terre, pour libérer du méthane et de l'oxygène, soit en électrolysant de l'eau du sous-sol gelé, pour donner de l'hydrogène liquide et de l'oxygène. En évitant de décoller de la Terre avec le carburant nécessaire au retour (il serait produit sur Mars), on réduirait notablement la masse lancée de la Terre (scénario *Mars Direct*).

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

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

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

rer le vaisseau sur une orbite martienne. Dans ce type de scénario, les astronautes ne sont envoyés qu'une fois le véhicule arrivé sur une orbite terrestre très haute, juste avant le grand arc de poussée interplanétaire.

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

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

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

En poussant ce raisonnement à l'extrême, certains pensent même que la durée du trajet pourrait être réduite à moins de 40 jours. C'est le cas de l'astronaute américain Chang-Diaz, dont la Société *Ad-Astra* étudie la possibilité d'une mission de 39 jours s'appuyant sur quatre réacteurs de 50 mégawatts électriques pour déposer un module de 20 tonnes en orbite martienne ! Les études que nous menons depuis plusieurs années sur ce sujet, notamment avec l'ONERA, montrent qu'une mission si courte ne serait pas faisable avec une masse réaliste au départ de l'orbite terrestre. Cependant, d'autres pistes intéressantes se déga-

gent. Ainsi, avec un seul réacteur de 20 mégawatts, il serait possible de véhiculer des astronautes vers Mars en quatre mois tout en ayant une masse au départ accessible en trois à cinq tirs de lanceurs lourds. Nous étudions aussi des scénarios intermédiaires pour lesquels la durée de mission serait la même qu'en propulsion chimique, mais où la propulsion électrique à forte puissance permettrait de réduire le nombre de lanceurs nécessaires, de bénéficier d'options de retour prématuré intéressantes et surtout d'avoir des fenêtres de départ nettement plus flexibles que celles accessibles en propulsion chimique, qui durent en général un mois au maximum, et n'existent que tous les deux ans environ.

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

Élisa Cliquet

CNES – Direction des lanceurs