

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. Samas

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-