

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

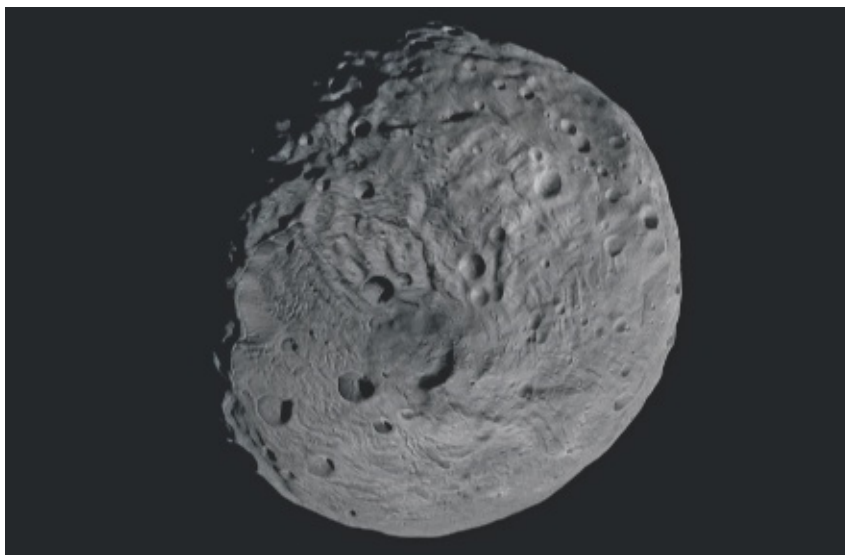
Un système de ce type a propulsé la sonde *Dawn* vers l'astéroïde géant Vesta et la conduira en 2015 jusqu'à la planète Cérès. Là où les moteurs chimiques classiques des fusées produisent une poussée puissante, mais brève, les moteurs électriques éjectent un flux modéré, mais régulier, de gaz. Les systèmes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

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

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

Les astéroïdes : des tremplins vers Mars

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



NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

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

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

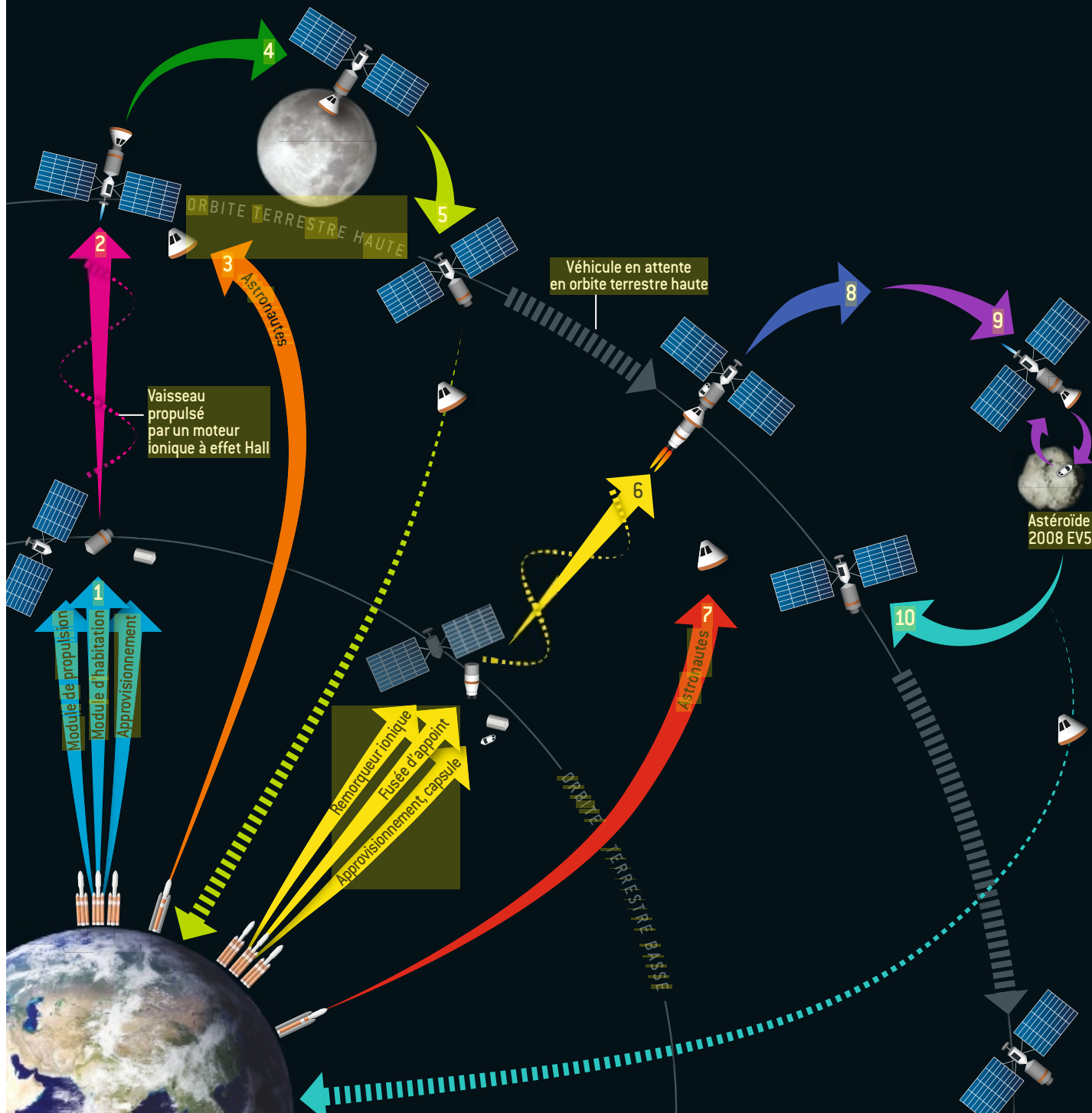
Plusieurs astéroïdes intéressants pourraient être visités par des astronautes avec des temps de vol allant de six mois à un an et demi en utilisant un système de propulsion électrique de 200 kilowatts, ce qui serait un progrès non négligeable par rapport à nos capacités actuelles ; la Station spatiale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

Par ailleurs – c'est le deuxième principe de notre projet –, la NASA ne sera pas obligée d'inventer des systèmes complètement nouveaux comme c'était le cas dans les années 1960. Si certains dispositifs, notamment ceux adaptés à l'impesanteur et ceux qui protègent contre les rayonne-

ments spatiaux, nécessiteront de nouvelles recherches, le reste des équipements dérivera directement de dispositifs existants. Le véhicule spatial sera assemblé en combinant quelques modules spécialisés : la structure, les panneaux solaires et les équipements permettant de vivre dans l'espace dériveront de modèles qui ont déjà été utilisés sur la Station spatiale internationale. De nombreuses agences spatiales étrangères et entreprises privées ont des compétences avérées dans ces domaines, que la NASA pourra mettre à contribution.

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

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



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

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



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

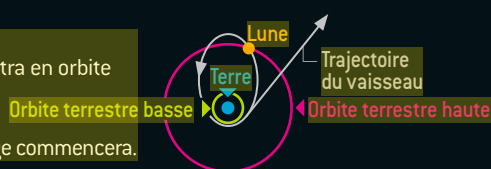
4 Mission lunaire
Pour mettre le vaisseau à l'épreuve, les astronautes le dirigeront vers une orbite lunaire. Ce voyage sera plutôt un vol d'essai, mais il permettra aussi d'accumuler des résultats scientifiques en utilisant une flottille de robots d'exploration.

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

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

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

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



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



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

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

Mission : 2008 EV5

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

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

Pour un vol d'essai, les astronautes placeront le véhicule sur une orbite qui restera presque toujours au-dessus du pôle Sud de la Lune. De là, ils pourront contrôler une flotte de robots d'exploration et étudier la composition d'anciens dépôts de glace dans les cratères toujours à l'ombre du bassin d'Aitken. Une telle mission offrira

Pitch Interactive

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-