

Le projet *VentureStar*, dont le X-33 est l'amorce, a été décidé par le Congrès américain, mais le premier *VentureStar* ne sera pas habité. Afin de prévoir les vols habités, la NASA a récemment demandé aux industriels d'étudier un véhicule expérimental de taille réduite, le X-34.

Pour les techniques de l'après X-33 et X-34, la NASA a récemment renforcé ses travaux sur les moteurs d'avions hypersoniques, relégués au second plan depuis l'annulation du programme d'avion aérospatial en novembre 1994. Des statoréacteurs à combustion supersonique (*scram-jet*), variantes des statoréacteurs classiques, mais qui fonctionnent à des vitesses supérieures à Mach 6 (7 300 kilomètres par heure), pourraient équiper un engin orbital à un seul étage. À partir de l'an 2000, plusieurs avions équipés de ces statoréacteurs, nommés X-43, voleront sans pilote jusqu'à Mach 10 (12 200 kilomètres par heure), puis s'échoueront dans l'océan Pacifique (voir l'encadré de la page 40).

Au-delà de la Terre

Dès qu'un vaisseau spatial quitte l'atmosphère et atteint une vitesse orbitale (environ Mach 25), les contraintes changent de nature. Notamment, le véhicule n'a plus à vaincre la gravité terrestre et la résistance de l'air. Plusieurs types de propulseurs sont à l'étude, notamment le moteur ionique qui équipe aujourd'hui la sonde *Deep Space 1* de la NASA. Les moteurs ioniques fonctionnent en accélérant les atomes chargés (ou ions) d'un gaz à l'aide d'un courant électrique de haute tension. En quittant le moteur, les ions produisent une poussée. Le gaz le plus utilisé est le xénon.

Sur la sonde *Deep Space 1*, l'énergie est fournie par des panneaux solaires, mais, en théorie, n'importe quel générateur électrique est envisageable. Les moteurs ioniques fournissent dix fois plus de poussée par kilogramme de «combustible» (ici du gaz) que les moteurs chimiques, de sorte que le moteur peut emporter moins de gaz. Ainsi, les moteurs ioniques, fonctionnant en continu pendant des années, permettraient à des engins spatiaux d'atteindre des vitesses considérables. Ils autoriseraient des missions d'exploration très longues, vers Uranus et vers Neptune,

Les vaisseaux photoniques

Leik Myrabo

Les vaisseaux spatiaux actuels emportent avec eux leur énergie. On réduirait considérablement le coût des voyages spatiaux en poussant les vaisseaux avec de la lumière laser ou avec des micro-ondes. Au cours des dernières années, des expériences financées par la NASA et par l'armée américaine ont démontré la faisabilité de vaisseaux spatiaux photoniques, poussés par un faisceau laser infrarouge pulsé, émis de la Terre. Les surfaces réfléchissantes du véhicule concentrent le faisceau en un anneau où il chauffe l'air jusqu'à une température d'environ 30 000 degrés (cinq fois la température de la surface solaire). La dilatation explosive de l'air ainsi chauffé engendre la poussée.

En utilisant un laser militaire à dioxyde de carbone de dix kilowatts, qui émettait 28 impulsions par seconde, Franklin Mead et moi-même avons propulsé une maquette d'une dizaine de centimètres de diamètre, stabilisée par rotation, à une hauteur de plus de 30 mètres en trois secondes. Nous avons le financement pour porter la puissance du laser à 100 kilowatts, ce qui permettra d'effectuer des vols jusqu'à 30 kilomètres d'altitude. Nos maquettes actuelles pèsent moins de 50 grammes, mais, d'ici à cinq ans, nous pensons accélérer un microsatellite de un kilogramme et l'injecter en orbite terrestre basse grâce à un laser classique de un mégawatt de puissance, et ceci pour quelques centaines de francs d'électricité.

Les maquettes que nous utilisons, en aluminium ordinaire, comprennent une coque, un capot en forme d'anneau et une partie arrière, formée d'une tuyère. Durant le vol atmosphérique, la section antérieure comprime l'air et le dirige vers l'entrée du moteur. Le capot annulaire reçoit le plus gros de la poussée. La partie arrière sert de miroir collecteur parabolique qui concentre la lumière laser infrarouge en un anneau, tout en fournissant une autre surface sur laquelle la sortie d'air chaud exerce sa pression. Le système est autostabilisé : si le vaisseau se déplace en dehors du faisceau, la poussée l'incline et le remet dans le droit chemin.

Nous envisageons que des vaisseaux spatiaux photoniques de un kilogramme accélèrent ainsi jusqu'à environ Mach 5 et atteignent une altitude de 30 kilomètres, puis passent en mode propulsion en consommant de l'hydrogène liquide embarqué, lorsque l'air se raréfiera. Un kilogramme d'hydrogène devrait suffire pour mener le vaisseau en orbite. Un engin de 1,4 mètre de diamètre devrait injecter en orbite des microsatellites de 100 kilogrammes, en naviguant sur un faisceau laser de 100 mégawatts. Comme le faisceau que nous utilisons est pulsé, on devrait atteindre cette puissance en combinant plusieurs lasers. Ceux-ci lanceraient des satellites de communications et les «désorbiteraient» lorsqu'ils seraient devenus obsolètes.

Des astronefs photoniques de structure différente pourraient se déplacer vers leur source d'énergie, au lieu de s'en éloigner. Ces systèmes transporteraient des marchandises autour du Globe à faible coût. À la place de lasers, on pourrait aussi utiliser des faisceaux de micro-ondes. La densité de puissance des micro-ondes est inférieure à celle des lasers, de sorte que les véhicules devront être plus grands, mais les sources de micro-ondes sont beaucoup moins chères et plus faciles à adapter aux puissances élevées.

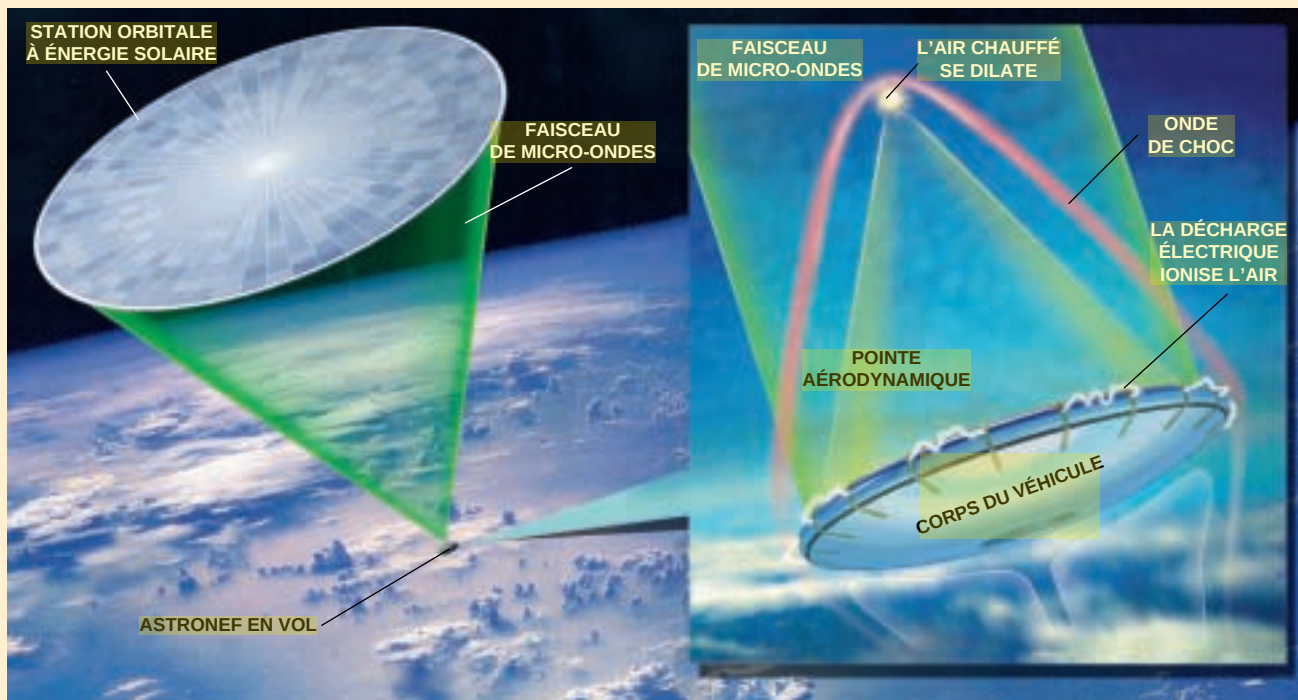


UNE MAQUETTE DE VAISSEAU SPATIAL PHOTONIQUE a déjà volé à 30 mètres de haut au cours d'essais ; elle était propulsée par un laser de dix kilowatts. Des systèmes plus grands devraient pouvoir être mis en orbite.

J'ai également conçu des vaisseaux plus élaborés, afin de transporter des passagers. Ces vaisseaux seraient plus adaptés pour le transport de marchandises lourdes, car ils engendrent leur poussée de manière plus efficace.

Un miroir installé sur le vaisseau concentrerait une partie de l'énergie incidente en un point situé au-dessus du véhicule, à une distance égale à son diamètre. La chaleur intense y créerait «une pointe aérodynamique», laquelle dévierait l'air qui arriverait sur le véhicule. La traînée hydrodynamique et l'échauffement du véhicule seraient ainsi réduits.

Ce vaisseau utiliserait une partie de l'énergie supplémentaire qui engendrerait de puissants champs électriques autour de la monture, ce qui ioniserait l'air ambiant. Il utiliserait également des aimants supraconducteurs pour créer d'intenses champs magnétiques dans cette région. Lorsque l'air ionisé traverserait les champs électriques et magnétiques



UNE STATION ORBITALE À ÉNERGIE SOLAIRE (en haut, à gauche) pourrait faire monter en orbite un astronef photonique en lui envoyant de l'énergie sous forme de micro-ondes (à droite). L'astronef serait propulsé par une poussée magnétohydrodynamique. Il concentre-

rait l'énergie des micro-ondes et créerait une «pointe aérodynamique» qui dévierait le flot d'air. Des électrodes placées sur la monture du véhicule ioniseraient l'air et accroîtraient la poussée par magnétohydrodynamique.

ainsi créés, des forces magnétohydrodynamiques accéléreraient l'air, ce qui créerait une poussée supplémentaire.

En variant la quantité d'énergie émise vers l'avant, le vaisseau spatial photonique commanderait le flux d'air autour du véhicule. En avril 1995, à l'aide d'une pointe aérodynamique placée dans un tunnel à choc hypersonique, j'ai étudié la réduction de la résistance à l'avancement avec une torche à plasma chauffé électriquement à la place du laser. Les essais de magnétohydrodynamique, pour un engin de 15 centimètres de diamètre, viennent de commencer. Un vaisseau spatial photonique de ce type de la taille d'un homme, propulsé par micro-ondes ou par un laser pulsé de 1 000 mégawatts devrait fonctionner jusqu'à 50 kilomètres d'altitude et atteindre facilement les vitesses orbitales.

Les astronefs photoniques pourraient révolutionner le transport spatial s'ils sont envoyés à partir de stations orbitales alimentées à l'énergie solaire. Toutefois, le coût d'assemblage de l'infrastructure orbitale devra être réduit à moins de quelques centaines de francs par kilogramme (pour des lanceurs classiques, il est aujourd'hui de 120 000 francs par kilogramme de charge utile).

Pour réduire les coûts, je propose que l'on construise une station orbitale fonctionnant à l'énergie solaire. Imaginez une structure de un kilomètre de diamètre construite comme une roue de bicyclette géante, en orbite à 500 kilomètres d'altitude. Sa masse serait de l'ordre de 1 000 tonnes, et une lente rotation sur elle-même la stabiliserait par l'effet gyroscopique (un objet qui tourne conserve mieux son orientation). Outre des «rayons» structuraux, la roue comporterait un disque constitué de 55 grands quartiers en carbure de silicium d'une épaisseur de 0,32 millimètre. Sur l'une des faces de chaque quartier, un panneau photovoltaïque d'un rendement de 30 pour cent fournirait 320 mégawatts d'électricité (de tels systèmes devraient voir le jour d'ici une décennie). Sur l'autre face, 13,2 milliards d'émetteurs miniatures à semi-conducteurs, chacun d'une largeur de 8,5 millimètres seulement, produiraient un faisceau micro-ondes de 1,5 watt.

Les pesantes fusées chimiques actuelles pourraient placer en orbite cette structure en 55 lancements, pour un coût total de 30 milliards de francs. La station serait mise en rotation par un système de stockage d'énergie formé de deux câbles supraconducteurs, chacun d'une masse de 100 tonnes, qui pourraient être chargés par des courants électriques opposés. (Cette disposition éliminerait le gigantesque couple magnétique engendré par un câble unique.)

En deux rotations autour de la Terre, la station chargerait entièrement ce système de 1 800 gigajoules d'énergie. Elle rayonnerait ensuite 4,3 gigawatts, sous la forme de micro-ondes, vers des vaisseaux spatiaux photoniques à une distance de plus de 1 000 kilomètres. Des couples mécaniques engendrés par le transfert de petites quantités de courant d'un câble à l'autre permettraient d'orienter la station, mais la commande précise des astronefs serait assurée par des balises embarquées qui enverraient des signaux de coordination des émetteurs individuels de la station, ce qui créerait une plage de dix mètres de diamètre sur le site de lancement. Les astronefs atteindraient l'orbite en moins de cinq minutes : leurs occupants seraient soumis à une accélération d'à peine trois fois l'accélération de la pesanteur, environ la même que celle subie par les astronautes de la navette spatiale. La station à énergie solaire pourrait également émettre la totalité de son énergie dans une décharge de 54 secondes qui offrirait une poussée verticale de presque 20 fois l'accélération de la pesanteur vers l'orbite géostationnaire ou même pour atteindre la vitesse de libération du champ gravitationnel terrestre.

La première station orbitale à énergie solaire ouvrira la voie à toute une industrie de stations orbitales, lancées et assemblées à partir de vaisseaux spatiaux photoniques spécialisés. D'ici à quelques décennies, une flotte de ces vaisseaux permettra d'effectuer des voyages rapides et à faible coût autour du Globe, vers la Lune et au-delà.

Leik Myrabo enseigne la physique pour l'ingénieur à l'Institut polytechnique Rensselaer (New York).

qui renverraient bien plus de données que les survols de *Voyager 2* dans les années 1980.

Un autre type de moteur ionique, nommé propulseur à effet Hall, accélère également des ions, mais avec une configuration différente. Ces propulseurs utilisent un champ électrique et un champ magnétique radial qui dirigent les ions, mais, pour une même taille, la poussée est quatre fois supérieure. La Société européenne de propulsion a mis au point un tel moteur qui devrait voler sur le satellite français de télécommunication *Stentor*. Pour le moment, on n'envisage d'utiliser ces systèmes que dans l'espace proche, mais, si les performances s'améliorent, on étendra leur champ d'application. Le gouvernement américain a déjà équipé un satellite militaire d'un tel moteur, et les satellites des flottes de télécommunications *Teledesic* et *SkyBridge* seront munis de propulseurs à effet Hall.

Aujourd'hui, des cellules photovoltaïques alimentent en électricité la plupart des satellites en orbite proche de la Terre. Les ingénieurs cherchent à les améliorer à l'aide de lentilles, qui focalisent la lumière solaire sur les cellules. La sonde *Deep Space 1* est équipée de tels panneaux.

Au lieu de transformer l'énergie solaire en électricité, ne pourrait-on pas l'utiliser directement pour pousser les satellites? L'armée américaine a voté un budget de 290 millions de francs pour la mise au point d'un étage terminal de fusée à énergie solaire qui transférerait les satellites d'une orbite terrestre basse à l'orbite géostationnaire pour une fraction seulement du coût des fusées chimiques. Le SOTV (l'acronyme de *Solar Orbit Transfer Vehicle*, soit «véhicule de transfert orbital solaire») utilisera un miroir très léger qui dirigera la lumière solaire sur un bloc de graphite dont la température atteindra 2 100 degrés. À cette température, l'hydrogène liquide stocké à bord se vaporisera ; le gaz occupant plus de volume que le liquide, une poussée sera produite par son éjection. Trois à huit semaines seront nécessaires pour monter une charge utile sur l'orbite géostationnaire, mais les économies se chiffrent par dizaines de millions de francs pour chaque lancement.

Au-delà de Jupiter, l'énergie solaire est plus diffuse, donc plus difficile à exploiter. La sonde *Galileo*, qui

Les voiles photoniques

Henry Harris

Depuis que les astronomes ont découvert que notre Galaxie contient de nombreuses planètes, les rêves des auteurs de science-fiction semblent plus réalistes. L'étude de ces planètes lointaines pourrait nous en apprendre davantage sur notre place dans l'Univers. Cette perspective conduit les ingénieurs à tourner leur regard vers les étoiles.

L'exploration de ces mondes n'est pas pour demain : avec les moyens techniques actuels, il faudrait des dizaines de milliers d'années pour atteindre les étoiles les plus proches. En 1998, j'ai coordonné pour la NASA une étude des systèmes de propulsion qui permettraient à un véhicule d'exploration de faire l'aller-retour vers une autre étoile en 40 ans, soit la durée d'une carrière pour un scientifique. Trois systèmes semblent envisageables : la fusion (voir l'encadré de la page 50), l'antimatière et la pression de radiation. Aujourd'hui, seul le dernier phénomène est suffisamment bien connu pour qu'on puisse en tester les potentialités.

L'attrait de la pression de radiation est évident : lorsque vous prenez votre voiture pour un long trajet, vous êtes tributaire de la présence de stations-service pour le ravitaillement en carburant et de mécaniciens qui la maintiennent en état. En revanche, les véhicules spatiaux actuels doivent emporter tout le carburant dont ils auront besoin et fonctionner sans intervention humaine. Ne pourrait-on pas laisser le moteur et le carburant sur la Terre? On pourrait alors procéder à des réparations au cours des vols et alléger le véhicule, de sorte qu'il serait accéléré plus facilement.

Dès les années 1980, les ingénieurs en aéronautique ont proposé de pousser des vaisseaux pour les vols de longue durée avec un puissant faisceau laser projeté sur une grande «voile». Les lasers transportent de l'énergie à de très grandes distances, et une surface importante de voile permet à cette dernière de recevoir une quantité d'énergie considérable. D'autres rayonnements sont envisageables : les micro-ondes sont évoqués par Leik Myrabo (voir l'encadré de la page 44), mais on pourrait aussi utiliser des particules chargées qui, atteignant le vaisseau, traverseraient une boucle magnétique supraconductrice, créant ainsi une force électromagnétique qui produirait une poussée. À ce jour, la lumière laser semble être encore la plus efficace.

Lorsqu'un photon émis par un laser atteint la voile, deux phénomènes peuvent se produire. Soit il entre en collision élastique avec le champ électromagnétique qui entoure les atomes de la voile, et il est alors réfléchi ; soit il est absorbé par le matériau de la voile, ce qui chauffe légèrement la voile. Dans les deux cas, la voile est accélérée, mais l'accélération qui résulte de la réflexion est deux fois supérieure à celle qui résulte de l'absorption.

L'accélération due à un laser est proportionnelle à la force qu'il transmet à la voile et inversement proportionnelle à la masse du véhicule spatial. Comme pour d'autres méthodes de propulsion, les performances des voiles photoniques sont limitées par les propriétés thermiques et par la résistance des matériaux, ainsi que par notre capacité à concevoir des structures légères. Les voiles proposées seraient un mince film métallique poli, tendu sur une structure de soutien qui conférerait une résistance structurale à l'ensemble.

La puissance transmise est limitée par l'échauffement de la voile : lorsque sa température augmente, la surface métallique devient moins réfléchissante. Pour refroidir la voile et augmenter ainsi l'accélération, on recouvrirait la face non réfléchissante de matériaux qui dissiperaient efficacement la chaleur.

Pour atteindre des vitesses très élevées, un véhicule spatial devrait accélérer longtemps. La vitesse finale qu'une voile photonique peut atteindre est déterminée par la durée pendant laquelle un laser au sol peut l'éclairer efficacement. La lumière laser est cohérente : l'énergie transmise est constante quelle que soit la distance, dans la limite d'une distance critique nommée distance de diffraction. Au-delà, la puissance transmise devient rapidement négligeable.



Slam Films