

Des câbles électrodynamiques vont également être essayés. Vers le milieu de l'an 2000, une mission de la NASA démontrera qu'un câble conducteur permet d'abaisser l'orbite de l'étage supérieur d'un lanceur *Delta 2*. À la Société *Tethers Unlimited*, nous mettons au point une version commerciale de cette idée : un petit caisson serait attaché à un satellite ou à l'étage supérieur avant le lancement ; à l'achèvement de la mission ou en cas de dysfonctionnement, le câble conducteur serait déployé et, freiné par le champ magnétique de la Terre, il ferait rapidement perdre de l'altitude au véhicule jusqu'à ce qu'il brûle dans l'atmosphère supérieure. Nous testerons un tel système de « désorbitage », vers la fin de l'an 2000, sur un étage supérieur de fusée construit par la Société russe *Lavochkin Association*.

La NASA envisage également d'utiliser des câbles électrodynamiques pour une propulsion ascendante. Dans ce système, des panneaux solaires fourniraient un flux d'électricité à travers le câble pour la propulser dans le champ magnétique terrestre. La force résultante monterait des charges utiles autour de la Terre. On maintiendrait ainsi la Station spatiale internationale en orbite, ce qui éviterait les ravitaillements en carburant.

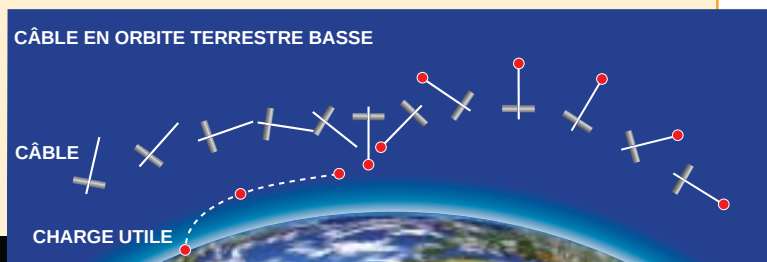
Jusqu'où les câbles emporteront-ils l'humanité ? Nous avons analysé un système de câbles tournant, de plusieurs centaines de kilomètres de long, en orbite, qui enverraient des charges utiles vers la Lune, et même plus loin. Tel Tarzan qui se balance de liane en liane, on accrocherait d'abord une charge utile, à l'aide d'un véhicule de lancement réutilisable, sur un câble en orbite terrestre basse, qui transférerait la charge à un

autre câble sur une orbite terrestre elliptique plus éloignée ; le deuxième câble lancerait alors l'objet vers la Lune, où il serait capturé par un câble en orbite lunaire.

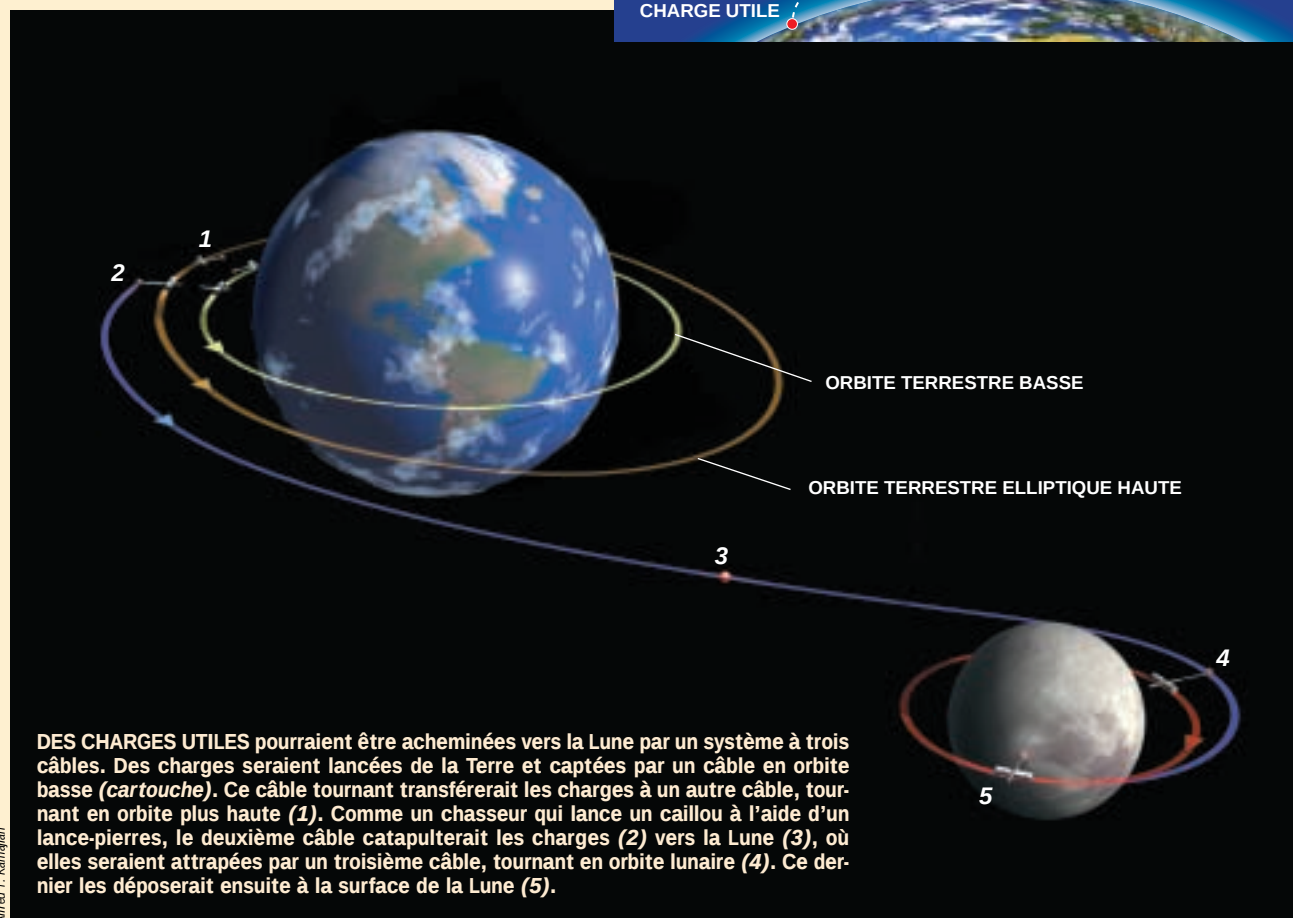
Le câble lunaire tournerait autour de la Lune à une vitesse telle que, une fois la charge utile capturée, il déposerait l'objet en douceur, à la surface de la Lune, une demi-rotation plus tard. Simultanément, le câble lunaire prendrait en charge un objet à retourner vers la Terre. Aucun carburant ne serait nécessaire si la masse à déposer et la masse à reprendre sont égales. Un tel mécanisme de transport formerait une navette, faisant du voyage lunaire un événement fréquent et banal.

De nombreux défis techniques restent à relever avant que ce système devienne une réalité, mais il est porteur d'un énorme potentiel. Un jour peut-être, des câbles tournant autour de nombreuses planètes et de leurs satellites, transporteront-ils les marchandises d'un commerce interplanétaire florissant.

Robert FORWARD et Robert HOYT sont les fondateurs de la Société *Tethers Unlimited*.



Johann Rosario



Alfred T. Kamajian

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.

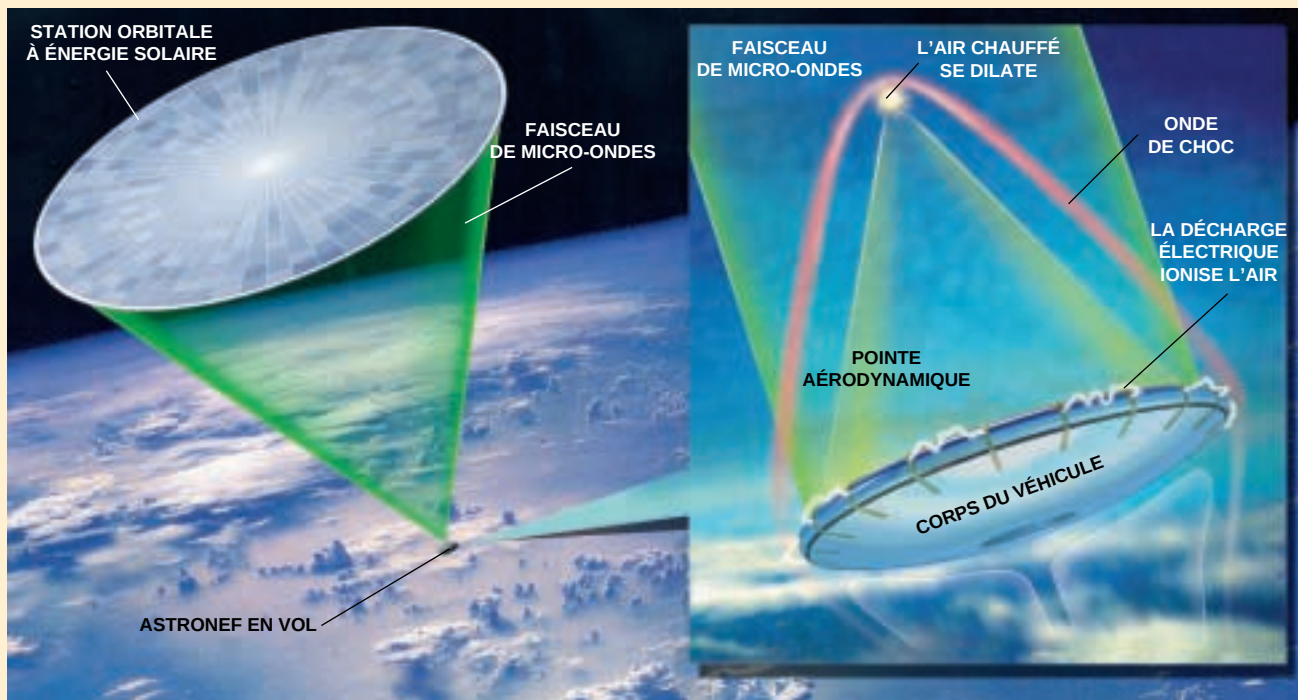


UNE MAQUETTE DE VAISSEAU SPATIAL PHOTONIQUE a déjà volé à 30 mètres de haut au cours d'essais ; elle était propulsée par un laser de dix kilowatts. Des systèmes plus grands devraient pouvoir être mis en orbite.

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.



La distance de diffraction d'un laser, et donc la vitesse maximale du véhicule qu'il propulse, dépend de l'ouverture du laser. Des lasers très puissants consisteraient probablement en une batterie de plusieurs centaines de petits lasers. L'ouverture équivalente est alors à peu près égale au diamètre de la totalité de la batterie de lasers. La puissance maximale est transmise lorsque les lasers forment un ensemble le plus serré possible. Nous avons conçu un arrangement en mosaïque d'une densité voisine de 100 pour cent.

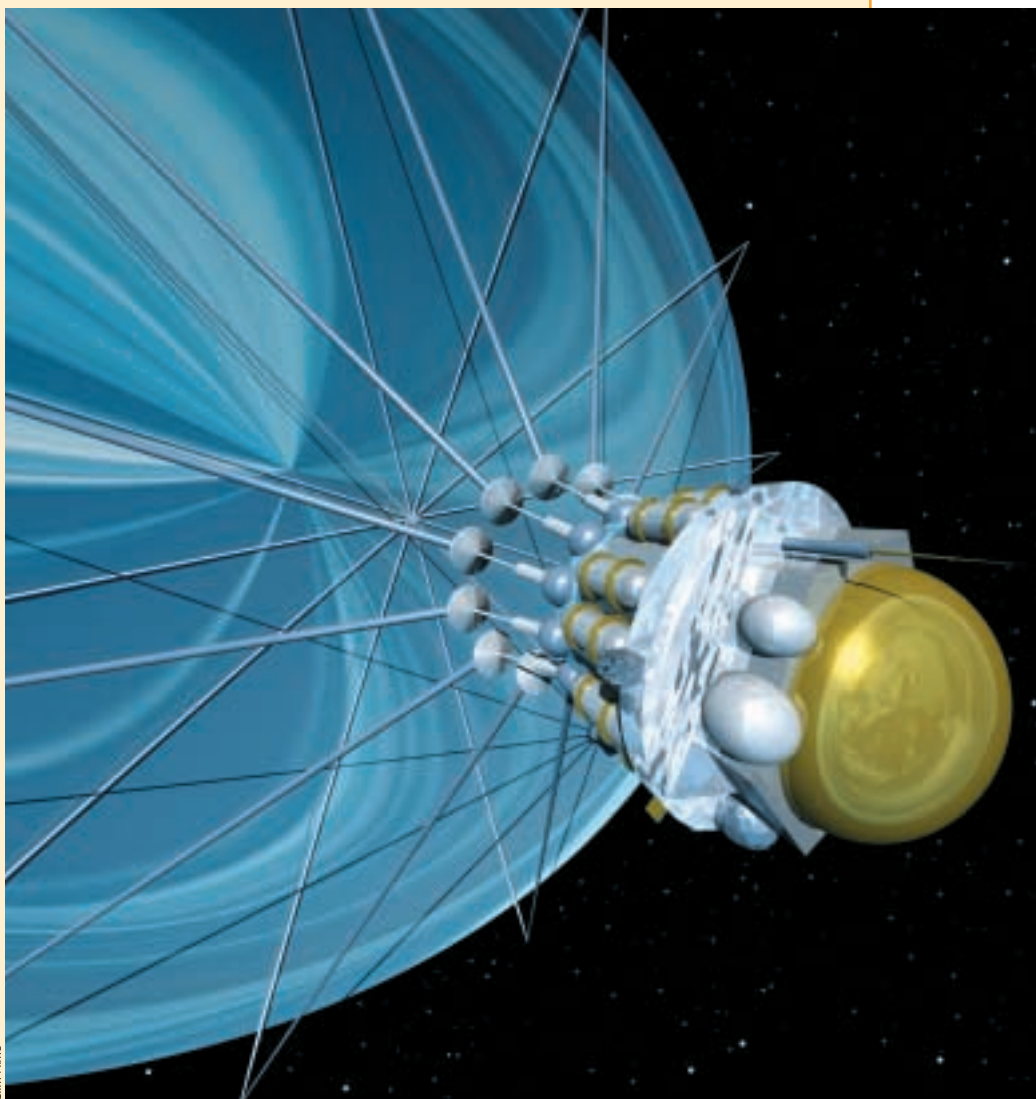
Au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena, nous avons étudié les compromis techniques pour le coût des missions entre la puissance de lasers individuels et la taille d'une batterie de lasers. L'ouverture requise pour une mission interstellaire est énorme. Pour envoyer une sonde en 40 ans vers l'étoile proche Alpha du Centaure, la batterie de lasers devrait avoir un diamètre de 1 000 kilomètres. Heureusement, les missions dans le Système solaire requièrent des ouvertures moindres : l'envoi d'une charge utile de dix kilogrammes vers Mars en dix jours nécessite une ouverture de 15 mètres avec un laser de 46 gigawatts qui éclairerait une voile de 50 mètres de diamètre recouverte d'or. Avec ce mécanisme, on pourrait envoyer une sonde jusqu'à la frontière entre le vent solaire et le milieu interstellaire, aux confins du Système solaire, en trois ou quatre ans.

Un véhicule spatial à voile photonique suivrait automatiquement un faisceau, de sorte qu'on pourrait le diriger de la Terre. On peut même construire une voile avec un anneau externe réfléchissant qui se détacherait une fois la destination atteinte. L'anneau continuerait sa route, réfléchissant la lumière laser vers la partie centrale, séparée de la voile, la propulsant ainsi sur le trajet de retour vers la Terre.

Une grande partie du travail sur les voiles photoniques a déjà été réalisée. Le ministère américain de la Défense a mis au point des lasers de haute puissance et des systèmes de pointage de précision dans le cadre de sa recherche sur les missiles balistiques et sur les armements antisatellites. Des satellites qui réfléchissent la lumière solaire ont déjà été testés. Les Russes ont fait voler un réflecteur solaire tournant, en polymère, de 20 mètres de diamètre, *Znamya 2*, dans le cadre d'un projet d'éclairage hivernal d'appoint des villes du Nord de la Russie.

Aux États-Unis, l'Agence américaine pour l'océan et l'atmosphère prévoit de lancer dans les quatre ans à venir un véhicule spatial propulsé par une voile solaire. L'engin tournerait sur une orbite instable entre la Terre et le Soleil, d'où il détecterait les particules émanant de tempêtes solaires, une heure avant qu'elles n'atteignent la Terre.

La NASA évalue des projets de voiles photoniques comme d'éventuelles solutions de remplacement à faible coût des fusées classiques. Les missions envisagées vont de la démonstration d'une voile de



UN VÉHICULE SPATIAL À VOILE PHOTONIQUE (à gauche), poussé de la Terre par un laser, pourrait un jour transporter des sondes vers des destinations lointaines du Système solaire, voire vers d'autres étoiles. L'accélération serait due à la pression de radiation. De telles voiles seraient liées à des charges utiles légères (ci-dessus).

100 mètres de diamètre en orbite terrestre à un voyage à travers l'onde de choc, aux confins du Système solaire.

Pour le moment, on teste les propriétés de matériaux susceptibles de constituer des voiles à laser pour des missions vers Mars, la ceinture de Kuiper et le milieu interstellaire. Au Nouveau-Mexique, un laser chimique militaire, d'une puissance de l'ordre de un mégawatt, testera les accélérations résultantes sur des voiles déployées à partir de véhicules spatiaux. D'ici à cinq ans, des lasers délivrant une puissance de un mégawatt pourraient propulser des voiles photoniques d'une orbite à une autre. De tels lasers assureraient la propulsion de missions scientifiques vers la Lune au cours de la prochaine décennie.

Si les voiles photoniques font naviguer dans le Système solaire, on envisagera ensuite leur utilisation pour des voyages vers des étoiles lointaines.

Henry HARRIS étudie l'exploration interstellaire au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena (Californie).

Space Access

Date de lancement prévue : 2003

Estimation du coût : 25 à 40 milliards de francs

Source de propulsion : statoréacteurs à éjecteurs, fusées



Space Access

4. CET AVION SPATIAL LOURD est en cours de mise au point par la Société Space Access. Grâce à d'innovants statoréacteurs à éjecteurs, ce véhicule atteindra Mach 6 (six fois la vitesse du son, soit 7 000 kilomètres par heure), avant de mettre à feu ses moteurs fusées. Les étages séparés atterriront sur la piste de lancement.

Fusée Kistler réutilisable

Date de lancement prévue : 1999

Estimation du coût : non révélé

Source de propulsion : fusée au kérosène et à l'oxygène liquide



Kistler Aerospace

5. LE PREMIER VAISSEAU SPATIAL ENTIÈREMENT RÉUTILISABLE sera l'engin K-1 de la Société Kistler Aerospace. Il devrait voler à la fin de 1999. Cette fusée à deux étages utilise des moteurs russes qui fonctionnent au kérosène et à l'oxygène liquide. Les étages séparés retourneront sur Terre par parachute.

a atteint les environs de Jupiter en 1995, et la sonde *Cassini-Huygens*, en route vers Saturne, ont toutes deux des générateurs nucléaires qui utilisent la chaleur de la désintégration de plutonium 238 pour engendrer de petites quantités d'électricité. Toutefois, il serait trop dangereux d'envoyer dans l'espace des systèmes nucléaires plus gros, car un accident au lancement serait catastrophique.

Comment résoudre la difficulté ? Les réacteurs nucléaires produisant des déchets radioactifs, les promoteurs de l'énergie nucléaire spatiale envisagent de les lancer à l'état inactif, à l'aide de fusées classiques, et de les activer à distance de la Terre. Un voyage vers Mars ne durerait que 100 jours à l'aide d'un moteur nucléaire, contre 200 jours pour une fusée chimique. Un réacteur pourrait également fournir de l'énergie pour une base installée sur Mars.

Les réacteurs nucléaires assureraient la propulsion des fusées de diverses manières, par exemple en fournissant une poussée directe et intense pendant un court instant (voir l'encadré de la page 49). Un réacteur nucléaire pourrait aussi produire de la chaleur qui serait ensuite transformée en électricité, laquelle alimenterait des moteurs ioniques, des propulseurs à effet Hall ou un nouveau type de propulseur électrique nommé propulseur magnétoplasmodynamique. Toutefois, les réticences du public limitent les études de ce type.

Poussés par de l'énergie rayonnée

Si les réacteurs nucléaires étaient rejetés, bien d'autres solutions subsisteraient. Par exemple, des ingénieurs ont imaginé des catapultes à lévitation magnétique, où les fusées seraient en sustentation au-dessus d'une piste comme le train allemand *Maglev* ; ces catapultes, construites sur le flanc d'une montagne, accéléreraient une fusée qui quitterait la Terre pour s'élever dans le ciel sous un angle de 30 ou 40 degrés, à la vitesse du son.

Des véhicules pourraient également être propulsés par des micro-ondes (voir l'encadré de la page 44) : une poussée serait assurée par un effet magnétohydrodynamique, créé lorsqu'un fluide ou un gaz conducteur traverse des champs électriques et magnétiques croisés. Avec de tels systèmes, les

Les fusées nucléaires

James Powell

Un jour, on ne se contentera plus d'envoyer des sondes qui survolent rapidement les planètes externes du Système solaire : on voudra les visiter à l'aide de véhicules spatiaux capables de se mettre en orbite autour d'elles, de faire descendre des robots sur leurs lunes et, même, d'en rapporter des échantillons de roches. On voudra envoyer des astronautes vers leurs fascinants satellites, dont on pense que certains contiennent en abondance de l'eau liquide, condition fondamentale pour héberger la vie telle que nous la connaissons.

Pour de telles missions, la fission nucléaire semble mieux adaptée que la combustion chimique. Les fusées chimiques sont utiles, mais la quantité relativement faible d'énergie qu'elles fournissent pour une masse donnée de carburant est limitant. Avec la propulsion chimique, seul un vaisseau spatial léger qui utilise plusieurs «assistances» gravitationnelles de planètes peut atteindre les planètes lointaines. Pour profiter de ces manœuvres gravitationnelles d'appoint, les concepteurs de missions doivent attendre des «fenêtres» de lancement, de courtes périodes durant lesquelles on peut lancer un engin spatial vers des planètes positionnées de telle façon qu'elles accélèrent sa course de proche en proche vers des corps célestes éloignés.

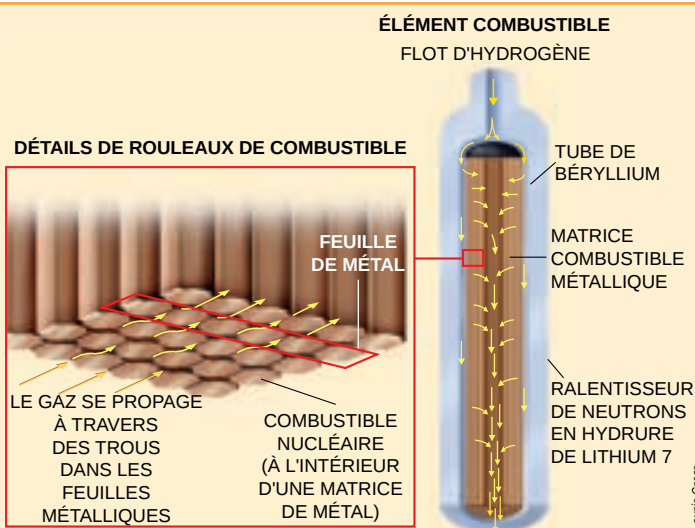
Les vitesses d'éjection des gaz de combustion ne sont pas suffisantes pour accélérer suffisamment les fusées. Les meilleures fusées chimiques, où l'on utilise la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, accélèrent des vaisseaux qui quittent l'orbite terrestre à dix kilomètres par seconde au maximum.

En revanche, des fusées nucléaires communiqueraient des accélérations de 22 kilomètres par seconde. On atteindrait Saturne en trois ans seulement au lieu de sept, et sans assistance gravitationnelle. Les fusées nucléaires seraient sûres et propres : une fusée nucléaire n'a pas besoin d'être très radioactive au moment du lancement. Le véhicule spatial, avec ses réacteurs nucléaires, serait lancé par une fusée chimique classique. Une fois la charge utile à environ 800 kilomètres d'altitude, on mettrait le réacteur nucléaire en route.

La construction d'un moteur de fusée à fission nucléaire est envisageable : avec mes collègues, nous avons dessiné un moteur de fusée nucléaire compact qui pourrait être construit dans six ou sept ans, pour un coût de 3,5 à 5 milliards de francs. Les coûts de mise au point du moteur seraient compensés par les économies réalisées sur les futurs coûts de lancement, car un véhicule spatial nucléaire n'a pas besoin d'emporter une masse importante de propergols chimiques, de sorte qu'on pourrait utiliser de petits lanceurs, tel qu'*Ariane 4*.

Les fusées nucléaires ne sont pas des nouveautés. À la fin des années 1980, le ministère américain de la Défense avait un programme de propulsion thermique nucléaire spatial. Son objectif était la mise au point d'un moteur nucléaire léger et compact, pour des applications de défense, comme l'injection de charges utiles lourdes en orbite terrestre haute. La pierre angulaire de ce projet était un réacteur à lit de particules, où le combustible consistait en de petites particules de carbure d'uranium tassées, recouvertes de carbure de zirconium. Les travaux sur ce réacteur avortèrent avant la construction d'un modèle de vol, mais les ingénieurs avaient montré, sur un modèle de faible puissance que le concept était réalisable.

Dans notre projet, le combustible nucléaire du réacteur serait sous la forme de feuilles métalliques perforées, enroulées comme dans un roulé à la confiture, avec un centre creux (voir la



DANS UN MOTEUR NUCLÉAIRE COMPACT, 37 cellules chaufferaient de l'hydrogène. Circulant dans l'élément, ce dernier se vaporiserait entre les rouleaux de combustible nucléaire (en marron clair). Cinq des feuilles de la matrice métallique du rouleau sont représentées en détail à gauche. Le gaz chauffé s'engouffrerait ensuite dans un canal central et sortirait en bas de l'élément créant la poussée.

figure ci-dessus). Une enveloppe d'hydrure de lithium 7 entourerait le rouleau de combustible et ralentirait les neutrons émis par la fission nucléaire qui se produirait au sein du combustible. Le réfrigérant (l'hydrogène liquide) s'écoulerait de l'extérieur du rouleau vers l'intérieur, se vaporisant rapidement à mesure qu'il s'échaufferait et qu'il coulerait vers le centre. Le gaz chauffé à environ 2 700 degrés passerait à grande vitesse dans un canal le long de l'axe central du rouleau et serait éjecté par une petite tuyère.

Un tel système profiterait de la présence d'hydrogène dans le Système solaire. Ainsi, comme le combustible nucléaire dure longtemps, un véhicule propulsé à l'énergie nucléaire pourrait en théorie faire le tour du Système solaire en 10 ou 15 ans, en se réapprovisionnant en hydrogène si nécessaire. Un vaisseau spatial pourrait évoluer durant des mois dans les atmosphères de Jupiter, de Saturne, d'Uranus ou de Neptune, récoltant des données détaillées sur leur composition ou sur leur climat. Un véhicule pourrait également visiter Europe, Pluton ou Titan en recueillant des échantillons de roches, et il referait le plein d'hydrogène en hydrolysant l'eau de la glace fondue.

Son réacteur n'étant mis en route que loin de la Terre, un véhicule spatial nucléaire serait plus sûr que certaines sondes d'exploration de l'espace lointain, équipées de propulseurs chimiques. Aux confins du Système solaire, les rayons du Soleil sont trop faibles pour fournir l'énergie électrique nécessaire aux instruments des engins spatiaux. C'est pourquoi ils fonctionnent en général au plutonium 238, qui est hautement radioactif même lors du lancement. En revanche, sur une sonde à propulseurs nucléaires, les instruments seraient alimentés par le réacteur qui fournit la poussée. En outre, la quantité de déchets radioactifs produits serait négligeable (de l'ordre de un gramme pour une mission dans l'espace lointain).

Avec uniquement des fusées chimiques, notre capacité d'exploration des planètes externes et de leurs satellites est limitée. Dans le futur proche, seules des fusées nucléaires pourront nous fournir la puissance, la fiabilité et la souplesse nécessaires pour élargir notre connaissance des confins du Système solaire.

James POWELL est président de la Société
P l u s

Vers les étoiles

Stephanie Leifer

L'idée de voyage vers les étoiles était déjà évoquée par les poètes romains, mais elle a toujours correspondu à une sorte de course à l'impossible. Bien que le voyage interstellaire reste un merveilleux rêve futuriste, un petit groupe d'ingénieurs et de scientifiques analyse théoriquement et expérimentalement des techniques capables de propulser des vaisseaux spatiaux à des vitesses suffisamment élevées pour s'échapper de notre Système solaire. Un système de propulsion fondé sur la fusion nucléaire pourrait emmener des hommes vers les planètes externes et envoyer des engins spatiaux automatiques à des milliers d'unités astronomiques dans l'espace interstellaire (une unité astronomique, égale à 150 millions de kilomètres, est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil). Un tel système pourrait voir le jour dans les décennies à venir. Des moteurs encore plus puissants, propulsés par annihilation de matière et d'antimatière, pourraient emmener des astronefs vers des étoiles voisines.

L'attrait de ces modes de propulsion exotiques réside dans la quantité fantastique d'énergie produite à partir d'une masse donnée de combustible. Un système de propulsion fondé sur la fusion nucléaire, par exemple, fournirait environ 100 milliards de joules par gramme de combustible, soit dix millions de fois plus qu'avec des réactions chimiques. Les réactions matière-antimatière seraient plus difficiles à exploiter, mais elles engendreraient 20 000 milliards de joules à partir d'un seul gramme de combustible !

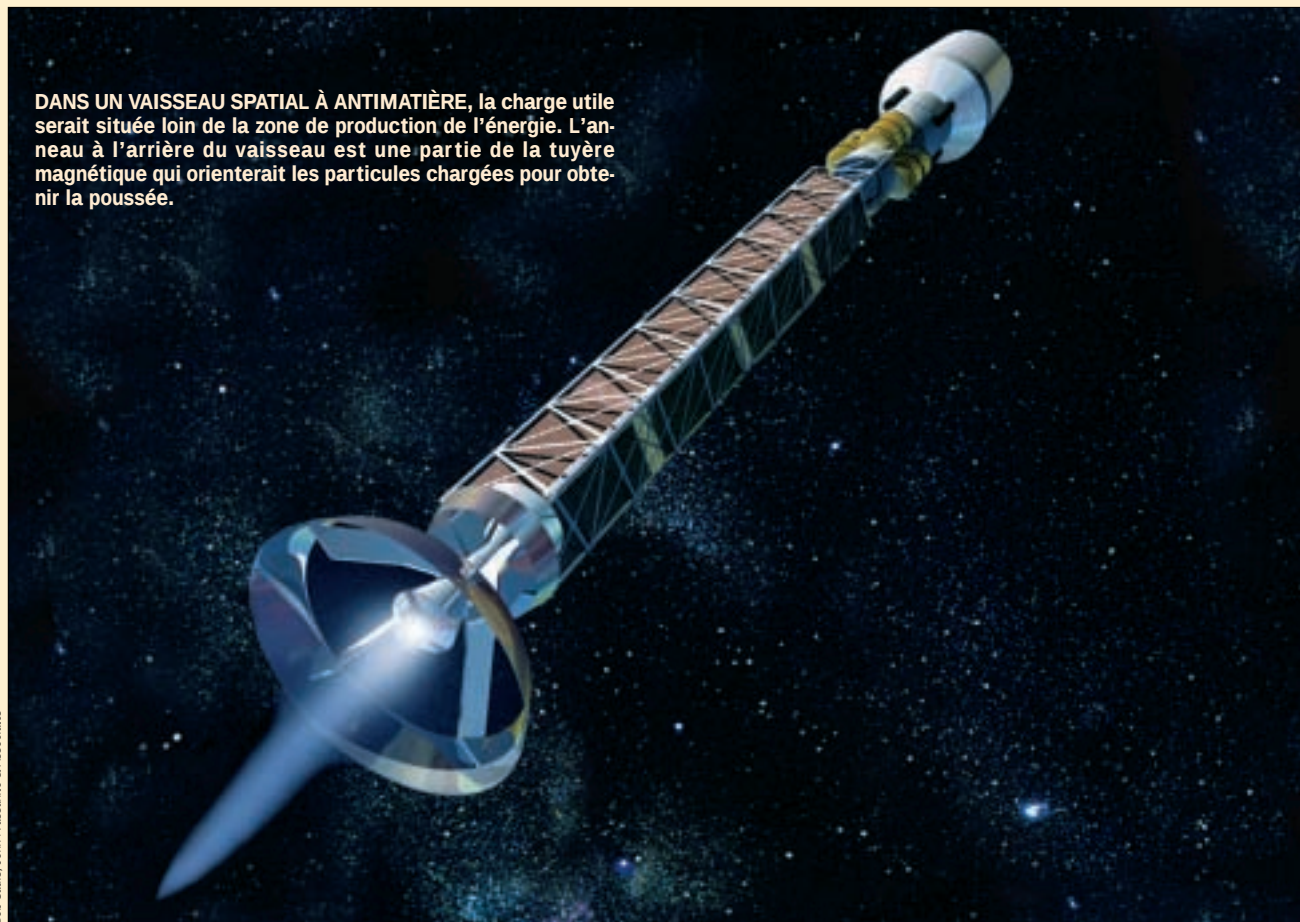
Dans la fusion nucléaire, des atomes légers fusionnent en atomes plus lourds, lorsque la température et la pression sont suffisantes

pour les rapprocher durant un temps assez long. La différence de masse (Δm) entre la somme des masses des deux atomes légers et la masse de l'atome fusionné correspond à l'énergie libérée (E) suivant la célèbre formule $E = \Delta mc^2$ (c est la vitesse de la lumière).

On explore la fusion contrôlée de deux façons, selon la technique utilisée pour confiner le gaz extrêmement chaud, le plasma, au sein duquel a lieu la fusion. Dans la fusion par confinement magnétique, de puissants champs magnétiques confinent le plasma. En revanche, la fusion par confinement inertiel est fondée sur des faisceaux lasers ou d'ions, dont le rayonnement chauffe et comprime de minuscules billes de combustible fusible.

En novembre 1997, des physiciens qui étudient le confinement magnétique ont produit une réaction de fusion dont l'énergie était égale à 65 pour cent de l'énergie fournie pour amorcer la réaction. La réaction eut lieu en Angleterre, dans le tokamak européen JET, une enceinte toroïdale où le plasma est confiné par des champs magnétiques. La fusion ne sera utilisée pour la production d'énergie que si l'on parvient à produire plus d'énergie qu'il en faut pour amorcer ou entretenir la réaction, mais, même si on l'obtient, sur la Terre, il y aura plusieurs problèmes spécifiques à résoudre pour le développement de fusées à fusion. Notamment, on devra canaliser les particules chargées, très énergiques, créées par la réaction. En outre, on devra apprendre à stocker suffisamment de combustible et à régler la libération de l'énergie produite.

DANS UN VAISSEAU SPATIAL À ANTIMATIÈRE, la charge utile serait située loin de la zone de production de l'énergie. L'anneau à l'arrière du vaisseau est une partie de la tuyère magnétique qui orienterait les particules chargées pour obtenir la poussée.



La fusée à fusion est évoquée depuis la fin des années 1950. Bien que la fusion produise d'énormes quantités de particules très énergiques, la réaction n'accélérera un vaisseau spatial que si ces particules sont dirigées de façon à produire une poussée. Dans les systèmes à fusion par confinement magnétique, on alimenterait la réaction en combustible pour l'entretenir, tout en permettant à une partie du plasma de s'échapper par une tuyère. Comme le plasma détruirait toute paroi matérielle rencontrée, la tuyère devrait être magnétique : de puissants champs magnétiques dirigeraient les particules chargées vers la sortie de la fusée.



Dana Berry et Robert O'Dell

UN VAISSEAU SPATIAL INTERSTELLAIRE HABITÉ aurait une structure tournante à l'avant, pour simuler la gravité à l'intérieur de quatre compartiments.

Dans un moteur fondé sur la fusion par confinement inertiel, de puissants lasers ou des faisceaux d'ions fusionneraient de minuscules billes de combustible à une cadence de 30 microbilles par seconde. Une tuyère magnétique suffirait également pour évacuer le plasma, créant ainsi la poussée.

Les particules créées par fusion dépendent des combustibles utilisés. La réaction la plus facile à amorcer est celle entre le deutérium et le tritium, deux isotopes lourds de l'hydrogène dont les noyaux atomiques comprennent un proton et, respectivement, un et deux neutrons. La réaction libère des protons et des particules alpha, c'est-à-dire des noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Les particules alpha communiqueraient une poussée (on peut les diriger à l'aide de champs électriques ou magnétiques, parce qu'ils sont électriquement chargés), mais les neutrons (neutres) sont indésirables parce qu'on ne peut les diriger. Leur énergie cinétique peut être exploitée pour la propulsion, mais pas directement : on pourrait les bloquer dans un matériau et utiliser la chaleur qui résulte de leur capture. Enfin les neutrons menaceraient l'équipage humain, de sorte que les fusées emportant un équipage seraient alourdies par des protections.

Ainsi, bien que la fusion entre deutérium et tritium soit *a priori* la plus facile à réaliser, il serait préférable d'utiliser du deutérium et l'isotope 3 de l'hélium (deux protons et un neutron). La fusion de ces noyaux produit une particule alpha et un proton, tous deux manipulables par des champs magnétiques. Cependant, l'hélium 3 est extrêmement rare sur la Terre, et la réaction entre le deutérium et l'hélium 3 est plus difficile à amorcer que la réaction entre le deutérium et le tritium. Dans tous les cas, seul un vaisseau spatial de plusieurs milliers de tonnes (la majeure partie étant du combustible) pourrait conduire des hommes jusqu'aux confins du Système solaire ou dans l'espace interstellaire (pour comparaison la Station spatiale internationale aura une masse de 500 tonnes environ).

Chacune des difficultés évoquées semble rébarbative, mais, pour chacune, des solutions semblent en vue. Tout d'abord, la réaction de fusion dépassera de loin le seuil de rentabilité à partir duquel un réacteur produit autant d'énergie qu'on lui en fournit. Les études du confinement inertiel progressent rapidement. En 2003, avec un laser dont la puissance atteindra près de deux millions de joules pendant quatre milliardièmes de seconde, les physiciens espèrent libérer jusqu'à dix fois la quantité d'énergie nécessaire pour amorcer la réaction de fusion.

Par ailleurs, plusieurs éléments indiquent que le tokamak, qui a dominé la recherche sur la fusion par confinement magnétique, sera un jour supplanté par des techniques plus compactes et plus

adaptables à la propulsion des fusées. En 1996, plusieurs pays ont financé les recherches sur des techniques de confinement magnétique prometteuses comme les strictions à champ toroïdal inversé, la configuration à inversion de champ et le tokamak sphérique.

En attendant, les physiciens étudient les tuyères magnétiques. Des physiciens de l'Université de l'Ohio et du Laboratoire de Los Alamos utilisent des courants électriques qui créent des plasmas chauds, et ils étudient les interactions de ce dernier avec le champ magnétique.

Même le problème de la rareté du combustible fusible peut être résolu.

Bien qu'il y ait très peu d'hélium 3 sur Terre, il en existe de grandes quantités dans le sol lunaire ou dans l'atmosphère de Jupiter. En outre, d'autres éléments présents sur la Terre, comme le bore, peuvent servir dans des réactions de fusion qui produisent des particules alpha.

L'annihilation de matière et d'antimatière libérerait encore plus d'énergie par unité de masse que la fusion. Un système de propulsion spatiale fondé sur ce principe exploiterait l'annihilation de protons et d'antiprotons.

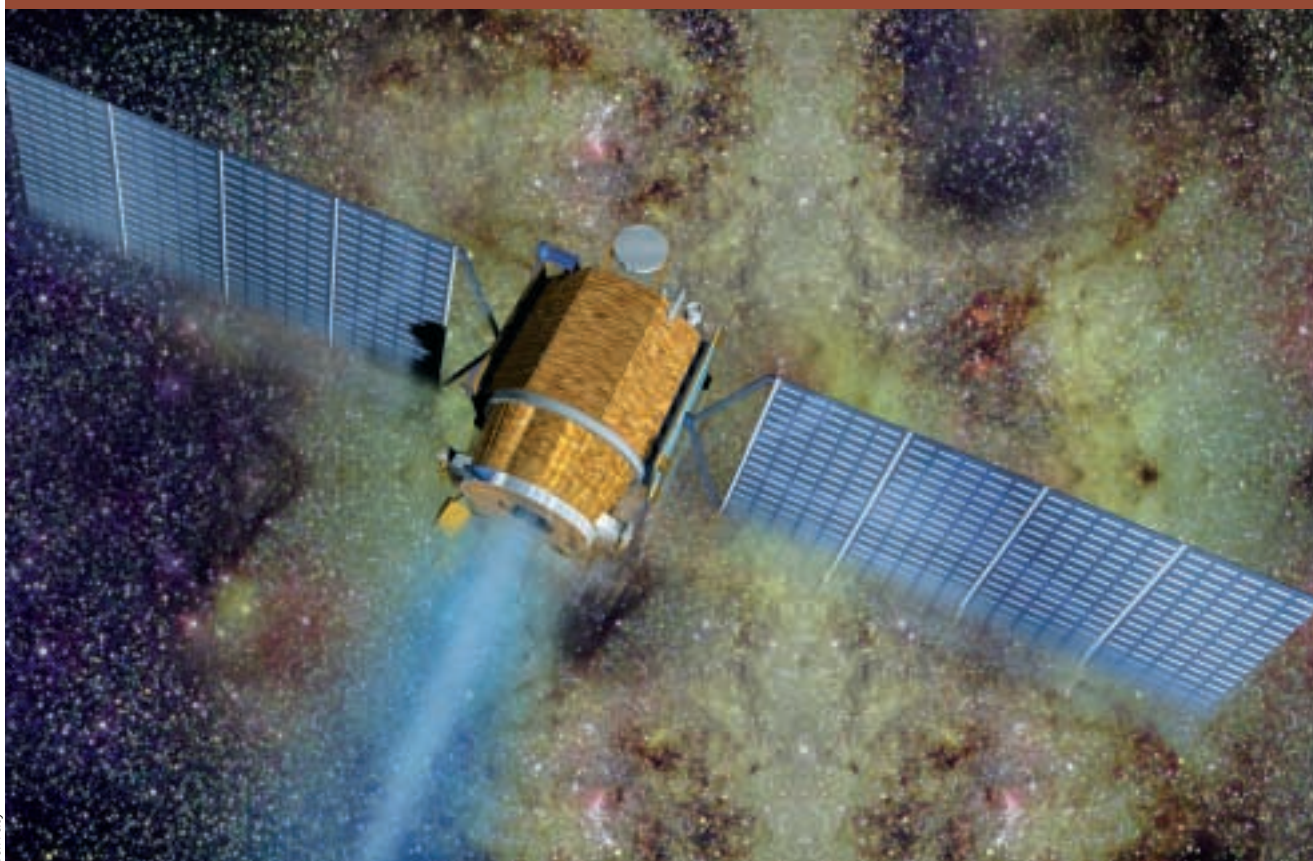
Cette annihilation conduit à une succession de réactions. La première d'entre elles est la production de pions, des particules de courte durée de vie, dont certaines peuvent être canalisées par des champs magnétiques. Les pions qui résultent de l'annihilation matière-antimatière se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière.

Où trouver les antiprotons, alors que les accélérateurs de particules de haute énergie du monde entier n'en produisent que quelques dizaines de nanogrammes par an ? Pour transporter des missions habitées vers Alpha du Centaure, un système de propulsion par annihilation de matière et d'antimatière nécessiterait des tonnes d'antiprotons. Le piégeage, le stockage et la manipulation des antiprotons restent une difficulté majeure, car ces particules s'annihilent au contact de protons de la matière ordinaire.

Néanmoins, on pourrait exploiter une partie seulement de l'énorme quantité d'énergie contenue dans l'antimatière, tout en n'utilisant que de petites quantités d'antiprotons, quantités qui seront probablement disponibles dans le courant de la prochaine décennie. Ce système utiliserait des antiprotons pour déclencher une fusion initiale par confinement inertiel. Les antiprotons pénétreraient dans les noyaux d'atomes lourds, s'annihileraient avec des protons et déclencheraient la fission des noyaux lourds. Les fragments énergiques obtenus par fission chaufferaient le combustible fusible et amorceraient la réaction de fusion. L'étude de la faisabilité d'un tel système de propulsion est en cours.

Au premier abord, les défis techniques de la construction de systèmes de propulsion à fusion, sans parler de l'antimatière, paraissent insurmontables. Cependant, l'humanité a déjà réalisé des exploits aussi extraordinaires. Le programme *Apollo* a montré ce que l'on peut accomplir lorsqu'on mobilise des efforts et les moyens. Avec la propulsion par fusion et par annihilation de matière et d'antimatière, l'enjeu serait considérable : c'est l'accès aux étoiles.

Stephanie LEIFER travaille au Laboratoire de propulsion spatiale de Pasadena (Californie).



Don Foley

6. LE MOTEUR IONIQUE vole déjà sur la sonde *Deep Space 1*, lancée en octobre 1998 (cette sonde doit approcher une comète). Des panneaux solaires produisent de l'électricité qui accélère

des atomes chargés de xénon. Le moteur fonctionne des semaines durant, d'où des vitesses finales élevées, malgré des poussées extrêmement faibles (l'équivalent du souffle humain).

engins ne seraient pas alourdis par le carburant ni par le comburant. Les véhicules propulsés par des faisceaux d'onde électromagnétique pourraient être alimentés par un réseau de stations orbitales fonctionnant à l'énergie solaire.

Du plus compliqué au plus simple : des équipes ont envisagé de propulser les engins spatiaux à l'aide de câbles. Pour rester en orbite, des objets plus éloignés du centre de la Terre doivent conserver une vitesse horizontale légèrement inférieure à celle d'objets plus proches. Ainsi, lorsque des objets se trouvant à différentes altitudes sont reliés par un câble de quelques centaines de mètres de long, d'importantes forces maintiennent le câble tendu.

D'autres principes physiques, notamment la conservation du moment cinétique, peuvent alors s'exercer sur les objets captifs, de sorte qu'un câble peut être utilisé comme un lance-pierres géant pour transférer efficacement de l'énergie entre des charges utiles et modifier ainsi rapidement l'orbite des

satellites. En utilisant des câbles conducteurs, on peut même engendrer ainsi de l'électricité ou contribuer à élever des objets (voir l'encadré de la page 42). On envisage même de relier la Terre à un satellite en orbite géostationnaire par un câble attaché en un point de l'équateur. Des systèmes élévateurs pourraient alors monter le long du câble pour atteindre n'importe quelle altitude jusqu'à 36 000 kilomètres, en dépensant très peu d'énergie.

Aujourd'hui, aucun matériau connu ne résisterait aux tensions qui s'exerceraient sur un tel câble, mais des fullerènes tubulaires, c'est-à-dire des molécules composées d'atomes de carbone assemblés en tubes de seulement quelques nanomètres de diamètre, pourraient constituer des câbles 600 fois plus résistants que les câbles métalliques actuels.

Enfin, certains étudient le voyage vers d'autres étoiles. L'approche la plus prometteuse semble être les voiles solaires (voir l'encadré de la page 46), mais des équipes envisagent aussi des réac-

teurs à fusion nucléaire (voir l'encadré de la page 50).

Dans la même veine futuriste, les idées sont nombreuses : la téléportation quantique, l'utilisation des trous de ver dans l'espace-temps, la suppression du moment cinétique... La mise en œuvre de ces idées nécessiterait toutefois une conception entièrement nouvelle de la physique, mais qui oserait dire qu'elles sont impraticables?

Geoffroy LANDIS, *Small Laser-propelled Interstellar Probe*, in *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 50, n° 4, pp. 149-150, 1997.

Tethers in Space Handbook, sous la direction de M.L. Cosmo et E.C. Lorenzini, Smithsonian Astrophysical Observatory, décembre 1997.

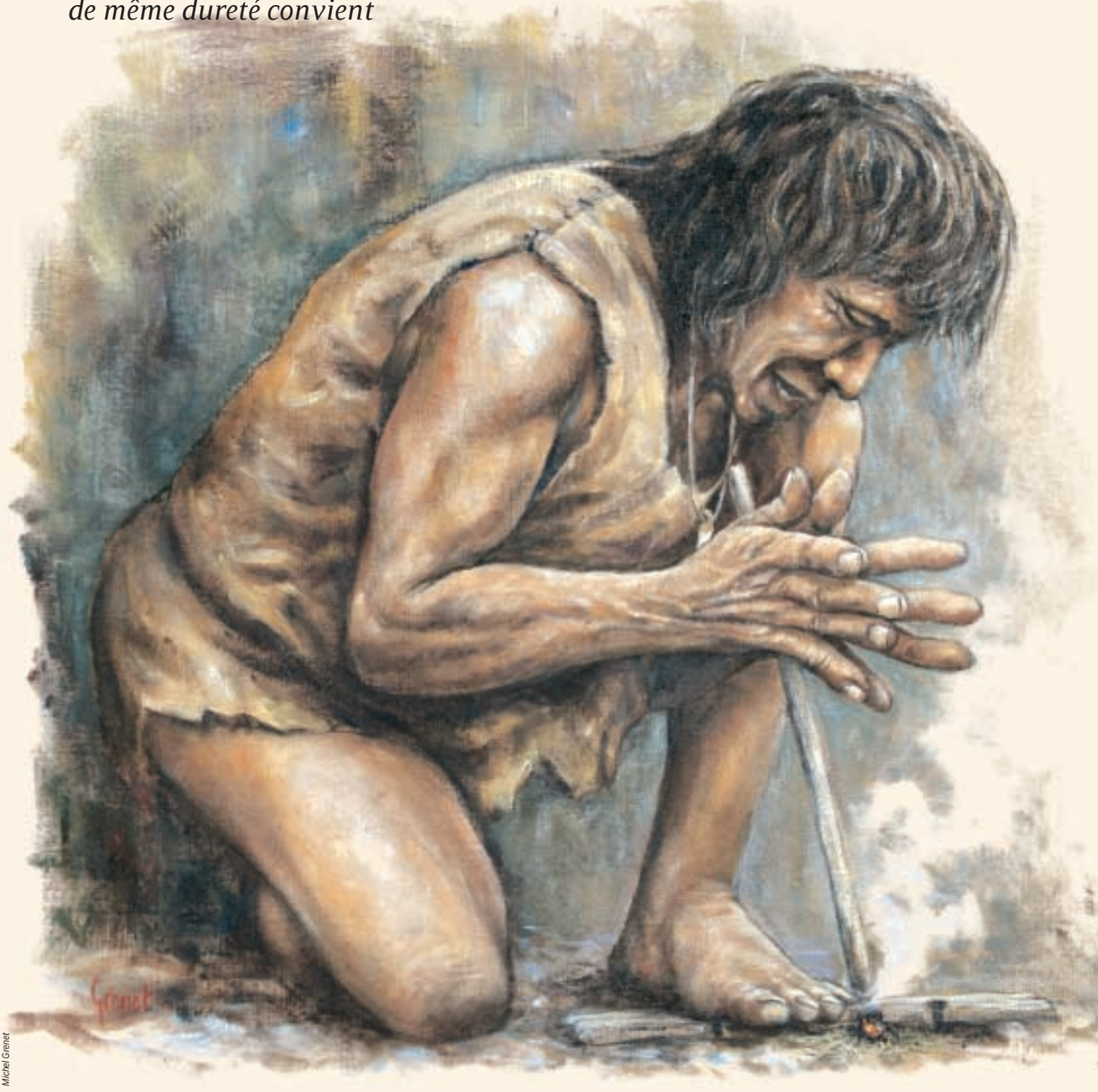
S.N.B. MURTHY et E.T. CURAN, *Scramjet Propulsion*, AIAA Education Series, 1999.

Des renseignements complémentaires sont disponibles sur notre site Internet : www.pourlascience.com

Le feu domestiqué

JACQUES COLLINA-GIRARD

Des expérimentations montrent que, contrairement aux idées reçues, deux silex ne peuvent allumer un feu, mais que la friction de deux bois de même dureté convient



Michel Grenet

Selon la mythologie grecque, le titan Prométhée a dérobé le feu aux dieux pour le donner aux hommes. Pour ce forfait, il a été enchaîné sur une montagne du Caucase et, chaque jour, un aigle venait lui dévorer le foie. Une autre légende indique qu'Hermès, après avoir enlevé le troupeau de vaches d'Apollon, a été le premier à allumer un feu en frottant deux morceaux de bois, l'un de laurier, l'autre de grenadier. Ces deux mythes, associant vol et feu, illustrent l'importance et le caractère sacré du feu dans l'imaginaire. La production du feu a exercé une fascination irrationnelle et générale, probablement dès les premiers temps de l'humanité. Sans doute est-ce là une voie de recherche psychologique pour comprendre de l'intérieur la maîtrise du feu et sa production, comme l'ont déjà esquissé Sigmund Freud, puis Gaston Bachelard. Ici, cependant, en examinant le passé au regard des techniques récentes, nous nous contenterons de traverser les champs de la préhistoire, de l'histoire, de l'histoire des techniques et de l'ethnographie pour dresser un bilan de nos connaissances sur l'obtention du feu. Comment et quand l'homme a-t-il domestiqué le feu ? Quand et comment l'a-t-il produit lui-même ?

Les plus anciens foyers

La plupart des préhistoriens, s'appuyant sur les foyers bien attestés de quelques sites bien datés, pensent que le feu est utilisé depuis 400 000 ou 500 000 ans. En Europe, la grotte de l'Escale, dans la vallée de la Durance, recelait, parmi une faune archaïque et quelques éclats, des traces de cendre datant de 600 000 ans. À ce jour, ces vestiges témoignent des plus anciens feux européens. Par ailleurs, les silex brûlés trouvés sur le site de Terra Amata, près de Nice, ont été datés de 380 000 ans, et dans l'Hérault, la grotte de Lunel-Viel, occupée

il y a 450 000 ans, a livré d'indiscutables traces de foyers aménagés. De plus, Jean-Laurent Monnier et Ramiro Javier March, de l'Université de Rennes, ont récemment mis au jour plusieurs foyers dont l'âge est échelonné entre 450 000 et 380 000 ans dans la grotte de Menez-Drégan en Bretagne (voir le dossier de *Pour la Science*, les origines de l'humanité, janvier 1999). En revanche, la grotte de Tautavel, dans les Pyrénées-Orientales, occupée il y a 400 000 ans, n'a livré aucun témoignage de feu.

La plupart des sites attribuables en Europe à un *Homo erectus* évolué prouvent une maîtrise du feu. Les archéologues y observent des restes de foyers, tels que des charbons, des couches de cendre, des pierres rougies et des ossements partiellement carbonisés. La structure des foyers retrouvés – cerclés de galets et installés dans une dépression du sol – dénotent une bonne connaissance des moyens d'améliorer la combustion et le tirage du feu.

Toutefois, nous ignorons encore si ces hominidés allumaient eux-mêmes le feu, car aucun vestige d'outil à fabriquer le feu n'a été trouvé. D'après les préhistoriens, il y a environ 600 000 ans, l'homme a d'abord appris à conserver et à entretenir un feu sans savoir le fabriquer. Cette hypothèse du feu ramassé et conservé est illustrée par le roman *La guerre du feu* de Joseph-Henri Rosny, publié en 1911. Au XIX^e siècle, en Europe, la conservation du feu était encore pratiquée dans les villages, où l'on préférait emprunter un tison au voisin plutôt que rallumer le feu – peut-être parce que les allumettes étaient chères. Les Indiens navigateurs de Patagonie transportaient dans leurs pirogues un foyer allumé sur un lit d'argile. Les textes classiques d'Hésiode (VII^e siècle avant notre ère) et d'Eschyle (-525 ; -456) évoquent les bergers grecs véhiculant le feu grâce à la moelle d'une grande ombellifère. En outre, l'homme conservé intact avec



2. UN MORCEAU DE SILEX (dans la main droite) produit, en heurtant un fragment de marcassite (dans la main gauche) des étincelles qui embrasent un morceau d'amadou combustible.

son équipement, dans les glaces des Alpes autrichiennes, daté de 3 350 à 3 100 ans avant notre ère, avait un récipient en écorce de bouleau qui contenait des feuilles d'érable et quelques charbons : cette boîte aurait servi au transport de tisons.

Il y a 40 000 ans, l'homme a réussi à allumer un feu. Les principales techniques utilisées sont fondées sur deux principes physiques : les systèmes par percussion, par exemple de l'acier contre un silex, et ceux par friction de deux morceaux de bois. Ces pratiques ont rarement fait l'objet d'expérimentations. Celles que nous avons effectuées ont pourtant clarifié quelques points de leur usage.

Battre le briquet

Au début de ce siècle finissant, il subsistait, dans toutes les cuisines d'Europe, une boîte métallique qui contenait un briquet composé d'un silex ou d'une pierre à fusil (le mot «briquet» provient d'un mot hollandais qui signifie pierre à feu), des chiffons partiellement



1. LA FRICTION vigoureuse d'un foret en bois contre une planchette produit rapidement de la fumée, ainsi que de la sciure qui s'accumule dans l'encoche taillée. Un spécialiste entraîné obtient après



une ou deux minutes une braise rougeoyante dans la sciure fumante. Cette technique est utilisée par les hommes depuis au moins 10 000 ans tel que le montre la vue d'artiste de la page précédente.

