

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.

adaptables à la propulsion des fusées. En 1996, plusieurs pays ont financé les recherches sur des techniques de confinement magnétique prometteuses comme les striction 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.

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 réhibitoire, 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

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.

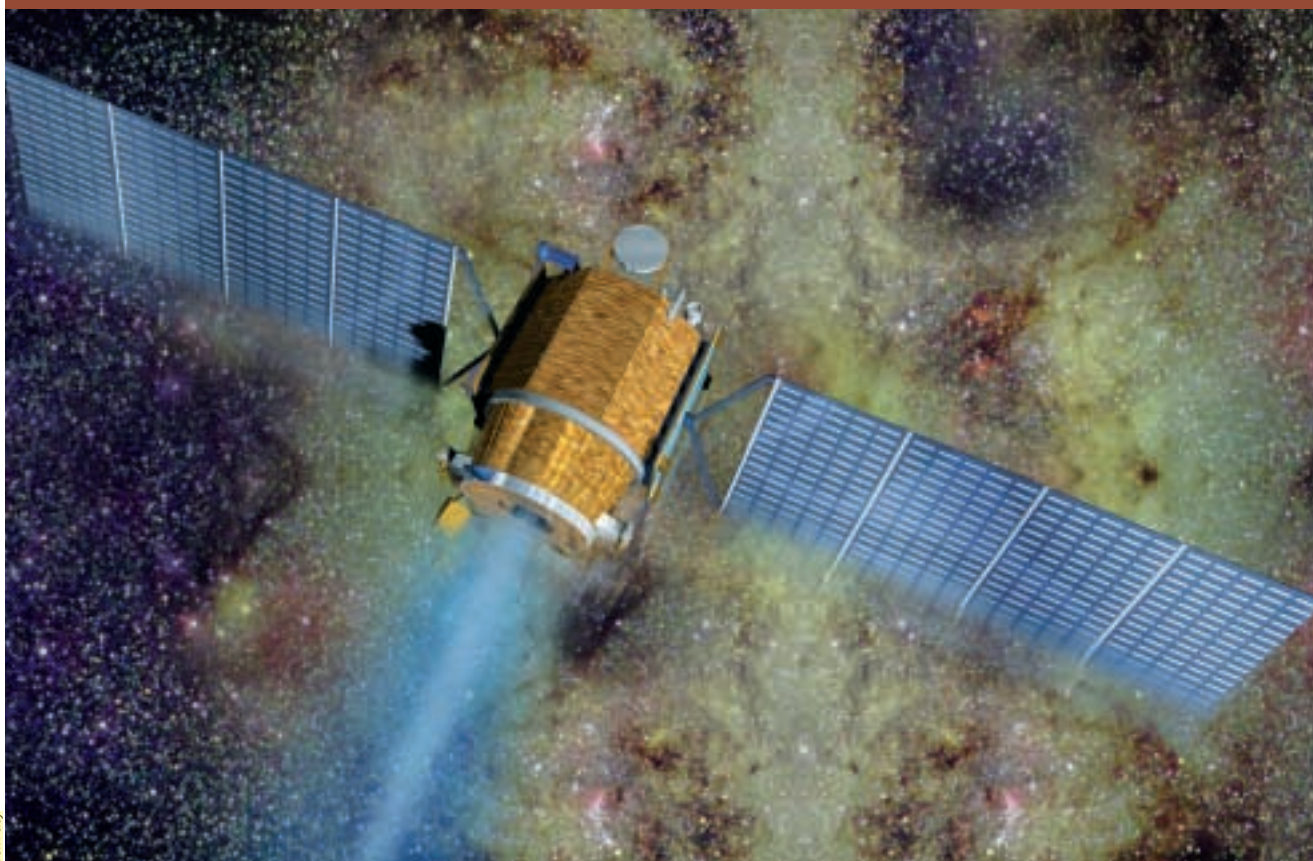
Cette annihilation conduit à une succession de réactions. La première d'entre elles est la production de pions, des particules de courte durée de vie, dont certaines peuvent être canalisées par des champs magnétiques. Les pions qui résultent de l'annihilation matière-antimatière se déplacent à des vitesses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

Geoffroey 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
