

des photons entre deux miroirs. Un miroir magnétique ne piège que les particules suffisamment lentes. Ces dernières rebondissent entre les anneaux jusqu'à ce qu'une perturbation augmente assez leur vitesse tangentielle pour les faire sortir du piège. Une telle augmentation de la vitesse peut résulter de collisions avec d'autres particules, d'interactions avec des ondes électromagnétiques ou encore de la turbulence ou d'instabilités du plasma.

Au final, les miroirs magnétiques agissent comme des sélecteurs d'énergie. Les particules les plus énergétiques sont les seules à pouvoir les quitter. Les autres y restent confinées et gagnent en énergie. Notons que le moteur VASIMR est construit pour confiner les électrons. Ce n'est que parce qu'un plasma est toujours globalement neutre, que les ions accompagnent le mouvement des électrons

et sont confinés par leur... confinement. VASIMR utilise trois bobines magnétiques : une première, le miroir amont situé au niveau de l'injecteur, qui ionise le gaz neutre, une bobine centrale refermant la première cavité et déterminant la fréquence cyclotron de l'amplificateur de puissance central, qui confère son énergie au plasma et, à l'aval, une tuyère magnétique qui l'éjecte le plasma dans l'espace. Dans le schéma de la figure 2, l'étage de puissance à résonance cyclotron est placé juste avant la tuyère magnétique (étape 4).

Chauffer le plasma

On peut utiliser des électrodes qui produisent des arcs électriques, mais elles s'usent vite. Dans VASIMR, des ondes radio chauffent le plasma, comme les micro-ondes d'un four. À l'étage de l'injecteur, le gaz neutre

devient un plasma dense, mais relativement froid, puisque sa température est de l'ordre de 60 000 kelvins. On utilise des ondes dont la fréquence est comprise entre 10 et 50 mégahertz et qui confèrent de l'énergie aux électrons libres du gaz. À mesure que les électrons libres gagnent de l'énergie, ils arrachent d'autres électrons aux atomes voisins, au cours d'une cascade d'ionisation.

Puis le plasma s'écoule dans l'étage central, où il est chauffé par d'autres ondes, des oscillations cyclotron de fréquences inférieures, qui augmentent l'énergie de rotation des ions. Le champ électrique de ces ondes est perpendiculaire au champ magnétique externe (dû aux électro-aimants) et tourne à la fréquence cyclotron des ions. Un phénomène de résonance fait tourner les ions de plus en vite. Très utilisée dans la recherche sur la fusion contrôlée, cette technique de chauffage ionique

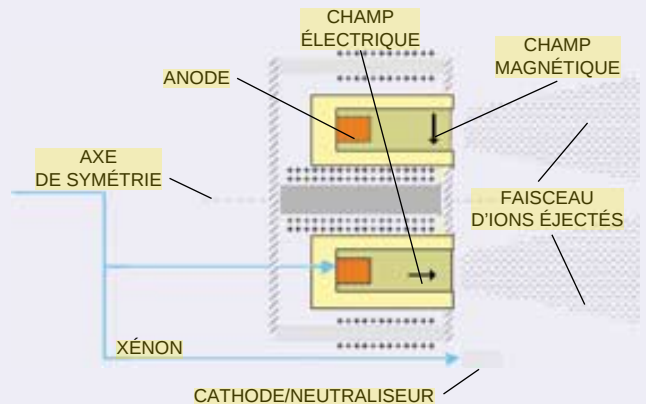
poignées bien supérieures à celle de VASIMR. Celle du PPS1350 est par exemple de 88 millinewtons pour 1 500 watts alors que le VX 10 de dix kilowatts développe 100 millinewtons. De 1 720 secondes, l'impulsion spécifique du PPS1350 est moins élevée que celle des moteurs ioniques, ses concurrents. Son rendement total est de 50 pour cent. Ces performances s'expliquent par le fait que PPS1350, comme les autres moteurs plasmiques comparables a été optimisé pour des satellites dont le rapport puissance / masse est de cinq kilowatts par tonne. VASIMR, en revanche, est destiné à un vaisseau spatial dont le rapport puissance / masse dépasse 100 kilowatts par tonne.

Au lieu d'expulser du plasma, les moteurs ioniques accélèrent des ions dans un champ électrostatique. Ils en existe plusieurs types, qui diffèrent par la méthode de production des ions. Les moteurs ioniques les plus au point sont ceux qui éjectent des ions par décharges continues en présence d'un champ magnétique ; ce sont d'ailleurs les seuls qui sont exploités commercialement par la Société américaine Hughes. L'accélération des ions y est obtenue à l'aide de grilles percées de trous. Des tensions d'accélération relativement fortes sont utilisées, ce qui conduit à une impulsion spécifique élevée. Cette tension est nécessaire afin de créer un champ électrostatique important entre les grilles ($\geq 1\,000$ volts par millimètre) et de manière à vaincre la répulsion électrostatique que les ions exercent les uns sur les autres.

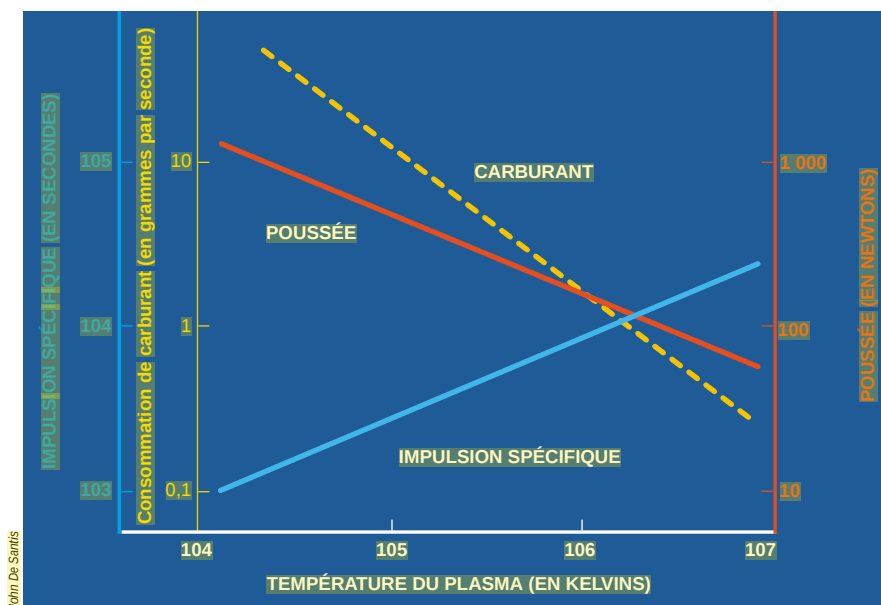
Les moteurs ioniques ont l'avantage de posséder une puissance spécifique (puissance dégagée divisée par la poussée) relativement importante (30 kilowatts par newton ou plus). Leur rendement total atteint 50 à 67 pour cent. Le moteur NSTAR de la NASA comporte, par exemple, des grilles de 30 centimètres de diamètre, avec lesquelles il produit une poussée de 90 millinewtons. Des ten-

sions relativement fortes sont mises en œuvre pour obtenir cette poussée, de sorte que le NSTAR possède une impulsion spécifique élevée, égale à 3000 secondes.

Dominique VALENTIAN, *Snecma Moteurs*



Dans un moteur plasmique, le fluide de propulsion, du xénon neutre, est ionisé par une décharge électrique continue entre la cathode et l'anode. Environ un quart des électrons émis par la cathode sont attirés par l'anode et rentrent dans la chambre d'ionisation cylindrique. La présence d'un champ magnétique radial les fait spiraler, ce qui empêche qu'ils ne neutralisent les ions positifs de xénon. Cependant, leur présence crée un champ électrique dans le sens de l'axe du moteur, lequel accélère les ions, et les propulse dans l'espace. Les trois quarts restant des électrons issus de la cathode suivent les ions dans l'espace, et les y neutralise. Finalement parvenus à l'anode, les électrons présents dans la chambre d'ionisation sont convoyés à la cathode par le circuit électrique. Au final, la poussée est créée par un courant globalement neutre, ce qui évite les tensions élevées et la faible densité de poussée qui sont les inconvénients majeurs des moteurs ioniques. Les tensions des décharges d'ionisation varient entre 150 à 700 V suivant l'impulsion spécifique recherchée. Notons que la poussée d'un propulseur plasmique de 10 centimètres équivaut à celle d'un propulseur ionique de 30 cm. Une remarquable compacité, laquelle découle de la densité élevée de courant d'ions élevée, qui caractérise les moteurs plasmiques.



6. VASIMR contient l'équivalent d'une boîte de vitesse. Ce moteur est conçu de façon à ce que la température du plasma éjecté soit ajustable, ce qui accroît la vitesse d'éjection (donc l'impulsion spécifique, en bleu) et réduit la consommation de carburant (en jaune). Dans ce cas, la poussée produite diminue (en rouge). La puissance du moteur VASIMR, constante, est égale à dix mégawatts.

L'énergie vitale

Dans l'espace, l'énergie est vitale. Une vérité que l'aventure vécue par l'équipage d'Apollo XIII au printemps 1970 illustre. Les astronautes n'ont dû leur salut qu'à l'utilisation judicieuse du peu d'énergie qui restait dans les batteries. Le sauvetage aurait été impossible si le vol avait duré plus longtemps.

La rapidité de la propulsion et la fiabilité des équipements qui assurent la survie imposent une énergie minimale. La navette spatiale, par exemple, consomme environ 15 kilowatts en orbite, tandis que la future station orbitale internationale consommera 75 kilowatts. Une mission vers Mars nécessiterait entre 20 et 60 kilowatts, sans compter l'énergie de propulsion. Avec une puissance supérieure, le voyage serait plus rapide : une fusée équipée d'un moteur VASIMR de 200 mégawatts atteindrait Mars en 39 jours.

Lors des expéditions dans l'espace proche de la Terre, l'énergie provient en général de combustibles chimiques et de panneaux solaires. La station orbitale tirera, par exemple, son énergie de 2 500 mètres carrés de panneaux. Toutefois, aussi bien les carburants chimiques que les panneaux solaires sont insuffisants, dès que l'on s'éloigne du Soleil. Ainsi, un «panneau» solaire de dix mégawatts, par exemple, mesurerait environ 68 000 mètres carrés sur Mars et 760 000 mètres carrés sur Jupiter ! Des tailles qui les rendent inviables.

Les seules sources d'énergie compactes et suffisamment puissantes sont nucléaires. L'électricité de bord de certains satellites a déjà été fournie par des générateurs thermo-électriques alimentés par la chaleur naturellement libérée lors de la désintégration du plutonium. Pour un vol habité, un tel système ne serait pas assez efficace. En revanche, un réacteur nucléaire embarqué, tirant son énergie de la fission de l'uranium, produirait dix millions de fois plus d'énergie que les «générateurs radio isotopiques à plutonium 238» du passé. Notons que les ingénieurs comparent les performances des sources d'énergie embarquées à l'aide du paramètre alpha, défini par le rapport de la masse de la «centrale» d'énergie en kilogrammes sur sa puissance exprimée en kilowatts. Plus alpha est petit, plus son rendement et sa puissance sont élevés. Aujourd'hui, les paramètres alpha des panneaux solaires embarqués sont compris entre 10 et 100. Ceux des piles à plutonium sont de 200. Celui d'un réacteur à uranium ne dépasse pas 0,5.

Enfin, les réacteurs nucléaires sont plus sûrs que les «générateurs radio isotopiques à plutonium, car le réacteur et son combustible peuvent être lancés séparément et assemblés sur une orbite éloignée de la Terre. Même ceux qui voudraient interdire l'utilisation de l'énergie nucléaire en orbite terrestre reconnaissent qu'elle pourrait servir lors des missions lointaines.

par résonance cyclotron confère à la fusée son impulsion spécifique élevée.

Après la création du plasma et son chauffage, le moteur doit encore fournir une poussée. Comment l'augmentation de la composante normale de la vitesse des ions peut conférer aux gaz d'échappement la puissance nécessaire ? L'efficacité du système provient en fait de la forme des lignes de champs dans la tuyère magnétique. Leur divergence transfère de l'énergie de rotation en énergie cinétique longitudinale. Les ions massifs entraînent avec eux les électrons, de sorte que c'est un fluide neutre qui s'échappe de la fusée. Dans le cas de VASIMR, cette expansion du plasma dans la tuyère se produit sur environ 50 centimètres.

Une fois l'expansion achevée, le plasma se détache de la fusée. Les études menées récemment par Roald Sagdeev, de l'Université du Maryland, et Boris Breizman, de l'Université du Texas, ont mis en évidence les mécanismes sous-jacents. La «vitesse d'Alfvén», d'après le nom du physicien suédois Hannes Alfvén qui l'a décrite le premier, y joue un rôle central. Alfvén montra que les perturbations d'un plasma se propagent le long des lignes de champ à cette vitesse précise. Dans une tuyère magnétique, la vitesse d'Alfvén joue un rôle semblable à celui de la vitesse du son dans une tuyère classique.

Le plasma se détache

Comme dans le cas du son, il existe donc un régime «subalfvénique» et un régime «superalfvénique». Ce «mur d'Alfvén» (par analogie au «mur du son») est une frontière au-delà de laquelle le flux aval ne rétroagit plus sur le flux amont, de sorte que l'éjection ne crée pas de résistance à l'avancement de la fusée. La tuyère de VASIMR est conçue pour dilater le plasma au-delà de cette frontière, en un point où l'énergie du champ est faible par rapport à celle du flux de plasma. Quand le plasma se détache, il emporte avec lui une petite quantité du champ. On pense qu'un phénomène semblable se produit dans la nature lorsque des protubérances de la couronne solaire échappent au champ magnétique du Soleil. La dépense d'énergie dans la partie où le champ est distordu diminue peu les performances de la fusée. Nos études montrent que le détachement