

Les champs intenses impliquent une fréquence cyclotron élevée et un petit rayon de Larmor. Par conséquent l'énergie correspondant à cette rotation est proportionnelle au champ magnétique local. Dans la VASIMR, la fréquence cyclotron des ions (des protons si le carburant est de l'hydrogène) est de quelques mégahertz, tandis que celle des électrons se compte en gigahertz.

Quels sont les mouvements des particules chargées à l'intérieur d'une cavité à miroirs magnétiques et quand elles en sortent? La vitesse des particules a deux composantes : l'une, tangentielle, est parallèle au champ (correspondant au déplacement vers l'avant le long de la ligne de champ) et l'autre, normale, est perpendiculaire (correspondant au déplacement orbital autour de la ligne de champ). Quand une particule se rapproche d'un champ plus intense, la compo-

sante normale de la vitesse augmente, mais la composante tangentielle diminue proportionnellement pour que l'énergie totale de la particule reste constante. C'est ce que les ingénieurs appelle «l'invariance adiabatique».

Ce phénomène est lié à la direction de la force qu'exerce le champ magnétique sur les particules : elle est toujours perpendiculaire à la vitesse de la particule et au champ magnétique. Près du centre de la cavité, où les lignes de champ sont parallèles, la force est radiale et n'a donc pas d'effet sur la composante tangentielle de la vitesse. Toutefois, lorsque la particule pénètre dans le goulot d'étranglement, la force magnétique change de direction, et rappelle la particule vers l'intérieur du miroir (voir la figure 5). Quand une particule quitte le goulot d'étranglement après avoir traversé l'anneau, le champ a l'effet opposé et la particule est accélérée.

Comme il n'y a pas eu d'apport extérieur d'énergie, cette accélération se fait au détriment de la vitesse de rotation. Le champ magnétique ne confère pas d'énergie supplémentaire à la particule ; il ne participe qu'au transfert de cette énergie.

Ce mécanisme n'est valable que si la déformation des lignes de champ n'est pas trop brutale pour que le mouvement des particules ne soit pas trop perturbé ; c'est la condition d'adiabaticité. Comme des voitures sur une autoroute dont la chaussée est mouillée et qui ne peuvent négocier des virages trop serrés, les particules ne peuvent pas suivre des lignes de champ de trop forte courbure. Un miroir magnétique piège les particules, à condition qu'elles soient suffisamment lentes pour être réfléchies aux endroits des étranglements. Ainsi, les particules chargées rebondissent entre les deux bobines comme

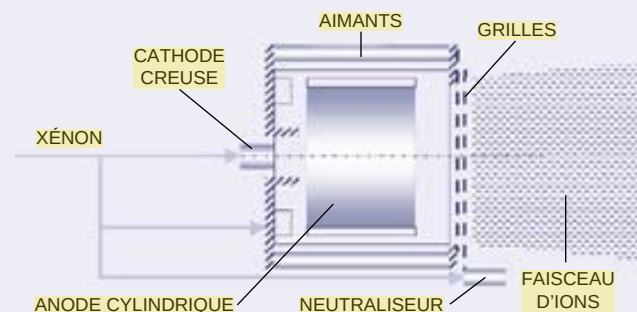
La propulsion électrique à bord des satellites

Proches de VASIMR, les moteurs électriques sont de plus en plus fréquemment embarqués à bord des satellites, où ils servent surtout aux corrections d'orbites. Il y a en deux types : les moteurs ioniques et les moteurs plasmiques (des moteurs à plasmas d'un principe différent de celui de VASIMR). Leur avantage est d'économiser la charge utile. Les propulseurs plasmiques actuels, par exemple, permettent de réduire la masse d'un satellite de plusieurs tonnes, de 700 kilogrammes. Si on les prévoit aussi pour servir au transfert en orbite géostationnaire, le gain de poids qu'ils rendent possible, dépasse les 1 500 kilogrammes!

Ces avantages sont recherchés, car le développement des télécommunications satellitaires implique des satellites géostationnaires de plus en plus lourds. Les exemplaires placés actuellement en orbite par Ariane V atteignent déjà cinq tonnes, mais des satellites encore plus lourds sont en construction, ce qui impose une augmentation de la capacité d'Ariane V. Si les nouveaux satellites géostationnaires sont de plus en plus lourds, c'est parce qu'ils emportent toujours plus de répéteurs, de microprocesseurs de traitement, etc. Cette électronique embarquée implique que le satellite dispose d'une forte puissance électrique, laquelle est un argument supplémentaire en faveur de la propulsion électrique, elle aussi gourmande en puissance.

Outre VASIMR, envisagé pour les missions martiennes habitées, plusieurs moteurs à plasma pour satellites sont en production ou à l'étude. En France, la Snecma a qualifié le moteur plasmique PPS1350 dont l'alimentation électrique est développée par avec la Société belge Alcatel/Etca. Son vol est déjà programmé à bord du

futur satellite de télécommunication Stentor ainsi que sur la sonde spatiale SMART ONE de l'Agence spatiale européenne. Un autre moteur similaire, est actuellement développé par la Société britannique Astrium. À puissance égale, les moteurs plasmiques satellitaires produisent des



Dans un moteur ionique, le fluide de propulsion, du xénon neutre, est ionisé par une décharge électrique continue entre la cathode et l'anode. Un champ magnétique créé par des aimants augmente le rayon de giration des électrons présents dans la chambre d'ionisation (issus de la décharge), ce qui multiplie les collisions avec des atomes neutres de xénon, et augmente le phénomène d'ionisation. Une fois ionisés, les ions de xénon sont accélérés entre les grilles. Environ 1/3 d'entre eux passent par les milliers de trous dont elles sont percées. Collés aux parois, les autres ions sont rapidement neutralisés par les électrons ambiants, ce qui les rend à nouveau disponibles. Au moins deux grilles sont nécessaires (l'une positive et l'autre négative placée à l'extérieur) afin d'empêcher la migration d'une partie des électrons du neutraliseur dans la chambre d'ionisation, où il neutraliserait des ions, et réduiraient l'efficacité du moteur. Toutefois, les propulseurs les plus évolués sont dotés de trois grilles, dont une à la masse. Son rôle est de minimiser la pollution du satellite par les produits de l'érosion des grilles par les ions. Dès lors, les électrons émis par le neutraliseur suivent dans l'espace les ions positifs accélérés, et les y neutralisent.

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'étape 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

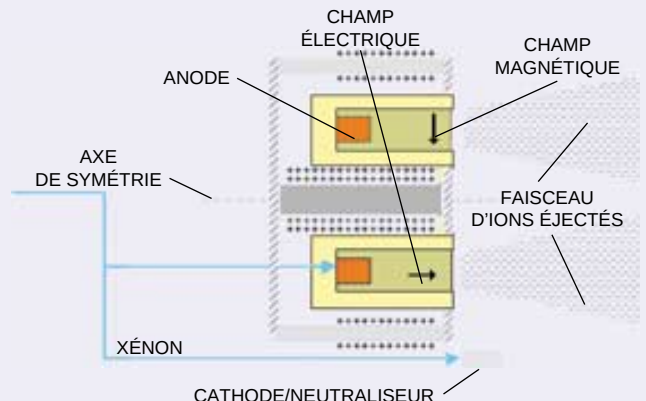
poussées bien supérieures à celle de VASIMR. Celle du PPS1350 est par exemple de 88 millinewtons pour 1 500 watts alors que le VX 10 de dix kilowatts développe 100 millinewtons. De 1 720 secondes, l'impulsion spécifique du PPS1350 est moins élevée que celle des moteurs ioniques, ses concurrents. Son 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.