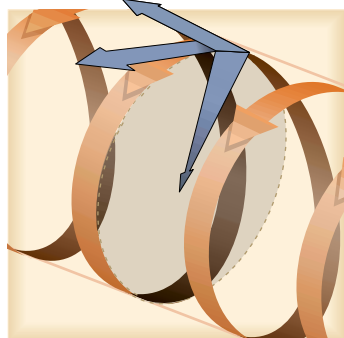
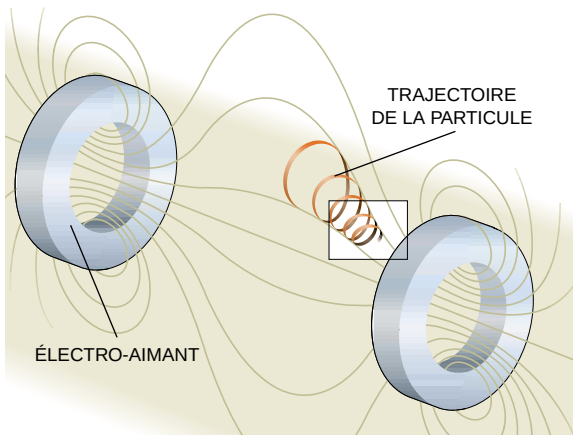
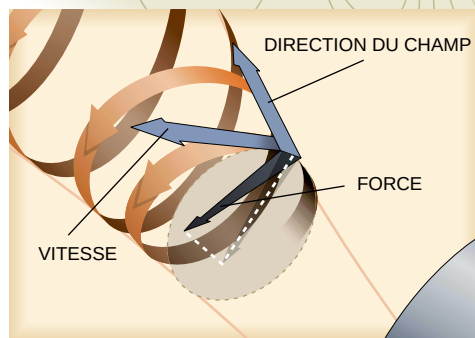


**3. UN PIÈGE MAGNÉTIQUE (OU CAVITÉ MAGNÉTIQUE)** piège les particules et les confine, de sorte que le plasma est échauffé jusqu'à dix millions de kelvins. Il est constitué de deux électro-aimants qui se font face, de sorte que les lignes de champ magnétique qui les relient prennent la forme d'un tonneau. Dans le moteur VASIMR, un troisième électro-aimant s'ajoute aux deux premiers et forme une tuyère magnétique, d'où s'échappent les particules.



**4. PRÈS DU CENTRE DU PIÈGE,** les lignes de champ magnétique sont presque parallèles, de sorte que les forces magnétiques qui s'exercent sur les particules sont quasi radiales. Ces dernières progressent à vitesse constante le long d'une hélice de rayon quasi constant.



**5. PRÈS DES ÉLECTRO-AIMANTS,** les lignes de champ se courbent fortement pour se concentrer au centre de la bobine. La force magnétique acquiert alors une composante parallèle à l'axe reliant les deux électro-aimants, laquelle repousse les particules loin des électro-aimants. Les particules rebondissent sur les électro-aimants, se réfléchissant sur le «miroir magnétique» que constitue la bobine.

nécessaire pour produire une certaine poussée est égale à l'énergie cinétique mise en œuvre par les gaz éjectés par unité de temps ; elle est proportionnelle au carré de l'impulsion spécifique. La poussée, quant à elle, est proportionnelle à l'impulsion spécifique. Ainsi, la puissance nécessaire pour produire une poussée donnée croît avec l'impulsion spécifique (à rendement total constant). Dans les moteurs chimiques, cette puissance est libérée par les réactions exothermiques du comburant avec un oxydant. On peut aussi chauffer le carburant, par exemple avec l'énergie produite par des panneaux solaires ou par des réacteurs nucléaires.

## Impulsions spécifiques élevées

Dans notre quête de bons rendements énergétiques, nous avons recherché des systèmes dont l'impulsion spécifique est élevée. Nous nous sommes détournés des moteurs chimiques dont les températures de combustion

ne dépassent pas quelques milliers de kelvins pour nous tourner vers les plasmas. La température de ces gaz est si élevée que les atomes ionisés sont dépouillés d'au moins un électron, voire de tous. Il se forme une sorte de «soupe», mélange d'ions chargés positivement et d'électrons chargés négativement. La température des ions des plasmas denses les plus froids est de l'ordre de 10 000 kelvins et atteint même, en laboratoire, dix millions de kelvins. À de telles températures, les ions, qui constituent l'essentiel de la masse, se déplacent à près de 300 000 mètres par seconde, soit 60 fois plus vite que les particules éjectées par les plus puissants des moteurs chimiques à propulsion.

Dans les fusées, la puissance du moteur est en général maintenue à son maximum, de sorte que la poussée et l'impulsion spécifique sont inversement proportionnelles. L'augmentation de l'une a toujours lieu au détriment de l'autre. Ainsi, si la puissance est constante, une fusée à impulsion spécifique élevée transporte une charge utile supérieure

(mais demande pour cela un temps plus long), que celle que peut véhiculer (en prenant un temps plus court) une fusée à impulsion spécifique basse. Afin d'optimiser le temps de transport et la charge utile, nous avons élaboré une forme de commande de poussée à impulsion spécifique et poussée variables; je l'ai nommé variation de poussée à puissance constante.

Comment un vaisseau spatial acquiert-il de l'énergie cinétique par éjection de gaz ? Il est possible, en principe, que la vitesse du vaisseau égale celle d'éjection des gaz. Dans ce cas, un observateur au sol voit les particules quitter le vaisseau au repos. Toute l'énergie d'éjection est alors communiquée au vaisseau. Le rendement énergétique est maximum, mais cette performance est obtenue au prix d'une consommation maximale de masse. C'est pourquoi les économies de carburant ne sont possibles que quand le vaisseau est plus lent. Pour être optimal, un vol doit pour ces raisons commencer à forte poussée et à forte accélération ; ensuite, à mesure que la vitesse augmente, il est bon d'augmenter l'impulsion spécifique et de diminuer la poussée, de façon à économiser le carburant. Un conducteur de voiture fait exactement de même lorsque, après avoir démarré, il passe rapidement toutes les vitesses avant de stabiliser son allure.

## Miroirs magnétiques

Installé au Centre spatial Johnson, à Houston, le prototype VX-10 de moteur VASIMR contient des miroirs magnétiques, un type particulier de piège magnétique. La structure la plus simple de tels pièges est constituée de deux électro-aimants annulaires (deux miroirs), où le courant s'écoule dans une même direction. Les lignes de champ magnétique confinées près des bobines annulaires s'écartent vers le milieu de la cavité. Les particules chargées se déplacent selon une hélice, le long des lignes de champ ; elles tournent à une fréquence dite «fréquence cyclotron» (la fréquence cyclotron est le nombre rotations décrites par seconde par la particule sous un champ magnétique donné). Les particules les plus lourdes (les ions) ont une fréquence cyclotron plus basse et un rayon de Larmor plus grand que les particules les plus légères (les électrons).

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

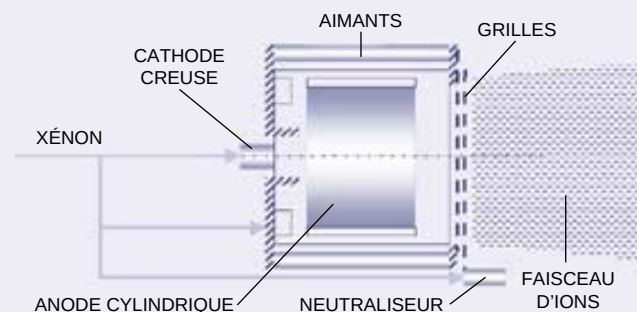
## La propulsion électrique à bord des satellites

**P**roches 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.