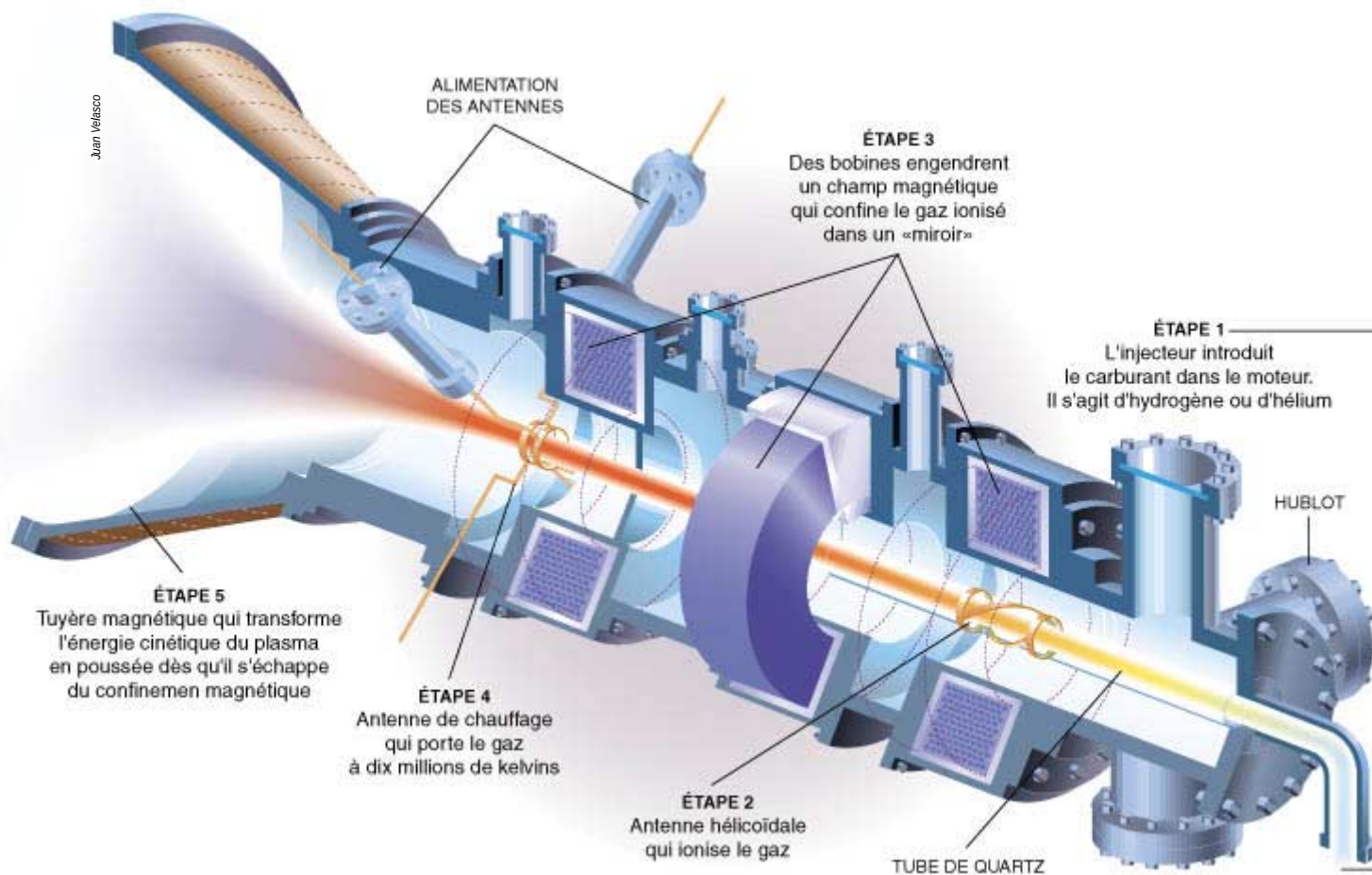




2. PLAN du prototype VX10 de moteur VASIMR.

méthode pour mettre des satellites sur orbite, d'autres moyens de propulsion seront nécessaires pour envoyer des hommes... dans les étoiles.

C'est cet objectif que nous poursuivons depuis le début des années 1980. Nous avons choisi d'adapter des fusées à plasma propulsées par des gaz ionisés accélérés à l'aide de champs magnétiques et électriques. VASIMR (pour *Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, c'est-à-dire moteur-fusée à impulsion spécifique variable) est le prototype que nous avons mis au point. Sa «naissance» remonte à la fin des années 1970, alors que je faisais des recherches sur la fusion nucléaire contrôlée. J'étudiais le confinement magnétique quand j'eus l'idée qu'un profil magnétique de forme appropriée constituerait une sorte de tuyère magnétique transformant l'énergie du plasma en énergie de propulsion. Les particules chargées restent confinées dans de tels «pièges magnétiques» qui isolent les plasmas ultra chauds dont la température atteint plusieurs centaines de millions de kelvins ! Si les plasmas confinés sont si

chauds, c'est que ces pièges magnétiques concentrent en leur sein une énorme énergie. Évacuée par la tuyère, l'énergie libérée par le gaz ionisé crée une poussée considérable. Une telle structure se comporte comme une tuyère classique de fusée, mais elle supporte des températures bien plus élevées. En outre, les moteurs à plasma autorisent une impulsion spécifique et, par conséquent, une poussée adaptable aux besoins.

Propulsion des fusées et loi de Newton

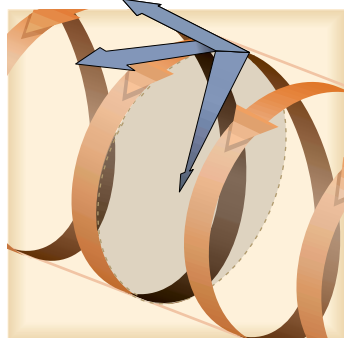
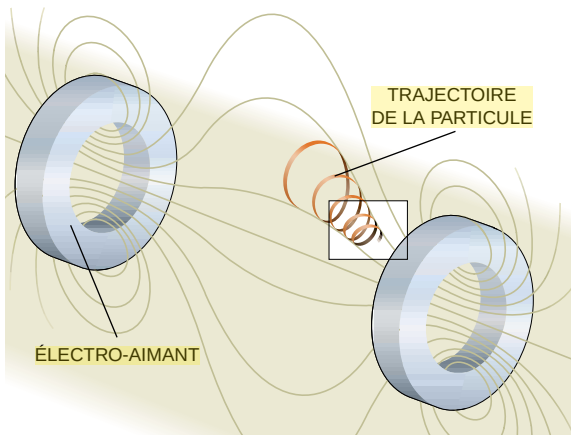
Rappelons quelques notions générales sur la propulsion des fusées. Elle satisfait à la loi de l'action et de la réaction de Newton. Cette loi stipule que toute action est contrebalancée par une réaction qui l'annule. Or, une fusée se propulse en éjectant des matériaux dans la direction opposée à celle de son déplacement. Au moment où ils s'éloignent, ces matériaux emportent une certaine quantité de mouvement. Pour la fusée, cette perte de quantité de mouvement dans

la direction d'éjection, implique le gain d'une quantité de mouvement équivalente dans la direction opposée, celle du vol. Dans le cas des fusées conventionnelles (à poudre ou à liquide), le matériau éjecté est un gaz chauffé par une réaction chimique. Avec VASIMR, c'est un plasma, c'est-à-dire un gaz ionisé, qui est éjecté.

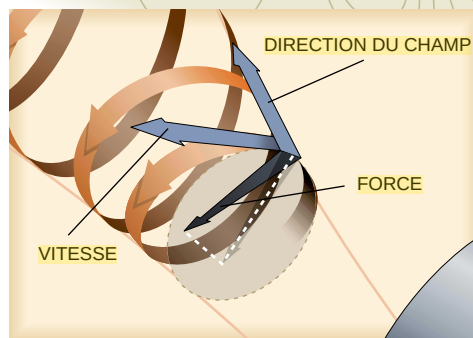
La poussée d'une fusée est égale au produit de la vitesse d'éjection des gaz par le débit massique du carburant. Par conséquent, on peut produire la même poussée en éjectant beaucoup de gaz à faible vitesse ou, au contraire, peu de matière à très grande vitesse. Cette dernière solution économise le carburant, mais les puissances nécessaires sont très élevées.

Pour comparer les performances des moteurs, les ingénieurs utilisent la notion d'impulsion spécifique, une grandeur égale à la poussée divisée par le débit massique et par l'accélération de la pesanteur au niveau de la mer (ou à la vitesse d'éjection divisée par l'accélération de la pesanteur). L'impulsion spécifique se mesure en seconde. La puissance

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).