

des zoos. La sous-espèce bongo des plaines est un peu moins menacée : sa population atteint plusieurs milliers d'animaux dispersés en Afrique centrale et en Afrique de l'Ouest.

Des antilopes et des tigres

Un groupe international d'organisation de sauvegarde prévoit de relâcher sur deux sites du Kenya des bongos des montagnes élevés en captivité. Le clonage assure un «réservoir» de bongos que l'on pourra réintroduire dans la nature. Qu'en est-il des animaux qui ont déjà disparu ? La première difficulté est le manque de tissu préservé, et donc d'ADN. En 1999, des biologistes ont déterré ce qu'ils espéraient être un mammoth bien conservé, mais, au cours des siècles, des congélations et décongélations successives ont dégradé l'ADN, et les biologistes moléculaires ne savent pas «rapiécer» ces accrocs génétiques.

Il en est de même pour les loups de Tasmanie, qui se sont éteints dans les années 1930 : des biologistes de Sydney essaient aujourd'hui de cloner des cellules d'un loup de Tasmanie conservé dans l'alcool en 1866, mais l'ADN est dans un tel état qu'ils devront sans doute reconstruire tous les chromosomes de l'animal, maillon après maillon.

La chèvre bucardo, dont l'extinction est récente, a plus de chances de ressusciter. Alberto Fernandez-Arias et José Folch, du Service de recherches agricoles de Saragosse, ont congelé du tissu de la dernière chèvre bucardo, après avoir tenté pendant plusieurs années de protéger cet animal victime du braconnage, de la destruction de son habitat et des glissements de terrains. L'an dernier, les biologistes espagnols ont transféré des embryons d'une sous-espèce apparentée à la bucardo chez une chèvre domestique, qui a donné naissance à des chevreaux.

Toutefois, même si les transferts nucléaires interspécifiques réussissent, ils ne donneront qu'une variété de clones, puisqu'on ne dispose que d'un seul animal, une femelle. Peut-être pourra-t-on «fabriquer» un mâle en retirant une copie du chromosome X dans l'une des cellules de la femelle bucardo et en ajoutant un chromosome Y issu d'une espèce de chèvres étroitement apparentée. Toutefois, cette technique, déjà utilisée pour manipuler des chromosomes humains, n'a encore jamais été appliquée au clonage.

Les 101 dalmatiens

Le mouton, la vache, la chèvre et la souris figurent parmi les animaux domestiques que les biologistes ont réussi à cloner. Le clonage d'un chien ou d'un chat ordinaire est-il aussi aisé ? Hélas, non. À ce jour aucune chatte à qui l'on avait implanté des embryons de chats n'a mis bas. Pour les chiens, la difficulté est encore plus grande.

Nous avons entrepris un programme de recherche pour assurer la reproduction des animaux de compagnie, mais aussi des chiens pour non-voyants, des chiens de sauvetage et des animaux utilisés dans un but thérapeutique.

De nombreuses personnes espèrent obtenir, grâce au clonage d'un animal de compagnie décédé, un animal qui aurait le même caractère et le même comportement, lesquels seraient en partie déterminés génétiquement. Bien que les chiens et les chats abandonnés abondent, certains utilisent des techniques traditionnelles de croisement pour obtenir l'animal souhaité ; le clonage offrirait une méthode plus efficace, notamment pour les animaux de service.

Aujourd'hui, par exemple, les chiens mâles pour les non-voyants sont châtrés quand ils sont tout jeunes, afin qu'ils soient plus attentifs au dressage rigoureux : toutefois, lorsqu'un chien est particulièrement compétent, on ne peut le croiser pour obtenir d'autres chiens qui lui ressembleraient.

On devrait pouvoir bientôt cloner le chat domestique, car sa physiologie de la reproduction est bien connue, et le transfert d'embryons, précoces ou tardifs, a donné naissance à des chatons. En revanche, des difficultés subsistent pour les chiens, dont la physiologie de la reproduction est unique parmi les mammifères : la maturation des ovules est très longue et, par ailleurs, le nombre d'ovules disponible est faible. À quand le clonage des 101 dalmatiens ?



Pourquoi cloner ?

Nous pensons que le clonage des espèces en voie de disparition participera à la sauvegarde des espèces menacées. Certains biologistes prétextent, à tort, qu'il réduirait la diversité génétique déjà amoindrie de ces espèces. Nous militons pour qu'un réseau mondial assure la conservation de tissus congelés du plus grand nombre possible d'individus d'une espèce menacée : on disposerait d'un réservoir génétique pour reconstituer des populations entières d'une espèce donnée. Une telle entreprise serait peu onéreuse.

Pour certains, cette pratique éclipserait les efforts de restauration de l'habitat. Nous opposons à cette critique que, si la préservation de l'habitat est la clé de voûte de la conservation des espèces, certains pays sont trop pauvres ou trop instables pour faire cet effort. De surcroît, avec la démographie croissante, l'habitat de certaines espèces disparaîtra inexorablement. Le clonage interspécifique offre la possibilité de conserver le stock génétique de ces espèces sans les maintenir en captivité. Clonage et restauration de l'habitat doivent se conjuguer pour la sauvegarde des espèces en voie de disparition.

Robert LANZA est président du Centre de biologie cellulaire avancée de Worcester. Betsy DRESSER est directrice du Centre de recherches sur les espèces menacées à l'Institut Audubon. Philip DAMIANI est biologiste au Centre de biologie cellulaire avancée de Worcester.

Graham E. CORLEY-SMITH et Bruce P. BRANDHORST, *Preservation of Endangered Species and Populations : A Role for Genome Banking, Somatic Cell Cloning*

and Androgenesis?, in *Molecular Reproduction and Development*, vol. 53, n° 3, pp. 363-367, juillet 1999.

Russell A. MITTERMEIER, Cristina G. MITTERMEIER, Gustavo A.B. DA FONSECA et Jennifer KENT, *Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities*, in *Nature*, vol. 403, n° 6772, pp. 853-858, 24 février 2000.

E.O. WILSON, *Vanishing before Our Eyes*, in *Time*, pp. 29-34, avril-mai 2000.

La fusée VASIMR

FRANKLIN CHANG DÍAZ

Il existe des fusées à forte poussée, mais grosses consommatrices de carburant ; d'autres ont un rendement élevé, mais une force de propulsion médiocre. Un nouveau type de fusées combine les avantages des deux précédents.

L'homme rêve de voyager dans l'espace. Au cours des 20 dernières années, j'ai eu la chance d'y aller six fois. Ces quelque 1 200 heures passées en mission m'ont donné le temps de contempler les étoiles et la Terre depuis l'espace. Quel spectacle ! Déjà avec mes amis, dans les années 1950, nous rêvions de voyager dans l'espace. J'ignorais alors à quel point ce rêve était partagé. Tous mes confrères, quel que soit leur pays d'origine, racontent de semblables rêveries. Sans doute quitterons-nous un jour notre fragile planète pour explorer le cosmos.

Toutefois, si l'homme rêve d'aller dans les étoiles, il est encore dépourvu de tout moyen de s'y rendre vite. C'est pourquoi, avec mes collègues de la NASA, nous avons mis au point un nouveau moteur de fusée. Conçu pour les voyages dans l'espace lointain, VASIMR doit servir au premier voyage vers Mars prévu pour bientôt. Cette randonnée vers la planète rouge sera la première croisière interplanétaire.

Un voyage vers la planète rouge avec les fusées à propulsion chimique actuelles durerait dix mois. La plus grande partie du véhicule serait occupée par le réservoir, et le carburant serait consommé en quelques brèves phases de poussées. La mission Apollo XIII a montré que, dans l'espace, les vaisseaux à propulsion chimique, dépourvus d'autonomie, sont

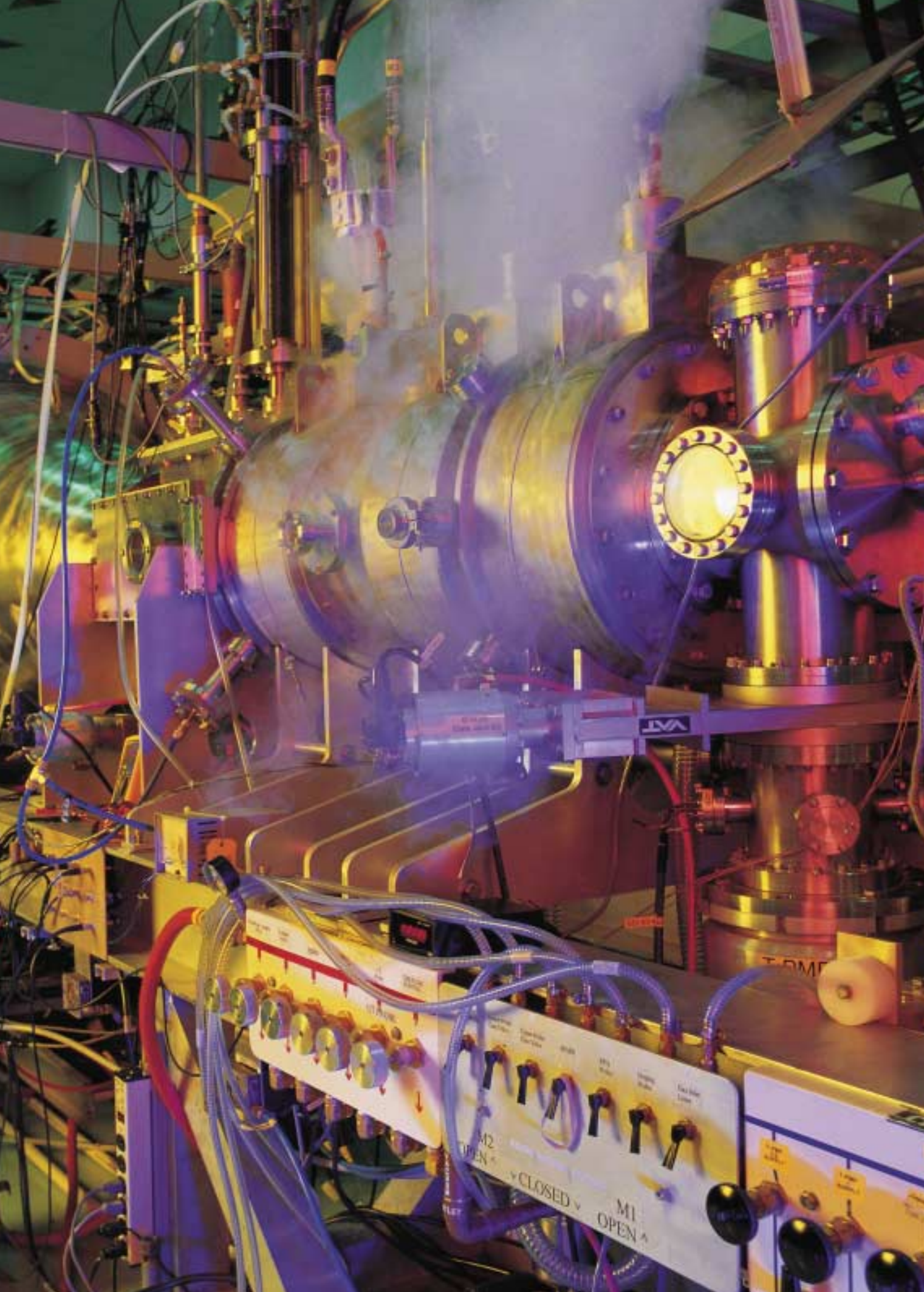
à la merci du moindre incident. Après l'explosion d'un réservoir, l'équipage de cette mission fut contraint de se réfugier dans le module d'alunissage, avec une quantité d'oxygène limitée et presque plus de carburant. Le sauvetage fut possible uniquement parce que l'accident eut lieu près de la Terre (à quelque 300 000 kilomètres). Un sauvetage serait impossible si un accident se produisait dans un vaisseau en route vers Mars. De surcroît, la lenteur due à la propulsion chimique menacerait la santé physique et morale de l'équipage, sans compter l'exposition prolongée aux rayonnements cosmiques, qui endommageraient le système immunitaire, et à l'impesanteur qui affaiblirait les muscles et les os...

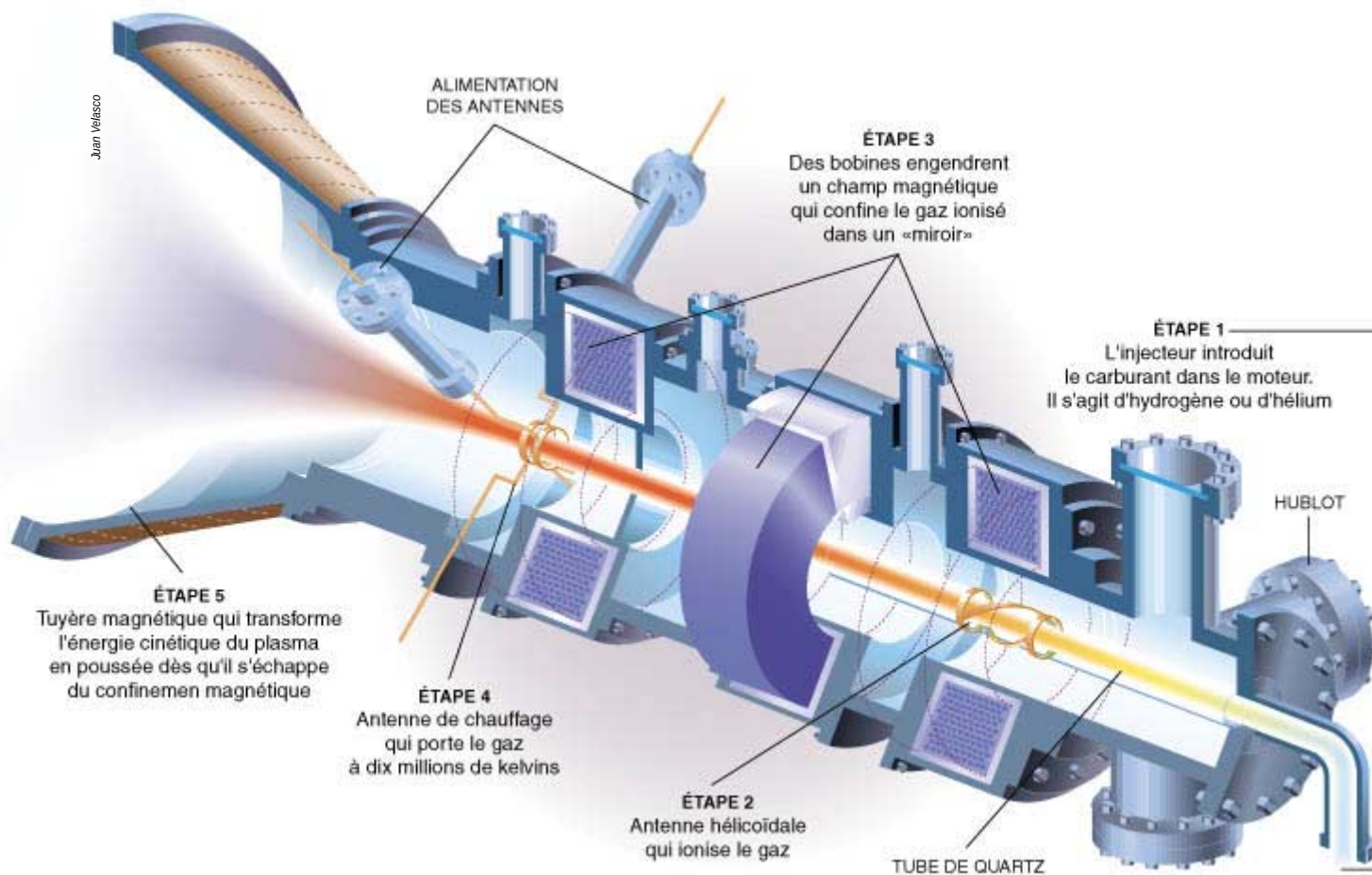
Pour être sûr, un vaisseau interplanétaire habité doit être rapide, fiable et capable de rentrer d'urgence en cas d'incident grave. Il lui faut des systèmes de propulsion efficaces pour couvrir les immenses distances interplanétaires et pour manœuvrer à proximité des planètes de départ et d'arrivée. Tandis que la propulsion chimique continuera d'être une excellente

1. CE MOTEUR DE FUSÉE, dont le principe est entièrement nouveau, éjecte des gaz ionisés. Long de trois mètres environ, il produit des vitesses d'éjection sans précédent : 300 kilomètres par seconde. Le hublot fixé par des boulons, à droite, laisse apparaître l'intense luminosité du plasma produit à l'intérieur du moteur.



Pam Francis





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

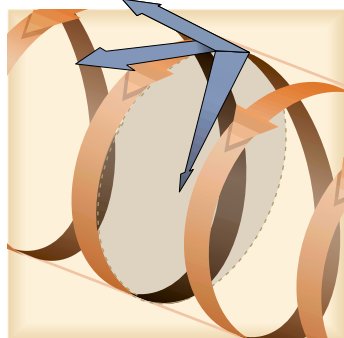
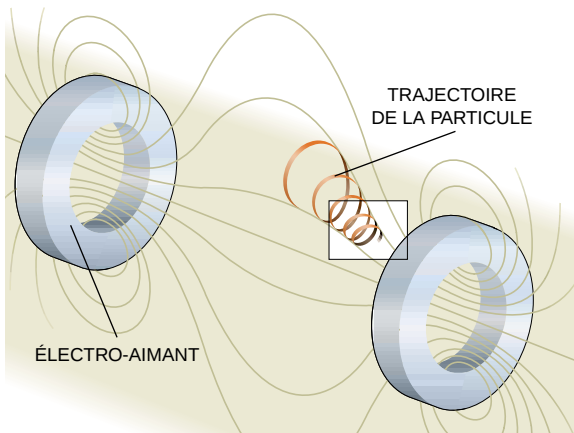
Rappelons quelques notions générales sur la propulsion des fusées. Elle satisfait à la loi de l'action et de la réaction de Newton. Cette loi stipule que toute action est contrebalancée par une réaction qui l'annule. Or, une fusée se propulse en éjectant des matériaux dans la direction opposée à celle 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.

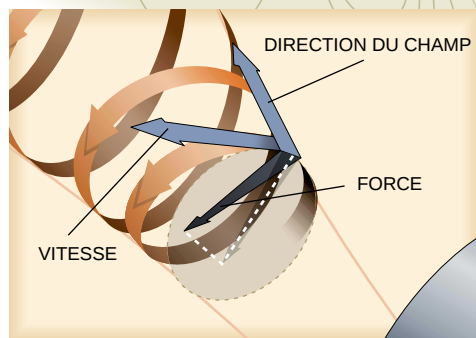
La poussée d'une fusée est égale au produit de la vitesse d'éjection des gaz par le débit massique du carburant. Par conséquent, on peut produire la même poussée en éjectant beaucoup de gaz à faible vitesse ou, au contraire, peu de matière à très grande vitesse. Cette dernière solution économise le carburant,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

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

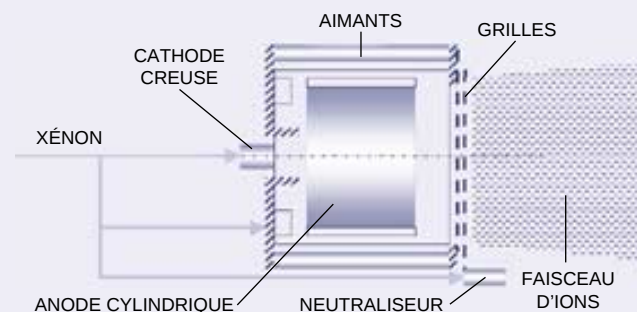
La propulsion électrique à bord des satellites

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

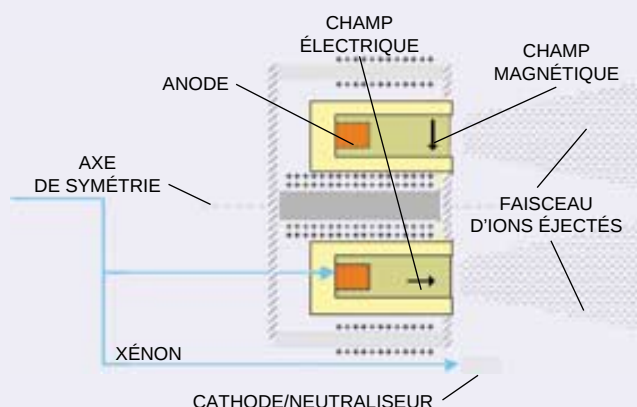
poussées bien supérieures à celle de VASIMR. Celle du PPS1350 est par exemple de 88 millinewtons pour 1 500 watts alors que le VX 10 de dix kilowatts développe 100 millinewtons. De 1 720 secondes, l'impulsion spécifique du PPS1350 est moins élevée que celle des moteurs ioniques, ses concurrents. Son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

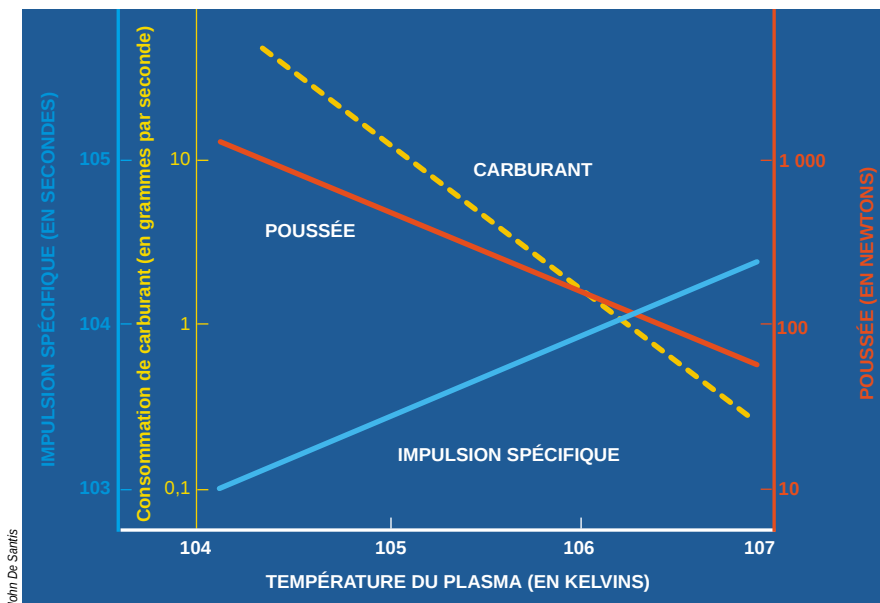
Au lieu d'expulser du plasma, les moteurs ioniques accélèrent des ions dans un champ électrostatique. Ils en existe plusieurs types, qui diffèrent par la méthode de production des ions. Les moteurs ioniques les plus au point sont ceux qui éjectent des ions par décharges continues en présence d'un champ 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*





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

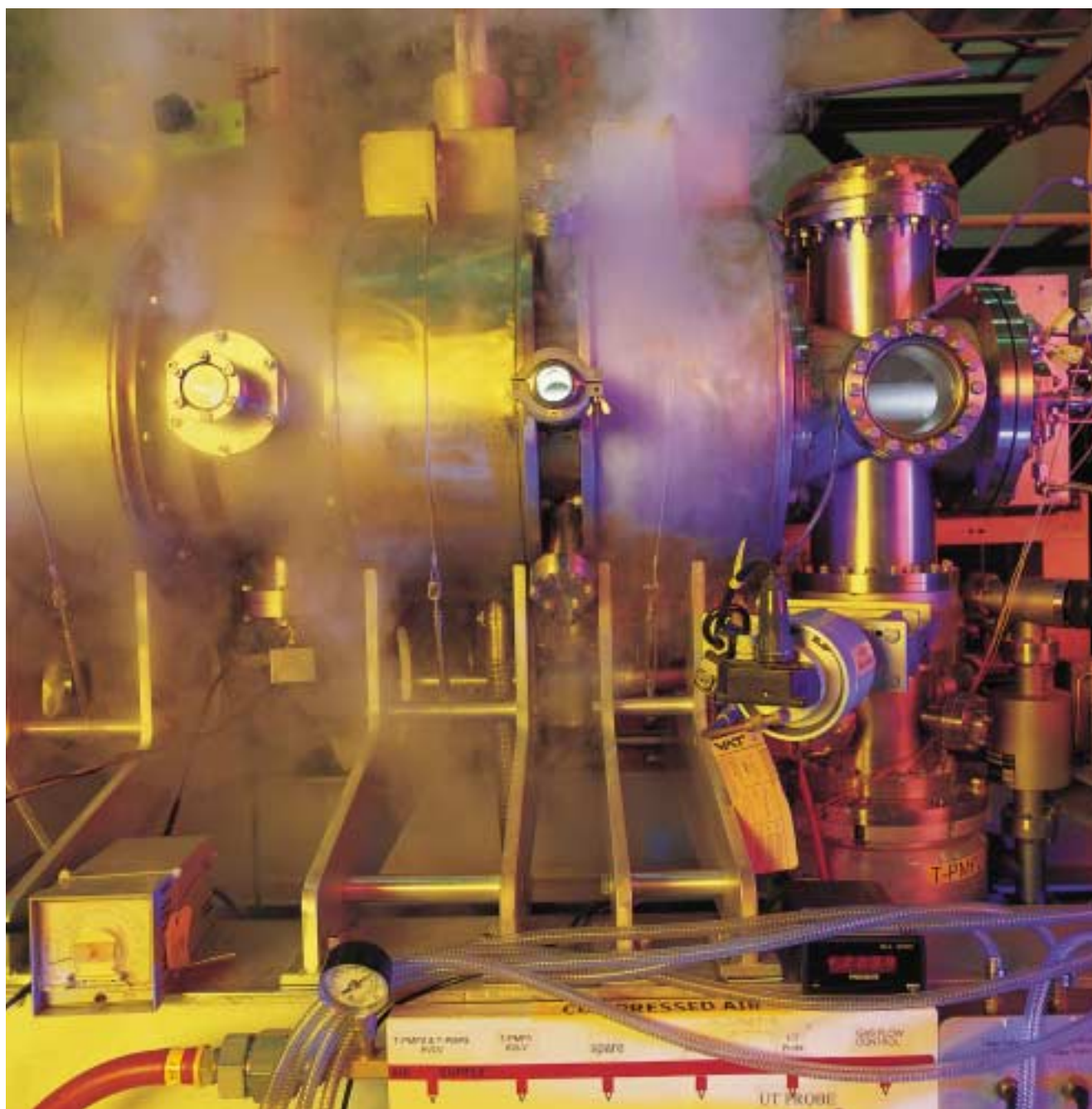
du plasma se produit un à deux mètres après le col de la tuyère.

Comment obtenir une variation de la poussée? Pour cela, nous avons prévu un moyen pour modifier l'une par rapport à l'autre les énergies délivrées au système hélicoïdal et au système de chauffage ionique par résonance cyclotron. Quand il s'agit d'obtenir une forte poussée, l'énergie est acheminée en priorité vers le système hélicoïdal, ce qui produit beaucoup d'ions à faible vitesse. Pour obtenir des impulsions spécifiques élevées (et une poussée réduite),

davantage d'énergie est envoyée vers le système de chauffage. Nous étudions également deux autres techniques de tuyère : un démarreur magnétique placé au niveau du de la tuyère qui produit une impulsion spécifique élevée (de manière à optimiser le champ en fonction de l'énergie du plasma), et un dispositif de postcombustion des atomes neutres restés dans le plasma, lequel produit une forte poussée à impulsion spécifique très basse.

Nous pouvions craindre que la régulation de poussée ne se fasse au

détriment du rendement énergétique. La création d'un plasma d'hydrogène nécessite environ 40 électronvolts par paire électron-ion (rappelons qu'un électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt). L'essentiel de cette énergie ne sert pas à la propulsion, mais seulement à la création du plasma. L'énergie cinétique qui engendre la poussée doit être rajoutée. Dans le premier prototype de VASIMR que nous avons construit, la quantité d'énergie cinétique ajoutée pour une impulsion spécifique élevée



7. DES NUAGES ONDOYANTS DE VAPEUR sortent des puissants électro-aimants refroidis à l'azote liquide.

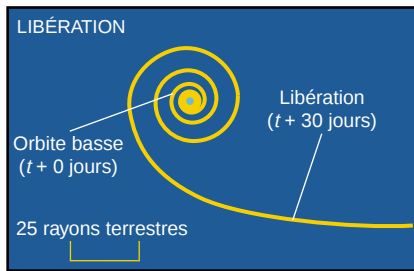
était d'environ 100 électronvolts par ion. Ainsi, une dépense totale d'énergie de 140 électronvolts donne 100 électronvolts d'énergie utile, ce qui représente un rendement électrique d'environ 70 pour cent. Les modèles de moteur VASIMR sur lesquels nous travaillons devraient atteindre des énergies de 800 à 1 000 électronvolts pour la même énergie initiale, ce qui améliorera notablement le rendement. Lorsque

l'impulsion spécifique est faible, on produit une quantité supérieure de plasma afin que la poussée soit plus forte ; l'énergie cinétique par particule se rapproche alors dangereusement de l'énergie d'ionisation, ce qui diminue l'efficacité du moteur. Toutefois, rappelons que l'on peut «choisir» le rendement selon la phase de la mission : quelques poussées fortes, mais brèves, peuvent parfois être plus efficaces. De surcroît, l'efficacité de

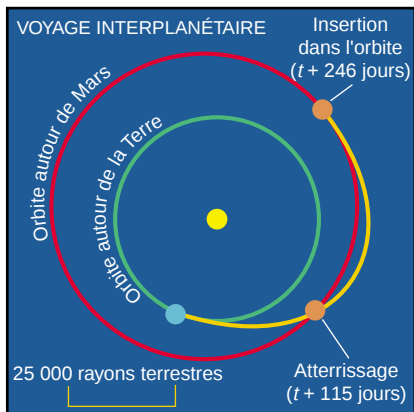
l'ionisation a une incidence sur le rendement. Une certaine proportion des atomes ne subit pas l'ionisation. Ils réduisent l'efficacité du moteur quand ils restent mélangés aux ions. Quand un atome neutre froid cède un électron à un ion chaud, l'atome neutre chaud résultant est insensible au champ magnétique et s'échappe, transférant son énergie sur les structures environnantes. L'ion froid qui subsiste est inutilisable.



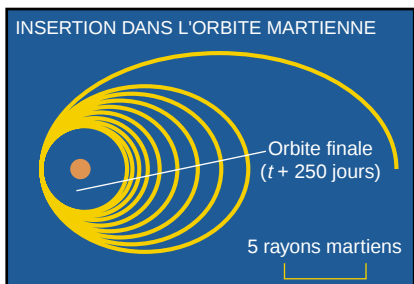
8. UN HUBLLOT DE VERRE de 15 centimètres de diamètre, placée dans l'axe du moteur VASIMR, permet de vérifier l'allumage du plasma.



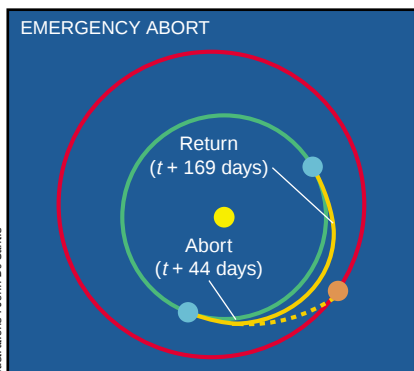
9. AU COMMENCEMENT DE SON VOYAGE vers Mars, un vaisseau doit acquérir de la vitesse pour s'arracher à l'attraction terrestre. Le moteur VASIMR a alors une poussée maximale et une impulsion spécifique de 3 000 secondes.



Contrairement aux fusées à propulsion chimique, une fusée équipée d'un moteur VASIMR peut changer de régime : elle atteint une impulsion spécifique de 30 000 secondes, 75 jours après le décollage, puis elle ralentit.



Après s'être rapproché de Mars pour larguer les astronautes, le vaisseau spatial rejoint progressivement une orbite autour de la planète rouge.



Une fusée équipée d'un moteur VASIMR aurait suffisamment d'autonomie pour revenir vers la Terre si un incident se produisait au début du voyage.

Pour réduire ce phénomène nuisible, nous étudions actuellement une technique de pompage radial des atomes neutres froids avant l'étagé de chauffage. Une fois pompés, les atomes froids sont réinjectés en aval du col de la tuyère, où l'énergie cinétique désordonnée des ions a déjà été transformée en une énergie cinétique directionnelle. L'échange de charge facilite le détachement du plasma de la tuyère.

Bien que les antennes hélicoïdales puissent ioniser presque tous les gaz, ceux qui sont constitués d'éléments légers, tels l'hydrogène ou l'hélium, sont plus intéressants. En effet, le chauffage ionique par résonance cyclotron est facilité dans les gaz légers dont les fréquences cyclotron, pour des champs magnétiques modérés (de l'ordre de un tesla), sont compatibles avec les techniques radio existantes pour les hautes fréquences. L'hydrogène étant l'élément le plus abondant de l'Univers, les vaisseaux spatiaux trouveront du carburant presque partout. La production de champs magnétiques intenses est une difficulté que nous cherchons à surmonter. Nous étudions de nouveaux supraconducteurs à haute température qui contiennent des oxydes de bismuth, de strontium, de calcium et de cuivre. Nous prévoyons d'utiliser de l'hydrogène à très basse température pour les refroidir.

Aujourd'hui, l'essentiel des recherches que nous menons sur VASIMR est concentré sur le VX-10. Ce prototype ou l'un des modèles dérivés sera bientôt testé dans l'espace. Un essai est prévu pour 2004 lorsqu'un vaisseau spatial doté d'un moteur de dix kilowatts fonctionnant à l'énergie solaire partira étudier les ceintures de radiation de la Terre (ceintures de van Allen).

Un système VASIMR sera aussi employé pour neutraliser la traînée atmosphérique de la station spatiale internationale. Les résultats récents et les progrès rapides dans la miniaturisation du matériel radio augurent bien du succès de ces premiers tests dans l'espace.

La véritable mise à l'épreuve de VASIMR se fera toutefois au cours du voyage vers Mars. Les études en cours prévoient un système VASIMR de 12 mégawatts. Le vaisseau qui accomplira cette mission suivra pendant quelque 30 jours une trajectoire de libération en spirale avant de commencer un voyage interplanétaire de 85 jours (deux fois plus rapide qu'avec une fusée à propulsion chimique). Pendant cette traversée, la fusée accélérera pendant une grande partie du voyage, puis ralentira à l'approche de Mars. Un module habité se détachera du vaisseau pour aller se poser sur Mars à l'aide de fusées chimiques, tandis que le vaisseau interplanétaire crociera non loin de la planète rouge, pendant quatre mois, suivant une trajectoire «économe». Afin de garantir la sécurité de l'équipage, il sera possible d'abandonner rapidement la mission en utilisant le mode «forte poussée du VASIMR. Le champ magnétique et l'hydrogène feraient écran aux rayonnements cosmiques, protégeant l'équipage.

La fusée VASIMR pourrait n'être que le précurseur des fusées dont certains d'entre nous rêvent : les moteurs à fusion nucléaire. Leurs puissances iraient de 10 à 100 gigawatts. Bien sûr, nous sommes loin de maîtriser la fusion nucléaire, mais les progrès sont constants. Sans doute les générations futures utiliseront-elles cette énergie pour voyager rapidement vers les planètes lointaines.

Franklin CHANG DÍAZ, docteur en physique des plasmas de l'Institut de technologie du Massachusetts, a participé à cinq missions spatiales, notamment au lancement de la sonde *Galileo* vers Jupiter et au dernier accostage entre la navette et la station spatiale russe *Mir*.

Gabriel GIANNINI, *Electrical Propulsion in Space*, in *Scientific American*, vol. 204, n° 3, pp. 57-65, mars 1961.

Ernst STUHLINGER, *Ion Propulsion for Space Flight*, McGraw-Hill, 1964.

F.R. CHANG DÍAZ et al., *The Develop-*

ment of the VASIMR Engine, in *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, papier 99-102, Turin, Italie, 13-17 septembre 1999. Texte disponible à l'adresse suivante : spaceflight.nasa.gov/mars/technology/propulsion/aspl

F.R. CHANG DÍAZ, J.P. SQUIRE, R.D. BENGTON, B.N. BREIZMAN, F.W. BAITY et M.D. CARTER, *The Physics and Engineering of the VASIMR Engine*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, papier 2000-3756, 17-19 juillet 2000.

