

Les systèmes de propulsion

Comment propulser un véhicule spatial habité, d'une orbite terrestre jusqu'à Mars? Les différents systèmes proposés ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le principal compromis technique est entre la poussée de la fusée et son rendement énergétique. Les systèmes à forte poussée communiquent une accélération supérieure, mais ils consomment en général plus de carburant. Les systèmes à faible poussée prennent plus lentement de la vitesse, mais ils consomment moins.

Les deux systèmes sont complémentaires : les fusées à forte poussée transporteraient rapidement les astronautes, tandis que les systèmes à faible poussée convoieraient plus lentement du matériel ou des modules d'habitation vides.

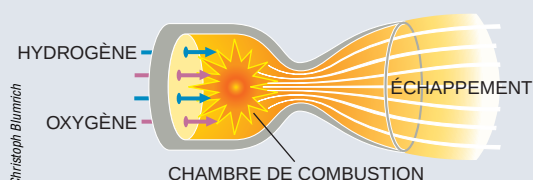
CODE DE COULEURS

→	CARBURANT
→	COURANT ÉLECTRIQUE
→	CHAMP MAGNÉTIQUE
→	OXYGÈNE

LA PROPULSION CHIMIQUE

La propulsion chimique est une technique éprouvée : la combustion de l'hydrogène et de l'oxygène produit des gaz dont la détente pousse la fusée. Elle engendre une poussée supérieure à celle de la plupart des autres techniques, mais avec un rendement inférieur. Les fusées chimiques nécessiteraient des quantités prodigieuses de carburant pour propulser un véhicule habité vers Mars. L'un des projets envi-

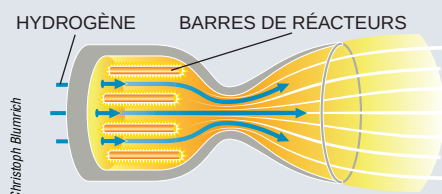
sagés nécessite, en orbite terrestre basse, un engin de 233 tonnes, dont 166 tonnes d'hydrogène et d'oxygène liquides. Ses sept moteurs RL-10 (un moteur classique utilisé sur de nombreuses fusées américaines) seraient disposés en trois étages de propulsion. Le premier étage enverrait le véhicule en orbite elliptique haute autour de la Terre ; le deuxième placerait le véhicule sur une trajectoire vers Mars ; et le troisième le ferait retourner vers la Terre à la fin de la mission. Chaque étage serait mis à feu pendant quelques minutes seulement, puis serait largué.



LA PROPULSION THERMONUCLÉAIRE

Dans les années 1960, le gouvernement américain a construit et testé au sol des fusées thermonucléaires dans le cadre du programme *Rover/NERVA*. Dans ces moteurs, un flot d'hydrogène liquide traverse un réacteur à cœur nucléaire solide, où le gaz est chauffé à plus de 2 500 °C avant d'être éjecté à grande vitesse par la tuyère de la fusée. La propulsion nucléaire fournit deux fois plus de quantité

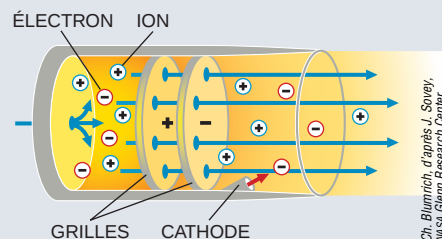
de mouvement par kilogramme de carburant que les fusées chimiques les plus performantes, et les réacteurs produisent de l'électricité pour le véhicule spatial. Un vaisseau habité de 170 tonnes, avec trois moteurs nucléaires et environ 90 tonnes d'hydrogène liquide, atteindrait Mars en six ou sept mois. Toutefois le public s'oppose à l'envoi dans l'espace d'un réacteur nucléaire : plusieurs systèmes de propulsion qui utilisent également des réacteurs nucléaires ont été aujourd'hui écartés.



LA PROPULSION IONIQUE

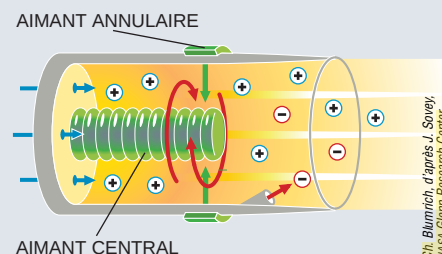
Conçue dans les années 1950, la propulsion ionique est l'une des techniques qui utilisent les champs électriques (plutôt que la chaleur) pour éjecter le gaz propulseur. Un gaz, comme le césium ou le xénon, passe dans une chambre où il est ionisé par un canon à électrons semblable à celui des tubes cathodiques des téléviseurs. Une tension électrique appliquée entre deux grilles de métal extrait les ions positifs, qui traversent la grille et sont éjectés dans l'espace.

Simultanément une cathode, à l'arrière du moteur, évacue les électrons dans le faisceau d'ions, de manière que le véhicule spatial n'accumule pas des charges négatives. En 1998, la sonde *Deep Space 1* était équipée d'un tel moteur. Celui-ci a consommé 2,5 kilowatts d'énergie solaire et produit une poussée faible (0,1 newton, c'est-à-dire la force d'un souffle humain), mais longue (plusieurs mois). Malheureusement, les grilles, qui à la fois accélèrent et retiennent les particules, ne peuvent être dimensionnées pour des moteurs de puissance voisine du mégawatt, requis pour les missions habitées vers Mars. De surcroît, un système de propulsion ionique nécessiterait de l'énergie produite par des réacteurs nucléaires, car des panneaux solaires de plus de 100 kilowatts seraient probablement difficiles à manier.



LA PROPULSION À EFFET HALL

Comme les systèmes de propulsion ionique, les moteurs à effet Hall utilisent un champ électrique pour accélérer des particules chargées positivement (en général, des noyaux de xénon). Le moteur crée différemment le champ électrique : un anneau d'aimants engendre d'abord un champ magnétique radial, qui fait circuler les ions autour de lui. Ce déplacement crée alors un champ électrique axial, qui assure l'éjection. Contrairement à la propulsion ionique classique, ce système ne comporte pas de grille et pourrait être agrandi plus facilement. Le rendement est inférieur, mais un second étage de propulsion l'améliorerait. Des petits moteurs-fusées à effet Hall volent sur des satellites russes depuis le début des années 1970 et la technique a récemment été adoptée par les États-Unis. Les derniers systèmes construits par les Russes consomment environ cinq kilowatts et engendrent une poussée de 0,2 newton. De son côté, l'Europe dispose du moteur SNECMA PPS1350 d'une poussée de 0,08 newton.



Poussée : 110 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 4,5 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 minutes
Fraction de masse : 55 pour cent

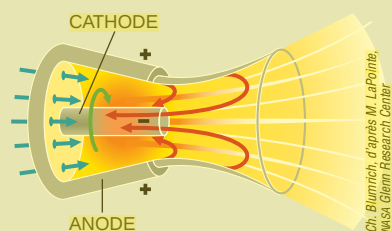
Poussée : 67 000 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 9 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 27 minutes
Fraction de masse : 32 pour cent

Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 30 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 79 jours
Fraction de masse : 22 pour cent

Poussée : 30 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 15 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 90 jours
Fraction de masse : 38 pour cent

LA PROPULSION MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE

Ces moteurs accélèrent des particules chargées en utilisant des champs magnétiques plutôt que des champs électriques. Le système est composé d'une anode creuse, avec tige centrale formant cathode. Une différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes ionise le gaz propulseur. Cette ionisation engendre un puissant courant électrique radial, qui s'écoule à travers le gaz et le long de la cathode. Ce courant engendre un champ magnétique circulaire, qui interagit avec le courant passant dans le gaz et accélère les particules dans une direction perpendiculaire aux deux, c'est-à-dire axiale. Le gaz propulseur peut être de l'argon, du lithium ou de l'hydrogène, par ordre croissant de rendement. Après s'être intéressée par intermittence à ce système pendant des décennies, la NASA a repris les travaux sur la propulsion magnétohydrodynamique en 1999. À la suite des recherches menées à l'Université de Princeton et dans des centres russes, japonais et allemands, la NASA a construit un prototype de un mégawatt, où le courant circule par impulsions de deux millisecondes.

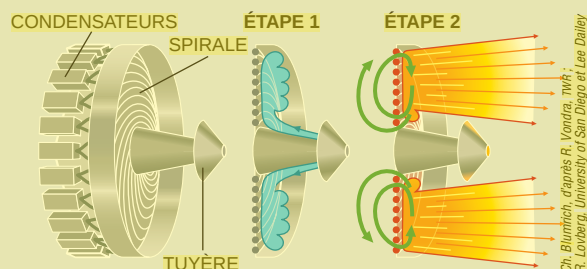


Ch. Blumrich, d'après M. LaPointe, NASA Glenn Research Center

Poussée : 100 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 20 à 100 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 à 25 jours
Fraction de masse : 6,7 à 31 pour cent

LES MOTEURS À INDUCTION PULSÉE

Le moteur à induction pulsée, qui retrouve les faveurs de la NASA, se fonde sur la création rapide de champs magnétiques et électriques perpendiculaires. Une tuyère éjecte d'abord une bouffée de gaz (en général, de l'argon), qui s'étale contre une spirale de fil électrique d'environ un mètre de diamètre. Une batterie de condensateurs produit alors, dans la spirale, une décharge de courant pendant environ dix millisecondes. Le champ magnétique radial créé par l'impulsion engendre un champ électrique circulaire dans le gaz, qu'il ionise et dont il accélère les particules dans la direction opposée à celle de l'impulsion électrique initiale. Comme leur déplacement est perpendiculaire au champ magnétique, ces particules sont éjectées dans l'espace. Contrairement à d'autres propulseurs électromagnétiques, ce système ne requiert pas d'électrodes, qui ont tendance à s'user, et l'on augmente la puissance en augmentant la fréquence des impulsions. On obtiendrait une puissance de un mégawatt, en émettant les impulsions 200 fois par seconde.

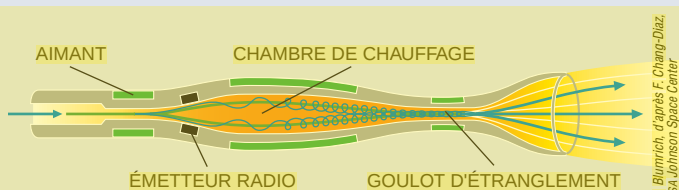


Ch. Blumrich, d'après R. Vondra, tufts : R. Lenzberg, University of San Diego et Lee Valley

Poussée : 20 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 50 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 110 jours
Fraction de masse : 14 pour cent

VASIMR

Le VASIMR (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, ou « fusée à magnétoplasma à impulsions spécifiques variables ») comble la lacune entre les systèmes à forte et à faible poussée. De l'hydrogène est d'abord ionisé par des ondes radio, puis guidé vers une chambre centrale où l'on fait régner un champ magnétique. Là, les particules longent les lignes de champ magnétique en tournant autour d'elles à une fréquence qui ne dépend que de leur charge électrique et de leur masse (la fréquence de Larmor). En bombardant les particules avec des ondes radio à la même fréquence, on les chauffe jusqu'à des températures de dix millions de degrés. Une tuyère magnétique transforme enfin le déplacement en spirale en déplacement axial, ce qui engendre la poussée. En réglant le chauffage et le convertisseur magnétique de sortie, le pilote commande la vitesse d'éjection. Le mécanisme est analogue à celui du levier de vitesse d'une voiture. En fermant l'étranglement de sortie, la fusée passe « en cinquième » : on réduit le nombre de particules excitées (et donc la poussée), mais on augmente leur température (et donc la vitesse d'éjection). L'ouverture de l'étranglement correspond à « la première » : poussée forte, mais rendement faible. Un véhicule spatial utiliserait une faible vitesse et un dispositif de chauffage pour quitter l'orbite terrestre, puis passerait en « cinquième » pour la croisière interplanétaire. La NASA prévoit un vol d'essai avec un système de dix kilowatts en 2004 ; les missions vers Mars nécessiteraient dix mégawatts.



Ch. Blumrich, d'après F. Chang-Diaz, NASA Johnson Space Center

	« Première »	« Cinquième »
Poussée :	1 200 newtons	40 newtons
Vitesse d'éjection des gaz :	10 kilomètres par seconde	300 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique :	2,1 jours	53 jours
Fraction de masse :	46 pour cent	2,4 pour cent

LES VOILES SOLAIRES

Les voiles solaires sont poussées par la faible pression de la lumière solaire. Pour transporter 25 tonnes en un an, de la Terre sur Mars, une voile devrait avoir une surface d'au moins quatre kilomètres carrés et une densité de un gramme par mètre carré. On fabrique aujourd'hui des fibres de carbone presque aussi fines qu'un cheveu, qui feraient ainsi des voiles très légères, mais comment déployer une structure aussi grande et aussi fragile ? En 1993, le Consortium spatial russe *Regatta* a déployé le miroir spatial *Znamya* de 300 mètres carrés, mais, lors d'un second essai en 1999, il s'est emmêlé. La NASA a récemment financé un concept similaire pour une « voile » magnétique qui capterait le vent solaire, les particules chargées émises par le Soleil, plutôt que la lumière solaire.

Poussée : 9 newtons par kilomètre carré (à la distance de la Terre au Soleil)
Vitesse d'éjection des gaz : pas de gaz
Temps de combustion spécifique : 58 jours