



PROPULSION IONIQUE

PROPULSION SPATIALE DU FUTUR ?

La propulsion chimique classique, qui fait réagir un carburant et un comburant, apporte la puissance nécessaire pour lancer une fusée et mettre une sonde en orbite. Mais une fois la sonde sur sa trajectoire, une faible poussée est suffisante pour atteindre, avec le temps, des vitesses élevées. C'est tout l'intérêt de la propulsion ionique, qui permet de limiter la quantité de gaz embarquée.

Lancer une sonde dans l'espace, c'est facile ; la faire aller loin, c'est plus difficile ; la faire aller loin avec peu de carburant, ce n'est pas à la portée de la propulsion chimique classique.

Cette dernière fait réagir un carburant et un comburant, une réaction se produit, des gaz s'échappent par la tuyère et propulsent la fusée (action = réaction).

Qu'est-ce que la propulsion électrique ou ionique ?

Le principe du moteur ionique est basé sur l'accélération électromagnétique d'ions : vous prenez un gaz qui s'ionise facilement (par exemple du xénon ou du

krypton) et vous le soumettez à une tension suffisamment importante (quelques milliers de volts par exemple). Il y a ionisation, c'est-à-dire création de charges positives (les ions) et négatives (des électrons). Cette soupe ions/électrons constitue un plasma, véritable quatrième état de la matière, dont la particularité est qu'il est conducteur alors que le gaz d'origine ne l'était pas. Le Soleil et les étoiles sont principalement constitués de plasma. Mais dans notre cas, le plasma correspond à une ionisation d'une quantité relativement faible de gaz, on obtient ce que l'on nomme un plasma « froid » par rapport aux plasmas des étoiles (quelques millions de degrés).



Ces ionisations vont en retour exciter aussi les atomes de gaz, qui vont émettre des photons lumineux (comme dans les tubes fluorescents). Ces plasmas sont utilisés dans la technologie spatiale pour faire fonctionner les moteurs ioniques, dans lesquels les ions⁺ passent dans un champ électrique et sont soumis à une force suivant les règles de l'électromagnétisme. Les ions sont accélérés grâce à un système de grilles + et - ; le gaz est éjecté à grande vitesse.

C'est cette force qui, bien dirigée, propulse la sonde dans la direction opposée (principe que toute action entraîne une réaction). Généralement, la vitesse d'éjection du xénon est très supérieure à celle des gaz produits par les propulseurs chimiques

classiques.

Mais la poussée finale est très faible, à cause de la faible quantité d'ions éjectés, elle est équivalente à un léger souffle sur une feuille de papier. Toutefois, l'énorme avantage est qu'elle peut durer très longtemps. De plus, les quantités emportées sont plus faibles que pour des carburants classiques, d'où un gain de masse.

L'énergie utilisée pour éjecter le xénon est fournie par l'électricité produite par les panneaux solaires.

Bien que très complexe, ce type de propulsion est très prometteur, car même si la poussée est extrêmement faible et constante, la vitesse d'éjection peut atteindre 100 km/s. La propulsion ionique est

particulièrement bien adaptée pour :

- la correction de la trajectoire de satellites,
- les missions interplanétaires lointaines, une fois qu'elles ont échappé à l'attraction,
- les missions à faible coût.

Néanmoins, les limitations de ce type de propulsion font que des améliorations de performances doivent être envisagées. Tous les pays engagés dans une politique spatiale y travaillent.

Impulsion spécifique et poussée

Le principe d'un moteur-fusée est toujours le même : on éjecte un gaz vers l'arrière et, selon le principe d'action-réaction, la fusée se déplace vers l'avant.

Il y a au moins deux notions importantes : ● **la poussée** est une force (N) qui correspond au débit massique de gaz éjecté (kg/s) multiplié par la vitesse d'éjection (m/s) ; ● **l'impulsion spécifique** (ISP) correspond à la durée pendant laquelle le moteur donne une poussée pour consommer tout le carburant. C'est l'efficacité énergétique d'un moteur. Elle est mesurée en secondes. Quelques exemples :

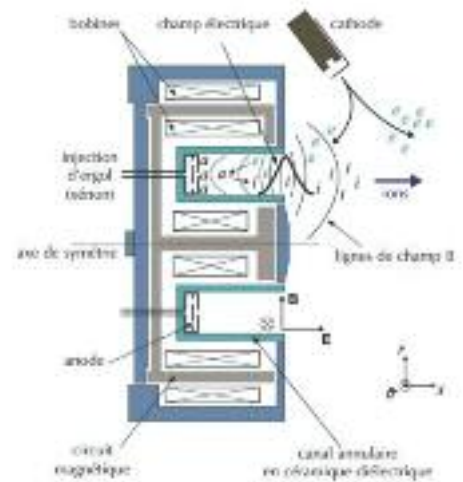
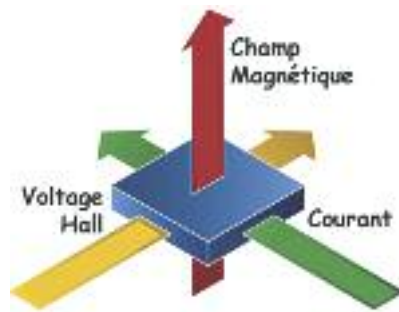
ISP : poudre, approx. 200 s ; carburants liquides, 400 s ; ionique, 4 200 s. – **Vej** : carburant liquide, 2 700 m/s à 4 000 m/s ; ionique, 16 000 m/s. – **Poussée** : carburant liquide pour *Saturn V*, 35 000 N ; *Dawn*, 20 à 90 mN (millinewton !).

On se rend bien compte qu'un moteur ionique ne pourra jamais faire décoller une fusée, mais il est endurant et, une fois l'ensemble mis en mouvement, il prend le relais et fournit une accélération légère mais permanente.

La propulsion chimique produit une poussée forte mais limitée dans le temps ; la propulsion ionique fournit une poussée (très) faible mais prolongée dans le temps. Lorsque la distance à parcourir devient grande, les moteurs à plasma permettent d'atteindre des vitesses de plus en plus grandes.

Différentes technologies

Il y a principalement deux types de mo-



Principe simplifié d'un moteur Hall. © S. Mazouffre



La sonde BepiColombo. © ESA

teur ionique : ● les moteurs ioniques à grilles ; ● les moteurs ioniques à effet Hall.

Les moteurs ioniques à grilles

Le carburant (xénon, krypton...) est injecté dans la chambre d'ionisation où des électrons sont créés grâce à un canon à électrons. Ces électrons ionisent le gaz, des ions + sont ainsi produits et le plasma est formé. Les électrons ne nous intéressent pas, ils sont ensuite attirés par l'anode (grille positive).

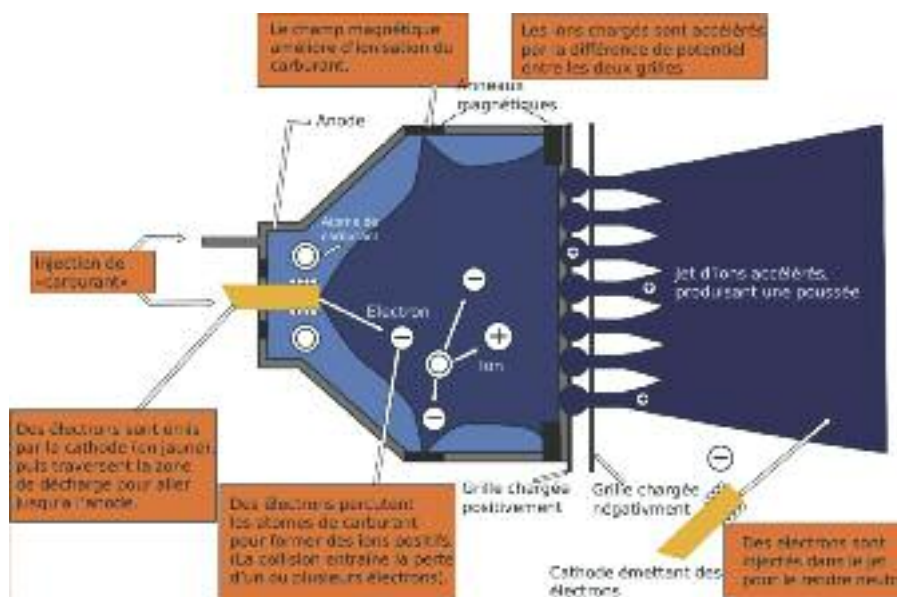
Les ions + qui traversent la grille positive sont accélérés par celle-ci (+ et + se repoussent) et sont dirigés vers la grille négative qui est chargée de les accélérer vers l'extérieur, ce qui produit la propulsion. Afin d'améliorer le rendement, le flux d'ions + est neutralisé en sortie à l'aide d'un canon à électrons, si bien que le jet est neutre, évitant ainsi tout retour et accumulation de charges négatives sur le moteur.

L'inconvénient de ces moteurs est que les grilles peuvent séroder avec le temps, ce qui dégrade les performances et limite leur durée de vie.

Les moteurs à effet Hall

Un courant électrique qui traverse un matériau soumis à un champ magnétique engendre une tension perpendiculaire au champ. Le propulseur à effet Hall est basé sur ce principe, un champ électrique accélère les ions et un champ magnétique piège les électrons pour ioniser le gaz carburant.

Le moteur ionique à grilles. © NASA



MISSIONS PRÉSENTES ET FUTURES À PROPULSION IONIQUE

Deep Space 1

Probablement le précurseur en la matière. Cette sonde, lancée en octobre 1998 vers l'astéroïde Braille et la comète Borelly, était un démonstrateur technologique qui a très bien fonctionné et a ainsi validé cette nouvelle technologie.

La sonde était équipée d'un moteur ionique à grille NSTAR de la Nasa, qui a utilisé 80 kg de xénon et fonctionné pendant plus de 1 000 heures avec démarrage et arrêt. La mission a pris fin en 2001.

Deep Space 1 devant la comète Borelly.



SMART-1

La sonde de l'Esa *Smart-1* (Small Missions for Advanced Research in Technology) a été lancée en septembre 2003 et a voyagé pendant 14 mois pour atteindre l'orbite lunaire.

Smart-1 avançait par petites spirales vers la Lune. Le moteur ionique (Snecma PPS 1350 à effet Hall) a été mis en route avec succès début octobre 2003 et a continué de fonctionner parfaitement jusqu'à la mise en orbite lunaire.

Le moteur était alimenté par du xénon (réservoir de 82 kg).

Ensuite, la sonde a été « capturée » par la Lune et a commencé à décrire une orbite lunaire elliptique quasi polaire. Puis, *Smart-1* s'est servie de son propulseur pour réduire l'altitude et l'excentricité de son orbite. En septembre 2006, on l'a fait s'écraser sur la Lune. À la fin de la mission, le moteur ionique avait produit 4 958 heures de poussée.

Hayabusa

C'est une sonde spatiale de l'agence japonaise, la Jaxa, qui s'est mise en orbite autour d'un astéroïde, a réussi à collecter quelques poussières et à les rapporter sur Terre. Lancée en 2003, elle a atteint Itokawa en 2005. Elle était équipée de 4 moteurs ioniques à grilles avec 65 kg de xénon et de petits moteurs-fusées pour les manœuvres orbitales. Malgré de nombreux problèmes techniques, la mission a été un énorme succès avec le retour d'échantillons en juin 2010.

Dawn

La sonde *Dawn* de la Nasa possède trois moteurs ioniques type NSTAR au xénon, qui sont redondants. La quantité de xénon emportée est importante : 425 kg pour une puissance maximale de 2 300 W. La quantité emportée est nécessaire, car deux mises en orbite (autour de Vesta et Cérès) étaient prévues. La poussée est de 90 mN (une feuille de papier reposant sur votre main !) et une impulsion spécifique de 3 100 s !

Lancée en 2007, elle se met en orbite autour de Vesta en 2011, puis autour de Cérès en mars 2015 où elle se trouve toujours, abaissant de plus en plus ses orbites.

BepiColombo

Future mission de l'Esa vers Mercure, elle devrait comporter quatre propulseurs ioniques, les mêmes qui étaient à bord de *Goce*, et deux orbiteurs, l'un de l'Esa, l'autre de la Jaxa. Ce sont des propulseurs à grille T6 de QinetiQ (Grande-Bretagne). Arrivée vers Mercure en 2024 !

Ce ne sera pas la seule mission Esa équipée d'un moteur ionique, *Solar Orbiter* devrait suivre.



La sonde Hayabusa, qui a parcouru 300 millions de kilomètres.

Le carburant (Xe, Kr...) est ionisé par une décharge dans une chambre annulaire en céramique. Les ions ainsi créés sont accélérés à la sortie de cette chambre par un puissant champ électrique. Ils sont ensuite éjectés à grande vitesse, ce qui génère la propulsion.

C'est en fait un moteur sans paroi, le plasma est uniquement confiné par le champ magnétique.

De même que pour le système à grilles, une cathode à électrons a pour but de neutraliser électriquement le faisceau d'ions positifs à la sortie.

Le rendement d'un propulseur Hall est meilleur que le système à grilles, la poussée est plus importante. Mais la chambre annulaire en céramique s'use avec le temps et le système Hall est complexe et pas encore totalement maîtrisé.

La France travaille sur ce genre de propulseur, notamment au laboratoire ICARE (Institut de combustion aérothermique réactivité et environnement) d'Orléans (voir interview).

En conclusion

Le moteur à grilles est plutôt destiné à des missions nécessitant une faible consommation de carburant, c'est-à-dire les missions interplanétaires. Le propulseur Hall, qui a une poussée plus importante, est mieux adapté aux transferts d'orbites. ■

Le Palais de la découverte a mis à la disposition du public il y a quelques mois, dans le cadre de « Un chercheur, une manip », une démonstration de moteur ionique. On aperçoit quelques membres de la SAF devant le moteur ionique à effet Hall (ici au krypton). Denis Renaud, d'ICARE, était à la manœuvre (caché en partie par le moteur). Jean-Pierre Martin



Stéphane Mazouffre

Stéphane Mazouffre, directeur de recherche au CNRS, est responsable de la propulsion électrique de l'équipe ICARE (Institut de combustion aérothermique réactivité et environnement) à Orléans.

L'Astronomie : Comment vous êtes-vous dirigé vers ce domaine de propulsion ?

S. Mazouffre : Je me suis intéressé dans mes études à la physique du solide et des plasmas. J'ai passé un doctorat aux Pays-Bas et en Allemagne, puis suis revenu en France, j'ai obtenu une place de postdoc chez ICARE.

Justement, qu'est-ce que le laboratoire ICARE ?

C'est le seul laboratoire en France qui est spécialisé dans la propulsion électrique et qui construit ce genre de moteurs. Nous possédons énormément de prototypes et démonstrateurs. Nous travaillons avec Safran (Snecma), Airbus (Astrium) et Thales.

« En fait, c'est la quantité de carburant qui limite la durée de vie. »



Quels sont les meilleurs principes envisagés après les quelques missions spatiales équipées de ce type de moteur ?

Il y a effectivement deux grandes familles : les moteurs à grilles et les moteurs à effet Hall. Les moteurs à grilles sont plutôt utilisés par les Américains, ils consomment un peu moins de carburant que l'autre type. Les moteurs à effet Hall ont une poussée plus grande et sont dédiés principalement aux satellites en orbite terrestre. Une grande nouveauté est en train d'apparaître, des satellites à propulsion totalement électrique, sans moteur chimique.

Quels sont les avantages et inconvénients d'une telle propulsion électrique ?

Les deux systèmes ont un avantage énorme : la faible consommation de carburant, d'où une réduction de masse embarquée. Le système à grilles possède une vitesse d'éjection plus grande et consomme moins ; le système Hall possède une plus grande poussée. Il faut avouer que pour le moteur à grilles, on comprend toute la théorie, alors que pour le moteur à effet Hall, on ne comprend pas encore tout.

Quel est le rôle exact du neutralisateur et pourra-t-on s'en passer ?

Cet élément est employé dans les deux types de moteur. Pour les moteurs à grilles, l'éjection d'ions + fait qu'ils se repoussent les uns les autres et cela provoque une divergence du faisceau. Le neutralisateur annule cet effet. Pour les moteurs à effet Hall, l'effet est similaire mais plus subtil, le neutralisateur fournit aussi les électrons pour le plasma.

Quelle est la durée de vie réaliste d'un tel moteur ionique ? Et la maintenance ?

En fait, c'est la quantité de carburant qui limite la durée de vie. Ces types de moteur ont déjà eu des cycles de 10 000 h de fonctionnement cumulé, on travaille pour fournir encore cinq à dix fois plus aujourd'hui, comme le demande le marché. Dans ces types de moteur, l'élément fragile, ce sont les parois, elles s'abîment avec le temps, et pour les moteurs à grilles, les grilles se détériorent aussi.

Quels sont les principaux fabricants au monde ? La France est-elle bien placée ?

En France, c'est essentiellement Safran (anciennement Snecma), en Grande-Bretagne QinetiQ (contrat pour *BepiColombo*), aux États-Unis Aerojet Rocketdyne et Busek, et Fakel en Russie. Oui, la France est plutôt bien placée.



Pour en savoir plus

Le propulseur à effet Hall, vidéo présentée par le labo ICARE : <https://youtu.be/p5RA-nUBZ-o>
Conversion d'énergie : Application à la propulsion spatiale par S. Mazouffre : <http://www.aleph-zero.fr/blog/wp-content/themes/default/images/Propulsion2012.pdf>

