HAL
open science

Les propulseurs à plasma - Une technologie spatiale d'avant-garde

Stéphane Mazouffre

To cite this version:

Stéphane Mazouffre. Les propulseurs à plasma - Une technologie spatiale d'avant-garde. Reflets de la Physique, 2009, 14, pp.15 - 19. 10.1051/refdp/2009009 . hal-02986786

HAL Id: hal-02986786

https://hal.science/hal-02986786

Submitted on 3 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les propulseurs à plasma

Une technologie spatiale d'avant-garde

Stéphane Mazouffre (stephane.mazouffre@cnrs-orleans.fr)
ICARE, UPR 3021 CNRS, 1C av. de la recherche scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

Le contrôle de la trajectoire des satellites de télécommunication à l'aide d'accélérateurs d'ions assure une économie significative en quantité d'ergol embarquée. Cette technologie d'avant-garde se répand, même si la propulsion chimique, plus classique, reste dominante. Des recherches ambitieuses sur la propulsion à plasma sont engagées de par le monde pour améliorer les performances des moteurs, augmenter leur durée de vie et atteindre des poussées de plusieurs Newtons. Ces travaux font appel à la fois à des simulations numériques complexes et au développement d'outils de diagnostic élaborés. Nous détaillons ici le cas des propulseurs à effet Hall, sur lesquels se concentre la recherche en France.

Intérêt et limites de la propulsion à plasma

Une fusée ou un vaisseau spatial se propulse en éjectant de la matière : la quantité de mouvement ainsi perdue est compensée par celle gagnée dans la direction du vol. Au début du XXe siècle, le physicien russe C. E. Tsiolkowski, un pionnier de l'astronautique, dérive à partir de la conservation de la quantité de mouvement, l'équation fondamentale de la propulsion spatiale, connue aujourd'hui sous l'appellation "The Rocket Equation". Pour un système sans force externe et en supposant la vitesse d'éjection du fluide propulsif v_e constante, cette équation relie de manière simple la masse Δm_e de combustible consommé lors d'une manœuvre à la variation de vitesse Δv du vaisseau :

$$\Delta m_e = m_0 \, [1 - \exp(-\Delta v / v_e)],$$

où m_0 est la masse initiale du vaisseau. On s'aperçoit alors que plus la vitesse d'éjection du combustible, que l'on nomme ergol en astronautique, est élevée, plus la quantité consommée par un propulseur est faible(1).

Avec la découverte de l'électron par J. J. Thomson et la mise en évidence du proton par E. Rutherford, les scientifiques réalisent dans les années 1910 qu'ils ont à leur disposition le combustible rêvé pour les vaisseaux spatiaux. En effet, les particules chargées sont susceptibles d'être accélérées à des vitesses considérablement plus grandes que celles que peuvent atteindre des atomes neutres, même chauffés à des températures extrêmes (fig. 1). La propulsion spatiale électrique, ou propulsion à plasma, venait de naître et le premier brevet sera déposé en 1932. Outre la consommation d'ergol, la poussée, qui est égale au produit du débit d'ergol par la vitesse d'éjection, est une autre grandeur fondamentale. Mais il faudra attendre le début des années 50 et la mise au point de sources d'ions délivrant des courants de plusieurs ampères pour que la propulsion à plasma apparaisse crédible. Des progrès rapides seront accomplis dans les années 50-60, avec le développement de la physique des plasmas et des sources d'ions. Deux familles de propulseurs feront alors leur apparition.

a) Les *moteurs ioniques,* pour lesquels l'extraction, la focalisation et l'accélération d'ions produits au sein d'un plasma sont assurées par un système de grilles polarisées à haute tension.

b) Les *propulseurs à effet Hall,* qui sont des accélérateurs d'ions sans grille utilisant avantageusement le confinement magnétique d'un plasma.

Les premiers essais en vol auront lieu dans les années 70. Dans les décennies qui suivront, le nombre de propulseurs embarqués ne fera que croître, tout comme le niveau des performances et la fiabilité. Aujourd'hui, les technologies « à grille » et « à effet Hall » occupent toujours une place prépondérante, et plusieurs dizaines de satellites sont équipés de propulseurs électriques qui assurent principalement le contrôle de la trajectoire et la correction d'altitude. Ce mode de propulsion est depuis peu employé pour des voyages interplanétaires, comme en témoignent la mission européenne SMART 1 [1] et la mission américaine Dawn.

La propulsion électrique offre plusieurs avantages par rapport à la propulsion chimique : une faible consommation d'ergol (fig. 1), un rendement énergétique élevé de l'ordre de 50 %, une longue durée de fonctionnement – plusieurs centaines de jours de tir en continu – qui assure une vitesse finale élevée, et un approvisionnement en énergie qui se fait de façon externe à l'aide de panneaux solaires, pour ne citer que les points forts les plus marquants [2 - 4].

Néanmoins, il existe en contrepartie trois limitations :

(i) un bas niveau de poussée, de l'ordre de 100 mN (la mise en orbite terrestre d'une masse d'une tonne nécessite une poussée de l'ordre de 10^6 N : la propulsion à plasma est donc restreinte à des applications en orbite terrestre et pour des trajets interplanétaires),

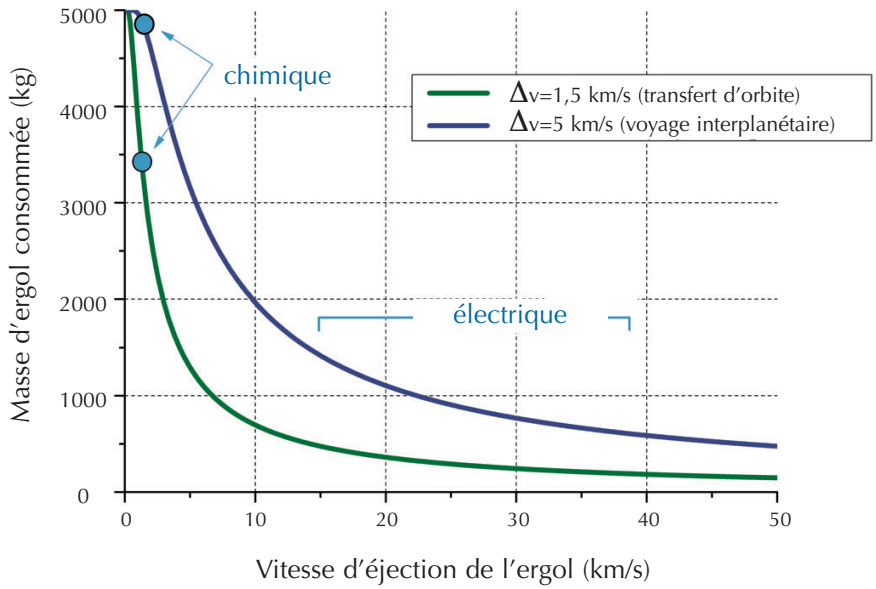
(ii) un degré de complexité relativement élevé,

(iii) et un fonctionnement restreint à un milieu à basse pression.

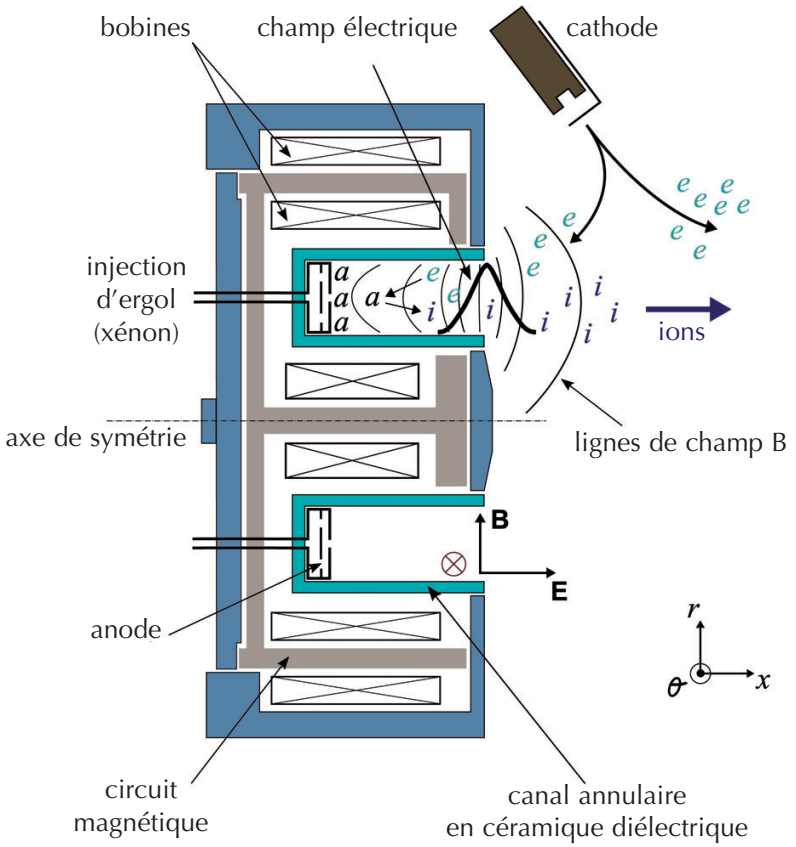
Un effort de recherche significatif est donc engagé dans le domaine de la propulsion à plasma, avec comme objectifs principaux l'amélioration des performances et le développement d'une gamme élargie en puissance, qui s'étendrait du Watt à la centaine de kiloWatts, afin de répondre aux besoins des opérateurs de satellites et des agences spatiales.

>>>

Article disponible sur le site http://www.refletsdelaphysique.fr ou http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2009009



1. Consommation d'ergol pour deux types de missions dans le cas d'un vaisseau spatial ayant une masse initiale de 5 tonnes, d'après l'équation de Tsiolkowski. Le terme Δv représente la variation de vitesse à accomplir sur la durée totale de la mission. Grâce à une grande vitesse d'éjection du fluide propulsif, la propulsion électrique autorise un gain significatif en masse d'ergol embarquée.



2. Schéma de principe d'un propulseur à effet Hall (a = atome, i = ion et e = électron). L'ensemble a une symétrie cylindrique. Les dimensions du canal annulaire d'un propulseur de 1,5 kW capable de développer 100 mN de poussée avec 5 mg/s de xénon sont typiquement : un diamètre externe de 100 mm, une largeur de 20 mm et une longueur de 30 mm.

>>>

La France a opté dans les années 90 pour la technologie des propulseurs à plasma à effet Hall, car ces derniers offrent un meilleur rapport poussée/puissance et sont mieux adaptés au domaine de la forte puissance. Les investissements réalisés depuis plus de dix ans en recherche et développement sur ces propulseurs ont ainsi conduit à l'émergence d'un domaine d'excellence, dont nous allons exposer les grandes lignes (voir encadré p. 17).

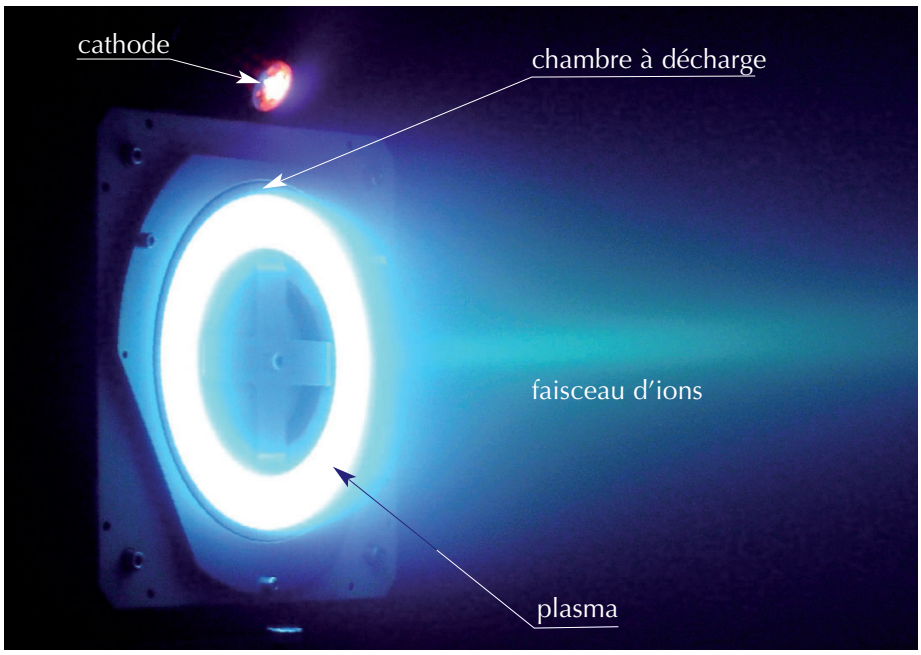
Création et accélération des ions dans un propulseur de Hall

Les grilles polarisées d'un moteur ionique (cas (a) de la section précédente) sont contraignantes pour deux raisons : leur configuration doit être parfaitement adaptée à la forme souhaitée du champ électrique, et leur érosion conduit à une dégradation des performances et en limite la durée de vie. S'en passer offre donc des avantages certains. C'est l'idée qui a conduit à la conception des propulseurs à effet Hall. Un propulseur à effet Hall est un accélérateur d'ions « sans grille », qui fait appel à une décharge plasma à basse pression baignée dans un champ magnétique [4, 5].

Dans un propulseur de Hall, l'ergol[(2)] est ionisé au sein d'une décharge confinée dans un canal annulaire en céramique ; puis les ions créés sont accélérés dans un champ électrique **E** et éjectés à des vitesses de l'ordre de 20-30 km/s, ce qui génère l'effet propulsif (figs. 2 et 3). Pour garantir la neutralité électrique, le faisceau d'ions positifs est neutralisé par une grande fraction (~ 80%) des électrons émis par la cathode. L'origine du fort champ électrique accélérateur **E** est subtile. Les électrons qui se dirigent vers l'anode, qui joue le rôle d'injecteur de gaz, doivent traverser un champ magnétique **B** radial produit par des bobines ou des aimants. L'intensité du champ **B** (~ 200 G) est choisie telle que le rayon de Larmor des électrons soit plus petit que les dimensions caractéristiques du canal diélectrique. Au contraire, les ions ne doivent pas ressentir le champ magnétique. Les électrons se retrouvent piégés dans la zone de fort champ magnétique – on parle de barrière magnétique – située vers la sortie du canal, ce qui conduit à une forte chute de la mobilité électronique transverse aux lignes de champ **B**. Pour maintenir le courant électronique, un intense champ électrique de plusieurs 100 V/cm apparaît alors en sortie du propulseur, car la différence de potentiel appliquée se retrouve

concentrée dans la région où les électrons sont ralentis. La combinaison du champ électrique, principalement axial, et du champ magnétique, majoritairement radial, conduit à la formation d'un fort courant électronique azimutal de quelques dizaines d'Ampères, dit courant de Hall, à l'intérieur du canal. Le courant de Hall permet une ionisation efficace de l'ergol, puisque 90% du débit de gaz injecté à l'arrière du canal est ionisé.

Les principes physiques fondamentaux qui régissent le comportement du plasma d'un propulseur à effet Hall sont aujourd'hui connus ; cependant, il reste des zones d'ombre qui limitent le caractère prédictif des modèles en développement. En particulier, il reste difficile de simuler les performances et de prévoir le comportement du plasma sur des longues durées. Deux mécanismes sont spécialement mal connus et non quantifiés. D'une part, les interactions entre le plasma et les surfaces, qui font intervenir l'émission d'électrons relativement froids par les parois diélectriques du canal sous l'effet du bombardement ionique. D'autre part, le transport dit « anormal » des électrons à travers la barrière magnétique. En effet, la diffusion électronique classique, assurée par des collisions entre électrons et atomes, n'explique pas l'intensité du courant recueilli : il existe un facteur de 10 à 20 entre le calcul et la mesure. Il faut donc faire appel, soit à un transport « pariétal » dû à la diffusion ou à l'émission d'électrons par les parois, soit à un transport « turbulent » lié à des fluctuations stochastiques de la densité électronique. Néanmoins, des avancées significatives ont été obtenues récemment, grâce à l'élaboration d'outils à la fois numériques et expérimentaux.



3. Photographie d'un propulseur à effet Hall de 5 kW en fonctionnement avec du xénon, dans le moyen d'essais Pivoine-2g du CNRS.

Modélisations particulaire et hybride

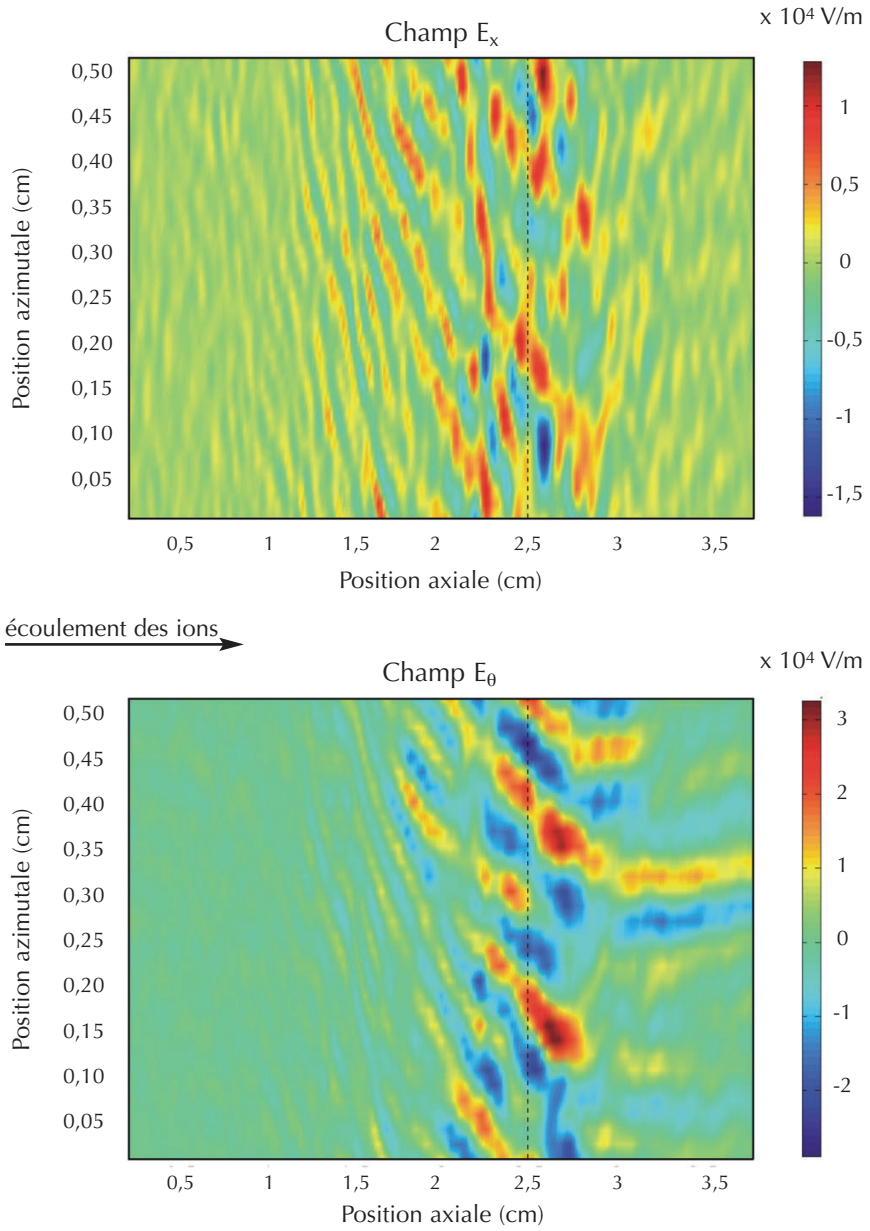
Afin de mieux appréhender le transport des particules chargées dans la décharge d'un propulseur à effet Hall, une méthode particulaire implicite 2D a été développée au CPHT de l'École polytechnique [5]. Ce modèle, qui consiste à suivre la trajectoire de chaque particule et à traiter individuellement chaque collision, permet de résoudre la dynamique du plasma au niveau de l'échelle temporelle du mouvement cyclotronique des électrons (~ 10^{-9} s). Puisqu'il s'agit d'étudier en priorité le transport des électrons, seules les coordonnées axiale x (direction du flux d'ions) et azimutale θ (direction du courant de Hall) sont considérées. Les interactions plasma-parois sont ainsi négligées. Les simulations particulaires ont apporté un éclairage nouveau sur le transport anormal des électrons, en montrant que ce dernier pouvait être relié à des fluctuations stochastiques du champ électrique dans la direction azimutale (fig. 4). Ces fluctuations spatio-temporelles, qui sont liées à des fluctuations de la densité électronique à courte longueur d'onde – de l'ordre du rayon de Larmor électronique ~ 1 mm – induisent une diffusion *in globo* des électrons dans la direction x. Le code particulaire prédit également l'existence de structures à grande échelle – dont la taille est très supérieure au rayon de Larmor des électrons – sous la forme de vortex de courant d'électrons.

Si l'approche particulaire est très puissante, elle est aussi très gourmande en temps de calcul : il faut plusieurs semaines pour simuler un régime d'équilibre. De plus, la géométrie choisie ne permet ni de prendre les parois en compte ni de calculer la poussée et la divergence du faisceau d'ions. Cette approche ne peut donc pas être utilisée pour simuler systématiquement le comportement d'un propulseur. À la place, une approche numérique hybride,

>>>

GdR Propulsion par plasma dans l'espace CNRS/CNES/Snecma/Universités 3161

La maîtrise des systèmes de propulsion par plasma à effet Hall a nécessité la mise en œuvre d'une stratégie de recherche reposant sur la combinaison de simulations numériques et d'expériences conduites dans le moyen national d'essais PIVOINE-2g du CNRS à Orléans. Cette stratégie a été développée au sein d'un Groupement de Recherche CNRS/CNES/Snecma/Universités à partir de 1996, soit seulement trois ans après les premiers contacts avec le professeur A.I. Morozov qui est à l'origine du concept.
Le GdR a pour objectif premier l'élaboration d'outils de simulation à caractère prédictif, ce qui impose au préalable de comprendre au mieux les phénomènes physiques qui sont au cœur de ces décharges magnétisées. La démarche, fortement interactive, fait appel aux nombreuses équipes de recherche du GdR. Elle a permis des progrès conséquents dans la compréhension des mécanismes physiques de base et a conduit à l'obtention de résultats scientifiques appréciés et reconnus au niveau international. De plus, le GdR a soutenu l'agence spatiale française dans sa démarche de recherche et technologie, et la Snecma dans son plan de développement et de commercialisation des propulseurs. Cette politique scientifique a abouti en particulier au succès de la sonde lunaire SMART-1 de l'Agence Spatiale Européenne, première sonde à être équipée d'un propulseur à plasma, en l'occurrence le PPS®1350-G de la Snecma.



4. Cartographies des fluctuations spatiales des composantes axiale E_x et azimutale E_θ du champ électrique, obtenues à l'aide de simulations numériques particulaires d'un propulseur de Hall de 1,5 kW [6]. La sortie du canal de décharge est située à une position axiale de 2,5 cm. Dans ce modèle, les fluctuations du champ électrique dans la direction θ, dont l'amplitude avoisine la valeur moyenne du champ électrique (~ 2 x 10^4 V/m), sont à l'origine de la diffusion des électrons à travers la barrière magnétique.

>>>

dans laquelle les ions sont traités comme des particules isolées et les électrons comme faisant partie d'un fluide maxwellien, est développée au laboratoire LAPLACE de l'Université Paul Sabatier à Toulouse [7]. Le modèle prend en considération les coordonnées axiale et radiale afin d'intégrer l'effet des parois, et fait l'hypothèse d'une symétrie cylindrique. Le transport des espèces n'est pas traité de manière autocohérente, mais il fait appel à des paramètres macroscopiques ajustables, qui quantifient la diffusion anormale des électrons ainsi que leur perte d'énergie. Cette modélisation est d'une grande utilité pour saisir la physique intrinsèque des propulseurs, réaliser des études paramétriques et tester certaines hypothèses. C'est aussi un outil indispensable pour la réalisation en amont d'études sur des nouveaux moteurs et concepts.

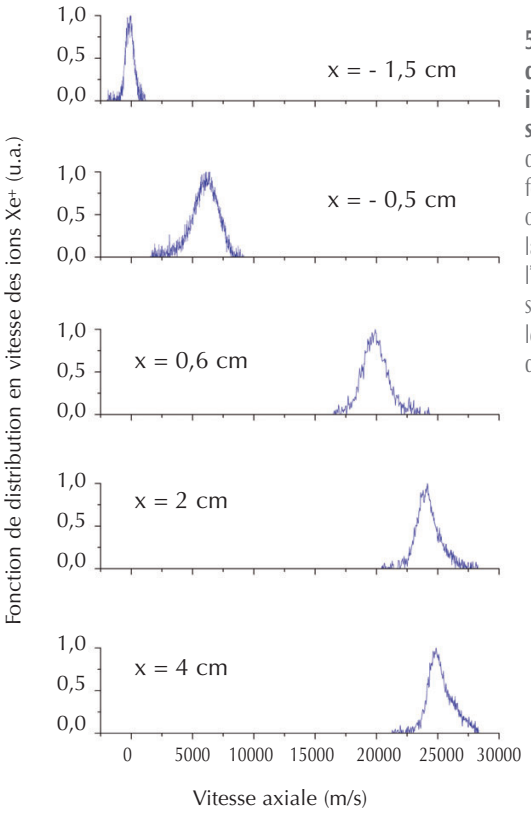
Des avancées significatives ont été réalisées récemment, en combinant les méthodes particulaire et hybride. La mobilité électronique obtenue à l'aide d'une simulation particulaire a été introduite dans le code hybride à la place des habituels coefficients ajustables. Cette démarche inédite a permis d'obtenir un bon accord entre expériences et calculs, comme illustré sur la figure 6.

Observation du plasma

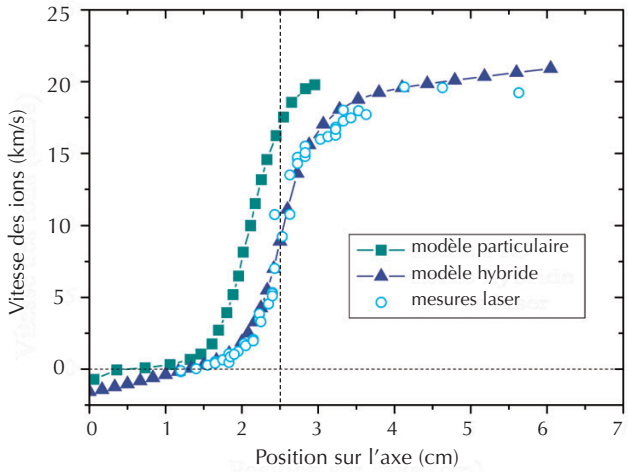
Le plasma d'un propulseur à effet Hall est difficile à sonder par une mesure intrusive, en raison du flux élevé d'énergie qui limite la durée de vie des instruments. Les techniques optiques se révèlent donc bien adaptées à l'observation de ce milieu, notamment les méthodes de spectroscopie laser qui offrent une excellente résolution spatiale, temporelle et spectrale.

La spectroscopie de fluorescence induite par laser (FIL) consiste à analyser les photons émis par des atomes après une excitation laser résonante. Cet outil a été mis en œuvre au laboratoire ICARE à Orléans [8]. En mesurant le décalage Doppler des photons de fluorescence, l'évolution de la fonction de distribution en vitesse des ions Xe^+ a pu être suivie dans l'espace et dans le temps (fig. 5). Cet outil a, par exemple, permis de mettre en évidence la forte corrélation entre les processus d'ionisation et d'accélération dans une décharge à barrière magnétique. La détermination du profil axial du champ électrique accélérateur, ainsi que son évolution spatio-temporelle, à partir de la distribution de vitesse des ions a fait progresser le niveau de compréhension de la physique de base d'un propulseur. Ces mesures ont également permis de valider l'approche qui consiste à coupler les codes particulaire et hybride (fig. 6). Enfin, en combinant expériences et simulations numériques, les chercheurs ont prouvé que des oscillations à haute fréquence du champ électrique étaient à l'origine de la création d'ions d'énergie cinétique supérieure à l'énergie fournie au système.

Une seconde technique laser sophistiquée a été spécifiquement mise en œuvre, afin d'étudier le mécanisme à l'origine du transport des électrons perpendiculairement aux lignes de champ magnétique. Il s'agit de la diffusion Thomson collective, qui consiste à analyser le signal qui résulte de la diffusion des photons d'un faisceau laser infrarouge par les fluctuations de densité d'un plasma. Si, comme prédit par les simulations particulaires, la diffusion des électrons à travers le champ **B** d'un propulseur est due à l'existence d'un champ électrique fluctuant dans la direction azimutale, il doit exister, à une certaine échelle, des fluctuations de densité électronique ayant des propriétés particulières en termes de taille et de période d'apparition. Jusqu'à récemment, ces fluctuations n'avaient jamais été observées et la question du transport « anormal » des électrons restait



5. Fonction de distribution de la vitesse axiale des ions Xe^+ mesurée par spectroscopie laser sur l'axe du canal d'un propulseur fonctionnant à 500 V. On observe une déformation de la distribution au cours de l'écoulement du fluide ionique, signature de l'interaction entre les processus d'ionisation et d'accélération.



6. Distribution de la vitesse axiale des ions Xe^+ le long de l'axe du canal d'un propulseur de Hall de 1,5 kW opérant à 300 V. Le plan de sortie est situé à 2,5 cm. Les simulations réalisées avec le modèle hybride prennent en compte la mobilité électronique obtenue à partir de la méthode particulaire. Le décalage entre le profil simulé par le code particulaire et le profil mesuré par spectroscopie laser provient de la condition imposée au potentiel à la limite du domaine de calcul.

pleinement ouverte. Du fait de la faible densité électronique (~ 10^{16} m^{-3}), détecter les photons infrarouges diffusés par le plasma d'un propulseur de Hall constituait un réel défi que les chercheurs du LPTP de l'École polytechnique et du LPMIA à Nancy ont su relever. Les résultats obtenus en 2008 sont très encourageants. Un signal de diffusion a effectivement été enregistré dans la gamme de fréquences 1-10 MHz, domaine où des fluctuations de densité électronique sont prédites par les simulations. Cependant, les données recueillies ne permettent pas encore d'affirmer que la diffusion des électrons est contrôlée par des fluctuations stochastiques du champ électrique dans la direction azimutale. Il faudra notamment obtenir un accord entre la relation de dispersion expérimentale et celle simulée.

Amélioration des performances

Les avancées réalisées au cours des dernières années sur l'aspect fondamental de la physique de la décharge d'un propulseur à effet Hall ont permis de faire progresser les concepts actuels et en cours de développement. Ces avancées concernent principalement la diffusion des électrons à travers la barrière magnétique, la production et l'accélération des ions, l'impact des électrons secondaires produits par les parois ainsi que les lois d'échelle. La technologie a également progressé grâce aux recherches sur les matériaux, sur l'optimisation de la cartographie magnétique, sur la réduction des pertes d'énergie aux parois et sur le comportement thermique. Les connaissances accumulées ont conduit à un accroissement du rendement et de la durée de vie, ainsi qu'à l'extension de la gamme de puissance, qui s'étend désormais de 100 Watts (~ 1 mN) à quelques dizaines de kiloWatts (~ 1 N). Cette technologie pourrait ainsi servir dans un futur proche à des manœuvres telles que le maintien en orbite basse des satellites d'observation et le transfert d'orbite des satellites de télécommunication.

Les scientifiques réfléchissent aujourd'hui à de nouveaux concepts capables de dépasser les limites imposées par l'architecture actuelle. En particulier, une meilleure séparation des processus d'ionisation et d'accélération autoriserait une plus grande flexibilité et une hausse du rendement. Le concept de propulseur à double étage s'appuie sur une séparation physique des processus : la difficulté consiste à guider les ions vers l'étage d'accélération, en limitant les pertes aux parois. Une autre approche consiste à injecter de l'énergie dans un propulseur à effet Hall par ondes radiofréquences, afin de favoriser l'ionisation et de limiter l'étalement de la zone de création des ions. Les recherches sur ces idées innovantes en propulsion par effet Hall n'en sont qu'à leurs premiers pas. Néanmoins, ces travaux d'avant-garde seront peut-être à l'origine d'un propulseur à plasma de forte puissance (~ 100 kW), qui ouvrirait la voie à l'exploration systématique du système solaire à l'aide de sondes automatiques en réduisant significativement le temps de trajet.

(1) En astronautique, on utilise préférentiellement la notion d'Impulsion Spécifique I_{sp} à la place de la notion de vitesse d'éjection de l'ergol. Ces deux quantités sont reliées par la formule : $I_{sp} = v_e / g$, où g est l'accélération de la pesanteur. Elle indique la durée pendant laquelle un kilogramme d'ergol produit une poussée de 9,81 N.

(2) L'ergol le plus couramment employé en propulsion à plasma est le gaz xénon, à cause de sa masse élevée et son faible potentiel d'ionisation.

En savoir plus...

1 • **http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1**

2 • R. H. Frisbee, "Advanced space propulsion for the 21st century", *J. Propulsion Power* **19** (2003) 1129.

3 • « La propulsion du futur », *Revue scientifique et technique de la défense,* **53** (2001).

4 • A. Bouchoule *et al.*, « La propulsion électrique pour les missions spatiales », *Lettre AAAF* **6** (2007) 11.

5 • V. V. Zhurin, H. R. Kaufmann et R. S. Robinson, "Physics of closed drift thrusters", *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) R1.

6 • J. C. Adam, A. Héron et G. Laval, "Study of stationary plasma thrusters using two-dimensional fully kinetic simulations", *Phys. Plasmas* **11** (2004) 295.

7 • G. J. M. Hagelaar *et al.*, "Two-dimensional model of a stationary plasma thruster", *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 5592.

8 • S. Mazouffre *et al.*, "Xe^+ ion transport in the crossed-field discharge of a 5 kW-class Hall effect thruster", *IEEE Trans. Plasma Sciences* **36** (2008) 1967.