

Vers la mesure au sol des émissions RF des propulseurs spatiaux ioniques *A way to ground measurements of radio emissions from ions space thrusters*

O. Pascal¹, V. Mazières², F. Gaboriau¹, R. Pascaud², S. Mazouffre³, C. Cailhol², L. Garrigues¹, L. Liard¹, V. Laquerbe⁴, A. Guglielmi⁵, A. Cozza⁶

¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, olivier.pascal@laplace.univ-tlse.fr, freddy.gaboriau@laplace.univ-tlse.fr, laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr, laurent.liard@laplace.univ-tlse.fr

²ISAE-SUPAERO, valentin.mazieres@isae-supaero.fr, romain.pascaud@isae-supaero.fr, Cyril.CAILHOL@isae-supaero.fr

³CNRS-ICARE, stephane.mazouffre@cnrs-orleans.fr

⁴CNES, vincent.laquerbe@cnes.fr

⁵EXOTRAIL, alexandre.guglielmi@exotrail.com

⁶Geeps, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, andrea.cozza@centralesupelec.fr

Mots clés (en français et en anglais) : émissions Radio Fréquence, chambre réverbérante électromagnétique, mesures et tests microondes, propulseur spatial ionique, Radio Frequency Emissions, Electromagnetic reverberation chamber, microwave measurement and testing, ion space thruster.

Résumé/Abstract

Les émissions électromagnétiques des propulseurs spatiaux électriques sont aujourd'hui difficiles à caractériser et leurs causes sont inconnues aux fréquences élevées. Leurs effets sur les satellites requièrent des moyens d'essais d'autant plus complexes que ces propulseurs doivent être allumés dans des enceintes sous vide poussé. En appui des traitements en environnement réverbérant au sein du moyen d'essais national CNRS PIVOINE-2G, une feuille de route de recherche est proposée.

Electromagnetic emissions from electric thrusters for spacecraft are currently difficult to characterize, and their origin remains unknown at high frequencies. Their effects on satellites require testing resources that are all the more complex in that these thrusters must be operated in vacuum chambers. A research roadmap is proposed, based on treatment in a reverberant environment within the CNRS PIVOINE-2G national test facility.

1 Contexte et motivation

Les propulseurs spatiaux ioniques sont considérés comme les plus efficaces pour mouvoir les satellites grâce à leur grande impulsion spécifique. Ils sont utilisés pour les phases de maintien à poste et pour celles de mise sur orbite, après la libération par la fusée. Ils ont en commun d'exploiter l'énergie électrique disponible à bord pour accélérer des ions, le plus souvent du Xénon, et engendrer une poussée en réaction. Plusieurs architectures peuvent être exploitées pour cela mais la plus courante reste les propulseurs à courant de Hall.

Ils sont largement déployés sur de nombreux satellites actuellement en exploitation. Leur puissance électrique (DC) typique est de l'ordre du kiloWatt. Même si elle est essentiellement consacrée à la propulsion, une partie de cette puissance peut également se retrouver en rayonnement électromagnétique du fait des instabilités qui existent depuis les kHz jusqu'au GHz.

Considérant la sensibilité extrême des récepteurs de communication à bord et l'exigence de maîtriser les sources de bruit pour conserver l'intégrité de l'information transmise, la question de la compatibilité électromagnétique de ces propulseurs avec le satellite est cruciale.

Considérant par ailleurs les enjeux liés à la militarisation de l'espace, ce rayonnement électromagnétique réduit la discrétion des manœuvres du satellite. On cherchera alors à diminuer les émissions de ses propres satellites voire à détecter plus précocement les manœuvres des satellites adverses via leurs émissions.

Ces émissions représentent enfin des nuisances pour les communautés de chercheurs qui exploitent des radiotélescopes. Même si on ne peut pas attribuer avec certitude aux propulseurs les émissions des constellations actuellement en cours de déploiement [1,2], ils sont assurément dans la liste des suspects.

Les méthodes usuelles de caractérisation permettant de garantir la compatibilité électromagnétique entre propulseurs et récepteurs sont cependant inutilisables ici. En effet les propulseurs ne peuvent être mis en marche que dans des enceintes où l'on a réalisé un vide poussé. De telles enceintes sont métalliques pour supporter les contraintes mécaniques liées à ce vide. Ainsi cet environnement réverbérant ne permet pas de mesurer, et encore moins de comprendre, ces émissions issues des propulseurs en fonctionnement. Ces deux points constituent les deux objectifs visés par la démarche proposée dans la suite.

2 Premiers indices.

A la demande du CNES et avec le soutien d'Airbus Defense and Space, le LAPLACE et l'ISAE-SUPAERO conduisent depuis plusieurs années des travaux pour documenter ces effets et définir une stratégie scientifique pour les comprendre et les mesurer. Dans le prolongement des travaux pionniers russes [3,4], V. Mazières a ainsi pu montrer qu'il était possible assez simplement « d'écouter » les rayonnements électromagnétiques dans une enceinte où était allumé un propulseur de Hall [5] (voir figure 1). Il a ainsi pu discriminer ces émissions instationnaires selon leurs bandes spectrales et les relier à diverses causes déjà identifiées dans la littérature. Pour les fréquences élevées, ces causes demeurent inconnues et elles constituent un enjeu de recherche.

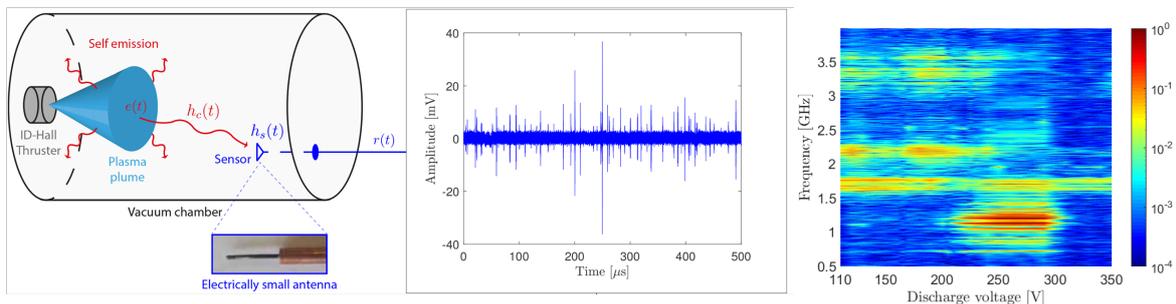


Figure 1 : configuration expérimentale, mesures brutes et traitées (en fonction de la tension d'alimentation du propulseur) d'après [5]

3 Comment mesurer ces émissions ?

Ces mesures, comme celles de Kirdyashev ou de Beiting [6] (figure 2), attestent clairement de l'existence de ces émissions intermittentes. L'environnement, totalement ou partiellement réverbérant, dans lequel elles ont été réalisées les rend néanmoins inexploitable pour répondre aux besoins industriels et de recherche. Elles ne sont pas représentatives de la configuration électromagnétique dans l'espace.

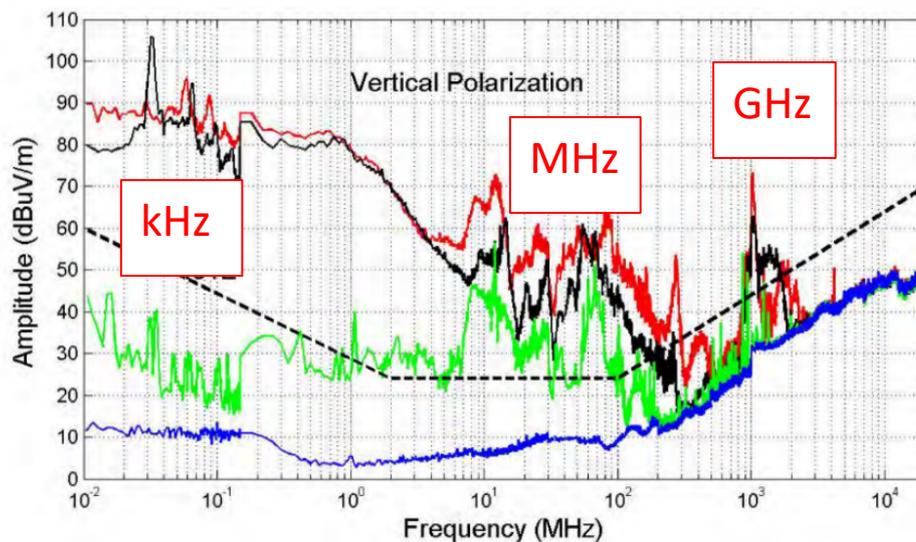


Figure 2 : émissions d'un propulseur de Hall d'après [6], la courbe bleue correspond au propulseur éteint

Puisqu'il est impossible au sol de s'affranchir de la pression atmosphérique une enceinte à vide reste nécessaire. Comme il semble également impossible de concilier tenue mécanique des contraintes de pression et transparence

électromagnétique, on ne peut pas mettre ces enceintes dans des chambres anéchoïdes classiques. Enfin, la tenue au vide des matériaux absorbants usuels ne permet pas de recouvrir l'intérieur des enceintes. Ainsi et d'après une première idée proposée en 2013 [7], les avancées sur les traitements en environnement réverbérant [8] nous ont conduit à proposer un programme de recherche basé sur les objectifs scientifiques suivants :

- Identifier l'origine du rayonnement électromagnétique des propulseurs de Hall.
- Etablir des liens de causalité entre conditions opératoires, ou design des propulseurs, et les émissions.
- Définir des capteurs performants dans l'environnement de mesure.
- Caractériser le comportement EM des enceintes de tir sous vide.
- Extraire l'information utile de la mesure, c'est-à-dire l'émission du propulseur.

4 La méthode

On propose de se concentrer sur le moyen d'essais national de référence en matière de propulsion spatiale ionique [9]. Disposant d'une instrumentation, tant mécanique que plasma, au niveau de l'état de l'art, il convient alors de développer une instrumentation microonde apte à extraire les informations électriques pertinentes.

On pourra s'appuyer sur des campagnes de mesures régulières et intensives pour acquérir d'importants volumes de données dans des configurations variées. Un travail spécifique sera conduit pour identifier les causes qui produisent le rayonnement. Dans la gamme GHz, on sait déjà qu'il ne peut être engendré que par des instabilités qui concernent les électrons. En appui sur des mesures in situ à échelle réduite, des études théoriques et numériques, on pense pouvoir comprendre le développement de ces instabilités radiatives.

Ces campagnes de mesure, associées à des développements spécifiques à échelle réduite, permettront également de développer des capteurs et les traitements adéquats. On pense exploiter un réseau de capteurs large bande décorrélés pour pouvoir tester des traitements à même de déconvoluer les effets de l'enceinte réverbérante sur les signaux mesurés.

5 Conclusion

La mesure des émissions des systèmes de propulsion spatiaux dans la gamme des microondes constitue un défi particulièrement important pour garantir l'opérabilité, voire la discrétion des satellites. Même si l'on sait avec certitude que ces émissions existent à des niveaux préoccupants, on n'en comprend pas encore les causes et on ne sait pas les mesurer de façon satisfaisante pour assurer les développements industriels.

Une voie a été proposée par un ensemble de partenaires académiques et industriels pour lever ces verrous. Elle s'appuie sur un moyen d'essai de référence et un plan de travail scientifique ambitieux. Elle doit conduire à doter la communauté nationale d'un diagnostic microonde original et efficace.

Références bibliographiques

- [1] Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz, *A&A* 676, A75 (2023)
- [2] SpaceX satellites are leaking radio waves — a potential headache for science, *Nature* 619, 439 (2023)
- [3] Kirdyashev, K. P., *Microwave Processes in Plasmadynamic Systems*, Energoatomizdat, Moscow, 1982
- [4] Kirdyashev, K.P. Microwave processes in the SPD-ATON stationary plasma thruster. *Plasma Phys. Rep.* 42, 859(2016).
- [5] Mazières, V, Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in Hall thruster inside a metallic vacuum chamber, *Physics of Plasmas* 29, 072107 (2022)DOI 10.1063/5.0090774.
- [6] Beiting, E., Electromagnetic emissions from PPS® 1350 Hall thruster, in IEPC, paper IEPC-2009-071.
- [7] Gianbusso, M., A Plan to Study the Radiated Emissions from a VASIMR® Engine Exhaust Plume, in IEPC, paper IEPC2013-199.
- [8] Cozza, A, Emulating an Anechoic Environment in a Wave-Diffusive Medium through an Extended Time-Reversal Approach, *Trans. On Antennas and Propagation*60, 3838 (2012).
- [9] <https://icare.cnrs.fr/recherche/moyens-experimentaux/pe-pivoine/>