

Caractérisation expérimentale de la signature radar des plumes plasmas des propulseurs électriques dans des environnements réverbérants (RCSPP)

Directeurs de thèse : Romain PASCAUD (ISAE-SUPAERO), Valentin MAZIERES (ISAE-SUPAERO) et Andrea COZZA (GeePS / CentraleSupélec)

Sujet :

Avec le nombre croissant de satellites et la militarisation des orbites, la surveillance spatiale devient essentielle. Par exemple, en 2009, l'Agence spatiale européenne (ESA) a créé le programme Space Situational Awareness (SSA), qui vise à maintenir l'accès indépendant de l'Europe à l'espace et son utilisation grâce à la surveillance spatiale. Parmi les exigences énoncées figure la capacité d'identifier les satellites en orbite et de détecter toute manœuvre hostile dans l'espace.

Aujourd'hui, les satellites sont de plus en plus équipés de systèmes de propulsion électrique. Ces systèmes permettent de manœuvrer le satellite en éjectant des ions à très grande vitesse qui, après neutralisation électronique, forment une plume plasma de taille variable à la sortie du propulseur. La présence de ce plasma pourrait permettre le développement de systèmes de détection des manœuvres des satellites.

Une première approche pourrait consister à obtenir des informations à partir d'un système de détection passif exploitant les émissions RF produites par les propulseurs à plasma pendant leur fonctionnement. En effet, il a été démontré que ces propulseurs génèrent des émissions dont le contenu spectral et l'origine physique restent à clarifier avant de pouvoir concevoir un tel système de détection [1-3].

Une autre façon de détecter le fonctionnement d'un propulseur à plasma pourrait être d'utiliser un système de détection actif tel qu'un radar. Dans ce cas précis, il est nécessaire de connaître la section efficace radar (SER) d'une plume plasma, qui est un paramètre complexe dépendant de la fréquence, de la polarisation et de la direction d'arrivée de l'onde incidente générée par le radar, et éventuellement de la position du récepteur radar dans le cas d'un système bistatique. Cependant, la SER d'un objet, même relativement simple, est difficile à évaluer et est généralement obtenue par simulation numérique ou caractérisation expérimentale. Dans le cas de la plume plasma, de nombreux problèmes se posent.

Tout d'abord, la plume plasma est un milieu complexe, dispersif en fréquence et non homogène. Ses propriétés dépendent du type de propulseur et de son mode de fonctionnement. De plus, pour pouvoir faire fonctionner le propulseur sur Terre, il doit être placé dans un caisson ultravide, généralement en métal, afin de répondre aux contraintes mécaniques liées aux différences de pression. Obtenir des mesures électromagnétiques précises dans un tel environnement réverbérant reste à ce jour un défi.

Dans ce travail de doctorat, nous proposons d'abord d'estimer numériquement la SER de la plume plasma à l'aide d'une méthode de simulation multi physique précédemment développée dans le cadre du travail de doctorat de Naomi de Mejanès [4]. En complément de ces travaux, nous prévoyons de développer des techniques de traitement avancées pour la mesure de la SER dans des environnements

réverbérants [5]. Ces méthodes seront utilisées pour mesurer la SER des plasmas et la comparer aux résultats de la simulation numérique du problème testé.

Pour ce faire, le travail de doctorat sera organisé comme suit :

- Revue de la littérature sur la SER des plasmas et sur les méthodes de mesure de la SER dans des environnements réverbérants (par exemple, les chambres réverbérantes).
- Étude électromagnétique numérique à l'aide d'un outil de simulation numérique multi physique [4] de la SER des plates-formes comprenant une plume plasma, ainsi qu'un cas test impliquant un réacteur à plasma à basse pression simulant la plume à titre de référence [6].
- Développement de méthodes avancées de traitement du signal pour extraire la SER dans des environnements réverbérants.
- Mesures de la SER du cas test dans un environnement anéchoïque à titre de référence.
- Mesures de la SER du cas test dans un environnement réverbérant à l'aide des méthodes développées et comparaison avec les mesures de référence dans une chambre anéchoïque.

Ces travaux seront supervisés par l'ISAE-SUPAERO et le GeePs / CentraleSupélec. À terme, cela devrait nous permettre d'acquérir les compétences requises pour caractériser numériquement et expérimentalement la SER d'une plume d'un système de propulsion spatiale électrique. En outre, les résultats de ces travaux pourraient également fournir des informations utiles pour aborder le problème inverse, à savoir améliorer la furtivité d'une cible en générant des plasmas autour de celle-ci [7].

[1] V. Mazières, F. Gaboriau, A. Guglielmi, V. Laquerbe, R. Pascaud, and O. Pascal, "Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in Hall thruster inside a metallic vacuum chamber", *Physics of Plasmas*, vol. 29, no. 7, p. 072107, Jul. 2022.

[2] V. Mazières, T. Yung, L. Herrero, A. Blanchet, V. Laquerbe, and O. Pascal, "Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in vacuum arc thruster inside a metallic vacuum chamber", *Physics of Plasmas*, vol. 29, no. 12, p. 123501, Dec. 2022.

[3] F. Réot, L. Liard, F. Gaboriau, V. Mazières, and O. Pascal, "Spectral dependency of pulsed GHz electromagnetic emission from Hall thrusters on discharge current oscillations", *Physics of Plasmas*, vol. 32, no. 2, p. 023509, Feb. 2025.

[4] N. de Mejanès, R. Pascaud, V. Mazières, A. Rossi, V. Laquerbe, L. Garrigues, and O. Pascal, "Simulation of the microwave propagation through the plume of a Hall thruster integrated on small spacecraft", *Journal of Applied Physics*, vol. 131, no. 24, p. 243303, Jun. 2022.

[5] A. Reis, F. Sarrazin, E. Richalot, S. Méric, J. Sol, P. Pouliguen, and P. Besnier, "Radar cross section pattern measurements in a mode-stirred reverberation chamber: Theory and experiments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 9, pp. 5942-5952, Sep. 2021.

[6] O. Pascal, R. Pascaud, N. de Mejanès, V. Laquerbe, C. Cailhol, and L. Garrigues, "Mimicking electric thruster plumes on earth to measure the radiation patterns of CubeSat antennas", 2025 ESA Workshop on Aerospace EMC, Seville (Spain), May 2025.

[7] X. Wei, X. Han, H. Xu, M. Lin, Y. Chang, and X. Wu, "Active control of electromagnetic attenuation characteristics of planar inductively coupled plasma", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 49, no. 10, pp. 3070-3077, Oct. 2021.