Titre :

Analyse des modes de résonance électromagnétique d'une chambre à vide en présence d'un propulseur à courant de Hall

Mots clés : Cavité microonde, propulseur ionique, propulseur électrique spatial, interaction microonde - plasma, chambre réverbérante

Contexte général :

Dans le contexte actuel du "New Space", de nombreux défis scientifiques et techniques doivent être relevés pour répondre aux problèmes posés par la miniaturisation des satellites [1]. Un de ces défis porte sur l'évaluation de la compatibilité électromagnétique (CEM) entre les dispositifs du satellite et, en particulier, entre la plume du propulseur et les autres dispositifs. Deux sources de perturbations peuvent être identifiées [2] : le rayonnement propre de la plume qui agit comme une source de bruit pour les composants du propulseur [3] et la modification du canal de communication par la présence de cette plume [4]. La difficulté à évaluer ces effets provient de la nécessité d'utiliser une chambre à vide pour le fonctionnement du propulseur au sol. En effet, la présence de cette chambre à vide (souvent métallique pour des raisons mécaniques) impacte sévèrement le comportement électromagnétique des ondes à l'intérieur. Sa présence empêche donc d'obtenir des mesures qui seraient directement représentatives du comportement de la plume plasma du propulseur dans l'espace. Il existe ainsi actuellement un fort besoin à développer des méthodes permettant de caractériser efficacement le comportement électromagnétique des propulseurs.

En plus d'être essentielle pour la compatibilité électromagnétique, une caractérisation précise du rayonnement propre de la plume peut conduire au développement de propulseurs plus efficaces et fiables (miniatures ou non). En effet, dans la littérature peu abondante sur les mesures de rayonnement propre des propulseurs électriques dans les installations de test dédiées (installations très couteuses et rares, il en existe seulement quatre dans le monde), du rayonnement au GHz a été observé, alors que son origine physique reste à l'heure actuelle inconnue. Ainsi, la caractérisation de ce rayonnement propre au GHz sera réellement utile pour appréhender les mécanismes physiques en jeu dans les propulseurs électriques.

Contexte local :

Ce stage fait partie du projet VEEPER ("Vers une caractérisation des Effets Electromagnetiques des Propulseurs spatiaux en Environnement Réverbérant") lancé en novembre 2022 à l'ISAE-SUPAERO en collaboration avec le laboratoire LAPLACE (financé par la DGA/AID). Ce projet s'inscrit dans le contexte actuel autour de l'exploration spatiale et s'intéresse au développement de méthodes innovantes pour la caractérisation des effets électromagnétiques des propulseurs. Il a été lancé suite à des investigations préliminaires réalisées au laboratoire LAPLACE en collaboration avec l'ISAE-SUPAERO et le CNES sur un propulseur à courant de Hall et un "vacuum arc thruster". Ces résultats encourageants ont montré la possibilité de caractériser le comportement du rayonnement propre de ces

propulseurs sur une large bande de fréquence (kHz−GHz) en environnement réverbérant [3].

Sujet du stage :

Dans le cadre d'une thèse se déroulant actuellement à l'ISAE-SUPAERO et au laboratoire LAPLACE (début de la thèse : septembre 2023), une méthode numérique permettant de comprendre l'influence de la présence du plasma du propulseur plasma sur le comportement électromagnétique de la chambre à vide en régime sous-modé (basse fréquence) a été mise en place. Le comportement électromagnétique de la plume plasma du propulseur est prise en compte par sa permittivité équivalente, calculée à partir de la densité électronique. Cette dernière est obtenue avec un code de simulation plasma nommé JET2D. Ensuite, les méthodes de "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" [5] donnent un cadre sur lequel s'appuyer pour interpréter les résultats.

Les plumes plasma des différents types de propulseurs spatiaux sont des plasmas "complexes" (inhomogènes, instationnaires, non-réciproques pour certains...) ce qui rend difficile l'évaluation des limites de la méthode. L'objectif de ce stage est d'analyser l'influence de la présence du plasma du propulseur sur le comportement électromagnétique de la chambre à vide pour différents points de fonctionnement du propulseur (différentes puissances) et ainsi d'évaluer les limites de la méthode numérique mise en place. Différentes chambres à vides pourront aussi être modélisées.

En complément des simulations, le stagiaire pourra participer à des campagnes de mesures sur le propulseur à courant de Hall du laboratoire LAPLACE afin de comparer les résulats expérimentaux aux résultats numériques.

Déroulement du stage :

Afin de valider la méthode mise en place et d'évaluer ses limites pour différents plasmas de propulseur et différentes cavités, le stage se déroulera en suivant les étapes suivantes :

1. **Étude bibliographique** et prise en main de la méthode mise en place.
   → Identifier des limites potentielles (densité critique, volume du plasma...).
2. **Étude paramétrique en simulation** (HFSS) d'une cavité avec un plasma (représentatif d'un plume de propulseur) en son sein.
   + **Développements analytiques** associés.
   → Évaluer les limites de la méthode avec un plasma complexe.
3. **Mesures expérimentales** sur le propulseur ID-HALL du laboratoire LAPLACE pour différents points de fonctionnement.
   → Comparer résultats numériques et expérimentaux (en fonction de la disponibilité du propulseur).
4. **Rédaction** du rapport de stage.
   → Publier les résultats dans une revue scientifique (en fonction des résultats obtenus).

Ainsi, ce stage permettra au stagiaire d'acquérir des compétences et des connaissances théoriques, en simulation, et expérimentales à l'intersection de deux domaines de la physique : l'électromagnétisme et les plasmas.

Profil recherché :

Un(e) candidat(e) issu(e) d'une formation master/école d'ingénieur en microonde et/ou physique des plasmas et plus précisément intéressé(e) par les interactions microonde-plasma

et les milieux de propagation complexes est recherché(e).

Cadre de travail, rémunération :

Le stage, d'une durée de 6 mois, se déroulera principalement au sein du département DEOS de l'ISAE-SUPAERO, à Toulouse. En plus de son encadrement coté ISAE, le stagiaire bénéficiera du soutien des différents acteurs des groupes GRE et GREPHE du laboratoire LAPLACE. La durée hebdomadaire de travail est de 35h. Le stage donnera lieu à une indemnité d'environ 540 Euros par mois.

Contact :

Célia Bouyssou : `Celia.BOUYSSOU@isae-supaero.fr`
Valentin Mazières : `valentin.mazieres@isae-supaero.fr`

Références :

[1] I. et al. Levchenko. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites : From proximate targets to furthermost frontiers. *Applied Physics Reviews*, 5(1) :011104, 02 2018.

[2] K. Holste, P. Dietz, S. Scharmann, K. Keil, T. Henning, D. Zschätzsch, M. Reitemeyer, B. Nauschütt, F. Kiefer, F. Kunze, J. Zorn, C. Heiliger, N. Joshi, U. Probst, R. Thüringer, C. Volkmar, D. Packan, S. Peterschmitt, K. T. Brinkmann, H.-G. Zaunick, M. H. Thoma, M. Kretschmer, H. J. Leiter, S. Schippers, K. Hannemann, and P. J. Klar. Ion thrusters for electric propulsion : Scientific issues developing a niche technology into a game changer. *Review of Scientific Instruments*, 91(6) :061101, 06 2020.

[3] 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*, 29(7) :072107, 07 2022.

[4] N. de Mejanes, 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*, 131(24) :243303, 06 2022.

[5] Bart Platier, Tim Staps, Peter Koelman, Marc van der Schans, Job Beckers, and Wilbert IJzerman. Probing collisional plasmas with mcrs : Opportunities and challenges. *Applied Sciences*, 10(12), 2020.