

Titre :

Développement d'une méthode innovante de caractérisation microonde des plumes de propulseurs électriques spatiaux (propulseurs plasmas)

Mots clés : Cavity microonde, propulseur plasma, 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 du panache 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 coûteuses 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 Electromagnétiques des Propulseurs spatiaux en Environnement Réverbérant") lancé en novembre 2022 à l'ISAE-SUPAERO en collaboration avec le laboratoire LAPLACE et le CNES (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 :

Afin de développer des méthodes innovantes de caractérisation du rayonnement des propulseurs en environnement réverbérant, la première étape, sur laquelle ce stage se focalise, consiste à comprendre l'influence de la présence du plasma du propulseur sur le comportement électromagnétique de la chambre à vide.

Les plumes plasma des différents types de propulseurs spatiaux sont des plasmas "complexes" (inhomogènes, instationnaires, non-réciproques pour certains...). L'objectif de ce stage est le développement d'une méthode de caractérisation microonde de ces plumes plasma en s'appuyant sur les méthodes de "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" [5]. Ces méthodes permettent d'extraire certaines propriétés d'un matériau présent dans une cavité réverbérante. Cela est possible en comparant le comportement des modes de résonances (fréquence de résonance, largeur spectrale) avec et sans le matériau. Ces méthodes ont été appliquées sur différents types de matériaux (plasma ou autre) possédant différentes propriétés : inhomogène (voir [6]), instationnaire (voir [5]), conducteur (voir [7]) / diélectrique (voir [6])...

L'objectif principal de ce stage consiste à développer une méthode de "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" adaptée à la caractérisation des plasmas "complexes" des propulseurs. L'intérêt d'une telle méthode est double. D'un côté cela permet de caractériser de façon non-intrusive les plumes des propulseurs. D'un autre côté cela permet de prévoir l'influence de la présence d'une plume sur le comportement électromagnétique d'une chambre à vide.

Déroulement du stage :

Afin de développer une telle méthode, un dispositif expérimental dédié sera mis en place par le stagiaire. Il consistera en une cavité réverbérante dans laquelle sera placée une enceinte sous vide contenant un plasma représentatif des plumes de propulseurs. Le stage se déroulera en suivant les étapes suivantes :

1. **Etude bibliographique** sur les méthodes "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" et plus généralement sur les méthodes d'imagerie en milieu complexe, ainsi que sur les plumes plasma des propulseurs électriques.
→ Identification de la méthode la plus adaptée.
2. **Etude paramétrique en simulation** (HFSS) d'une cavité avec un plasma en son sein.
+ **Développements analytiques** associés.
→ Dimensionnement du dispositif expérimental (cavité + enceinte plasma en verre).
3. **Montage d'un banc expérimental dédié** comprenant une cavité et une enceinte plasma en verre. L'analyse du comportement électromagnétique de la cavité sera réalisé à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA).
→ Mise en place de la méthode identifiée en étape 1 (+ comparaison simulation / expérience).
4. **Mise en place de la méthode sur un propulseur** à courant de Hall au laboratoire LAPLACE [3] (en fonction de l'avancée du stage et 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. De plus, en fonction de l'avancée des travaux, les résultats du stage pourront être valorisés par une publication dans une revue scientifique.

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).

Un sujet de thèse est également en cours de réflexion pour une possible suite à ce stage.

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 d'Andréa Cozza de Centrale Supelec ainsi que 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 :

Valentin Mazières : valentin.mazieres@isae-supaeero.fr

Romain Pascaud : romain.pascaud@isae-supaeero.fr

Références :

- [1] Levchenko, I. et al. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites : From proximate targets to furthestmost frontiers. *Applied Physics Reviews*, 5(1) :011104, March 2018.
- [2] Holste, K. et al. Ion thrusters for electric propulsion : Scientific issues developing a niche technology into a game changer. *Review of Scientific Instruments*, 91(6) :061101, June 2020.
- [3] Mazières, V. et al. Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in Hall thruster inside a metallic vacuum chamber. *Physics of Plasmas*, 29(7) :072107, July 2022. Publisher : American Institute of Physics.
- [4] de Mejanes, N. et al. Simulation of the microwave propagation through the plume of a Hall thruster integrated on small spacecraft. *Journal of Applied Physics*, 131(24) :243303, June 2022. Publisher : American Institute of Physics.
- [5] Platier, B. et al. Probing Collisional Plasmas with MCRS : Opportunities and Challenges. *Applied Sciences*, 10(12) :4331, January 2020. Number : 12 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [6] Staps, T. J. A. et al. Numerical profile correction of microwave cavity resonance spectroscopy measurements of the electron density in low-pressure discharges. *Review of Scientific Instruments*, 92(9) :093504, September 2021. Publisher : American Institute of Physics.
- [7] Donovan, S. et al. Microwave cavity perturbation technique : Part II : Experimental scheme. *Int J Infrared Milli Waves*, 14(12) :2459–2487, December 1993.

Title :

Development of an innovative method of microwave characterization of space electric thrusters (plasma thrusters)

Keywords: Microwave cavity, plasma thruster, microwave-plasma interaction, reverberation chamber

General context:

In the current context of "New Space", many scientific and technical challenges must be met to address the problems posed by the miniaturization of satellites [1]. One of these challenges concerns the evaluation of electromagnetic compatibility (EMC) between the satellite devices and, in particular, between the thruster plume and other devices. Two sources of disturbance can be identified: the self-emission of the plume which acts as a noise source for the thruster components [2] and the modification of the communication channel by the presence of this plume [3]. The difficulty to evaluate these effects comes from the necessity to use a vacuum chamber for the operation of the ground thruster. Indeed, the presence of this vacuum chamber (often metallic for mechanical reasons) severely impacts the electromagnetic behavior of the waves inside. Its presence thus prevents to obtain measurements which would be directly representative of the behavior of the thruster plume in space. There is thus currently a strong need to develop methods to effectively characterize the electromagnetic behavior of thrusters.

In addition to being essential for electromagnetic compatibility, an accurate characterization of the plume's own radiation can lead to the development of more efficient and reliable thrusters (miniature or not). Indeed, in the scarce literature on the measurement of the self-radiation of electric thrusters in dedicated test facilities (very expensive and rare facilities, there are only four in the world), radiation at GHz has been observed, while its physical origin remains unknown at the present time. Thus, the characterization of this GHz radiation will be really useful to understand the physical mechanisms at stake in electric thrusters.

Local context:

This internship is part of the VEEPER project ("Vers une caractérisation des Effets Electromagnetiques des Propulseurs spatiaux en Environnement Réverbérant") launched in November 2022 at ISAE-SUPAERO in collaboration with the LAPLACE laboratory and the CNES (funded by the DGA/AID). This project is part of the current context around space exploration and focuses on the development of innovative methods for the characterization of electromagnetic effects of thrusters. It was launched following preliminary investigations carried out at the LAPLACE laboratory in collaboration with ISAE-SUPAERO and CNES on a Hall current thruster and a vacuum arc thruster. These encouraging results have shown the possibility to characterize the behavior of the natural radiation of these thrusters on a wide frequency band (kHz–GHz) in a reverberant environment [2].

Internship proposal:

In order to develop innovative methods of characterization of the radiation of thrusters in a reverberant environment, the first step, on which this internship focuses, is to understand the influence of the presence of the thruster plasma on the electromagnetic behavior of the vacuum chamber.

The plasma plumes of the various types of space thrusters are "complex" plasmas (inhomogeneous, instationary, non-reciprocal for some...). The objective of this internship is the development of a method of microwave characterization of these plasma plumes based on the methods of "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy". These methods allow to extract some properties of a material present in a reverberating cavity. This is possible by comparing the behavior of the resonance modes (resonance frequency, spectral width) with and without the material. These methods have been applied to different types of materials (plasma or other) with different properties: inhomogeneous (see [5]), instationary (see [4]), conductive (see [6]) / dielectric (see [5])...

The main objective of this internship is to develop a method of "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" adapted to the characterization of "complex" plasmas of thrusters. The interest of such a method is double. On the one hand it allows to characterize in a non-intrusive way the plumes of the thrusters. On the other hand it allows to predict the influence of the presence of a plume on the electromagnetic behavior of a vacuum chamber.

Unfolding of the internship:

In order to develop such a method, a dedicated experimental device will be set up by the trainee. It will consist of a reverberation cavity in which will be placed a vacuum chamber containing a plasma representative of the plumes of thrusters. The internship will take place in the following steps:

1. **Bibliographical study** on "Microwave Cavity Resonance Spectroscopy" methods and more generally on imaging methods in complex media, as well as on plasma plumes for electric thrusters.
→ Identification of the most suitable method.
2. **Parametric study in simulation** (HFSS) of a cavity with a plasma inside. + Associated **analytical developments**.
→ Dimensioning of the experimental device (cavity + glass plasma chamber).
3. **Set up of a dedicated experimental bench** including a cavity and a glass plasma chamber. The analysis of the electromagnetic behavior of the cavity will be performed with a vector network analyzer (VNA).
→ Implementation of the method identified in step 1 (+ comparison simulation / experiment).
4. **Implementation of the method on a Hall current thruster** at LAPLACE laboratory [2] (depending on the progress of the internship and the results obtained).

Thus, this internship will allow the trainee to acquire theoretical, simulation, and experimental skills and knowledge at the intersection of two fields of physics: electromagnetism and plasmas. Moreover, depending on the progress of the work, the results of the internship could be valorized by a publication in a scientific journal.

Profile required:

A candidate with a master/engineering school background in microwave and/or plasma physics and more precisely interested in microwave-plasma interactions and complex propagating media is sought.

A thesis subject is also under consideration for a possible follow-up to this internship.

Working environment, remuneration:

The internship will last 6 months and will mainly take place in the DEOS department of ISAE-SUPAERO, in Toulouse. In addition to his supervision at ISAE, the trainee will benefit from the support of Andréa Cozza from Centrale Supélec as well as from the different actors of the GRE and GREPHE groups of the LAPLACE laboratory. The weekly working time is 35 hours. The internship will give rise to an allowance of about 540 Euros per month.

Contact:

Valentin Mazières : valentin.mazieres@isae-supero.fr

Romain Pascaud : romain.pascaud@isae-supero.fr

References:

- [1] Levchenko, I. et al. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers. *Applied Physics Reviews*, 5(1):011104, March 2018.
- [2] Mazières, V. et al. Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in Hall thruster inside a metallic vacuum chamber. *Physics of Plasmas*, 29(7):072107, July 2022. Publisher: American Institute of Physics.
- [3] de Mejanes, N. et al. Simulation of the microwave propagation through the plume of a Hall thruster integrated on small spacecraft. *Journal of Applied Physics*, 131(24):243303, June 2022. Publisher: American Institute of Physics.
- [4] Platier, B. et al. Probing Collisional Plasmas with MCRS: Opportunities and Challenges. *Applied Sciences*, 10(12):4331, January 2020. Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [5] Staps, T. J. A. et al. Numerical profile correction of microwave cavity resonance spectroscopy measurements of the electron density in low-pressure discharges. *Review of Scientific Instruments*, 92(9):093504, September 2021. Publisher: American Institute of Physics.
- [6] Donovan, S. et al. Microwave cavity perturbation technique: Part II: Experimental scheme. *Int J Infrared Milli Waves*, 14(12):2459–2487, December 1993.