



**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE INSTRUMENTATION ENVIRONNEMENT ESPACE  
DPHY**

**Soutenance de thèse de Federico BONI  
PHYSIQUE**

**Jeudi 24 novembre 2022 à 10h00**

***Développement d'un diagnostic plasma micro-onde appliqué aux  
systèmes de propulsion électrique***

***Lieu : Salle Jacques Dorey, bâtiment J3.01.16  
ONERA - The French Aerospace Lab - Centre de Palaiseau,  
8 Chemin de la Hunière, 91123 PALAISEAU / Visioconférence\****

Composition du jury :

- ✚ Ralf Peter Brinkmann, Rapporteur, Prof. Dr., Ruhr-Universität Bochum
- ✚ Sedina Tsikata, Rapporteur, Chargée de recherche, CNRS-ICARE, Université d'Orléans
- ✚ Jean-Paul Booth, Examineur, Directeur de recherche, CNRS-LPP, Institut Polytechnique de Paris
- ✚ Gabi-Daniel Stancu, Examineur, Professeur des Universités, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay
- ✚ Trevor Lafleur, Examineur, Principal Engineer, ThrustMe, Australie
- ✚ Tiberiu Minea, Directeur de thèse, Professeur des Universités, LPGP, Université Paris-Saclay
- ✚ Julien Jarrige, Co-encadrant (invité), Ingénieur de recherche, DPHY/CSE, ONERA
- ✚ Victor Désangles, Co-encadrant (invité), Ingénieur de recherche, DPHY/FPA, ONERA

Résumé :

Dans le contexte de l'industrie du New Space, un nombre croissant de satellites de petite taille embarque des systèmes de propulsion électrique (EP) miniaturisés. Ces propulseurs permettent une réduction de la masse au lancement, une augmentation de l'impulsion totale des missions et un positionnement précis des satellites. Cependant, certaines technologies sont relativement nouvelles et de nouvelles études sont nécessaires afin d'améliorer la compréhension de leurs principes physiques de fonctionnement ainsi que leurs performances. La première partie de ce travail consiste à développer une sonde résonante micro-onde de type curling probe (CP), un diagnostic permettant la mesure de la densité électronique dans les plasmas magnétisés à basse pression. Les caractéristiques de cette sonde la rendent pertinente pour l'étude des propulseurs électriques. C'est une sonde compacte, ne collectant pas de courant du plasma, et facile à mettre en œuvre. La sonde CP est étudiée à l'aide de simulations numériques et de mesures expérimentales. La fréquence de résonance de la sonde est exprimée en fonction de ses paramètres géométriques. Cette relation permet de résoudre la question de la nature du résonateur (quart d'onde ou demi-onde) qui restait ouverte dans la littérature. Le développement d'une méthode de calibration absolue, utilisant des étalons solides de permittivité diélectrique connue, permet de calculer précisément la valeur de la densité électronique d'un plasma. La fréquence de travail de la sonde détermine la précision de la mesure, la sensibilité, et la densité maximum mesurable. L'utilisation de la seconde harmonique permet d'effectuer des mesures sur une large gamme de densité, tout en gardant une très bonne précision aux faibles valeurs. Une méthode de correction prenant en compte les effets de gaine se formant à la surface de la sonde est développée. La validité des méthodes de calibration et de correction des effets de gaine est évaluée expérimentalement dans le plasma produit par un propulseur à résonance cyclotronique électronique (ECR) et dans une source plasma à couplage inductif. Les densités mesurées par la sonde CP sont en bon accord avec d'autres diagnostics bien connus dans la littérature (sondes hairpin et de Langmuir). La seconde partie propose la caractérisation d'un propulseur ECR à l'aide

de la sonde CP ainsi que d'autres diagnostics : balance de poussée, fluorescence induite par laser et sondes électrostatiques. La mesure directe des poussées - totale, magnétique et thermique - permet d'étudier les mécanismes de production de poussée. La poussée magnétique représente la contribution principale à la poussée totale (au-delà de 70 %) quand l'efficacité du propulseur est élevée. La majeure partie de la poussée magnétique est produite par le volume du plasma dans la source du propulseur. Une combinaison de différents diagnostics permet d'estimer l'anisotropie de la température des électrons. Dans la source du propulseur, la composante perpendiculaire de la température des électrons est jusqu'à six fois supérieure à la composante parallèle. L'expansion du plasma dans la tuyère magnétique est comparée avec des modèles existants. Le long de l'axe de symétrie du propulseur, le profil de la densité électronique peut être approché par un modèle isotherme, tandis que la densité décroît plus vite en s'éloignant de l'axe. Le refroidissement observé des électrons dans le panache peut être décrit par une expansion polytropique. Enfin, une méthode permettant des mesures résolues temporellement avec la sonde CP est développée. Des mesures résolues à 10  $\mu$ s dans le panache du propulseur ECR permettent d'identifier des oscillations de la densité électronique à quelques dizaines de kilohertz.

Mots clés : diagnostic plasma, sonde résonante micro-onde, densité électronique, propulsion électrique, propulseur plasma ECR, tuyère magnétique.

\*Contact lien visio-conférence : [federicoboni.fb@gmail.com](mailto:federicoboni.fb@gmail.com) et [federico.boni@onera.fr](mailto:federico.boni@onera.fr)