

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Vers une mesure embarquable de la densité électronique dans les plasmas de rentrée hypersonique : adaptation du diagnostic curling probe**

Référence : **PHY-DPHY-2026-06**  
*(à rappeler dans toute correspondance)*

Début de la thèse :

Date limite de candidature :

**Mots clés**

**diagnostic plasma, curling probe, densité électronique, plasma magnétisé et collisionnel, rentrée atmosphérique**

**Profil et compétences recherchées**

Master en physique des plasmas ou physique appliquée, école d'ingénieur (aérospatial). Connaissances en : physique des plasmas ou électromagnétismes, mécanique des fluides, méthodes numériques / simulations.

Première expérience dans un laboratoire de recherche est un plus.

**Présentation du projet doctoral, contexte et objectif**

Lors de la rentrée hypersonique d'un véhicule dans l'atmosphère, la compression et le réchauffement extrêmes de l'air génèrent une couche plasma qui pose deux enjeux majeurs. D'une part, ce plasma peut perturber les communications : lorsque la densité d'électrons dépasse une valeur critique, les ondes électromagnétiques des systèmes radio embarqués sont fortement atténuées, entraînant une perte de liaison avec le sol pendant les phases critiques, pouvant durer jusqu'à plusieurs minutes (ex. missions RAMC [1]). D'autre part, ce gaz ionisé conducteur offre la possibilité d'un contrôle actif par effet magnétohydrodynamique (MHD). En effet, l'application d'un champ magnétique externe peut générer des forces et des couples stabilisants ou guidant le véhicule, déplacer le choc afin de réduire les contraintes thermiques et atténuer le blackout en diminuant localement la densité électronique. Ceci est notamment étudié à l'ONERA dans le projet AMHYRA. Dans ces deux contextes, la mesure précise, robuste et résolue localement et temporellement de la densité électronique constitue un verrou scientifique et technologique majeur.

Ce projet doctoral propose d'adapter, pour les conditions de rentrée atmosphérique, le diagnostic « curling probe » (CP), une sonde résonante micro-onde compacte et faiblement intrusif. Comparée aux diagnostics actuellement employés (sondes de Langmuir, interférométrie micro-onde), la CP présente plusieurs avantages : elle mesure la densité électronique à travers une paroi diélectrique (protection du capteur contre les flux thermiques élevés), sur une plage de 3 à 4 ordres de grandeur, avec une bonne résolution spatiale ( $< 1$  cm) et temporelle (jusqu'à 5  $\mu$ s). Développée à l'ONERA et déjà validée dans les applications plasma à basse pression (densités d'électrons  $< 10^{11}$  cm $^{-3}$ , températures d'écoulement  $< 600$  K, champs magnétiques  $< 0,05$  T) [2], le diagnostic présente un intérêt certain pour d'autres applications spatiales de l'ONERA (mesures sur panneaux solaires, caractérisation du propulseur à tuyère magnétique ECRA), de l'industrie (Safran, mesures dans les propulseurs à effet de Hall) et du DLR (caractérisation du panache d'un propulseur électrique). Dans le cas de la rentrée atmosphérique, les propriétés du plasma diffèrent radicalement des conditions pour lesquelles a été développée la CP : les densités atteignent jusqu'à  $10^{14}$  cm $^{-3}$ , les fréquences de collision peuvent aller jusqu'au térahertz, les champs magnétiques sont de l'ordre du tesla et les températures d'écoulement dépassent plusieurs milliers de kelvins. La CP doit donc être adaptée à ces nouveaux régimes. Des mesures récentes réalisées en collaboration avec le CNRS ICARE (dans le cadre du projet AMHYRA) ont démontré la faisabilité de la mesure par CP aux conditions de rentrée [3], comme illustré en Fig. 1.

Le projet doctoral s'articule autour de quatre défis principaux : (i) l'élaboration d'un modèle de mesure valable en régime fortement collisionnel et magnétisé (pour les applications MHD), (ii) la conception d'une sonde embarquable et non intrusif, adaptée aux essais en soufflerie et, à terme, aux essais en vol, (iii) la validation expérimentale dans des environnements représentatifs des plasmas de rentrée (notamment la soufflerie F4), et (iv) la caractérisation de la distribution spatiale 2D du profil de densité électronique normal à la paroi pendant la rentrée.

Les retombées scientifiques attendues concernent principalement une meilleure compréhension des plasmas de rentrée atmosphérique et de la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux fortement collisionnels et magnétisés. Sur le plan des compétences, ce projet doctoral favorisera le développement d'expertises à l'interface de plusieurs domaines, l'aérodynamique hypersonique, la physique des plasmas collisionnels et magnétisés, ainsi que la physique instrumentale, qui constituent des axes stratégiques tant pour la recherche fondamentale que pour les applications industrielles liées aux phénomènes de rentrée atmosphérique.

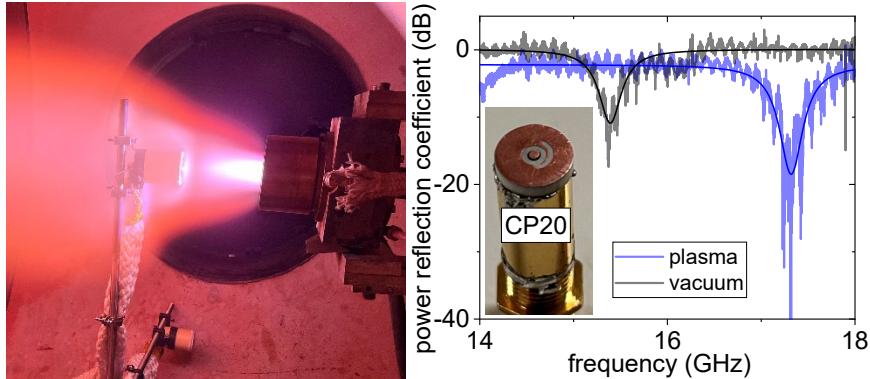


Figure 1. Gauche : Utilisation d'une sonde curling probe dans la soufflerie supersonique PHEDRA du laboratoire ICARE simulant les plasmas rencontrés durant les phases de rentrée atmosphérique. Droite : Exemple de spectre de la sonde mesuré durant les essais en soufflerie et permettant de remonter à la densité d'électrons.

- [1] W. L. Grantham, "Flight results of a 25000-foot-per-second reentry experiment using microwave reflectometers to measure plasma electron density and standoff distance," 1970. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710004000>
- [2] F. Boni, "Development of a microwave plasma diagnostic applied to electric propulsion systems," Université Paris-Saclay, 2022.
- [3] F. Boni, B. Khiar, and V. Lago, "A Novel Microwave Resonant Probe Diagnostic to Perform Real-Time and In-Situ Electron Density Measurements in Atmospheric Re-Entry Plasmas," in *4th International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology*, Tours, 2025, p. HiSST-2025-342.

#### Collaborations envisagées CNRS ICARE (Orléans, Viviana Lago)

##### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact** : Federico Boni

Tél. : 01 80 38 64 80 Email : [federico.boni@onera.fr](mailto:federico.boni@onera.fr)

##### Directeur de thèse

Nom : **Tiberiu MINEA**

Laboratoire :

Tél. :

Email :

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>