

Offre de thèse

Intitulé : Développement d'un cadre unifié pour l'inversion de spectres d'émission optique dans les plasmas hors équilibre, combinant modèles collisionnels-radiatifs, expériences et inférence Bayésienne.

Présentation du sujet

➤ **Contexte**

L'équipe GREPHE (<https://www.laplace.univ-tlse.fr/grephe/>) a développé depuis de nombreuses années une expertise en modélisation de plasmas hors-équilibre couvrant une large gamme de pression mais également une diversité de sources [1-2]. L'objectif principal de ces développements numériques est d'étudier les mécanismes physiques en jeu dans des systèmes afin d'identifier des ruptures technologiques. Pour valider ces modèles et apporter des éléments d'analyse complémentaires, l'équipe a également développé une expertise autour de la conception d'expériences à caractère fondamental sur lesquelles sont mis en places des diagnostics simples, aussi bien électriques qu'optiques [3-4].

Parmi les grandeurs macroscopiques d'intérêt, nous retrouvons la densité et la température électroniques et plus globalement la fonction de distribution en énergie des électrons. Dans certaines situations, des mesures par sonde de Langmuir sont exploitables mais dans d'autres types de plasmas que nous étudions à plus forte pression, en présence de champs magnétiques intenses ou encore pour des phénomènes transitoires rapides, cette méthode est limitée. Pour certains cas très précis, nous apportons une réponse par l'utilisation de la spectroscopie d'émission mais qui reste elle aussi très limitée, d'une part à cause des conditions très fortement hors-équilibre que nous rencontrons et d'autre part du fait du caractère peu quantitatif. Pour autant, cette dernière méthode, très ancienne et répandue dans la communauté des plasmas trouve un regain d'intérêt ces dernières années avec de nouvelles approches plus robustes et rendant les interprétations des résultats plus fiables [5-7].

➤ **Objectif**

Cette thèse vise ainsi à développer un cadre unifié pour l'inversion de spectres d'émission dans les plasmas hors équilibre, combinant modèles collisionnels-radiatifs, expériences et inférence Bayésienne. L'objectif est de reconstruire les grandeurs macroscopiques du plasma (température électronique, densité, distribution énergétique) avec une quantification rigoureuse des incertitudes. Selon l'avancée des travaux, une composante spatiale sera abordée afin de caractériser les profils radiaux des plasmas étudiés.

➤ **Programme de la thèse**

Première année

Dans un premier temps, après une période de contextualisation et d'appropriation des méthodes envisagées, le travail consistera à poser précisément le problème selon les trois approches : expérimentale, modélisation, inverse.

D'un point de vue expérimental, il s'agira de développer une décharge de type colonne positive DC dans l'argon qui permettra d'étudier un problème parfaitement maîtrisé, tant du point de vue théorique que numérique. Ce développement s'accompagnera de la mise place du diagnostic spectroscopique.

La partie modélisation consistera à développer un premier modèle collisionnel radiatif (CR) simple dans l'argon pour des conditions de décharge appropriées ou notamment la fonction de distribution est de type Maxwellienne. Cette simplification permettra de réaliser une première analyse de sensibilité sur les paramètres pertinents, en particulier sur les sections efficaces.

La dernière partie sera consacrée au développement de l'approche Bayésienne pour traiter le problème inverse et déterminer la densité et la température électronique.

Dans l'optique de valider cette approche, d'autres méthodes de diagnostics telle que les sondes de Langmuir ou l'interférométrie micro-onde seront mise en œuvre.

Seconde année

Cette deuxième partie de la thèse sera consacrée à l'extension du modèle CR pour des distributions énergétiques quelconques et la prise en compte d'une chimie plus complexe. L'approche Bayésienne sera étendue aux grandeurs macroscopiques de densité et température électroniques mais également à la fonction de distribution en énergie. Selon les avancées et difficultés rencontrées, une extension du modèle aux propriétés microscopiques des sections efficaces pourra être envisagée.

Troisième année

Selon l'avancée des travaux, cette troisième étape concernera l'extension de l'approche précédente 0D à une approche 1D afin de remonter aux profils spatiaux du plasma. Cela pourra se faire dans un premier temps avec le modèle développé à l'étape 1 combiné à un modèle fluide pour ce qui concerne la partie modélisation ainsi que d'un point de vue expérimental avec une approche Bayésienne pour traiter le problème d'inversion.

➤ **Références**

- [1] Lucas Fuster, Gerjan Hagelaar et al., "Plasma-based microwave power limitation in a printed transmission line: a self-consistent model compared with experimental data", *Plasma Sources Sci. Technol.* 31 (2022) 025009 (11pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac4848>.
- [2] Laurent Garrigues, G. Fubiani, "Tutorial: Modeling of the extraction and acceleration of negative ions from plasma sources using particle-based methods", *Journal of Applied Physics*, 2023, 133 (4), pp.041102, <https://doi.org/10.1063/5.0128759>.
- [3] Vincent Laquerbe et al., "Towards antenna miniaturization at radio frequencies using plasma discharges", *Phys. Plasmas* 26, 033509 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5087070>.
- [4] Q Delavière--Delion, F Gaboriau, G Fubiani, L Garrigues, "Dual-Time-Scale Ion Acceleration Dynamics in Hall Thrusters", *Physical Review Letters*, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1103/1b8f-knmw>
- [5] Seung Whan Chung et al., "Characterization of uncertainties in electron-argon collision cross sections", *Plasma Sources Sci. Technol.* 34 (2025) 025009 (26pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6595/adacd5>.
- [6] S Chouteau et al., "Bayesian analysis of optical emission spectroscopy measurements coupled to a collisional-radiative model: application to lowpressure misty plasmas", <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ae37a2>
- [7] Zoltán Donkó et al., "Self-consistent calculation of the optical emission spectrum of an argon capacitively coupled plasma based on the coupling of particle simulation with a collisional-radiative model", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 57 (2024) 375209 (20pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad4e42>

Informations complémentaires

➤ Type de financement

Bourse ministérielle : 2300 € brut mensuel
Durée du contrat : 36 mois
Date d'embauche prévue : automne 2026
Quotité de travail : Temps complet

➤ École Doctorale de rattachement

GEETS - Génie Electrique Electronique, Télécommunications et Santé : du système au nanosystème n°323

➤ Laboratoire d'accueil

Laboratoire LAPLACE – UMR 5213
Université de Toulouse – Bat 3R1 – 118, route de Narbonne – 31062 Toulouse Cedex 9

➤ Contacts

Directeurs de thèse :

- Thierry CALLEGARI, LAPLACE, Université de Toulouse, thierry.callegari@laplace.univ-tlse.fr
- Gerjan Hagelaar, LAPLACE, CNRS, gerjan.hagelaar@laplace.univ-tlse.fr