

AVIS DE SOUTENANCE

Jean PORTO HERNANDEZ

Astronomie et Astrophysique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

*Simulation Cinétique d'un Plasma Magnétisé dans un Propulseur à Résonance Cyclotron Électronique à Tuyère Magnétique*

Soutenance prévue le **18 octobre 2021 à 14h00**

Lieu : Couloir 24-34, 509 (5ème étage)  
Sorbonne Université 4 Place Jussieu, Paris 75005

**Composition du jury proposé**

M. Andrea CIARDI	Maître de conférences	Sorbonne Université	Directeur de these
M. Laurent MAUNOURY	Ingénieur de recherche	CNRS, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds	Rapporteur du jury
M. Laurent GARRIGUES	Directeur de recherche	Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie – LAPLACE Université de Toulouse, CNRS-UPS-INPT	Rapporteur du jury
Mme Anne BOURDON	Directeur de recherche	Laboratoire de Physique des Plasmas Ecole Polytechnique	Membre du jury
Mme Caterina RICONDA	Professeur	Sorbonne Université	Membre du jury

**Mots-clés :** Propulsion spatiale, Résonance cyclotron, Simulation cinétique, Électromagnétisme, Plasmas froids, Particle-In-Cell,

**Keywords :** Space propulsion, Cyclotron resonance, Kinetic simulation, Electromagnetism, Cold Plasma, Particle-In-Cell,

**Résumé :**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du développement d'un nouveau concept de propulseur plasmique, appelé propulseur ECR (Electron Cyclotron Resonance), qui utilise des ondes électromagnétiques pour chauffer, par résonance cyclotron électronique, un plasma. Ce plasma est ensuite accéléré dans une tuyère magnétique. L'objet de ce travail est de simuler la création et l'expansion du plasma magnétisé. Afin de mieux comprendre l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le plasma, il a été nécessaire de développer une méthode Particle-In-Cell permettant un calcul auto-consistant des champs électromagnétiques. Pour la résolution des équations de Maxwell, une méthode numérique a été développée en se basant sur la méthode CIP (Constrained Interpolation Profile). Cette méthode semi-Lagrangienne est attractive dans ce contexte car elle permet d'utiliser de grands pas de temps lors des simulations des cas 2D plan et 3D tout en ayant une formulation explicite. Cependant, les algorithmes disponibles dans la littérature en 2D cylindrique n'ont pas

cette capacité, étant limités à des nombres CFL  $\leq 1$  (Courant-Friedrichs-Lewy). Par conséquent, nous avons développé une procédure généralisant la méthode CIP pour traiter des CFL  $> 1$  en géométrie 2D axisymétriques. Ces développements ont été intégrés au code électrostatique Particle-In-Cell/Monte-Carlo Module (PIC-MCC) de l'Onera. Ils ont permis d'effectuer des simulations PIC électromagnétiques auto-consistantes du propulseur en géométrie quasi-1D (CFL=2.9) et 2D axisymétrique (CFL=1). Le modèle 1D3V montre en particulier que l'énergie des électrons dans la direction perpendiculaire aux lignes de champ magnétique augmente près de la zone de chauffage et qu'elle pouvait présenter un second maximum dans la tuyère magnétique dû au confinement des électrons à haute énergie. De plus, la zone de chauffage s'étend 6 mm autour de la zone de résonance, ce qui est cohérent avec la valeur prédite par l'élargissement Doppler. Une analyse paramétrique avec ce modèle suggère en particulier que la diffusion des particules chargées vers les parois du propulseur est le mécanisme dominant de perte d'énergie par rapport aux collisions entre ces particules et les particules neutres. Enfin, les premiers résultats en 2D axisymétrique suggèrent qu'il y a une forte concentration d'électrons à haute énergie près de l'antenne du propulseur, en accord avec des observations expérimentales. Les outils développés pendant ce travail continueront à être exploités pour approfondir davantage notre connaissance sur le propulseur. La comparaison avec de futures mesures de densité électronique à l'intérieur du propulseur, une zone peu explorée dans le laboratoire, pourraient servir de validation aux résultats des simulations.

### Summary :

The framework for this work is the development of a new space propulsion technology. The device is based on the cyclotron resonance phenomenon to heat a plasma using microwaves. This work aims at simulating for the first time the magnetized plasma inside an Electron Cyclotron Resonance (ECR) thruster with self-consistent calculations of the electromagnetic fields to gain insight into the thruster's working principles. An electromagnetic solver for Maxwell's equations was developed based on the Constrained Interpolation Profile (CIP) method to simulate the electron-microwave interaction in a quasi-1D (1D3V) model of the thruster. This semi-Lagrangian method enables the use of large time steps in planar 1D to 3D cases while using an explicit formulation. However, the thruster modeling in a 2D cylindrical coordinate system (2D3V) faced the problem that the scheme was still limited by the Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) condition. Therefore, we developed a procedure to overcome this constraint and extend the ability of this method to handle CFL greater than one in 2D axisymmetric domains. A ghost node method was also proposed to deal with boundary conditions such as the singularity on the axis or the perfectly conducting walls. The solvers were integrated into the electrostatic Particle-In-Cell/Monte-Carlo Module (PIC-MCC) code developed at Onera. They allowed the self-consistent electromagnetic full-PIC simulations of the ECR thruster in 1D and 2D axisymmetric. The results provided insight into the mechanisms affecting the plasma, like its heating and confinement, the energy lost by collisions and at the thruster's walls by cross-field diffusion, and the possibility of mode conversion for the microwaves due to its interaction with the plasma. In the 1D3V model, we show that the electron's energy perpendicular to the magnetic field lines increased near the heating zone and has a second unexpected peak in the nozzle due to the confinement of highly energetic electrons and loss at the close end of the thruster of low energy electrons. We carried out a parametric analysis with this model that allowed us to understand better the influence of some of the thruster's parameters on its performance and assess the sensibility of our model to have a more detailed view of the validity of the results. The cross-field diffusion towards the thruster's walls appeared as a dominant mechanism for energy lost over the collisions between the charged particles and the neutral background. The results of this research work will contribute to the efforts of the propulsion community to improve this technology.