

Plasmas électrons–ions en champs électromagnétiques intenses : approche gyrocinétique et modèle à gyromoments

Zoubair TAZAKKATI, CMAP, École Polytechnique - Palaiseau

Teddy PICHARD, CMAP, École Polytechnique - Palaiseau

Josselin MASSOT, CMAP, École Polytechnique - Palaiseau

Marc MASSOT, CMAP, École Polytechnique - Palaiseau

Nous étudions un plasma électrons–ions régi par les équations de Boltzmann–Poisson dans un régime dominé par des champs électriques et magnétiques intenses. Bien que la configuration étudiée demeure générique, elle est fortement inspirée des conditions physiques rencontrées dans les propulseurs à effet Hall.

Une analyse d'échelle révèle que les électrons présentent une dynamique complexe : pour les électrons, ils combinent une dérive $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ avec une gyration cyclotronique rapide autour des lignes de champ magnétique, ce qui conduit à leur piégeage le long de ces lignes. À l'inverse, les ions restent faiblement magnétisés mais sont fortement accélérés par le champ électrique. Ce comportement multi-échelle introduit une raideur numérique significative dans les équations aux dérivées partielles décrivant le système, notamment (mais non exclusivement) en raison du mouvement de gyration électronique très rapide. Pour remédier à cette difficulté, nous proposons une stratégie globale de modélisation et de simulation numérique des électrons, fondée sur un passage à un modèle fluide.

Premièrement, au niveau cinétique, un développement de Hilbert permet de décomposer la fonction de distribution en un équilibre « gyromoyenné » à l'ordre principal (représentant la dynamique moyennée des trajectoires, une fois les oscillations cyclotroniques rapides filtrées) et en corrections oscillatoires d'ordres supérieurs. Cette structure est ensuite exploitée pour dériver un modèle fluide aux moments utilisant une base polynomiale adaptée, distinguant les contributions gyromoyennées et les contributions oscillatoires. Le modèle de « gyromoments » qui en résulte capture les caractéristiques anisotropes du régime fortement magnétisé, tout en filtrant les échelles de temps les plus rapides responsables de la raideur numérique.

Les ions sont également décrits à l'aide d'un modèle fluide, menant à une description électrons–ions entièrement fluide. Contrairement aux électrons, le modèle fluide ionique suit une formulation standard de type Euler, leur faible magnétisation ne nécessitant pas de "gyroréduction".

Enfin, nous présentons des expériences numériques illustrant la dynamique multi-échelle du plasma et la pertinence du modèle réduit proposé dans des régimes où les simulations cinétiques directes présentent un coût de calcul prohibitif.

Références

- [1] Z. Tazakkati, A.A Laguna, J. Massot, M. Massot, T. Pichard, *A gyromoment approach for electron dynamics in low-temperature $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ plasmas of Hall thrusters*. submitted, 2025.
- [2] Z. Tazakkati, T. Pichard, J. Massot, M. Massot, *Toward Efficient Simulations of Highly Magnetized Plasma*. submitted, 2025.