

Évolution temporelle des fonctions de distribution des ions sous l'action des instabilités du plasma : application au propulseur de Hall

Q. Delavière--Delion¹, F. Gaboriau², G. Fubiani² & L. Garrigues²

¹ ONERA - DPHY, 6 Chemin de la Vauve aux Granges, Palaiseau

² LAPLACE - Laboratoire PLASMA et Conversion d'Énergie, Université Paul Sabatier, CNRS, INP, Toulouse

mél: quentin.delaviere@onera.fr

Les plasmas magnétisés, comme ceux rencontrés dans les propulseurs de Hall, constituent un environnement particulièrement favorable à l'apparition d'un large éventail d'instabilités [1]. Parmi celles-ci, les oscillations de temps de transit des ions (ITTO) sont considérées comme ayant un impact majeur sur le comportement des ions. Des travaux antérieurs [2,3] ont montré que les ITTO se manifestent par la propagation d'ondes électrostatiques transversales au champ magnétique et parallèles au champ électrique. Ce mécanisme crée une modulation spatiale et temporelle du potentiel électrique dans le plasma, entraînant une accélération différenciée des ions : certains, en phase avec l'onde, "surfent" sur sa crête et acquièrent ainsi une énergie cinétique supérieure, tandis que d'autres, moins bien synchronisés, subissent une accélération moindre. Toutefois, leur étude, et plus spécifiquement le suivi temporel des fonctions de distribution en énergie des ions (FDI), reste complexe en raison de leur nature irrégulière et intermittente. En effet, dans les plasmas des propulseurs de Hall, les ITTO se superposent à d'autres instabilités ayant des périodes temporelles plus longues, ce qui rend leur isolement et leur caractérisation particulièrement difficiles.

Pour contourner cette difficulté, une approche originale a été développée, basée sur l'appariement des motifs d'oscillations les plus similaires. En combinant les mesures du courant de décharge avec celles obtenues par un Retarding Potential Analyser (RPA), il a été possible de révéler que dans certains cas l'évolution temporelle des FDI s'opère selon deux échelles de temps distinctes. La première correspond au mode de respiration (breathing mode), tandis que la seconde est associée aux ITTO. Cette analyse a aussi permis de mettre en évidence un phénomène d'accélération des ions se produisant spécifiquement sur l'échelle de temps des ITTO.

Le propulseur utilisé dans l'étude, dont les résultats seront présentés lors du séminaire, est le PPS-FLEX, un propulseur de Hall expérimental [4]. Celui-ci se distingue par l'utilisation de bobines magnétiques segmentées, offrant une grande flexibilité dans le réglage du champ magnétique. Grâce à cette caractéristique, le point de fonctionnement a été sélectionné de manière à accentuer les instabilités de type ITTO et à maximiser la stabilité des oscillations de la décharge. Dans un propulseur de Hall, le champ magnétique remplit deux fonctions principales : Augmenter le temps de résidence des électrons dans la décharge, favorisant ainsi un taux d'ionisation élevé (l'intensité du champ magnétique restant suffisamment faible pour ne pas magnétiser les ions). Et localiser le champ électrique dans une zone restreinte du canal de décharge, en piégeant localement les électrons (ce qui réduit fortement la conductivité axiale). Ce champ électrique est généré par l'application d'une différence de potentiel entre : une anode ; située au fond d'un canal annulaire, au niveau de l'injection de gaz et une cathode émissive ; placée à l'extérieur du propulseur, dont le rôle est triple : initier et maintenir le plasma, ainsi que neutraliser le faisceau d'ions extrait du canal par le champ électrique (se sont ces ions qui génèrent la poussée).

Références

[1] E. Y. Choueiri, Plasma oscillations in Hall thrusters, *Physics of Plasmas* (2001).

[2] Bareilles, Hagelaar, Garrigues, Boniface, Boeuf, Gascon, Critical Assessment of a Two-Dimensional Hybrid Hall Thruster Model: Comparisons with Experiments, *Physics of Plasmas* (2004).

[3] Petronio, Charoy, Alvarez Laguna, Bourdon, Chabert, Two-Dimensional Effects on Electrostatic Instabilities in Hall Thrusters. II. Comparison of Particle-in-Cell Simulation Results with Linear Theory Dispersion Relations, *Physics of Plasmas* (2023).

[4] Garrigues, Mazouffre, Hénaux, Vilamot, Rossi, Harribey, Bourgeois, Vaudolon, Zurbach, Design and First Test Campaign Results with a New Flexible Magnetic Circuit for a Hall Thruster, 33rd IEPC, **2013-250** (2013).

Statut : post-doc