

Rapport de Stage

Caractérisation d'instabilités dans un plasma froid à deux espèces de type Hélium - Argon

Aloïs COQUILLARD

Département de Physique, L3 SdM

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON

Année 2024–2025

Réalisé à

L'institut J. LAMOUR

2 allée André Guinier

Campus ARTEM, Nancy

<https://ijl.univ-lorraine.fr/>

Supervisé par

Frédéric BROCHARD

Dir. de rech. au CNRS

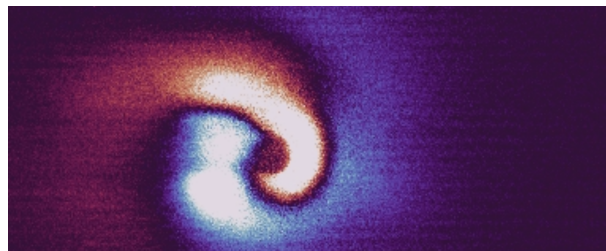
tel. 03 72 74 24 99

frederic.brochard@univ-lorraine.fr

Résumé

L'objectif de ce stage a été d'étudier les instabilités se formant dans un plasma froid contenant de l'Hélium et de l'Argon en diverses proportions, afin de les relier ou non aux instabilités usuelles rencontrées dans des plasmas cylindriques.

Mots clés : *plasma, instabilité, mode flûte, onde de dérive*



Remerciements

Je tiens à remercier l'institut Jean Lamour de m'avoir accueilli, particulièrement les ressources humaines et informatiques qui ont pris le temps de me faire toutes les accréditations et formations nécessaires.

Je remercie aussi Nicolas PLIHON, mon tuteur, sans qui je n'aurais pu trouver ce stage.

De l'équipe des plasmas de fusion de l'IJL je remercie Niamh CLARKE et Senghor TCHUENKAM KEMOGNE pour avoir été là pour moi quand j'étais perdu dans ma bibliographie, Robert dont les discussions autour d'un café ont été plus d'une fois rafraîchissantes et éclairantes, ainsi que tous ceux que j'ai pu croiser dans les couloirs et qui n'ont jamais hésité à se rendre disponible pour moi.

Un grand merci à Stéphane HEURAUX pour sa patience face à toutes mes questions et son implication dans mes recherches alors même que rien ne l'y obligeait, ainsi que sa bonne humeur dont j'avais grandement besoin.

Finalement je remercie Frédéric BROCHARD, mon maître de stage, qui malgré son emploi du temps bien chargé a su se libérer pour discuter des directions à prendre avec un enthousiasme dont je me souviendrai.

Table des matières

I	Introduction	3
II	La machine Aline et les plasmas Hélium-Argon	4
II.1	Présentation de la machine	4
II.2	Plasmas He-Ar et origine du sujet de stage	5
II.3	Organisation du stage	5
III	Les différents types d'instabilités	6
III.1	Les ondes de dérive	6
III.1.a	Dérive $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$	6
III.1.b	Onde de dérive diamagnétique	8
III.2	Les modes dits "flûte"	9
III.2.a	Instabilité de Kelvin-Helmholtz	9
III.2.b	Instabilité de Rayleigh-Taylor centrifuge	10
III.2.c	Instabilité de Simon-Hoh	10
III.3	Autres instabilités	10
III.4	Récapitulatif	11
IV	Exploitation des données expérimentales	11
IV.1	Exploitation des données de sonde	11
IV.2	Exploitation des données de caméra rapide	13
IV.2.a	Exploitation des données de AX Vision	14
IV.2.b	Exploitation des données caméra brutes	17
IV.3	Expériences supplémentaires	20
V	Détermination des instabilités	21
V.1	Récapitulatif des exploitations	21
V.2	Identification des instabilités dans les expériences	21
VI	Conclusion	22
Références		22
	Articles utilisés à but illustratif	22
	Ressources scientifiques	22
Annexes		23
A	Théorie des sondes de Langmuir	23
B	Réévaluation des pressions pour un mélange bi-gaz	24
B.1	Fonctionnement et défauts d'une jauge de pression Pirani	24
B.2	Influence du gaz sur le pompage turbomoléculaire	25
B.3	Temps de parcours moyen pour un mélange bigaz	26
C	Figures annexes	28
D	Remarques concernant l'utilisation des IA	32

I Introduction

Le plasma, quatrième état de la matière, fait l'objet de nombreuses recherches du fait de son utilité potentielle dans de nombreux domaines, que ce soit par exemple en physique de la matière (lasers, fabrication de semi-conducteurs, etc.) mais aussi en physique nucléaire avec les plasmas de fusion. Cette dernière application est pleine de promesses, car maîtriser la fusion nucléaire permettrait de *mettre le Soleil en bouteille*, c'est-à-dire de produire de l'énergie thermique de manière propre et durable, avec tous les avantages mais sans les principaux défauts de sa cousine la fission qui alimente nombre de réacteurs français. Cependant le défi est de taille et c'est pour cela que cette technologie que l'on pensait à quelque années de la maturité dans les années 70 n'est toujours pas fonctionnelle à ce jour, malgré des tentatives toujours plus prometteuses. L'ambition actuelle est symbolisée par le projet international ITER, qui doit permettre d'atteindre d'ici 2035 un coefficient d'amplification (rapport entre la puissance générée par fusion et la puissance injectée) $Q = 10$.

Un des principaux obstacles à la fusion est la stabilité du plasma. En effet, même si celui-ci peut sembler visuellement stable dans une configuration linéaire (une Q-machine¹ par exemple), il est en fait parcouru de nombreuses instabilités invisibles aux échelles humaines de temps et d'espace. Ces diverses instabilités, bien plus marquées dans des machines à géométries plus complexes, peuvent alors déséquilibrer le plasma et générer une turbulence qui le perturbe à l'échelle macroscopique. Dans le cas le plus extrême, il peut en résulter une perte de contrôle du courant plasma ; dans un tokamak (type de réacteur à fusion), cette perte de contrôle du courant autogénéré est synonyme d'une perte de confinement magnétique, appelée disruption.

L'étude des instabilités est donc un sujet de recherche important et actuel dans le domaine des plasmas de fusion, et c'est pour cela que je voulais à l'occasion de mon stage de L3 faire des recherches dans ce domaine afin d'en comprendre plus en profondeur les enjeux.

L'institut Jean LAMOUR (IJL), basé à Nancy en Lorraine, est spécialisé dans l'étude de la matière sous divers aspects. Pour cette raison, il dispose de plusieurs équipes travaillant sur les plasmas et leurs différentes applications, et plus particulièrement une équipe travaillant sur les plasmas de fusion. Étant personnellement originaire des environs de Nancy, il a été logique que mon tuteur Nicolas PLIHON m'encourage à contacter cette équipe afin d'y réaliser mon stage, et c'est avec enthousiasme que j'ai pu par la suite visiter leurs locaux et discuter de sujets de stage possibles avec les chercheurs Stéphane HEURAUX et Frédéric BROCHARD, pour au final choisir le sujet qui va être développé dans le présent rapport qui fut encadré par ce dernier.



FIGURE 1 – Membres du groupe SPEKTRE, regroupant les équipes de recherche 107 (Plasmas de fusion) et 201 (Plasmas, Procédés, Surfaces) de l'Institut Jean LAMOUR, posant devant la machine SPEKTRE. On peut voir notamment : devant en vert Frédéric BROCHARD, à sa droite Niamh CLARKE, et 3^{ème} au fond à gauche Stéphane HEURAUX.

1. Les Q-machines, ou *Quiescent machines*, sont des machines à plasma de configuration usuellement cylindrique axiale (ressemblant de loin à la machine Aline dont il sera question plus loin) et dont le plasma était généré par une cathode chaude. Elles étaient appelées ainsi car le plasma généré en leur sein était à première vue très stable, ce qui s'avéra être une piètre approximation de la réalité comme nous le verrons au cours de ce stage.