



Université Claude Bernard



DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **09 décembre 2021**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur VINCENT Simon**

Titre de la thèse : « *Modification par injection de courant d'ondes azimuthales dans une colonne de plasma magnétisée* »

Résumé



L'ensemble de la matière visible de l'univers est estimé être constituée à 99.9% de gaz ionisé, aussi appelé plasma. Le comportement de cet état de la matière est dicté par les interactions électromagnétiques entre les particules chargées (ions et électrons) qui le composent, résultant en une dynamique bien particulière et sans grande ressemblance avec l'ensemble des fluides neutres observés sur Terre. Les étoiles, le vent solaires, ..., bien que de natures très variées en termes de densités et de températures, sont tous des objets qui nécessitent la physique des plasmas pour être compris et étudiés de manière adaptée. Avec l'essor des progrès technologiques des dernières décennies et l'utilisation des plasmas dans l'industrie, pour la gravure de micro-processeurs ou les propulseurs spatiaux par exemple, la physique des plasmas ne limite plus au champ de l'astrophysique. A mi-chemin entre recherche fondamentale et application industrielle, la génération contrôlée de réactions de fusion thermonucléaires, observées de manière naturelle au cœur des étoiles, est également un enjeu de taille au sein de la recherche en physique des plasmas. Envisagée comme moyen de production d'énergie décarbonnée et à haut rendement, la maîtrise de l'énergie de fusion se heurte encore cependant à plusieurs verrous technologiques et de compréhension physique, tel que celui d'un confinement efficace.

En effet contrairement aux réactions de fusion au sein des étoiles, confinées de manière naturelle par gravité, les plasmas de fusion produits sur Terre dans des machines à géométrie toroïdale (appelé tokamaks) sont confinés par un champ magnétique intense, de l'ordre du Tesla. Dans cette configuration les forts gradients de densité et de température générés aux bords des plasmas de fusion sont la source de nombreuses instabilités qui ont une grande influence sur l'équilibre global du plasma. Les ondes basses fréquences notamment (i.e. dont la fréquence est inférieure à la fréquence cyclotronique ionique) sont connues pour être responsable d'un transport radial important aux bords des plasmas de fusion, qui nuit à un confinement efficace. Ce transport causé par turbulence d'onde, aussi appelé transport turbulent, est aujourd'hui l'un des obstacles majeurs à la maîtrise d'une production d'énergie par fusion contrôlée.

Dans ce travail de thèse, des ondes basses fréquences se développant aux bords d'une colonne de plasma magnétisée sont observées expérimentalement. Leur dynamique est finement caractérisée à l'aide de mesures par sondes et par imagerie rapide. Ces ondes et le transport turbulent qu'elles génèrent sont enfin modifiées par l'intermédiaire d'une électrode polarisée placée au centre du plasma.

Dans un premier chapitre, l'installation expérimentale est présentée et les ordres de grandeurs des paramètres du plasma sont introduits.

L'installation expérimentale est constituée d'une chambre cylindrique en acier de 80 cm de long, et de diamètre 20 cm. Un plasma d'Argon à une pression de 1 mTorr et un taux d'ionisation de 20 % est généré par induction via une source radio-fréquence de puissance 1 à 3 kW. Le plasma est confinée par un champ magnétique d'une intensité de 50 à 700 G, et forme une colonne de 10 cm de diamètre. L'évaluation numérique des grandeurs caractéristiques du plasma montrent que les électrons sont magnétisés, et les ions non-magnétisés. Le rôle de la friction des neutres sur la dynamique de la colonne de plasma est enfin mis en évidence.

Un deuxième chapitre est consacré aux techniques de mesures mises en œuvre au cours de la thèse. Des mesures électrostatique par sonde permettent d'évaluer de manière systématiques les profils radiaux des paramètres plasmas. La densité, la température et le potentiel flottant sont mesurés par sonde de Langmuir et le potentiel plasma par sonde émissive. Une sonde cinq pointes plus avancée, et au design inspiré d'une sonde triple, permet la mesure du transport turbulent. L'une des extrémités de la chambre cylindrique est composée d'une fenêtre transparente en borosilicate, permettant la visualisation de la colonne de plasma. Une caméra située à 3.5 m de cette extrémité filme la lumière émise naturellement par le plasma, à une fréquence de 200 kfps et une résolution de 256×256 px². Une étude approfondie de la dépendance de la lumière émise en fonction des paramètres plasma est menée. La lumière filmée est filtrée autour de trois longueurs d'ondes distinctes, et comparée aux mesures par sonde pour des valeurs de champ magnétique de 170, 340, 510 et 680 G. Les profils moyens sont comparés ; dans un deuxième temps l'évolution temporelle de la lumière est comparée à des mesures simultanées par sonde. Un modèle simplifié de la forme ... permet de rendre compte avec précision de l'intensité lumineuse filmée par caméra, pour un ensemble significatif de valeurs de longueurs d'ondes filtrée et de champ magnétique. Ce résultat robuste atteste l'importance de la prise en compte de la température électronique pour expliquer la lumière émise, qui est usuellement considérée comme simplement proportionnelle à la densité lors de mesures par caméra rapide.

Les images obtenues par caméra rapide sont analysées à l'aide de deux techniques de décomposition de modes : la transformée de Fourier 2D et la POD. Ces techniques sont présentées dans un troisième chapitre. Le calcul de bicohérence permettant l'évaluation d'interaction faiblement non-linéaire à trois ondes est également expliqué en détail.

Dans un quatrième chapitre, la colonne de plasma est caractérisé pour en fonction des paramètres de contrôle, au moyen d'un ensemble conséquent de mesures par sondes. Les profils radiaux de l'ensemble des paramètres plasma sont notamment présentés, pour des valeurs de champ magnétique de 170, 340, 510 et 680 G. La rotation globale de la colonne de plasma est mise en évidence.

Le cinquième chapitre de cette thèse est consacré aux ondes acoustiques ioniques qui se développent pour un champ magnétique de 170 G. Des mesures par caméra rapide mettent en évidence la présence d'ondes se propageant à une vitesse proche de la vitesse acoustique ionique. Une relation de dispersion est calculée, prenant en compte la magnétisation des électrons dans ce régime, ainsi que la friction ressentie par les particules chargées via les collisions avec les neutres, et la rotation globale de la colonne de plasma. Les vitesses de phases théoriques obtenues par la résolution numérique de cette relation de dispersion montrent un très bon accord avec les vitesses de phases expérimentales observées par caméra rapide. De forts échanges d'énergies entre modes sont observés. Il est montré que le temps caractéristique de ces échanges augmente avec la pression du plasma. Un calcul de bicohérence quantifie la nature non linéaire de ces échanges d'énergie.

Pour de plus hautes valeurs de champ magnétique à 340, 510 et 680 G, des ondes azimuthales basses fréquence sont observées expérimentalement, et sont l'objet d'un chapitre 6. Les instabilités basse fréquence qu'il est commun d'observer dans une géométrie linéaire, i.e. de type Kelvin-Helmholtz, Rayleigh-Taylor, et de dérives, sont présentées au travers d'un état de l'art. Un ensemble de mesure par sonde donne accès au déphasage entre les fluctuations de densité et de potentiel flottant. Ces mesures sont combinées aux mesures de profils radiaux, et conduisent à l'identification d'ondes Kelvin-

Helmholtz et Rayleigh-Taylor évoluant dans la colonne de plasma. La coexistence de ces deux ondes est clairement observée par caméra rapide pour un champ magnétique de 510 G. Des calculs de bicohérence permettent de caractériser avec précision la grande diversité des interactions non-linéaire entre l'ensemble des modes présents. Des mesures par sonde de transport montrent enfin que les ondes Kelvin-Helmholtz, majoritairement présentes, sont responsables d'un transport d'onde cohérent, orienté vers l'intérieur de la colonne de plasma.

Dans un dernier chapitre, une électrode en tungsten est placée au centre du plasma,. Cette électrode est chauffée jusqu'à un niveau d'émission thermoionique, puis polarisée négativement par rapport à l'enceinte à la masse. Un courant thermoionique de l'ordre de plusieurs Ampères est alors injecté depuis les parois vers le centre du plasma. La forte influence de ce courant sur les profils radiaux de densité et de potential plasma est étudiée, ainsi que la modification des ondes azimuthales qu'il entraîne, pour tous les régimes de champ magnétiques. A 510 G et 680 G il est montré qu'une faible injection de courant supprime les ondes Kelvin-Helmholtz. Pour un courant injecté plus important de l'ordre de 5 à 10 A, le développement d'une structure de type « bras de rotation » est observé. Le transport turbulent est mesuré dans la nouvelle configuration avec injection de courant. Des mesures simultanées de caméra rapide et de sondes permettent d'associer le passage des structures en rotation avec des pics de transport positif. Une transition est observée, d'un transport d'ondes cohérentes orienté vers l'intérieur vers un transport intermittent par structure convectives orienté vers l'extérieur.