

Coordination de la Formation par la Recherche

Sujet de Thèse CEA "SUJET-LABO 2022"

Référence du dossier :

Pôle : DRF

N° : SL-DRF-22-0320

1 - Laboratoire d'accueil au CEA

Centre : **Cadarache**

Département/Service : **IRFM / Service Chauffage et Confinement du Plasma**

Nom du laboratoire : **TTM/Transport Turbulence et Magnétohydrodynamique**

2 - Titre du sujet de thèse

Impact de la géométrie magnétique sur le confinement des plasmas de tokamaks

3 - Thématique de Recherche

Physique corpusculaire et cosmos / Physique des plasmas et interactions laser-

4 - Pièce jointe

Y a t-il une pièce jointe associée ? **Non**

Intitulé de la pièce jointe :

5 - Résumé

Le confinement du plasma dans un tokamak est essentiel à sa performance en termes de puissance fusion. Expérimentalement, il apparaît que ce confinement dépend fortement de la géométrie magnétique. Pour autant, ce potentiel d'optimisation offert par la géométrie n'a pas encore été pleinement exploité jusqu'ici – en raison notamment du manque de flexibilité de la plupart des tokamaks quant à la géométrie. A l'inverse, théorie et simulation numérique sont des approches particulièrement adaptées pour explorer de façon exhaustive l'impact de la géométrie sur le confinement. Si le transport de chaleur au cœur des tokamaks est en général dominé par la turbulence, le rôle des collisions ne peut cependant pas être ignoré. Dans ce cadre, le sujet de thèse proposé vise à étudier l'impact de la géométrie magnétique sur la turbulence plasma et le transport collisionnel. Des simulations numériques seront réalisées à l'aide du code gyrocinétique à cinq dimensions GYSELA développé à l'IRFM. Une approche analytique sera également menée en vue d'identifier les mécanismes physiques en jeu dans les simulations – notamment comment les mécanismes d'instabilités dépendent de la géométrie, principalement le rapport d'aspect du tore et l'élongation et la triangularité de sa section. Une comparaison aux résultats expérimentaux sera enfin menée. Cette étude devrait permettre une exploration fiable et complète de l'espace des paramètres afin d'optimiser les performances des futurs tokamaks.

6 - Exposé du sujet

Le confinement de l'énergie dans un plasma de tokamak est un ingrédient essentiel à sa performance. L'expérience montre qu'il dépend fortement de la géométrie magnétique. De fait, les lois d'échelle empiriques du temps de confinement de l'énergie, utilisées pour la conception de nouveaux tokamaks y compris ITER, dépendent du rapport d'aspect – i.e. le rapport du grand sur le petit rayon du tore – et de la forme des sections poloïdales des surfaces de flux – circulaires ou possédant élongation et triangularité. Même si ces paramètres permettent l'optimisation du confinement, leur potentiel n'a pas encore été pleinement exploité à cause du manque de flexibilité de la géométrie magnétique de la plupart des tokamaks. A l'inverse, théorie et simulation numérique sont des outils particulièrement adaptés à l'étude exhaustive de l'impact des paramètres géométriques sur le confinement. De plus, alors que certaines observations expérimentales sont bien prédites par les modèles théoriques, d'autres restent mal comprises. La compréhension des mécanismes sous-jacents est pourtant une étape préalable pour prédire et optimiser de façon fiable les performances des futurs tokamaks (tels ITER et DEMO). En effet, les lois d'échelle empiriques présentent une grande incertitude quant à la dépendance du confinement vis-à-vis de certains paramètres géométriques. Par ailleurs, la simple extrapolation des dépendances observées dans les machines actuelles aux prochains tokamaks pourrait bien s'avérer erronée du fait d'un changement possible du régime de turbulence.

Au sein d'un plasma dont la configuration magnétique est stable (on supposera que c'est le cas dans le cadre de la thèse; on exclut de fait du champ de l'étude la question des instabilités magnéto-hydrodynamiques dont la dépendance aux paramètres géométriques est relativement bien documentée), il existe un transport net au travers des surfaces de flux magnétique. Ce transport est dû à la perturbation des trajectoires de particules confinées par des mécanismes qui brisent la conservation d'un ou plusieurs invariants du mouvement. Cette perturbation peut être due soit à des collisions entre particules du plasma (on parle de transport collisionnel) soit à la présence de fluctuations microscopiques du champ électromagnétique (on parle de transport turbulent). La plupart du temps, le transport au cœur des tokamaks est dominé par la turbulence. Cela vient de l'état intrinsèquement hors équilibre des plasmas magnétisés de fusion, caractérisés par de forts gradients de densité et de température desquels les instabilités puisent leur énergie. Par ailleurs, la faible densité et les très hautes températures trouvées au cœur des tokamaks conduisent à une collisionnalité relativement faible. La situation au bord du plasma – i.e. plus proche des parois – est quant à elle plus contrastée. En effet, la diminution de la température entraîne une augmentation de la fréquence de collision tandis que les très forts gradients souvent présents dans cette région peuvent servir de source d'énergie libre au développement d'instabilités. Enfin, la proximité des lignes de champ ouvertes qui interceptent des éléments de paroi est à l'origine d'un champ électrique cisailé radialement. Ce champ contrôle la rotation de la turbulence via la vitesse de dérive électrique. Il peut alors déchirer les structures turbulentes et réduire le transport qui en résulte. L'étude du transport dans la zone du bord est difficile du point de vue théorique car à la croisée de nombreux phénomènes physiques et du point de vue numérique du fait de l'interaction

plasma-paroi. Malgré ces difficultés, cette région ne peut être ignorée quand on s'intéresse à la géométrie car les surfaces magnétiques externes sont celles qui possèdent les élongations et triangularités les plus importantes. Il est donc crucial de bien les décrire afin de comprendre l'impact de la géométrie sur le confinement des plasmas de tokamaks.

Dans ce cadre, le sujet de thèse proposé a pour objectif l'étude de l'impact de la géométrie magnétique sur les transports turbulent et collisionnel d'un plasma de tokamak. Deux approches complémentaires seront suivies durant la thèse. D'un côté des simulations seront réalisées à l'aide du code gyrocinétique GYSELA. L'approche gyrocinétique est à l'heure actuelle la description la plus complète des transports turbulent et collisionnel. Elle repose sur un nombre limité d'hypothèses et convient à ce titre à une exploration fiable de l'espace des paramètres. Le code GYSELA a été récemment amélioré pour traiter des surfaces de flux non circulaires. Par ailleurs, il est particulièrement adapté pour cette étude car étant global, il permettra d'explorer le poids des processus non-locaux dans la modification du transport, propriétés hors de portée de la plupart des simulations locales réalisées jusqu'à présent. Cependant, malgré l'utilisation de techniques de pointe en calcul intensif, ce genre de code est coûteux numériquement de sorte que son utilisation pour une exploration exhaustive de l'espace des paramètres est inenvisageable. Pour cette raison et aussi dans un souci de compréhension théorique des mécanismes en jeu, une approche analytique sera menée en parallèle à l'utilisation du code GYSELA.

L'impact de la géométrie sur le transport turbulent sera plus particulièrement étudié à travers deux aspects. Le premier concerne le taux de croissance linéaire des instabilités qui peut être modifié par la géométrie. Cette partie pourra être réalisée de façon totalement analytique et aisément vérifiée numériquement. On prolongera le travail en estimant le transport attendu dans le cadre de la théorie quasi-linéaire, résultats qui seront comparés à ceux des simulations turbulentes de GYSELA pour quantifier le rôle des processus non-linéaires et non-locaux. Le second aspect concernera l'impact de la géométrie sur le développement du champ électrique radial au bord du plasma et son impact sur la saturation non linéaire de la turbulence. Etant donné la nature essentiellement non-linéaire de cet effet, il sera principalement étudié numériquement.

Concernant l'impact de la géométrie sur le transport collisionnel, des prédictions théoriques existent même si elles sont souvent complexes à obtenir. Elles seront testées en l'absence puis en présence de turbulence ce qui permettra de repérer les éventuelles synergies entre transport collisionnel et turbulent.

En résumé, l'objectif de la thèse est d'identifier les mécanismes essentiels permettant d'expliquer l'impact de la géométrie sur le confinement. Les résultats de cette thèse pourront être utilisés a posteriori pour améliorer des modèles réduits existants, renforçant ainsi leur fiabilité. Ces modèles réduits pourront ensuite être utilisés pour une exploration fiable et complète de l'espace des paramètres afin d'optimiser les performances des futurs tokamaks.

Dans le cadre de cette thèse réalisée dans l'équipe GYSELA du groupe de théorie et simulations numériques, l'étudiant(e) apprendra la physique à l'origine des transports turbulent et collisionnel au sein des tokamaks. L'utilisation d'un code de simulation haute performance (GYSELA) et l'exploitation des nombreuses données générées permettront également à l'étudiant(e) d'acquérir des compétences valorisables même en dehors du cadre de la recherche académique. Ce travail de thèse s'inscrira dans le cadre de deux collaborations à l'échelle européenne ainsi qu'une collaboration étroite avec une université de Singapour (NTU). Ces collaborations seront l'occasion pour l'étudiant(e) de rencontrer des collègues travaillant au sein d'autres instituts ce qui permettra des échanges enrichissants.

7 - Collaborations (éventuelles) prévues

Laboratoire : **Swiss Plasma Center**

Organisme : **EPFL**

Responsable : **Villard Laurent**

Raison de la collaboration :

Laurent Villard est l'un des principaux développeurs du code gyrocinétique ORB5, un code assez semblable à GYSELA. Le responsable du projet (P. Donnel) a étudié l'impact de la géométrie magnétique sur le confinement avec ORB5 au cours d'un post-doctorat dans l'équipe de Laurent Villard. Un autre post-doctorant (Giovanni Di Giannatale) a repris ce projet du côté ORB5. La collaboration avec l'équipe de Laurent

Villard pour l'étude de l'impact de la géométrie magnétique sur le confinement des plasmas de tokamaks est donc déjà en cours et la thèse s'inscrit naturellement dans cette collaboration.

Duree : 36

8 - Partenariat(s) industriels prévu(s) (éventuellement)

9 - Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Nom: **Donnel**

Prénom: **Peter**

Adresse : **DRF/IRFM/SPPF/GTSN**

bât. 513/148

CEA-Cadarache

13108 Saint Paul-Lez-Durance Cedex

Téléphone **0442252234**

@mail: **peter.donnel@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches :

Non

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà

0

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2022/2023 ? **0**

10 - Directeur de thèse

Nom: **SARAZIN**

Prénom: **Yanick**

Adresse : **CEA,IRFM centre de Cadarache,**

F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France.

Téléphone: **+33 4 42 25 48 03**

@mail: **yanick.sarazin@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches :

Oui

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà encadrées

10

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2022/2023 ? **2**

11 - Signatures :

Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Date : /././././

Peter Donnel

Signature :

Directeur de Thèse (lorsqu'il est identifié)

Date : /././././

Yanick SARAZIN

Signature :

Chef de Département CEA (ou son représentant)

Date : /././././

Alain BECOULET

Signature :

Directeur du Pôle CEA (ou son représentant)

Date : /././././

Elsa CORTIJO

Signature :

12 - Avis du Responsable de l'Ecole Doctorale :

Physique et Sciences de la Matière - Aix-Marseille Université -

Nom du Responsable :

Date : /././././

Signature :

Avis : Favorable Défavorable

Avis circonstancié :