

Coordination de la Formation par la Recherche

Sujet de Thèse CEA "SUJET-LABO 2023"

Référence du dossier :

Pôle : DRF

N° : SL-DRF-23-0571

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 de la configuration magnétique sur le confinement des plasmas dans les 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 terme de puissance fusion. Expérimentalement, ce confinement dépend fortement de la triangularité du plasma, quand la section du tore de plasma présente une asymétrie interne-externe. De fait, les plasmas à triangularité négative – dont un des sommets du triangle pointe vers l'axe de symétrie du tore – présentent un confinement approximativement doublé par rapport à ceux à triangularité positive. Les configurations à triangularité négative sont difficiles à réaliser expérimentalement dans les machines actuelles, car non conçues dans cet objectif. A l'inverse, théorie et simulation numérique sont des approches particulièrement adaptées pour explorer l'impact de la triangularité 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, notamment au bord où la triangularité est maximale. Dans ce cadre, le sujet de thèse proposé vise à étudier l'impact de la triangularité du plasma sur la turbulence 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 principales instabilités dépendent de la triangularité. Cette étude devrait permettre d'évaluer la pertinence de la construction d'un grand tokamak à triangularité négative.

6 - Exposé du sujet

La performance d'un plasma de fusion de tokamak croît non-linéairement avec le temps de confinement de l'énergie. Les meilleurs confinements sont actuellement obtenus avec des plasmas possédant une barrière de transport périphérique (zone dans le bord du plasma dans laquelle le niveau de turbulence est réduit). La formation d'une barrière de transport est bénéfique au confinement, mais des relaxations quasi-périodiques de cette barrière sont souvent observées, entraînant de larges flux intermittents susceptibles d'endommager les parois du tokamak. Des expériences récentes montrent que le temps de confinement dépend fortement de la triangularité du plasma, qui mesure l'asymétrie interne-externe de la section du tore de plasma. De fait, les plasmas à triangularité négative sans barrière de transport possèdent un confinement similaire à ceux à triangularité positive avec barrière de transport. Mais l'absence des relaxations quasi-périodiques de cette barrière est clairement un avantage pour les plasmas à triangularité négative. Les configurations magnétiques à triangularité négative sont difficiles à réaliser dans des tokamaks non prévus pour cette géométrie. A l'inverse, théorie et simulation numérique sont des outils adaptés pour étudier leur impact sur le confinement. Quelques études numériques ont permis de retrouver qualitativement l'amélioration du confinement observé en triangularité négative et d'identifier les ingrédients physiques clés. Mais la compréhension des observations expérimentales et numériques reste lacunaire. Elle est pourtant nécessaire pour pouvoir extrapoler la dépendance du confinement avec la triangularité à des machines plus grandes et envisager ainsi la construction d'un tokamak adapté à une configuration à triangularité négative.

Au sein d'un plasma dont la configuration magnétique est stable (la dépendance aux paramètres géométriques des instabilités magnéto-hydrodynamiques est relativement bien documentée et ne sera pas étudiée au cours de cette thèse), 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. Ces mécanismes sont de deux ordres: soit des collisions entre particules du plasma (on parle de transport collisionnel), soit des 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: 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. 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 triangularités les plus importantes. Il est donc crucial de bien les décrire afin de comprendre l'impact de la triangularité sur le confinement des plasmas de tokamaks.

Dans ce cadre, le sujet de thèse proposé a pour objectif l'étude de la triangularité sur les transports turbulent et collisionnel d'un plasma de tokamak. Deux approches complémentaires seront suivies. 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. Or le caractère global a été signalé comme un ingrédient essentiel pour retrouver numériquement l'effet bénéfique de la triangularité négative sur le confinement. 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.

L'impact de la triangularité 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. Un calcul analytique prédisant une diminution du taux de croissance en triangularité négative a récemment été réalisé par un membre de l'équipe GYSELA. Mais cette prédiction n'a pour l'heure pas été confrontée aux résultats numériques. Le travail de thèse commencera donc par une comparaison détaillée entre prédiction théorique et résultats de simulations linéaires. On prolongera le travail en estimant le transport attendu dans le cadre de la théorie quasi-linéaire locale, qui sera comparé aux résultats de simulations turbulentes de GYSELA pour quantifier le rôle des processus non-linéaires et non-locaux. Le second aspect concerne l'impact de la triangularité sur le développement du champ électrique radial 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 dériver analytiquement. Elles seront testées en l'absence puis en présence de turbulence ce qui permettra de repérer les éventuelles synergies entre transport collisionnel et turbulent. Etant donné l'état actuel des connaissances et l'apport majeur attendu du travail de thèse, au moins deux publications sont envisageables, centrées respectivement sur les transports turbulent et collisionnel.

En résumé, l'objectif de la thèse est d'identifier les mécanismes essentiels, à la fois linéaires et non-linéaires, permettant d'expliquer l'impact de la triangularité sur le confinement. Les résultats de cette thèse pourront être utilisés a posteriori pour améliorer des modèles réduits existants, qui pourront ensuite être utilisés pour une exploration fiable et complète de l'espace des paramètres afin d'évaluer la pertinence de la construction d'un grand tokamak à triangularité négative.

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 internationales qui permettront à l'étudiant(e) de rencontrer des collègues travaillant au sein d'autres instituts de recherche.

7 - Collaborations (éventuelles) prévues

Laboratoire : **School of Physical and Mathematical Sciences**
Organisme : **Nanyang Technological University, Singapore**
Responsable : **Garbet Xavier**

Raison de la collaboration :

Xavier GARBET a réalisé le calcul analytique qui sera testé numériquement au cours de la thèse. Son aide sera précieuse pour le test de cette prédiction et son éventuelle amélioration.

Duree : **36**

Laboratoire : **Swiss Plasma Center**
Organisme : **EPFL**
Responsable : **Villard Laurent**

Raison de la collaboration :

Le professeur Laurent Villard et son équipe travail actuellement sur une thématique de recherche assez proche de ce sujet de thèse, mais à l'aide d'un autre code gyrocinétique (ORB5). Il existe déjà une collaboration entre les deux groupes.

Nous coordonnerons les efforts afin de pouvoir comparer les résultats numériques des deux codes, renforçant ainsi la crédibilité de ceux-ci.

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 2023/2024 ? **1**

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 2023/2024 ? **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 : /././././

Jérôme BUCALOSSI

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 :