

Coordination de la Formation par la Recherche

Sujet de Thèse CEA "SUJET-LABO 2024"

Référence du dossier :

Pôle : DRF

N° : SL-DRF-24-0489

1 - Laboratoire d'accueil au CEA

Centre : **Cadarache**

Département/Service : **IRFM**

Nom du laboratoire : **GMPP/Groupe Mesures Physiques Plasma**

2 - Titre du sujet de thèse

Turbulence dans le plasma de bord des tokamaks en régime de fort couplage réactif avec les neutres

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

La stratégie de gestion des flux de chaleur extrêmes vers la paroi des réacteurs de fusion magnétique repose sur la dissipation de l'énergie du plasma par interaction avec le gaz neutre présent au bord du plasma principalement du fait de la recombinaison du plasma en contact avec des matériaux solides. La physique en jeu consiste en un équilibre entre le transport du plasma, dominé par la turbulence, et les réactions atomiques et moléculaires. La modélisation de cette phénoménologie extrêmement non linéaire est nécessaire pour la conception et la définition de l'espace opérationnel des futurs dispositifs comme ITER. Elle requiert l'utilisation de codes numériques traitant de manière auto-cohérente les mécanismes associés, ce qui n'a encore jamais été fait. L'IRFM et AMU ont co-développé un tel outil numérique, le code SOLEDGE3X-EIRENE, qui offre la capacité de modéliser le transport turbulent de manière auto-cohérente et la dynamique des particules neutres dans une géométrie 3D réaliste. De premières études ont démontré que la prise en compte de l'interaction plasma-neutres dans les simulations change significativement l'auto-organisation de la turbulence et le transport qui en découle. Elles ont également souligné que ces simulations soulèvent plusieurs défis spécifiques, liés en particulier à l'apparition de nouvelles échelles de temps long dans le système. Ce projet de thèse vise à poursuivre ce travail pour l'étendre aux régimes de fort couplage entre le plasma et les neutres qui constituent les régimes de fonctionnement envisagés dans les futurs réacteurs. Le travail reposera sur des simulations numériques exécutées sur supercalculateurs de classe mondiale. Leurs résultats seront analysés afin de comprendre la phénoménologie sous-jacente et de la comparer aux tendances expérimentales. En fonction du goût et des capacités du candidat retenu, il pourra également inclure un bras numérique (amélioration du code) ou expérimental (expériences dédiées sur le tokamak WEST ou machines partenaires européennes).

6 - Exposé du sujet

One of the main challenges of magnetic confinement fusion is the management of power fluxes at the machine wall. In next-generation experimental machines, heat fluxes to solid surfaces in the divertor will exceed by far the technologically acceptable limit of 10 MW/m² if no action is taken to mitigate them. The strategy envisaged to cope with these conditions is based on the dissipation of the power flow carried by the plasma by taking advantage of the interaction of the plasma with neutral particles (naturally present in the vicinity of the plasma-wall interaction surface due to plasma recombination) or impurities. The ultimate goal is to operate the plasma in a so-called detached regime in which most of the energy from the plasma center is transferred by collisions and chemical reactions to non-confined particles (photons or neutral atoms/molecules) before reaching solid surfaces.

Current knowledge shows that obtaining the detached regime is highly dependent on the mechanisms of plasma transport in the direction perpendicular to the magnetic field. We also know that turbulence plays an important - dominant in some regimes - role in these mechanisms. Conversely, experimental results on several tokamaks show a strong impact of detachment on turbulent transport in the edge plasma. This way, the interaction between plasma turbulence and neutrals particle has an influence on density regimes in tokamaks and contributes to the determination of the operational space for a safe operation of the machine. The phenomenology at play is highly nonlinear and can only be approached quantitatively on the basis of numerical simulations modeling all of these phenomena. However, due to the complexity of the problem and the computational means then available, the numerical modeling of turbulence and that of the plasma-neutral interaction have historically been 2 disjoint domains of study relying on 2 different classes of numerical tools: on the one hand, codes including the physics of the plasma-neutral interaction but dealing with the perpendicular transport in an ad-hoc way; on the other hand, turbulence codes not integrating the plasma-neutral interaction and often treating the problem in idealized geometries.

Significant progress has recently been achieved with the development of numerical tools capable of consistently dealing with these 2 aspects of edge plasma physics. IRFM, in collaboration with laboratories at Aix-Marseille University, has developed the SOLEDGE3X-EIRENE edge plasma code which features the unique capabilities to treat plasma turbulent transport and neutrals dynamics in 3D realistic geometry. First applications of the code to the study of the impact of neutrals on edge

plasma turbulence have revealed that the relocalization of particle sources due to plasma-neutrals interactions lead to a qualitative self-reorganization of turbulence transport even in low coupling regime where collisions and chemical reactions do not dominate the momentum or energy balance. They have also highlighted specific challenges associated with running such global turbulence simulations including a self-consistent description of plasma-neutrals interactions. In particular, the related physics is responsible for the appearance of a slow time-scale for the system to reach a steady-state equilibrium rendering these simulations extremely computationally costly.

The target of the proposed PhD is to pursue these studies by extending them to regimes of tight coupling between the plasma and neutrals, in which momentum and energy exchanges between the plasma and neutrals become dominant contributors to global balances. Such regimes, especially the so-called detached regime in which the plasma gives up all its energy to unconfined particles before reaching the vessel wall, are those of interest for future reactors. The work will rely on the execution of large scale simulations performed on world-class high-performance computers. Sets of simulations reproducing experimental density scans up to detached regime will be executed and analyzed in order to compare them with experimental trends. Advanced post-treatment tools will be used to disentangle the various mechanisms at play and build up some understanding of the underlying physics. Some of these tools already exist, while others will have to be designed and implemented by the student. The work will also include the development and test of methods to circumvent the identified challenges related to turbulence simulations including plasma-neutrals interactions. Depending on the tastes and competencies of the student, the work can also include a numerical arm (contribution to the development of the SOLEDGE3X-code package to improve its performances or stability) or a dedicated experimental arm (contribution to dedicated experimental sessions on the WEST tokamak or European partner devices).

7 - Collaborations (éventuelles) prévues

Laboratoire : **PIIM**

Organisme : **CNRS**

Responsable : **Marandet Yannick**

Raison de la collaboration :

Le code de turbulence plasma SOLEDGE3X a été développé en étroite collaboration entre l'IRFM et 2 laboratoires de l'Université d'Aix-Marseille, le M2P2 et le PIIM. La collaboration avec le PIIM porte principalement sur la physique des particules neutres et les réaction atomiques et moléculaires lors de leur interaction avec le plasma. Le doctorant sera intégré dans cette collaboration et sera donc amené à interagir avec les partenaires du PIIM.

Duree : **36**

Laboratoire : **M2P2**

Organisme : **CNRS**

Responsable : **Serre Eric**

Raison de la collaboration :

Le code de turbulence plasma SOLEDGE3X a été développé en étroite collaboration entre l'IRFM et 2 laboratoires de l'Université d'Aix-Marseille, le M2P2 et le PIIM. La collaboration avec le M2P2 porte principalement sur le développement de méthodes numériques adaptées aux modèles considérés. Le doctorant sera intégré dans cette collaboration et sera donc amené à interagir avec les partenaires du M2P2.

Duree : **36**

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

9 - Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Nom: **Tamain**

Prénom: **Patrick**

Adresse : **CEA Cadarache
IRFM/SPPF bat 513
13108 St Paul lez Durance Cedex
FRANCE**

Téléphone **0442252616** @mail: **patrick.tamain@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches : **En cours**

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà **12**

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2024/2025 ? **2**

10 - Directeur de thèse

Nom: **Tamain**

Prénom: **Patrick**

Adresse : **CEA Cadarache
IRFM/SPPF bat 513
13108 St Paul lez Durance Cedex
FRANCE**

Téléphone: **0442252616** @mail: **patrick.tamain@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches : **En cours**

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà encadrées **12**

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2024/2025 ? **2**

11 - Signatures :

Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Date : /././././

Patrick Tamain

Signature :

Directeur de Thèse (lorsqu'il est identifié)

Date : /././././

Patrick Tamain

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 :

Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPMN)

Nom du Responsable :

Date : /././././

Signature :

Avis : Favorable Défavorable

Avis circonstancié :