



Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives  
Direction de la Recherche Fondamentale

Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique  
<http://irfm.cea.fr>



Centre de Cadarache, 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

## SUJET DE THÈSE 2017

### Bifurcations du transport turbulent induites par la collisionnalité dans les plasmas de fusion

<b>Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse :</b>  Yanick Sarazin	<b>e-mail :</b>	yanick.sarazin@cea.fr
	<b>page web :</b>	
	<b>téléphone :</b>	04 42 25 48 03
	<b>secrétariat :</b>	04 42 25 62 22
<b>Équipe de Recherche :</b> IRFM/SPPF/GTS Groupe Théorie & Simulations, équipe GYSELA		

<b>Nom du Directeur de thèse :</b>  Xavier Garbet	<b>e-mail :</b>	xavier.garbet@cea.fr
	<b>page web :</b>	
	<b>téléphone :</b>	04 42 25 49 29
	<b>secrétariat :</b>	04 42 25 62 22
<b>Équipe de Recherche :</b> IRFM/SPPF/GTS		

#### Résumé du sujet :

Dans les plasmas de fusion par confinement magnétique, le transport de chaleur, et in fine les performances, sont contrôlés par la turbulence. Le transport collisionnel reste faible dans ces plasmas chauds et peu denses. Pour autant, les collisions sont loin de jouer un rôle négligeable. En cause notamment l'impact des écoulements cisailés à grande échelle, dont l'amplitude est en partie gouvernée par les collisions, sur l'auto-organisation et la saturation de la turbulence. L'objectif de la thèse consiste à étudier les bifurcations possibles de la turbulence vers des régimes à confinement amélioré induites par les collisions.

Dans ce cadre, des simulations dites "premiers principes" avec le code gyrocinétique GYSELA permettront d'élucider de manière auto-consistante, i.e. incluant collisions et turbulence, deux mécanismes de bifurcation récemment découverts au travers de modèles réduits et liés à la collisionnalité: la transition entre deux régimes de turbulence, ionique ou électronique, et le déclenchement d'une barrière de transport. Le tokamak WEST, qui entre en opération fin 2016 à l'IRFM, est un équipement particulièrement adapté à l'étude de ces bifurcations.

L'étudiant intégrera "l'équipe GYSELA", constituée de 7 permanents et plusieurs thésards et post-docs, impliquée entre autres dans plusieurs projets Européens. Les simulations seront réalisées sur des supercalculateurs nationaux et européens.

**Formation recherchée / recommandée :** intérêt pour la physique non-linéaire, la théorie et les simulations numériques

**Intitulé du master préconisé :** physique des plasmas et de la fusion ou physique générale

## Description détaillée du sujet :

Les plasmas de fusion par confinement magnétique, chauds et peu denses, sont faiblement collisionnels : le libre parcours moyen des particules dans le plasma de cœur des tokamaks dépasse de plusieurs ordres de grandeurs la taille de la machine. De fait, c'est la turbulence et non les collisions qui gouverne le transport de chaleur dans la plupart des scénarios plasmas, et in fine la performance fusion, rapport de la puissance dégagée à celle injectée. Les deux canaux de transport, liés aux collisions et à la turbulence, sont intrinsèquement multi-échelles. En effet, le transport néoclassique est dû à l'amplification de l'effet des collisions par l'existence d'une excursion à grande échelle des trajectoires, qui explorent l'ensemble de la topologie magnétique du tokamak. A l'inverse, la turbulence se développe à des échelles beaucoup plus petites, de l'ordre de quelques rayons de Larmor ioniques. Des travaux récents montrent cependant que l'hypothèse de séparation d'échelle, souvent invoquée pour justifier un traitement séparé de ces deux mécanismes, n'est pas légitime. En cause notamment l'impact des écoulements cisailés à grande échelle, dont l'amplitude est en partie gouvernée par les collisions, sur l'auto-organisation et le niveau de saturation de la turbulence.

L'objectif de la thèse consiste à étudier le rôle des collisions sur la turbulence en s'affranchissant de cette hypothèse simplificatrice, et d'identifier et de caractériser les mécanismes de bifurcation qu'elles peuvent induire vers des régimes à confinement amélioré.

Deux points cruciaux seront particulièrement regardés, en lien notamment avec les spécificités de la machine WEST, qui entre en opération fin 2016 à l'IRFM.

- 1) Les mesures expérimentales et les simulations numériques indiquent que le transport turbulent de matière et de chaleur est dû principalement à deux types d'instabilités: celle portée par les ions (mode ITG ou "Ion Temperature Gradient"), et celle due à une classe particulière d'électrons, ceux qui restent piégés dans les inhomogénéités du champ magnétique (TEM pour "Trapped Electron Modes"). Le poids respectif des turbulences ITG et TEM dépend en partie des collisions: celles-ci stabilisent la branche TEM en dépiégeant des électrons. Mais la collisionnalité a également un autre effet, antagoniste: elle amortit les écoulements à grande échelle, réduisant d'autant une source importante de stabilisation de la turbulence. De fait, cette double propriété pourrait expliquer l'existence de lois d'échelles empiriques contradictoires vis-à-vis de la collisionnalité. Dans ce cadre, le grand rapport d'aspect de WEST ( $5.5 \leq R/a \leq 6.5$  contre  $R/a \sim 3$  pour JET et ITER) pourrait permettre de résoudre une partie des contradictions observées car il modifie l'équilibre entre stabilisation et excitation de la turbulence. En outre, la grande flexibilité des systèmes de chauffages rend cette machine particulièrement adaptée à l'étude de ces transitions. Un scan en rapport d'aspect et collisionnalité devrait éclairer les lois d'échelle actuelles, et renforcer ainsi notre capacité prédictive.
- 2) A l'approche de la dernière surface magnétique fermée, la collisionnalité du plasma (proportionnelle à la densité et à l'inverse du carré de la température) varie de plusieurs ordres de grandeurs du fait des forts gradients de densité et température. Des travaux récents, menés en partie par notre équipe avec des modèles réduits, ont montré que cette grande variation pouvait jouer un rôle clé dans le déclenchement d'une barrière de transport à la périphérie du plasma, en induisant un fort cisaillement des écoulements à grande échelle. Ce résultat est à rapprocher du mécanisme de transition d'un régime de faible confinement (mode L) au mode H (fort confinement) observé dans la plupart des tokamaks. Le gradient de collisionnalité est suspecté jouer un rôle potentiellement clé dans cette bifurcation, et peut-être aussi sur la stabilité même du mode H, l'un des scénarios de référence pour ITER.

Ces travaux seront conduits à l'aide de simulations numériques avec le code gyrocinétique GYSELA, développé à l'IRFM au travers de collaborations nationales et internationales. Ce code est l'un des rares au monde à décrire turbulence et collisions sur un pied d'égalité, sans séparation d'échelle. Son caractère global, incluant depuis peu une prise en compte optimisée de l'interaction cœur-bord, lui confère en outre la capacité d'étudier et mettre en lumière les effets non-locaux induits par les

écoulements à grande échelle et les variations inhomogènes de la collisionnalité. Plusieurs dizaines de millions d'heures CPU sont obtenues chaque année pour tourner sur des supercalculateurs nationaux et européens.

L'étudiant intégrera "l'équipe GYSELA", constituée de 7 permanents et plusieurs thésards et post-docs (6 actuellement). Des réunions de travail hebdomadaires sont organisées par l'équipe, qui participe également à de nombreux groupes de travail dans l'Institut. Par ailleurs, l'équipe est régulièrement impliquée dans plusieurs projets Européens. En particulier, la thèse s'insère dans le cadre du projet "Turbulent and Neoclassical Transport in tokamak plasmas", piloté par Xavier Garbet et récemment sélectionné par le programme "Enabling Research" du consortium Européen EUROfusion.

Enfin, nous organisons toutes les années impaires le "Festival de Théorie", manifestation scientifique internationale qui regroupe pendant 4 semaines, au début de l'été à Aix-en-Provence, des théoriciens de la fusion et de la physique du Soleil et de la Terre. Les discussions sur les propriétés d'auto-organisation de la turbulence qui y sont régulièrement menées par des experts internationaux des plasmas et des fluides neutres fourniront un cadre propice à la confrontation des résultats de la thèse sur les bifurcations induites par les collisions à d'autres domaines de la physique.