



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

Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique
<http://www-fusion-magnetique.cea.fr>

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



SUJET DE THÈSE 2024

Etude gyrocinétique des bifurcations du transport turbulent dans les plasmas de tokamaks : rôle des interactions plasma-neutres

Gyrokinetic study of turbulent transport bifurcations in tokamak plasmas: impact of plasma-neutral interactions

Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse : Yanick Sarazin	e-mail :	yanick.sarazin@cea.fr
	page web :	
	téléphone :	+33 (0)4 42 25 48 03
	secrétariat :	+33 (0)4 42 25 62 22 / 45 55
Équipe de Recherche : DRF/IRFM/SPPF/GTSN (Groupe Théorie et Simulation Numérique)		

Nom du Directeur de thèse : Guilhem Dif-Pradalier	e-mail :	guilhem.dif-pradalier@cea.fr
	page web :	
	téléphone :	+33 (0)4 42 25
	secrétariat :	+33 (0)4 42 25 62 22 / 45 55
Équipe de Recherche : DRF/IRFM/SPPF/GTSN (Groupe Théorie et Simulation Numérique)		

Argumentaire / résumé :

Le transport turbulent est la principale cause de la dégradation du confinement dans les plasmas de tokamaks. Expérimentalement, on observe des bifurcations spontanées de la turbulence vers des régimes de faible intensité, caractérisés par un transport réduit et de forts gradients de matière et/ou de chaleur souvent localisés à la périphérie du plasma confiné. Ces régimes de confinement optimisé sont ceux qui devraient permettre à ITER d'atteindre ses objectifs les plus ambitieux.

Si des éléments fondamentaux de compréhension de ces mécanismes de bifurcation ont été identifiés – comme le rôle clé joué par les écoulements à grande échelle qui tendent à cisailer les cellules turbulentes – aucune modélisation ab initio n'est pour l'heure capable de prédire leurs seuils d'apparition. Outre la complexité topologique de cette région périphérique, cela tient notamment à la richesse des processus physiques où l'interaction du plasma avec les particules neutres – nées de l'interaction plasma-paroi – est supposée impacter fortement l'auto-organisation de la turbulence.

Dans le cadre de collaborations nationales et internationales, l'IRFM développe depuis plus de 20 ans le code GYSELA pour modéliser le transport et la turbulence dans le cadre de l'approche gyrocinétique, considérée "ab initio" ou "premiers principes". Les développements récents le rendent opérationnel pour aborder ces questions critiques pour l'avenir de la fusion, notamment ses capacités à découpler les dynamiques de la densité et de la température et à prendre en compte l'interaction plasma-paroi. L'ajout d'un modèle fluide de transport de neutres conduira à des simulations à l'état de l'art dans le domaine. Le travail de thèse s'attachera à décrire et comprendre le rôle des neutres dans les différents régimes d'auto-organisation de la turbulence et des écoulements, et à explorer les mécanismes de bifurcation en lien avec les dépendances paramétriques observées expérimentalement.

Résumé du sujet en Français :

La turbulence et le transport associé dégradent le confinement des plasmas de tokamaks, diminuant les performances attendues en terme de gain énergétique. Expérimentalement, plusieurs régimes de confinement amélioré sont observés, notamment ceux où le transport turbulent est fortement réduit à la périphérie du plasma. Ces barrières de transport externes conduisent à de forts gradients de densité et/ou de température qui maximisent le contenu énergétique du plasma confiné. Ces bifurcations spontanées résultent de l'auto-organisation de la turbulence soumise au forçage de différentes sources, de particules et de chaleur. Leur mécanisme est mal compris, du fait notamment de la complexité topologique de cette région externe et de la richesse des probables processus en jeu. Ces régimes représentent une chance majeure pour atteindre les meilleures performances dans les plasmas d'ITER. Il est donc crucial de gagner en compréhension pour pouvoir prédire leurs seuils de transition et si possible les contrôler.

La thèse proposée s'inscrit dans ce cadre. Elle repose sur la modélisation numérique à l'état de l'art des plasmas de fusion, la description gyrocinétique à cinq dimensions dans l'espace des phases. Les développements récents permettent de traiter séparément les transports de matière et de chaleur dans cette région périphérique. Reste à implémenter une source de particules neutres qui, par ionisation, constituera le forçage en densité du plasma. On sait d'ores et déjà, grâce notamment à des modèles réduits, que cette source dynamique joue un rôle crucial dans les processus d'auto-organisation. L'objectif du travail de thèse est de coupler un modèle fluide de neutres aux électrons et ions décrits cinétiquement, et d'étudier leur impact sur le transport turbulent et son auto-organisation grâce à des simulations HPC (high performance computing) avec le code GYSELA.

Abstract in English:

Turbulence and associated transport degrade the confinement of tokamak plasmas, reducing the expected performance in terms of energy gain. Experimentally, several regimes of improved confinement have been observed, notably those where turbulent transport is strongly reduced at the plasma edge. These external transport barriers lead to strong density and/or temperature gradients that maximize the energy content of the confined plasma. These spontaneous bifurcations result from the self-organization of turbulence under the forcing of different sources, of particles and heat. Their mechanism is poorly understood, not least because of the topological complexity of this outer region and the wealth of probable processes at play. These regimes represent a major opportunity for achieving the best performance in ITER plasmas. It is therefore crucial to gain a better understanding of them, so as to be able to predict their transition thresholds and, if possible, control them.

The proposed PhD thesis falls within this framework. It is based on state-of-the-art numerical modeling of fusion plasmas, the five dimensional (in phase space) gyrokinetic approach. Recent developments have made it possible to treat self-consistently both transport of matter and heat in this peripheral region. What remains to be done is to implement a source of neutral particles which, through ionization, will constitute the plasma's density forcing. We already know, thanks in particular to reduced models, that this dynamic source plays a crucial role in self-organization processes. The aim of this thesis work is to couple a reduced fluid model of neutrals to kinetically described electrons and ions, and to study their impact on turbulent transport and self-organization using high-performance computing (HPC) simulations with the GYSELA code.

Formation recherchée / recommandée : Physique des plasmas, Simulations Numériques

Intitulé du master préconisé : Sciences de la Fusion, GI-PLATO, PPF

Description détaillée du sujet :

Contexte et enjeux:

La voie la plus prometteuse pour produire de l'électricité grâce à la fusion de noyaux légers repose sur le confinement magnétique du plasma. Le tokamak, concept inventé par les Russes en 1950, est la machine retenue pour le projet international ITER. Ses performances en termes de gain énergétique requièrent de maximiser le triple produit de la densité du plasma, de sa température et de son temps de confinement. Ce dernier mesure la qualité d'isolation thermique de la configuration magnétique, caractérisée par des surfaces magnétiques en forme de tores emboîtés. La dégradation du confinement de l'énergie du plasma est principalement due à la turbulence à petite échelle qui se développe dans ces machines. Cette turbulence est le fruit d'instabilités engendrées par les forts gradients inévitablement présents dans ces machines, entre le cœur du plasma chaud et relativement dense, et sa périphérie en comparaison plus froide et diluée. Elle est sujette à une auto-organisation qui reste difficile à prédire, bien qu'essentielle à l'optimisation des performances. En particulier, de nombreux régimes de bifurcation ont été observés expérimentalement au bord depuis le fameux "mode H" (pour "High confinement") découvert sur le tokamak ASDEX en 1982. Ils se caractérisent par une barrière de transport sur la densité et/ou la température, qui se traduit par un raidissement des profils correspondants et une augmentation du contenu énergétique global du plasma. Comprendre, prédire et si possible contrôler ces bifurcations reste un enjeu d'actualité car les plasmas les plus performants d'ITER sont attendus pour de tels régimes. Des mécanismes fondamentaux à l'origine de cette auto-organisation ont pu être mis en évidence, liés en particulier à la réduction de la turbulence par des écoulements à grande échelle et cisailés. Pour autant, aucune modélisation "premiers principes" n'est encore parvenue à reproduire la dynamique de ces bifurcations, ni en prédire les seuils d'apparition.

Une des difficultés tient à la localisation même de ces barrières de transport, en périphérie du plasma confiné. Cette région est en effet à l'interface des surfaces magnétiques fermées (du cœur confiné) et ouvertes (issues de l'interaction avec les parois matérielles du tokamak). C'est également le lieu d'interaction du plasma avec les particules neutres, qui conduisent pour le plasma à une source de particules (ionisation), une perte de quantité de mouvement (échange de charge) et d'énergie (rayonnement). Bien décrire cette région requiert la description globale du plasma : la partie *confinée de cœur*, la *région externe* où les lignes de champ magnétiques interceptent des éléments solides de paroi et la *périphérie de bord*, lieu de confluence de ces deux physiques, où le plasma interagit avec des particules neutres et où de forts gradients se développent. Très peu (≤ 2) de codes de par le monde sont capables d'embrasser l'ensemble de ces processus physiques. Avec la prise en compte de l'interaction entre plasma et particules neutres, GYSELA, développé à l'IRFM depuis une vingtaine d'années, deviendrait l'un d'eux, ***ouvrant ainsi la possibilité d'accéder à une description "ab initio" de bifurcations de transport***. Nous avons récemment montré que la prise en compte de la région périphérique, en dépit d'une modélisation simplifiée, permettait de retrouver qualitativement certaines des observations expérimentales essentielles à ces bifurcations, dont la mise en place d'écoulements structurés [DifPradalier2022]. Dans le cadre d'une thèse qui se termine, nous avons levé les simplifications les moins justifiées et implémenté la physique de l'interaction plasma-paroi : déformation des fonctions de distribution au voisinage d'une surface matérielle et développement d'un champ électrique confinant qui se traduit notamment par l'accélération des ions du plasma à des vitesses soniques – analogue au mécanisme de détente d'un gaz dans le vide – et au piégeage des électrons lents [Munschy2023].

L'objectif de la thèse est d'implémenter un modèle de neutres dans GYSELA, à l'instar de celui considéré dans des modèles réduits fluides, et d'étudier l'impact des interactions plasma-neutres sur la dynamique de la turbulence et du transport associé. La prise en compte de cette source d'ionisation, périphérique alors que le dépôt de puissance est central, permettra de découpler le transport de particules de celui de la chaleur dans les simulations. Ce point est crucial pour avoir accès à la richesse des bifurcations observées expérimentalement. Le rôle de la dynamique non-linéaire de la source d'ionisation sur la turbulence sera particulièrement regardée.

Description de l'outil numérique :

Du fait des faibles densités et fortes températures des plasmas de fusion, l'hypothèse de fonctions de distribution Maxwelliennes est souvent peu justifiée. Par ailleurs, la physique de l'interaction plasma-paroi est intrinsèquement cinétique. Pour ces raisons, l'outil principal de cette étude sera le code gyrocinétique GYSELA à 5 dimensions dans l'espace des phases. Il résout l'équation gyrocinétique (de type Vlasov) pour les électrons et les ions du plasma dans la configuration magnétique d'un tokamak. Une équation de Poisson, couplée à l'évolution des fonctions de distribution de chaque espèce définissant la densité de charges, permet de calculer le champ électrique à chaque pas de temps. Cette version amplement testée a prouvé sa capacité à simuler une turbulence électrostatique dans un plasma magnétisé. Le forçage du système se réalise via le couplage à une source de chaleur imposée, localisée dans le cœur du plasma confiné, comme attendu dans une machine de fusion.

Contenu du travail :

Dans un premier temps, le travail de thèse consistera à implémenter une source d'ionisation non-linéaire, produit des densités d'électrons, de particules neutres et de leur taux d'ionisation, ce dernier étant fonction de la température électronique. Le modèle fluide dynamique que nous envisageons pour les particules neutres est dérivé de celui actuellement implémenté dans le code tridimensionnel SOLEDGE3X, qui modélise le plasma via une description fluide [Bufferand2022]. L'équation de continuité est résolue en considérant une source d'injection de gaz et un puits associé au piégeage dans le mur. Dans le cadre d'hypothèses raisonnables, on peut montrer que leur flux tridimensionnel est la somme d'un terme de diffusion non-linéaire – qui résulte du processus d'échange de charge (la longueur caractéristique d'échange de charge est très petite devant la longueur d'ionisation dans le cas général), et d'un terme convectif proportionnel à la vitesse des ions [Quadri2023]. Le stage de master 2 préparatoire à la thèse permettra de se familiariser avec cette physique et les aspects numériques en procédant à l'implémentation d'un terme source analogue dans le code cinétique VOICE, similaire au code GYSELA dans sa structure.

L'exploitation de cet outil au travers de simulations turbulentes constituera le cœur du travail de thèse. Différents degrés de raffinements du modèle de neutres pourront être introduits pas-à-pas pour quantifier leur impact sur la turbulence. Deux points seront particulièrement regardés car essentiels à la dynamique des bifurcations : le découplage entre les transports de matière et de chaleur selon les régimes en densité et en température, et les mécanismes d'établissement du champ électrique radial, mesure de l'intensité de l'écoulement cisailé dans le plasma périphérique et prélude de bifurcations de transport. Documentés expérimentalement mais jamais décrits dans leur intimité, ces deux points seront

particulièrement intéressants à comparer finement aux mesures expérimentales de WEST et d'autres tokamaks.

Encadrement :

L'encadrement sera assuré par Guilhem Dif-Pradalier et Yanick Sarazin de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM) du CEA de Cadarache. Nous sommes tous les deux experts en turbulence plasma et co-développeurs du code GYSELA. Des interactions régulières avec Patrick Tamain et Nicolas Rivals sont également prévues pour profiter de leur expertise sur la physique du plasma de bord, des interactions plasma-neutres et de leurs simulations avec le code fluide SOLEDGE3X. La thèse s'inscrit aussi dans le cadre de la collaboration européenne TSVV#4 ("Theory, Simulation, Verification and Validation" project devoted to "Plasma Particle/Heat Exhaust: Gyrokinetic/Kinetic Edge Codes") pilotée par EUROfusion.

Références :

- [Bufferand2022] H. Bufferand et al. "Implementation of multi-component Zhdanov closure in SOLEDGE3X", Plasma Phys. Controll. Fusion 64 (2022) 055001
- [DifPradalier2022] G. Dif-Pradalier et al., "Transport barrier onset and edge turbulence shortfall in fusion plasmas", Comm. Phys 5 (2022) 229
- [Munschy2023] Y. Munschy et al., "Kinetic plasma-wall interaction using immersed boundary conditions", submitted to Nucl. Fusion (2023)
- [Quadri2023] V. Quadri, "Interaction turbulence-neutres et impact sur les régimes en densité dans le plasma de bord des tokamaks", Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, 2021-2024

Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :

- Nom des collaborateurs: Dr. Yannick Marandet
- Organisme/Société: CNRS, PIIM
- Raison de la collaboration:
Yannick Marandet est un expert de la physique des interactions entre le plasma de bord des tokamaks et les particules neutres. Il est notamment le principal expert du code Européen EIRENE de transport des neutres et de leurs interactions avec les ion et électrons du plasma.

- Nom des collaborateurs: Dr. Patrick Tamain et Nicolas Rivals
- Organisme/Société: CEA, IRFM
- Raison de la collaboration:
Patrick Tamain et Nicolas Rivals sont des experts de la physique du plasma de bord et de son interaction avec les neutres dans les tokamaks. Ils sont en outre co-développeurs et utilisateurs du code SOLEDGE3X qui modélise le plasma dans une description fluide.