



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 2022

Interaction entre électrons découplés et plasmas froids : application à l'amortissement des disruptions des plasmas de tokamaks.

Interaction between runaway electrons and cold plasmas: application to disruption mitigation in tokamaks

Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse : Cédric Reux	e-mail : cedric.reux@cea.fr
	page web : irfm.cea.fr
	téléphone : +33 (0)4 42 25 29 56
	secrétariat : +33 (0)4 42 25 42 95
Équipe de Recherche : Groupe Pilotage et Alimentation en Matière (IRFM/STEP/GPAM)	

Nom du Directeur de thèse : Peter Beyer	e-mail : peter.beyer@univ-amu.fr
	page web :
	téléphone :
	secrétariat :
Équipe de Recherche :	

Résumé du sujet en Français :

Les disruptions sont des interruptions brutales des décharges plasmas dans les tokamaks. Elles sont dues à des instabilités menant à la perte de l'énergie thermique et de l'énergie magnétique du plasma sur des laps de temps de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes. Les disruptions peuvent générer des faisceaux d'électrons relativistes dits *découplés* qu'il est important de contrôler ou d'arrêter pour assurer une opération fiable des futurs tokamaks tels qu'ITER. Le sujet proposé se concentre sur l'amortissement des électrons découplés par injection massive de matière et en particulier l'interaction entre les électrons découplés et le plasma de fond froid qui les accompagne pendant toute la phase de disruption. Ce plasma froid est entretenu par les électrons découplés eux-mêmes via leurs collisions avec le gaz neutre présent dans la chambre à vide. Un plasma froid avec suffisamment peu d'impuretés lourdes (argon, néon...) permet de dissiper les électrons découplés sans dommage aux parois via la combinaison d'une forte instabilité magnétohydrodynamique et d'une absence de régénération des électrons découplés lors de leur dissipation finale. Ce scénario récemment mis en évidence sur les tokamaks JET et DIII-D est prometteur pour ITER. Il est donc proposé pour ce sujet de thèse de commencer par mener une caractérisation expérimentale du plasma de fond dans le cas des injections de deutérium (température, composition en impuretés, densité, densité de neutres). Cette caractérisation devra s'accompagner de modélisation des mesures effectuées. Il sera ensuite proposé d'approfondir les modèles de transport utilisés pour décrire ce plasma froid, et enfin de bâtir un nouveau modèle traitant de façon auto-cohérente l'interaction entre les électrons découplés et le plasma pour extrapoler à ITER.

Résumé du sujet en Anglais :

(traduction du texte précédent)

Formation recherchée / recommandée : Master 2 de physique / Ingénieur Grande Ecole

Intitulé du master préconisé : Physique des plasmas chauds ou froids, modélisation en physique

Description détaillée du sujet :

Les disruptions sont des arrêts brutaux et prématurés des décharges plasmas dans les tokamaks. Elles ont pour origine des instabilités magnétohydrodynamiques à grande échelle qui mènent à la perte totale de l'énergie thermique et magnétique du plasma sur une échelle de temps de quelques dizaines de millisecondes. Cette énergie est dissipée dans les éléments du tokamak de trois manières : des charges thermiques sur les composants face au plasma, des forces électromagnétiques dans les structures et la formation de faisceaux d'électrons relativistes dits découplés qui viennent heurter les éléments face au plasma. Les impacts de ces électrons qui peuvent porter plus de la moitié de l'énergie magnétique initiale du plasma peuvent mener à des endommagements localisés des éléments internes à la chambre à vide. Afin de limiter au maximum les conséquences des disruptions sur la fiabilité et la disponibilité des futurs réacteurs (dont ITER), il est donc indispensable de comprendre la physique impliquée dans leur déroulement, hautement non-linéaire. La thèse sera principalement consacrée à l'étude de l'interaction entre les électrons découplés et le plasma de fond froid (dit « plasma compagnon ») qui les accompagne lors de la disruption. Ce plasma dont la température est estimée entre quelques eV et quelques dizaines d'eV est généré par les collisions entre les électrons découplés et le gaz neutre présent dans la chambre suite à la disruption. Les caractéristiques de ce plasma compagnon (profils de température et de densité, contenu en espèces neutres) et sa composition ne sont encore qu'imparfaitement connus. Or la dynamique du faisceau d'électrons découplés dépend fortement du plasma compagnon. Il a en particulier été démontré précédemment que ce plasma pouvait être sensiblement plus chaud sur des grands tokamaks comme JET [1] et influait sur la dynamique du faisceau d'électrons [2]. En outre, il a été découvert plus récemment qu'une injection massive de deutérium par injection d'éclats de glaçons permettait de dissiper de façon totalement bénigne le faisceau d'électrons découplés [4,5]. Ce résultat est très prometteur pour ITER et est l'objet principal de la thèse.

Dans un premier temps, il s'agira de caractériser expérimentalement le plasma compagnon avant et après l'injection de deutérium. Il est actuellement postulé que le plasma compagnon subit une expulsion de ses impuretés lorsque le deutérium y pénètre, ce qui conduit à une baisse de sa température menant à une recombinaison au moins partielle. Des impuretés restent toutefois présentes et peuvent se manifester lors de la dissipation finale du faisceau d'électrons. Il s'agira donc de caractériser le contenu en impuretés du plasma pendant ces deux phases ainsi que de comprendre la phase d'expulsion pendant laquelle les impuretés sont évacuées du plasma. Ce travail demandera d'interpréter les observations expérimentales sur JET et WEST, notamment en utilisant des techniques de spectroscopie basse température. L'étudiant pourra également s'appuyer sur des travaux antérieurs de caractérisation du plasma compagnon [1]. Enfin, la possibilité d'effectuer des mesures de densité électronique de précision (densités très basses) afin de caractériser le degré de recombinaison du plasma compagnon sera étudiée. En fonction des plannings expérimentaux des tokamaks européens impliqués sur le sujet, l'étudiant pourra être amené à prendre part aux expériences sur les tokamaks WEST (France), JET (UK), TCV (Suisse), AUG (Allemagne) afin de compléter sa base d'observations. Une collaboration avec le laboratoire PIIM (Aix-Marseille Université) pour la spectroscopie est également envisagée.

Dans un deuxième temps, le plasma compagnon sera modélisé en utilisant des codes existants, dont celui développé par les équipes de l'Université de Californie - San Diego (UCSD) et du tokamak DIII-D [6,7]. Ce code est un code de transport 1D qui prend en compte le rayonnement de raie des différentes

impuretés présentes dans le plasma. Il sera adapté pour pouvoir être utilisé dans des conditions où ce plasma devient très froid malgré la présence d'électrons découplés. L'étudiant cherchera donc à identifier les mécanismes pouvant conduire à l'expulsion des impuretés du plasma suite à l'injection de deutérium et effectuera des comparaisons avec les observations expérimentales. Une attention particulière devra être apportée à l'utilisation de bases de données de physique atomique dont les données à basse température peuvent varier selon les bases et grandement influencer les résultats du code. Des améliorations du code pourront être proposées par l'étudiant afin de prendre en compte des phénomènes qui pourraient avoir été mis en évidence dans la première partie de la thèse consacrée à l'analyse expérimentale. L'étudiant pourra développer son propre modèle en fonction des résultats obtenus avec les codes existants, en particulier en ce qui concerne les rayonnements non thermiques émis par l'interaction directe entre les électrons découplés et le plasma compagnon. Ceux-ci sont en effet peu pris en compte dans les codes actuels, et les observations expérimentales récentes montrent que la puissance rayonnée générée par ces interactions constitue une partie non négligeable des pertes en énergie du faisceau d'électrons [8]. Ce rayonnement qui n'est pas émis par le plasma à l'équilibre radiatif domine en effet la puissance rayonnée par le système électrons découplés + plasma compagnon pendant la phase d'expulsion des impuretés. Les résultats seront comparés avec les mesures expérimentales.

Enfin, dans un dernier temps, ces modèles seront étendus à la phase finale de terminaison du faisceau d'électrons découplés, lorsque ceux-ci sont dissipés à la paroi et qu'un plasma thermique se reforme à nouveau. Cette phase est encore très mal comprise, mais reste néanmoins cruciale car c'est à ce moment qu'une régénération d'électrons découplés peut se produire si le contenu en impuretés est trop important [5]. L'étude de cette phase qui comprend également des phénomènes magnétohydrodynamiques se fera en collaboration avec le projet européen TSVV 9 (*Dynamics of Runaway Electrons in Tokamak Disruptions*) dont le responsable est un des membres de l'équipe disruptions de l'IRFM. Cette troisième partie de la thèse se tournera également vers l'extrapolation à ITER. Il est en effet crucial de pouvoir déterminer si la méthode d'injection massive de deutérium est applicable aux futures machines qui seront davantage susceptibles de générer des faisceaux d'électrons découplés pendant les disruptions. Un suivi de la thèse par des experts des disruptions ITER sera également proposé tout au long des études afin de bénéficier de l'étroite collaboration qui a été mise en place ces dernières années.

Le sujet permettra donc à l'étudiant de se former à l'analyse de données, de s'intéresser à des physiques variées : physique atomique, spectroscopie, plasmas froids. Il lui permettra également de se former à la modélisation numérique. La thèse sera par essence tournée vers l'international, puisque l'étudiant sera impliqué dans des collaborations européennes ou avec des collègues américains, et aura l'opportunité de participer à des expériences sur d'autres tokamaks en Europe. L'équipe disruptions de l'IRFM est reconnue sur le plan international, et l'étudiant bénéficiera donc d'une forte expertise locale. Les perspectives d'après-thèse sont multiples, que ce soit dans la fusion ou vers l'industrie, via les compétences acquises en analyse de données ou en plasmas froids.

[1] Sridhar et al. 2020 Nucl. Fusion 60 096010.

[2] Reux et al., APS conference 2017

[3] Bandaru et al., APS conference 2019

[4] Paz-Soldan et al., Plasma Phys. Control. Fusion 61 (2019) 054001

[5] Reux et al., Phys. Rev. Lett. 126, 175001 – Published 30 April 2021

[6] Hollmann et al 2019 Nucl. Fusion 59 106014

[7] Hollmann et al., Physics of Plasmas 27, 042515 (2020)

[8] Garland et al., Physics of Plasmas 27, 040702 (2020)

Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :

- Nom du collaborateur: Michael Lehn
- Organisme/Société: ITER Organization
- Raison de la collaboration:
Les disruptions sont une des préoccupations majeures d'ITER avant son démarrage. Une task force consacrée aux disruptions a été mise en place il y a quelques années pour se préparer au mieux aux disruptions qui ne manqueront pas d'arriver sur ITER. Une précédente thèse sur les runaways avait été suivie par M. Lehn et avait apporté des orientations scientifiques très bénéfiques à l'étudiant. Il est proposé de reconduire ce suivi.

- Nom du collaborateur: Mohammed Koubiti
- Organisme/Société: AMU/PIIM
- Raison de la collaboration:
Le laboratoire PIIM dispose d'une expertise en analyse spectroscopique des plasmas froids qui pourra être mise à contribution dans la caractérisation expérimentale du plasma compagnon.

- Nom du collaborateur: Eric Hollmann
- Organisme/Société: UCSD (San Diego, USA)
- Raison de la collaboration:
Une collaboration a déjà été mise en place lors d'une précédente thèse pour le développement conjoint du code de transport 1D utilisé dans les études du plasma compagnon. Elle a déjà amené à des résultats intéressants et permet de bénéficier de l'expertise en processus de physique atomique possédée par E. Hollmann.