



SUJET DE THÈSE 2021

Contrôle des électrons découplés avec les ondes RF Control of runaway electrons by means of RF waves

Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse :	e-mail :	yves.peysson@cea.fr
	page web :	www.cea.fr/drf/Pages/La-DRF/Instituts/institut-irfm.aspx
	téléphone :	+33 (0)4 42 25 62 90
	secrétariat :	+33 (0)4 42 25 62 22
Équipe de Recherche : DRF/IRFM/SPPF/GMICS		

Nom du Directeur de thèse :	e-mail :	yves.peysson@cea.fr
	page web :	www.cea.fr/drf/Pages/La-DRF/Instituts/institut-irfm.aspx
	téléphone :	+33 (0)4 42 25 62 90
	secrétariat :	+33 (0)4 42 25 62 22
Équipe de Recherche : DRF/IRFM/SPPF/GMICS		

Résumé du sujet en Français :

Les électrons découplés dépassant plusieurs dizaines de MeV créés lors d'une disruption majeure d'un plasma de tokamak représentent une menace potentielle importante, en particulier pour le réacteur ITER. Dans ce contexte, différentes solutions sont envisagées pour prévenir leurs formations, ou de les ralentir si le faisceau d'électrons est déjà existant. Parmi celles-ci, l'utilisation des ondes radio-fréquence (RF) est potentiellement très attractive, mais n'a fait jusqu'à présent que l'objet de peu d'investigations. L'objectif de la thèse est donc d'estimer le potentiel des ondes RF pour contrôler un faisceau d'électrons découplés. Le contexte scientifique est très porteur vu les enjeux, et le travail sera mené dans un cadre de collaborations internationales, tant au niveau européen que mondial avec une équipe ayant une connaissance approfondie du sujet. Le sujet est d'abord numérique (code Fokker-Planck relativiste en 3-D LUKE et tracé de rayon C3PO, code relativiste de rayonnement de freinage R5-X2), avec des comparaisons avec l'expérience sur divers tokamaks, mais comportera aussi des volets théoriques importants, notamment en physique cinétique.

Résumé du sujet en Anglais :

The runaway electrons exceeding several tens of MeV created during a major disruption of a tokamak plasma represent a significant potential threat, in particular for the ITER reactor. In this context, various solutions are envisaged to prevent their formation, or to slow them down if the electron beam is already existing. Among these, the use of radio-frequency (RF) waves is potentially very attractive, but has so far only been the subject of little investigation. The objective of the thesis is therefore to estimate the potential of RF waves to control a beam of runaway electrons. The scientific context is very promising given the challenges, and the work will be carried out within the framework of international collaborations, both at European and global level with a team having in-depth knowledge of the subject.

The subject is first numerical (Fokker-Planck relativistic 3-D LUKE code and C3PO ray tracing, relativistic bremsstrahlung radiation code R5-X2), with comparisons with experience on various tokamaks, but will also include important theoretical aspects, particularly in kinetic physics.

Formation recherchée / recommandée : Physique des plasmas, Electromagnétisme, Numérique

Intitulé du master préconisé : PPF, GI-PLATO

Description détaillée du sujet :

Les électrons découplés post-disruptifs constituent un risque majeur pour le tokamak ITER en fonctionnement nominal (10-15 MA). Avec une énergie de plusieurs dizaines de MeV, le faisceau d'électrons peut conduire à une destruction des objets dans l'enceinte du tokamak. Les calculs cinétiques les plus avancés montrent que l'injection de matière dense (Ar, Ne) sous forme de gaz ou de glaçons pour ralentir le faisceau n'offre pas la garantie d'une efficacité suffisante par rapport au risque : amplification du faisceau par effet d'avalanche par apport d'électrons liés aux atomes de la matière injectée, échelle de temps trop lente (diffusion), inhomogénéité du dépôt de matière réduisant pouvant réduire à néant l'impact sur le faisceau. Dans ce contexte, Les ondes RF peuvent être un outil très utile pour prévenir la formation d'électrons rapides (en phase prédisruptive) et contrôler ceux-ci (une fois la disruption passée). Les avantages potentiels sont : rapidité (la propagation de l'onde étant de l'ordre de la vitesse de la lumière), localisation à partir de l'antenne, pas d'apport d'électrons par une onde RF. Le sujet, qui a fait l'objet de peu d'études jusqu'à présent malgré son importance et le potentiel des ondes RF (travaux menés principalement sur les effets de la MHD et des collisions coulombiennes sur les électrons découplés), consiste à identifier les capacités des ondes à la fréquence hybride basse (LH, 1-5 GHz) et cyclotron électronique (EC, 100 GHz) pour contrôler un faisceau d'électrons rapides: i) prévenir sa formation avec l'onde LH par ralentissement résonnant des électrons rapides, ii) transfert d'énergie perpendiculaire pour un faisceau déjà formé par onde EC, pour forcer la dissipation d'énergie par rayonnement synchrotron. Les avancées attendues portent sur identification des régimes permettant un contrôle des électrons découplés, selon les phases du plasma (pré- ou post-disruption). La nature du travail à réaliser consiste à effectuer des simulations avec des codes numériques existants pour identifier les possibilités de contrôle, effectuer des analyses d'expériences prometteuses sur le sujet (Tore Supra, C-Mod, TCV...), et le cas échéant aborder la théorie cinétique pour améliorer l'opérateur RF dans le code Fokker-Planck. Les travaux menés peuvent conduire à proposer des expériences sur le tokamak WEST. Le travail proposé se déroulera dans un contexte international très actif, notamment au niveau européen (projet eTASC), au sein d'une équipe encadrante ayant une expertise scientifique reconnue sur les ondes RF (nombreuses publications, voir ci-dessous), la maîtrise de codes de calcul, et participant activement aux collaborations internationales, notamment sur ce sujet (direction projet européen sur le sujet pendant 4 ans entre 2014-2018, Enabling Research Eurofusion). Les codes utilisés sont largement validés, et ont été développés à l'IRFM, permettant une maîtrise complète de ceux-ci : couplage d'onde ALOHA (LH), tracé de rayon C3PO (LH, EC), Fokker-Planck 3-D relativiste avec effets d'écran des impuretés Z élevé LUKE (Ohmique, LH, EC,...), rayonnement de freinage R5-X2, simulateur tokamak METIS. L'encadrement sera très disponible sur ce sujet important, dont les retombées peuvent être multiples, à la fois pour la maîtrise des électrons découplés, mais aussi l'interaction onde-électrons rapides en général. Il s'agit d'un sujet de thèse dont les objectifs sont réalisables en 3 ans, offrant des perspectives de collaborations internationales (pendant et en post-doc après la thèse) mais aussi permettant à l'étudiant d'acquérir la maîtrise d'outils et d'environnement numériques modernes, des connaissances théoriques avancées, et de s'intégrer dans un cadre collaboratif international très dynamique.

- Peysson, Y. and Decker, J., Fast electron bremsstrahlung in axisymmetric magnetic configuration, *Phys. Plasmas*, 2008, 15, 9, pp. 092509
- Y Peysson and J Decker and L Morini and S Coda, RF current drive and plasma fluctuations, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2011, 53, pp. 124028,
- Y. Peysson and J.Decker and L. Morini, A versatile ray-tracing code for studying rf wave propagation in toroidal magnetized plasmas, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012, 54, pp. 045003

- *Y. Peysson and J. Decker, Numerical simulations of the radio-frequency driven toroidal current in tokamaks, Fusion Science and Technology, 2014, 65, pp. 22-42*
- *E. Nilsson and J. Decker and N. J. Fisch and Y. Peysson, Trapped-electron runaway effect, Journal of Plasma Physics, 2015, 81, pp. 475810403*
- *J Decker and E Hirvijoki and O Embreus and Y Peysson and A Stahl and I Pusztai and T Fulop, Numerical characterization of bump formation in the runaway electron tail, Plasma Phys. Control. Fusion, 2016, 58, pp. 025016,*
- *Y. Peysson and P. T. Bonoli and J. Chen and A Garofalo and J. Hillairet and M. Li and J. Qian and S. Shiraiwa and J. Decker and B. J. Ding and A. Ekedahl and M. Goniche and X. Zhai, Current Challenges in the First Principle Quantitative Modelling of the Lower Hybrid Current Drive in Tokamaks, EPJ Web of Conferences, 2017, 157, pp. 02007*
- *Y. Peysson and D. Mazon and J.-F. Artaud and A. Ekedahl and L. Delpech and J. Hillairet and T. Hoang and X.L. Zou and WEST Team and X.Y. Bai and Y.P. Zhang and HL-2A Team and K. Krol and J. Bielecki and A. Jardin and M. Scholz and D. Dworak and J. Decker, Lower Hybrid Current Drive in High Aspect Ratio Tokamaks, Journal of Fusion Energy, 2020*

Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :

- Nom du collaborateur: Projet européen eTASC, ITER
- Organisme/Société:
- Raison de la collaboration: