



## SUJET DE THÈSE 2018

### Characterization of hydrogen pellet ablation in the perspective of ITER Caractérisation de l'ablation des glaçons d'hydrogène dans la perspective d'ITER

<b>Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse :</b> Mohammed Koubiti	<b>e-mail :</b>	mohammed.koubiti@univ-amu.fr
	<b>page web :</b>	<a href="http://piim.univ-amu.fr/KOUBITI-Mohammed">http://piim.univ-amu.fr/KOUBITI-Mohammed</a>
	<b>téléphone :</b>	+33 (0)4 91 28 27 21
	<b>secrétariat :</b>	+33 (0)4 91 28 xx xx
<b>Équipe de Recherche : AMU/PIIM (UMR7345)</b>		
Ou (dépend du mode de financement)		
<b>Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse :</b> Ryuich SAKAMOTO	<b>e-mail :</b>	sakamoto@nifs.ac.jp
	<b>page web :</b>	<a href="http://www.nifs.ac.jp/en/helical/hdpprd.html">http://www.nifs.ac.jp/en/helical/hdpprd.html</a>
	<b>téléphone :</b>	+81 572 xx xxx
	<b>secrétariat :</b>	+81 572 58 222
<b>Équipe de Recherche : NINS/NIFS</b>		
<b>Nom du Directeur de thèse :</b> Bernard PÉGOURIÉ	<b>e-mail :</b>	Bernard.pegourie@cea.fr
	<b>page web :</b>	<a href="http://www-irfm.intra.cea.fr/sppf/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_groupe.php?id_groupe=514">http://www-irfm.intra.cea.fr/sppf/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_groupe.php?id_groupe=514</a>
	<b>téléphone :</b>	+33 (0)4 42 25 45 51
	<b>secrétariat :</b>	+33 (0)4 42 25 62 22
<b>Équipe de Recherche : IRFM/SPPF/GDIPP</b>		

#### Résumé du sujet en Français :

L'alimentation en combustible des machines de prochaine génération sera nécessairement faite par injection de glaçons. Cependant, reproduire les conditions régissant la physique de l'alimentation dans ces machines est impossible dans les tokamaks actuels. Les prédictions sont donc essentiellement basées sur des simulations et il est nécessaire de valider les codes d'ablation/déposition aussi soigneusement que possible pour pouvoir accorder à leurs prédictions un degré de confiance suffisant. Une injection de glaçon se compose de deux phases : l'ablation du glaçon et la dérive du nuage de matière ablatée. Si la phase 2 est bien validée, la phase 1 est beaucoup moins bien diagnostiquée : la densité, la température et la dynamique de l'ionisation dans les nuages ont seulement été rarement déterminées, et toujours avec des approximations significatives. Ce projet tend à combler ce vide. Il comprend tout d'abord une composante expérimentale incluant une participation aux campagnes de plusieurs machines, une phase d'interprétation des données récoltées de façon à en extraire les caractéristiques des nuages et leur corrélation avec les caractéristiques de l'injection, enfin la comparaison des résultats avec les prédictions du code d'ablation/déposition HPI2, celui-ci étant modifié si nécessaire pour une meilleure description de la physique des nuages d'ablation.

#### Résumé du sujet en Anglais :

Pellet injection is mandatory for the fueling of next generation devices. But reproducing the corresponding conditions is not possible in present tokamaks. Predictions are exclusively based on modelling and additional validation of the ablation/deposition codes is necessary for reliable extrapolation. Pellet injection is composed of two phases: the pellet ablation and the homogenization of the deposited material. If phase 2 is well validated, phase 1 is less accurately diagnosed: the density, temperature and ionization dynamics in the deposited cloud were only rarely determined, and always with significant approximations. This project aims at filling up this void. It comprises participation to the experimental campaigns on several machines, an interpreting phase for determining the cloudlet physical parameters and their correlation with the injection characteristics, then a comparison with predictions of the ablation/deposition code HPI2, the latter being improved if necessary for a closer description of the physics involved.

**Formation recherchée / recommandée :**

**Intitulé du master préconisé :** Tout M2 de physique générale

### **Description détaillée du sujet :**

Pellet injection is mandatory for the fueling of next generation devices (ITER). Nevertheless, the experimental reproduction of the conditions expected in these devices (shallow penetration – up to the top of the pedestal at best, probably less – the essential part of matter penetration being due to the  $\nabla B$ -induced drift) is not possible in present day tokamaks. Predictions are thus exclusively based on modelling, a consequence of which is that it is mandatory to validate the available ablation/deposition codes as thoroughly as possible. It is only at this price that it will be possible to extrapolate their predictions to reactor-like devices with a high enough degree of confidence.

The physics of particle fueling by pellet injection is composed of two phases: the pellet ablation and the drift of the deposited material down the magnetic field gradient. Phase 2 is relatively well validated from studies performed in different devices (tokamaks and stellarators [1-3], see also corresponding references in [4]). The magnitude of the drift depends on the cloudlet mass and dimensions, which are directly correlated to the ablation rate. Conversely, the ablation (Phase 1) is by far less accurately diagnosed, the simple comparison between the calculated and measured pellet penetrations (which only depends on the integral of the ablation over plasma profiles of roughly similar shapes) being generally used as a criterion. Particularly, the density, temperature and ionization dynamics in the cloudlets – which are the initial parameters of the drift phase – were only rarely determined, and always with significant approximations in the cloud shape and dimensions (see references in [4], [5]).

The aim of this project is to fill up this void, using experiments performed on stellarators (LHD, TJ-II) and tokamaks (WEST / ASDEX-Upgrade). It comprises (1) the installation on the stellarator LHD and the calibration of a newly built dedicated diagnostic (fast camera using different exposure times and filters of several widths around a number of selected wavelengths, with the spectrum in the wavelength domain  $\lambda = 300-700$  nm measured with the same time resolution), (2) the participation to experimental campaigns on LHD for both establishing the diagnostic capabilities and measure ablation clouds the different plasma scenarios available in this machine, then – following the possibilities – to that of TJ-II, WEST and/or ASDEX-Upgrade, (3) the determination of cloudlet physical parameters (dimensions, density and temperature distributions – distribution of the different atomic excited states) through a 3-D radiative transfer calculation in the cloudlet. Special attention will be paid to the modeling of the external part of the cloud where the conditions of Local Thermodynamic Equilibrium are not fulfilled. The method was already demonstrated on a few data from LHD [6], but it is mandatory to improve the diagnostic, extend the database of analyzed pellets (other plasma profiles and additional heating methods...). Result will be the quantitative link between ablation rate, line emission ( $H\alpha$  or other) and cloud dimensions and physical characteristics, as a function of the local plasma and pellet parameters, i.e. the required input for the drift calculation. Moreover, the knowledge of these parameters allows an accurate characterization of the pressure perturbation associated with a pellet injection, which is often associated to the triggering of a magneto-hydrodynamic instability at the plasma edge.

Results of the analysis will be systematically compared with predictions of ablation codes (e.g. [7]) and – if necessary - the physical model used in these codes improved for a closer description of ablation physics, this part being fully integrated in the action launched by the IOS group of ITPA for validating the different pellet ablation deposition codes available. The last step will be the application to ITER and DEMO fueling scenarios, in link with the European Work Program Tritium-Fueling&Vacuum.

Last, it must be underlined that the parameters of pellet ablation clouds are similar to those in White Dwarf atmospheres, and that the present study can be used as a test for the Stark widening models that are used in both domains.

### **References:**

- [1] N. Commaux et al., Nucl. Fusion **50** (2010) 025011
- [2] A. Matsuyama et al., Nucl. Fusion **52** (2012) 123017
- [3] R. Sakamoto et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 063007
- [4] B. Pégourié, Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) R87
- [5] M. Goto et al., Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) 1163
- [6] B. Pégourié et al., 43<sup>rd</sup> EPS Conf. on Plasma Physics, Leuven, P5.002
- [7] B. Pégourié et al., Plasma Phys. Control. Fusion **47** (2005) 17

L'alimentation en combustible des machines de prochaine génération (ITER) sera nécessairement faite par injection de glaçons. Cependant, reproduire les conditions régissant la physique de l'alimentation dans ces machines (faible pénétration – au mieux jusqu'au sommet du piédestal, probablement moins – l'essentiel de la pénétration étant liée à la dérive associée au gradient de champ) est impossible dans les tokamaks actuels. Les prédictions sont donc essentiellement basées sur des simulations. Il est donc nécessaire de valider les codes d'ablation/déposition aussi soigneusement que possible, car c'est seulement à ce prix qu'il sera possible d'accorder à leurs prédictions aux réacteurs un degré de confiance suffisant.

La physique de l'alimentation par injection de glaçons se compose de deux phases : l'ablation du glaçon et la dérive du nuage de matière ablatée le long du gradient de champ magnétique. La Phase 2 (dérive) est relativement bien validée par plusieurs études menées sur différentes machines (tokamaks et stellarators [1-3], voir aussi les références sur ce sujet dans [4]). L'importance de cette dérive dépend de la masse et des dimensions du nuage, lesquelles sont directement corrélées au taux d'ablation. A l'opposé, l'ablation (Phase 1) est beaucoup moins bien diagnostiquée, la simple comparaison entre les pénétrations calculée et mesurée (qui résultent d'une intégrale de l'ablation sur des profils plasma tous de formes plus ou moins similaires) étant généralement utilisée comme critère. En particulier, la densité, la température et la dynamique de l'ionisation dans les nuages – qui sont la condition initiale de la phase de dérive – ont seulement été rarement déterminées, et toujours avec des approximations significatives pour ce qui concerne la forme et les dimensions des nuages (références dans [4], [5]).

Le propos de ce projet est de combler ce vide à partir d'expériences menées sur des machines de différents types : stellarator (LHD / TJII) et tokamak (WEST / ASDEX-Upgrade). Il comprend (1) l'installation sur le stellarator LHD et la calibration d'un diagnostic dédié nouvellement construit (caméra rapide utilisant plusieurs temps d'exposition et munie de filtres de différentes largeurs autour de longueurs d'ondes spécifiques, plus le spectre dans la zone  $\lambda = 300-700$  nm mesuré avec la même résolution temporelle), (2) la participation aux campagnes expérimentales de LHD pour vérifier les capacités dudit diagnostic et mesurer les caractéristiques des nuages d'ablation pour les différents scénarios plasma utilisés sur cette machine, puis – selon les possibilités – à celles de TJII, WEST et/ou ASDEX-Upgrade, (3) la détermination des paramètres physiques du nuage (dimensions, distributions de densité et température – distribution des différents états d'excitation des atomes) au moyen d'un calcul de transfert radiatif 3-D dans le nuage. Une attention particulière sera apportée à la partie externe du nuage où les conditions de l'Equilibre Thermodynamique Local ne sont pas remplies. La méthode a déjà été démontrée sur quelques données de LHD [6], mais il est impératif d'améliorer le diagnostic, d'étendre la base de données (sur d'autres profils de plasma et d'autres méthodes de chauffage...). Le résultat de l'analyse est le lien quantitatif entre le taux d'ablation, l'émission des raies ( $H\alpha$  ou autre) et les dimensions et caractéristiques physiques du nuage, en fonction des paramètres locaux du plasma et du glaçon, c'est-à-dire toutes les quantités nécessaires au calcul de la dérive. De plus, la connaissance de ces paramètres permet de caractériser précisément la perturbation de pression associée à l'injection du glaçon, souvent associée au déclenchement d'une instabilité magnétohydrodynamique au bord du plasma.

Les résultats de cette analyse seront systématiquement comparés aux prédictions de codes d'ablation (e.g. [7]) et – si nécessaire – le modèle physique utilisé dans ces codes sera amélioré pour une meilleure description de la physique de l'ablation, cette partie étant menée en lien étroit avec l'action lancée par le groupe IOS de l'ITPA dans le but de valider les différents codes d'ablation/déposition disponibles.

La dernière étape sera de tirer les conséquences de ces résultats pour les scénarios d'alimentation d'ITER et de DEMO, en lien avec le Work Program européen Tritium-Fueling&Vacuum.

Enfin, on doit souligner que les paramètres des nuages d'ablation des glaçons sont similaires à ceux des atmosphères de Naines Blanches, et que la présente étude peut être utilisée pour tester les modèles d'élargissement Stark utilisés dans ces deux domaines.

#### **Références:**

- [1] N. Commaux et al., Nucl. Fusion **50** (2010) 025011
- [2] A. Matsuyama et al., Nucl. Fusion **52** (2012) 123017
- [3] R. Sakamoto et al., Nucl. Fusion **53** (2013) 063007
- [4] B. Pégourié, Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) R87
- [5] M. Goto et al., Nucl. Fusion **49** (2007) 1163
- [6] B. Pégourié et al., 43<sup>rd</sup> EPS Conf. on Plasma Physics, Leuven, P5.002

**Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :**

Les collaborations avec le NIFS (R. Sakamoto) et le PIIM (M. Koubiti) sont permanentes. La première dans le cadre d'un accord d'Institut à Institut, la seconde dans le cadre de la fédération de Recherche sur la Fusion Magnétique.

Celles-ci-dessous sont acquises sur le principe, mais ne seront effectives qu'après validation des capacités du nouveau diagnostic comme indiqué dans le descriptif de la thèse.

- Nom du collaborateur: P. T. Lang
- Organisme/Société: IPP Garching (ASDEX-Upgrade)
- Nom du collaborateur: K. Mc Carthy
- Organisme/Société: CIEMAT (TJ-II)
- Raison de la collaboration:  
Etude de la physique de l'alimentation en combustible des machines à fusion par injection de glaçons. Il s'agit là des principales machines disposant de ce système et offrant un large spectre de scénarios plasma (densité, méthode de chauffage...)