

Titre en français : Caractérisation thermique des composants ITER-grade du divertor de WEST : étude du vieillissement des composants et des dépôts surfaciques

Titre en anglais : Thermal characterisation of ITER-grade components in the WEST divertor: study of component ageing and surface deposits

Nom du directeur de thèse : Jean-Laurent Gardarein

Tel : +334 91 10 68 86

E-Mail : jean-laurent.gardarein@univ-amu.fr

Co-encadrants : Jonathan Gaspar & Fabrice Rigollet

Tel : +334 91 10 68 86

E-Mail : jonathan.gaspar@univ-amu.fr / fabrice.rigollet@univ-amu.fr

Laboratoire : IUSTI

Financement : demandé

Type de financement : Ministère

Résumé en français :

Les recherches menées pour développer la fusion thermonucléaire contrôlée comme nouvelle source d'énergie utilisent des dispositifs expérimentaux appelés 'tokamaks'. Dans ce type de machine, la matière est portée à haute température (plasmas) en étant confinée par des champs magnétiques. L'interaction du plasma avec les parois de la chambre à vide des tokamaks induit de hauts flux de chaleur allant jusqu'à 10MW/m² en régime stationnaire et parfois plus pendant de brèves phases transitoires. Les flux de chaleur associés aux interactions entre le plasma et les composants induisent des dégradations et modification des matériaux constituant les composants.

Dans ce contexte, le tokamak « WEST » (W Environment in Steady state Tokamak) s'inscrit comme une plateforme d'essais pour étudier l'interaction du plasma avec les composants face au plasma (CFP), plus particulièrement ceux qui seront utilisés dans le tokamak international ITER [1]. Lors des différentes campagnes expérimentales de WEST, différentes dégradations des CFP ont été observées [2]. Ces dégradations peuvent prendre différentes formes, comme des micro ou macro-fissures ou encore l'inclusion de nano-bulles de vide dans les matériaux, pouvant réduire les capacités d'extraction de la chaleur des composants en raison d'une dégradation de la conductivité thermique. Un autre type de dégradation possible est l'érosion de matière et la re-déposition locale ou non de celle-ci sur d'autres composants. Ce type de dégradation bien connue dans les anciennes machines en carbone a également été observé lors de la campagne expérimentale de 2023, caractérisée par l'apparition de nombreux dépôts surfaciques sur les composants [3]. Cette campagne s'est terminée avec la répétition d'un choc forte densité pour atteindre, sur les CFP de technologie ITER placé dans le divertor de WEST, des fluences comparables à celles attendues pour un choc dans des conditions ITER [4]. Lors de cette campagne « forte fluence », l'apparition de nombreux dépôts en surface des CFP a été observée. Ils présentent des propriétés thermiques inconnues mais probablement dégradées, c'est-à-dire une faible diffusivité et/ou un faible contact thermique avec le CFP.

Par ailleurs, ces derniers ont fortement impacté la campagne expérimentale par leur détachement des CFP et leur entrée dans le cœur du plasma induisant son arrêt prématuré.

Le travail de thèse vise à améliorer la compréhension de l'évolution des propriétés thermiques des CFP lors de leur exploitation dans le Tokamak WEST. Pour cela, différents bancs expérimentaux seront développés au laboratoire IUSTI afin de mesurer les propriétés thermiques des composants de type ITER (diffusivité thermique, conductivité thermique ...). Le défi sera de mettre au point des méthodes applicables directement sur un composant (sans découpage ou modification) afin d'étudier leur vieillissement. La caractérisation des dépôts fera partie de ces analyses, ceux-ci présentant une épaisseur faible (de l'ordre de quelques dizaines de μm), ils devront être caractérisés par voie laser : méthodes flash rapide ou thermorélectance à haute fréquence.

Une fois les différents bancs développés, plusieurs composants provenant du Tokamak WEST pourront être caractérisés. Il sera alors possible d'étudier la corrélation entre la cartographie de leurs propriétés thermiques et leur niveau d'exposition au plasma (en amplitude et en durée) lors des différentes campagnes expérimentales. Compte tenu de l'importance de ces paramètres dans l'analyse des mesures thermiques (infrarouge ou de contact), la participation à l'analyse de différentes expériences réalisées sur WEST à Cadarache sera indispensable.

Résumé en anglais :

Research to develop controlled thermonuclear fusion as a new energy source uses experimental devices known as tokamaks. In this type of machine, matter is heated to high temperatures (plasmas) while being confined by magnetic fields. The interaction of the plasma with the walls of the tokamak generates high heat fluxes up to $10\text{MW}/\text{m}^2$ in steady state and sometimes more during transient phases. The heat fluxes associated with the interactions between the plasma and the components lead to degradation and modification of the materials making up the components.

In this context, the WEST tokamak (W Environment in Steady state Tokamak) is being used as a test platform to study the interaction of plasma with plasma-facing components (PFCs), particularly those that will be used in the international ITER tokamak [1]. During the various WEST experimental campaigns, various degradations of the CFPs have been observed [2]. These degradations can take different forms, such as micro or macro cracks or the inclusion of nano-bubbles in the materials, which can reduce the heat extraction capacity of the components due to a deterioration in thermal conductivity. Another possible type of degradation is the erosion of material and its local or non-local redeposition on other components. This type of degradation, well known in older carbon machines, was also observed during the 2023 experimental campaign, characterised by the appearance of numerous surface deposits on the components [3]. This campaign ended with the repetition of a high density discharges to reach fluences comparable to those expected for a discharge under ITER conditions on the ITER technology PFCs placed in the WEST divertor [4]. During this 'high fluence' campaign, the appearance of numerous deposits on the surface of the PFCs was observed. These deposits have unknown but probably degraded thermal properties, i.e. low diffusivity and/or low thermal contact with the PFC. These deposits had a major impact on the experimental campaign, as they detached from the PFCs and entered in the plasma core, bringing it to a premature end of the discharge.

The aim of this thesis is to improve our understanding of the evolution of the thermal properties of PFCs during their use in the WEST Tokamak. To achieve this, various experimental benches will be developed at the IUSTI laboratory to measure the thermal properties of ITER-type components (thermal diffusivity, thermal conductivity, etc.). The challenge will be to develop methods that can be applied directly to a component (without cutting or modifying it) in order to study its ageing. Characterisation of the deposits will be part of these analyses, as they are thin (of the order of a few tens of μm) they will need to be characterised by laser: fast flash methods or high-frequency thermoreflectance.

Once the various benches have been developed, several components from the WEST Tokamak can be characterised. It will then be possible to study the correlation between the mapping of their thermal properties and their level of exposure to the plasma (in amplitude and duration) during the various experimental campaigns. Given the importance of these parameters in the analysis of thermal measurements (infrared or contact), participation in the analysis of various experiments carried out on WEST at Cadarache will be essential.

Profil du candidat recherché :

L'étudiant(e) devra avoir des connaissances en transferts thermiques, en traitement du signal, en modélisation thermique et un attrait pour le travail expérimental en équipe. Une première expérience dans le domaine de la caractérisation thermique (mesures de propriétés thermique ou radiative) est un atout. Il (elle) devra être suffisamment mobile et autonome pour travailler au laboratoire IUSTI mais aussi à l'IRFM sur le Tokamak WEST. Enfin il (elle) devra avoir une bonne maîtrise de la langue française et anglaise permettant la rédaction de rapports et d'articles scientifiques.

Publications sur le sujet :

- [1] J. BUCALOSSI et al., Operating a full tungsten actively cooled tokamak: Overview of WEST first phase of operation, Nuclear Fusion, 2022, 62(4), 042007
- [2] M. Diez et al., « In situ observation of tungsten plasma-facing components after the first phase of operation of the WEST tokamak », Nuclear Fusion, vol. 61, no 10, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac1dc6>.
- [3] In-situ estimation of the thermal resistance of carbon deposits in the JET tokamak, J. Gaspar et al. (2016) International Journal of Thermal Science
- [4] Overview of plasma wall interactions in the first high particle fluence campaign of WEST, E. Tsitrone, PSI2024

Insertion professionnelle après thèse : publique et/ou privée