

Coordination de la Formation par la Recherche

Sujet de Thèse CEA "SUJET-LABO 2023"

Référence du dossier :

Pôle : DRF

N° : SL-DRF-23-0578

1 - Laboratoire d'accueil au CEA

Centre : **Cadarache**

Département/Service : **IRFM / Service Intégration Plasma Paroi**

Nom du laboratoire : **GCECFP/Groupe Conception et Exploitation Composants Face au Plasma**

2 - Titre du sujet de thèse

Erosion des cibles et migration du tungstène dans le tokamak WEST activement refroidi

3 - Thématique de Recherche

4 - Pièce jointe

Y a-t-il une pièce jointe associée ? **Non**

Intitulé de la pièce jointe :

5 - Résumé

Un des défis soulevés par le tokamak ITER concerne la durée de vie et l'exploitation des composants face au plasma qui devront supporter des flux de particules et de chaleur très élevés pendant 10 ans. Dans ITER, ces composants sont activement refroidis et composés de cibles en tungstène de petite taille (centimétrique) qui seront exposées au plasma avec des zones d'interaction plus ou moins fortes en fonction du plasma environnant. L'enjeu est de prévoir l'évolution de ces composants au fur et à mesure que la fluence augmente. Il s'agira plus précisément d'évaluer l'érosion des cibles dans les zones d'interaction fortes et d'identifier les chemins de migration des atomes pulvérisés vers les zones d'interaction plus faible, dominées par la re-déposition « prompte » (à proximité des zones d'érosion) ou « lointaine » (après avoir été transportées dans le plasma). Dans les zones d'interaction faible, des poussières et des couches de matière vont ainsi s'accumuler et recouvrir les composants. Dans un premier temps, on s'attend à une évolution progressive des températures de surface, des propriétés de recyclage et de dégazage en particulier dans les zones affectées par les dépôts. Dans un second temps, on s'expose au risque de détachement intempestif des dépôts, ce qui pourrait potentiellement engendrer des disruptions (perte du plasma) et limiter l'exploitation du tokamak, ce que nous souhaitons éviter à tout prix. L'objectif de la thèse est de simuler les processus d'érosion et migration du tungstène à l'échelle des cibles, jusqu'au bilan global à l'échelle du tokamak en utilisant les conditions aux limites qui seront mesurées lors des décharges longues dans WEST (priorité programmatique de l'Institut et de l'Europe). Des collaborations existantes avec des spécialistes nationaux (Université Aix-Marseille) et internationaux (U.S. Department of Energy) sont envisagées pour garantir des avancées majeures sur la modélisation et la compréhension de la dynamique du mur sous haute fluence.

6 - Exposé du sujet

Dans un tokamak fonctionnant en régime stationnaire, la puissance à évacuer est égale à celle générée et injectée dans le plasma. La puissance perdue est portée par les neutrons (dans le cas de réactions deutérium-tritium par exemple), le rayonnement et le transport de chaleur, conducteur et convectif. Même en tâchant de maximiser la fraction rayonnée par le plasma froid de la périphérie, les flux de chaleur transportée jusqu'aux éléments de paroi restent très élevés. La contrainte est qu'ils doivent néanmoins rester en dessous des limites technologiques imposées par les matériaux, de l'ordre de 10 MW/m² en continu. Ces composants face au plasma font l'objet d'une attention particulière, d'une part car ils peuvent être source d'impuretés, d'autre part car leur durée de vie doit être maximisée.

Dans ITER, ces composants sont activement refroidis et composés de cibles en tungstène de petite taille (12 mm de large pour 28 mm de long, avec un espace entre cibles de 0.5 mm). Pour recouvrir la totalité du divertor d'ITER, il faudra assembler un très grand nombre de composants (2 000), et un nombre encore plus grand de petites cibles élémentaires (300 000). Les cibles seront ensuite exposées au plasma avec des zones d'interaction plus ou moins fortes en fonction des surfaces magnétiques, de la géométrie des surfaces matérielles et du plasma environnant. L'enjeu est de prévoir l'évolution de ces composants au fur et à mesure que la fluence augmente. Il s'agira plus précisément d'évaluer l'érosion des cibles dans les zones d'interaction fortes et d'identifier les chemins de migration des atomes ainsi pulvérisés vers les zones d'interaction plus faibles, dominées par la re-déposition "prompte" (à proximité des zones d'érosion) ou "lointaine" (après avoir été transportées dans le plasma). Dans les zones d'interaction faibles, des poussières et des couches de matières vont ainsi s'accumuler et recouvrir les composants. Dans un premier temps et avec l'accroissement des dépôts, on s'attend à une évolution progressive des températures de surface, des propriétés de recyclage et de dégazage du gaz retenu dans les matériaux. Dans un second temps, on s'expose au risque de détachement intempestif des dépôts, ce qui pourrait potentiellement engendrer des disruptions et limiter l'exploitation du tokamak, ce que nous souhaitons éviter à tout prix.

De nombreuses études ont déjà été conduites dans d'autres tokamaks sans refroidissement actif, donc avec des conditions limites au mur très différentes de celles attendues dans ITER. Avec le démarrage de la phase 2 du projet WEST (Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak), la totalité des composants de la machine est activement refroidie, ce qui ouvre la voie des décharges de longue durée, et à forte fluence, avec une machine en régime stationnaire du point de vue du plasma et des composants. WEST est aujourd'hui la seule et unique machine en Europe capable de

tester les composants d'ITER sous haute fluence. Un programme ambitieux fondé sur des décharges longues (1000 s) est d'ailleurs prévu à court terme (donc dans la durée de la thèse) à l'IRFM avec notamment un programme nommé "forte fluence" (évalué avec une très forte priorité par le programme de fusion Européen, dans le cadre du "Work Package Tokamak Exploitation") et un projet "10 GJ" pour atteindre un record d'énergie injectée dans le plasma (le record étant actuellement détenu par EAST avec 2 GJ). Le programme "forte fluence" prévu dans WEST sera étalé sur plusieurs semaines d'expériences et repose sur une mobilisation considérable des ressources IRFM pour atteindre des niveaux de fluence pertinentes pour ITER. L'objectif de la thèse est de simuler les processus d'érosion et migration du tungstène à l'échelle des cibles, jusqu'au bilan global à l'échelle du tokamak en utilisant les conditions limites mesurées lors des expériences « forte fluence » réalisées dans WEST.

Nous proposons d'aborder cette thématique en analysant les données expérimentales à l'aide de la modélisation numérique, en particulier en utilisant le code de transport SOLEDGE-EIRENE pour calculer les plasmas de background, puis en étudiant les sources de W et le transport associés à ces conditions à l'aide du code ERO2.0. Plus précisément, SOLEDGE-EIRENE sera utilisé pour simuler différentes conditions de plasma en relation avec les décharges expérimentales sélectionnées, tandis qu'avec le traceur d'impuretés ERO2.0, nous calculerons l'érosion des parois et modéliserons le transport du W à travers le plasma. Dans un premier temps, nous considérerons une géométrie de paroi axisymétrique pour la chambre à vide de WEST, et l'impact des principaux composants face au plasma du tokamak sera examiné en termes de source de W et d'écran par le plasma de background. L'érosion et la migration du W dans différents scénarios opérationnels, tels qu'une puissance injectée faible ou élevée, ou un régime de densité attaché ou semi-détaché, seront étudiés. Dans un deuxième temps, on considèrera des simulations de transport en 3D, notamment par rapport à une géométrie de paroi non axisymétrique. Le modèle 3D SOLEDGE - ERO2.0 sera adapté pour prendre en compte les objets localisés toroidalement comme le limiteur d'antenne, localisé toroidalement du côté faible champ de WEST. Nous envisagerons un balayage de la position de la position de telle antenne par rapport à la configuration magnétique et aux conditions du plasma afin d'étudier son effet sur les sources W, l'érosion des composants face aux plasmas ainsi que la contamination du plasma central. La partie expérimentale consistera à exploiter les mesures de densité et température du plasma, des sources de tungstène, de la température des composants et à faire des bilans de particules et de puissance à l'échelle globale. Des collaborations existantes avec des spécialistes nationaux (Université Aix-Marseille) et internationaux (U.S. Department of Energy) sont envisagées pour garantir des avancées majeures sur la modélisation et la compréhension de la dynamique du mur sous haute fluence.

7 - Collaborations (éventuelles) prévues

Laboratoire : **PIIM**

Organisme : **Aix marseille Université**

Responsable : **Marandet Yannick**

Raison de la collaboration :

Expert du code SOLEDGE2D-EIRENE

Duree : **36**

8 - Partenariat(s) industriels prévu(s) (éventuellement)

9 - Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Nom: **CORRE**

Prénom: **Yann**

Adresse : **CEA/Cadarache**

Téléphone **0442254981**

@mail: **yann.corre@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches :

Oui

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà

3

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2023/2024 ? **2**

10 - Directeur de thèse

Nom: **CIRAULO**

Prénom: **Guido**

Adresse : **CEA, IRFM, 13108 St Paul Lez Durance**

Téléphone: **0442254950**

@mail: **guido.ciraolo@cea.fr**

Habilitation à diriger des recherches :

Oui

Organisme de rattachement : **CEA**

Combien de thèses avez-vous déjà encadrées

7

Combien de doctorants encadrerez-vous durant l'année universitaire 2023/2024 ? **2**

11 - Signatures :

Correspondant chargé du suivi de la thèse au CEA

Date : /././././

Yann CORRE

Signature :

Directeur de Thèse (lorsqu'il est identifié)

Date : /././././

Guido CIRAULO

Signature :

Chef de Département CEA (ou son représentant)

Date : /././././

Jérôme BUCALOSSI

Signature :

Directeur du Pôle CEA (ou son représentant)

Date : /././././

Elsa CORTIJO

Signature :

12 - Avis du Responsable de l'Ecole Doctorale :

Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique - Aix-Marseille Université -

Nom du Responsable :

Date : /././././

Signature :

Avis : Favorable Défavorable

Avis circonstancié :