

Interaction plasma-surface pour la fusion magnétique contrôlée : une approche intégrée de laboratoire

R. Bisson^{1*}, M.-F. Barthe², S. Markelj³, L. Gallais⁴, G. Cartry¹, C. Martin¹, T. Angot¹, Y. Ferro¹, C.S. Becquart⁵, J. Mougnot⁶, and C. Grisolia⁷

¹*Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM UMR 7345, 13397 Marseille, France*

²*CNRS, CEMHTI UPR 3079, Université d'Orléans, 45071 Orléans, France*

³*Jožef Stefan Institute, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenia*

⁴*Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13397 Marseille, France*

⁵*UMET UMR 8207, CNRS, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France*

⁶*LSPM, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 93430 Villetaneuse, France*

⁷*CEA, IRFM, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France*

L'exploitation de réaction de fusion nucléaire comme source d'énergie décarbonée est activement explorée depuis des décennies et ITER est le premier réacteur de type Tokamak conçu pour générer un gain net d'énergie. Dans ce type de réacteur, un mélange de deutérium et tritium est chauffé à plusieurs centaines de millions de °C (dizaines de keV) pour initier la fusion de ces noyaux et produire de l'hélium et un neutron dont l'énergie cinétique seront convertis en chaleur. Le mélange gazeux étant ionisé, des champs magnétiques intenses sont utilisés pour confiner le plasma. L'évacuation des produits de réaction est assurée de manière contrôlée en bas du réacteur par l'intermédiaire d'une configuration magnétique en point X située au dessus du divertor. Le divertor est un composant face au plasma élaboré en tungstène afin de résister au haut-flux particulaires et thermique, dont l'ampleur combinée est inédite. L'évolution des propriétés du divertor sous l'influence des interactions avec le bord du plasma de fusion est actuellement un domaine de recherche très actif. Nous nous concentrerons sur les propriétés de rétention de celui-ci, c'est-à-dire de piégeage du deutérium et tritium dans la masse volumique (« bulk ») du tungstène. En effet, la rétention du tritium dans les composants face au plasma doit être limitée pour des raisons de sûreté nucléaire. Il est donc primordial de pouvoir modéliser quantitativement la rétention de cet isotope radioactif de l'hydrogène dans les conditions de fonctionnement d'ITER.

Dans cette contribution, nous présenterons notre consortium et son approche intégrée dont le but est la compréhension des phénomènes de rétention du deutérium et du tritium dans les composés face au plasma en tungstène. Notre approche combine des expériences modèles avec des modélisations à toutes les échelles pertinentes, des mécanismes élémentaires nanoscopiques aux observables macroscopiques. De cette manière, les mécanismes fondamentaux responsables de la rétention des isotopes de l'hydrogène seront révélés, une étape obligatoire pour qu'un modèle de paroi prédictif et fiable puissent être développé dans le cadre d'ITER et des futurs démonstrateurs préindustriels de type DEMO.

Dans ce but, un ensemble d'expériences « modèles » est conçu où la complexité du réel est étudiée de manière graduelle et contrôlée. L'aspect matériaux est pris en compte avec des échantillons de tungstène pleinement caractérisés, des défauts du « bulk » à la composition de surface, grâce à un ensemble de techniques complémentaires allant de la spectroscopie d'annihilation de positron (PAS), diverses microscopies électroniques (SEM, ESBD, TEM), la spectroscopie de photoélectrons X (XPS)... Des expériences bas-flux de faisceaux d'ions et/ou d'atomes, où l'énergie cinétique des espèces, leur flux et leur angle d'incidence est

réglable tout en gardant un contrôle indépendant de la température du matériau, sont comparées à des expositions moyen-flux obtenus par des plasmas haute-densité basse-pression. Après exposition des échantillons, le profil de distribution en profondeur du deutérium dans les échantillons en tungstène est mesuré par des analyses de faisceaux d'ions tels que l'analyse de réaction nucléaire (NRA) et la spectrométrie de masse d'ions secondaires (SIMS).

Tout ces paramètres et résultats expérimentaux servent à initialiser et contraindre les paramètres d'entrées de codes Monte-Carlo Cinétique Objet (OKMC) et d'équations cinétiques macroscopiques (MRE). Des paramètres supplémentaires tels que les énergies caractéristiques des processus élémentaires sont eux initialisés par des résultats obtenus dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) et de modèles thermodynamique et statistique. Les codes méso- et macroscopique (OKMC et MRE) sont alors utilisés pour prédire le comportement du tungstène chargé en deutérium vis à vis de cycles thermiques modèles tels que la désorption programmée en température (TPD). Ces prédictions sont mises en regard de mesures TPD réalisées dans un environnement ultra-vide et permettant de quantifier la rétention de l'hydrogène et de ses isotopes à des niveaux aussi faible que 10^{17} D/m². Toute différence entre les observations expérimentales sur systèmes « modèles » et les prédictions des modèles théoriques permet d'améliorer ces derniers. Le but ultime étant de valider notre compréhension des mécanismes microscopiques d'interaction deutérium/tritium – tungstène et de fournir un modèle macroscopique prédictif de ce système applicable pour ITER. Cette approche intégrée sera illustrée par des résultats récents obtenus sur des échantillons recristallisés de tungstène polycristallin [1] et simulés avec les modèles développés au sein de notre consortium [2].

Remerciements : Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet Investissements d'Avenir A*MIDEX portant la référence n°ANR-11-IDEX-0001-02. Partie de ce travail a été effectué dans le cadre du Consortium EUROfusion et a reçu un financement du programme de recherche et innovation Horizon 2020 de l'Union Européen sous la convention de subvention n°633053. Les points de vue et les opinions exprimées ici ne reflètent pas nécessairement ceux de la Commission Européenne.

[1] R. Bisson, S. Markelj, O. Mourey, F. Ghiorghiu, K. Achkasov, J.-M. Layet, P. Roubin, G. Cartry, C. Grisolia, and T. Angot, *Journal of Nuclear Materials*, submitted

[2] E. Hodille, X. Bonnin, R. Bisson, T. Angot, J.-M. Layet, and C. Grisolia, *Journal of Nuclear Materials*, submitted