

Contrat doctoral – ED Galilée

Titre du sujet :

Etude de la cinétique de restauration dans l'Eurofer et le cuivre : impacts de la température et de la présence d'impuretés (H/He)

- Unité de recherche : Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (LSPM CNRS UPR 3407)
- Discipline : Sciences des Matériaux
- Direction de thèse : Jonathan Mougenot (directeur) et Fabienne Gregori (co-encadrante)
- Contact : jonathan.mougenot@lspm.cnrs.fr
- Domaine de recherche : Matériaux
- Mots clés : Restauration, Thermique, Hydrogène, Hélium, Défauts cristallins, Dislocations

Les tokamaks¹ DEMO auront pour objectif la production nette d'électricité à partir de la réaction de fusion nucléaire au cours de laquelle les noyaux de deutérium et de tritium réagissent pour former de l'hélium et un neutron rapide de 14 MeV. Les aciers RAFM (Reduced Activation Ferritic Martensitic), dont l'Eurofer, sont de bons candidats comme matériaux de structure de première paroi de par leur haute conductivité thermique, leur faible dilatation thermique et leur résistance au gonflement de cavités [1]. Dans certains designs, les composants en Eurofer subiront les plus forts dommages induits par les neutrons (jusqu'à 16 défauts par atomes/année d'exposition dpa/fpy) suivis de près par les structures en cuivre (10 dpa/fpy) et en tungstène (6 dpa/fpy) [2]. De nombreuses études se sont intéressées à la l'analyse des défauts microstructuraux créés par les neutrons et leurs impacts sur les propriétés (thermo-)mécaniques [3, 4, 5, 6]. De plus, le cuivre est utilisé comme joint entre le circuit de refroidissement et l'armure en tungstène des monoblocs des composés face au plasma [7], il est donc sujet à de fortes déformations plastiques [8] génératrices de dislocations.

Les défauts créés, notamment les dislocations, participent activement [9, 10] au piégeage des espèces diffusantes (hélium et tritium – isotope de l'hydrogène), augmentant ainsi les concentrations de ces espèces dans les matériaux. Au-delà des problématiques de fragilisation, l'augmentation du stockage du tritium pose en outre des problèmes de sûreté nucléaire. Il a aussi été montré la rétroaction de l'hydrogène sur la création et l'annihilation de ses propres pièges : la présence d'hydrogène et d'hélium augmente la densité des défauts qui les piègent à la suite de bombardement ionique (mimant l'impact des neutrons) [11, 12] et réduit le taux de restauration lors de recuits [13].

Parallèlement aux études expérimentales, de nombreux modèles de transport d'hydrogène ont été développés pour tous les matériaux cités [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Dans la plupart de ces modèles, l'augmentation de la densité des pièges sous l'effet de l'exposition au plasma est permise mais très peu prennent en compte l'annihilation thermique des pièges [20, 21]. Il existe par ailleurs des études portant sur la modélisation des cinétiques de restauration et de recristallisation [22] qui, quant à elle, ne s'intéressent pas à l'impact de l'hydrogène. Dans tous ces modèles, la difficulté rencontrée dans

¹ voir le bulletin IAEA 62-2 (2021) : <https://www.iaea.org/fr/energie-de-fusion/la-fusion-par-confinement-magnetique-tokamaks-et-stellarators>

la simulation de la restauration réside dans le manque de données expérimentales des cinétiques, des caractéristiques des pièges (densité, énergie de dépiégeage) et de l'impact de l'hydrogène et de l'hélium sur les mécanismes d'annihilation des pièges. Il y a donc un réel besoin expérimental afin de paramétrer, voire préciser, les modèles.

L'objectif principal est la détermination des coefficients cinétiques de restauration dans l'Eurofer et le cuivre (et possiblement le fer) dans un matériau à l'état de référence puis un matériau chargé en hydrogène ou en hélium. Le plan de travail s'organisera autour du triptyque suivant :

1. La création de défauts par essais de traction (ou compression selon les besoins) sur des échantillons préalablement préparés (polissage) et leurs caractérisations microstructurales (EBSD, MEB, DRX). Les protocoles pour le cuivre peuvent s'appuyer sur les thèses déjà encadrées dans le laboratoire [23, 24].
2. Plusieurs méthodes expérimentales seront utilisées pour caractériser les pièges induits : l'analyse de courbes contrainte-déformation, l'utilisation de la diffraction des rayons X et/ou l'estimation de la quantité d'hydrogène retenue dans les échantillons (catharométrie) après chargement gazeux (cellule sous pression et température). Il peut également être envisagé de remonter à une densité de défauts en utilisant l'EBSD. Un partenariat envisagé avec le CEA/IFRM permettra de caractériser les pièges par perméation d'hydrogène et spectrométrie de masse de thermodésorption (ThermoDesorption Spectrometry i.e. l'étude du dégazage de l'hydrogène lors de l'application d'une rampe linéaire de température sur un échantillon préalablement chargé en hydrogène). Les protocoles pourront s'inspirer de ceux publiés dans [12, 15, 25, 26, 27].
3. L'application de recuits contrôlés sur les échantillons dans un four à différentes températures et différents temps de recuits permettra d'étudier la restauration statique. L'étude de la restauration dynamique sera explorée à l'aide d'expérience in-situ en EBSD. Les conditions opératoires pourront s'inspirer des études sur l'évolution de la microstructure lors de traitements thermiques de l'Eurofer [28, 29] et du cuivre [23].

Un post traitement des données expérimentales fournira les coefficients cinétiques à implémenter dans les modélisations de transport d'hydrogène. Si les missions sont essentiellement expérimentales, un travail de simulation numérique en tâche de fond tout au long de la thèse est prévu dans le but de confronter résultats numériques et expérimentaux, ainsi que dimensionner les conditions expérimentales à réaliser.

Nous sommes à la recherche d'une personne titulaire d'un master 2 ou diplôme d'ingénieur formée à la mécanique et à la science des matériaux avec des connaissances en transferts de matière dans les métaux. Les techniques de caractérisation, d'essais mécaniques ou de chargement d'hydrogène ne devront pas lui être étrangères et des compétences en simulation numérique par éléments finis seront grandement appréciées.

- [1] [Bhattacharya et al. *Fusion Engineering and Design* **173**, 112935 \(2021\)](#)
- [2] [Federici et al. *Nucl. Fusion* **57**, 092002 \(2017\)](#)
- [3] [Bhattacharya et al. *J. Phys. Energy* **4**, 034003 \(2022\)](#)
- [4] [Fabritsiev & Pokrovsky, *Fusion Engineering and Design* **73**, 19–34 \(2005\)](#)
- [5] [Das *SN Appl. Sci.* **1**, 1614 \(2019\)](#)
- [6] [Klimenkov et al. *Journal of Nuclear Materials* **538**, 152231 \(2020\)](#)
- [7] [Alba et al. *Materials* **15**, 6591 \(2022\)](#)
- [8] [Bian, S. Thèse de doctorat USPN \(2024\) \(à soutenir\)](#)
- [9] [Terentyev et al. *Journal of Applied Physics* **117**, 083302 \(2015\)](#)
- [10] [Zang et al. *Nucl. Fusion* **64**, 026013 \(2024\)](#)
- [11] [Li et al. *Nuclear Fusion* **60**, 086015 \(2020\)](#)
- [12] [Schmid et al. *Nuclear Materials and Energy* **34**, 101341 \(2023\)](#)
- [13] [Pečovnik, et al. *Nuclear Fusion* **60**, 106028 \(2020\)](#)
- [14] [Arredondo et al. *Nuclear Materials and Energy* **28**, 101039 \(2021\)](#)
- [15] [Montupet-Leblond et al. *Nucl. Fusion* **62**, 086011 \(2022\)](#)
- [16] [Schmid et al. *Nuclear Materials and Energy* **36**, 101494 \(2023\)](#)
- [17] [Hodille et al. *Nuclear Fusion* **57**, 056002 \(2017\)](#)
- [18] [Delaporte-Mathurin et al. *Nuclear Materials and Energy* **21**, 100709 \(2019\)](#)

- [19] [Dark et al. *Nucl. Fusion* **61**, 116076 \(2021\)](#)
- [20] [Pečovnik et al. *Nucl. Fusion* **60**, 036024 \(2020\)](#)
- [21] Dark et al. To be submitted
- [22] [Jansen Van Rensburg et al. *Comput Mech* **62**, 1343–1367 \(2018\)](#)
- [23] [Siv, E., Thèse de doctorat Paris XIII \(2019\)](#)
- [24] [Savina, R., Thèse de doctorat Paris XIII \(2014\)](#)
- [25] [Bestautte et al. *Corrosion Science* **224**, 111509 \(2023\)](#)
- [26] [Hollingsworth et al. *Nuclear Fusion* **60**, 016024 \(2020\)](#)
- [27] [Ortholland et al. dans *Hydrogène-matériaux, corrosion sous contrainte, fatigue-corrosion*, 133-138 \(2023\)](#)
- [28] [Klimenkov et al. *Nuclear Materials and Energy* **35**, 101451 \(2023\)](#)
- [29] [Chauhan et al. *Journal of Nuclear Materials* **548**, 152863 \(2021\)](#)