

Sujet de thèse

# Modélisation de la croissance des bulles d'hélium dans le tungstène : mécanismes d'accroissement et impacts de la déplétion

Septembre 2023 à Septembre 2026

**Laboratoire :** Laboratoire des Sciences de Procédés et Matériaux (LSPM)  
Campus de l'Université Sorbonne Paris Nord  
99 avenue J.B. Clément  
93430 Villetaneuse – France

**Axe :** MECAMETA

**Directeur de thèse :** Jonathan Mougenot  
01 49 40 34 80  
[jonathan.mougenot@lspm.cnrs.fr](mailto:jonathan.mougenot@lspm.cnrs.fr)

**Co-directeur de thèse :** Yann Charles

## Objectifs scientifiques :

Les tokamaks sont des candidats prometteurs pour la production d'énergie par fusion thermonucléaire [1]. Dans ces réacteurs, le plasma est porté à une température de 150 millions de kelvins permettant la fusion des deux isotopes de l'hydrogène, et la production d'un neutron énergétique et d'un noyau d'hélium. Grâce à son haut point de fusion, sa bonne conductivité thermique et sa faible pulvérisation, le tungstène est un matériau de choix pour résister aux flux thermiques et de particules (hydrogène et hélium) provenant du plasma [2,3]. En fonction de l'énergie et du flux des ions et de sa température [4], il subit cependant en surface des endommagements par l'hélium, entraînant la création de nanobulles [5,6] (comme l'illustre la figure 1a) et pouvant conduire jusqu'à création de zones poreuses (nommées *fuzz*) [7].

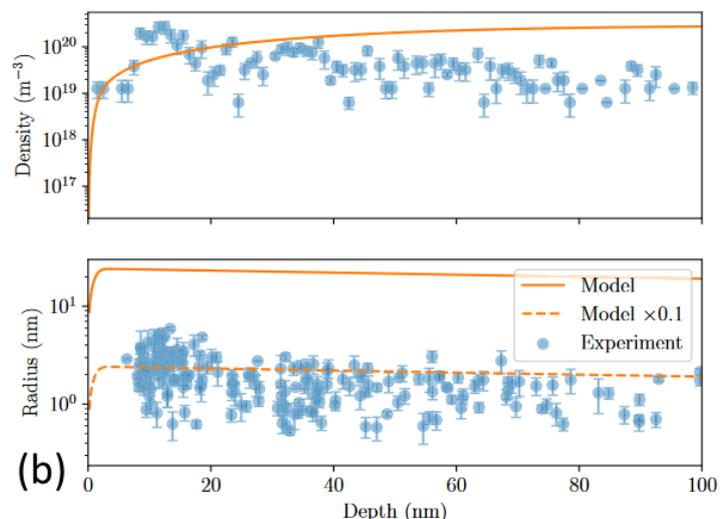
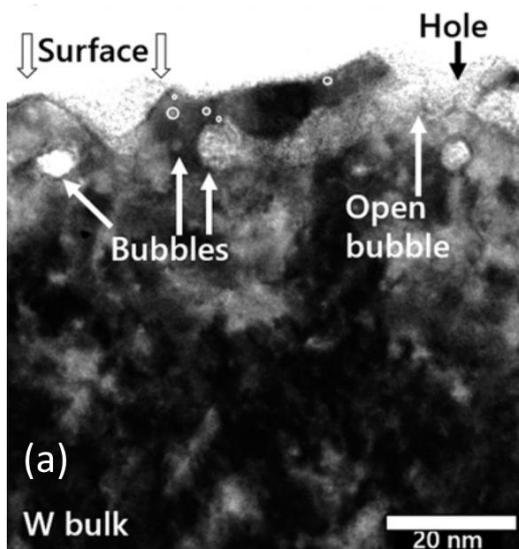


Figure 1. (a) Coupe transverse de tungstène après irradiation à l'hélium laissant apparaître des bulles de quelques nanomètres de diamètre dont certaines sont éclatés [6] (b) Comparaison des densités [5,12].

Au-delà de ses impacts propres sur le tungstène, l'hélium modifie le transport d'hydrogène [8] et il pourrait avoir un rôle dans la rétention du tritium, élément clé de la sûreté nucléaire des tokamaks. Il est donc important de comprendre les mécanismes de formation de ces bulles et d'en prédire les caractéristiques. Pour y répondre, la résolution de modèles de dynamique d'amas (diffusion-réaction des héliums et clusters helium-lacunes HeV à l'échelle des milieux continus) permettent d'obtenir des profils de densité et des rayons moyens de ces bulles [9,10,11,12,13]. La figure 1b montre la comparaison des résultats obtenus avec le code HeFenics [12] avec des résultats expérimentaux [5], on peut constater une différence sur la taille des bulles que l'on pourrait expliquer par le manque de la prise en compte, dans la modélisation, de l'éclatement des bulles proches de la surface.

A l'aide d'implémentations récentes dans le code HeFenics et de la littérature [10,14], le premier objectif de la thèse sera de paramétrer un modèle d'éclatement des bulles afin de reproduire plus fidèlement les rayons des bulles obtenus par les expériences (réalisées par des équipes du CEA/IRFM et le laboratoire PIIM avec lesquelles nous collaborons). Les lois de probabilité d'éclatement proposées devront idéalement prendre en compte la pression interne dans les bulles, la distance à la surface et la température. L'hypothèse d'une déplétion partielle de l'hélium lors de l'éclatement des bulles devra être considérée [15]. De récentes données énergétiques de formation des complexes HeV [16,17] et plusieurs lois reliant nombre de lacunes et le nombre d'hélium [18] pourront être ajoutées dans le code et testées.

Un deuxième objectif, plus fondamentale, sera de décrire l'évolution d'une bulle en particulier en ajoutant un maximum de mécanismes de croissances généraux et propres à l'hélium dans le tungstène (pression interne induisant des dislocations, effet de la plasticité environnante, déplétion partielle des bulles lors de la rupture). En se basant sur les résultats aux basses échelles obtenus dans la littérature, un modèle GTN sera implémenté dans Abaqus (en se basant sur un travail déjà amorcé dans l'équipe) qui permettra d'inclure les effets thermomécaniques dans la probabilité de rupture. Les résultats obtenus permettront d'affiner et de donner une base physique aux lois paramétrées. Enfin, l'impact de l'hydrogène sur les mécanismes de croissances devra être investigué.

[1] <a href="#">Alba et al. <i>Materials</i> <b>15</b>, 6591 (2022)</a>	[10] <a href="#">Blondel et al. <i>Nuclear Fusion</i> <b>58</b>, 126034 (2018)</a>
[2] <a href="#">Richou et al. <i>Techniques Ingénieur</i> <b>BN3761</b> (2022)</a>	[11] <a href="#">Bi et al. <i>Nucl. Fusion</i> <b>59</b>, 086025 (2019)</a>
[3] <a href="#">Pitts et al. <i>NME</i> <b>20</b> 100696 (2019)</a>	[12] <a href="#">Delaporte-Mathurin et al. <i>Scientific Reports</i> <b>11</b> (2021)</a>
[4] <a href="#">Hammond <i>Mater. Res. Express</i> <b>4</b>, 104002 (2017)</a>	[13] <a href="#">Niu et al. <i>JNM</i> <b>572</b>, 154062 (2022)</a>
[5] <a href="#">Ialovega et al. <i>Phy. Sc.</i> <b>T171</b>, 014066 (2020)</a>	[14] <a href="#">Lee et Hammond <i>JNM</i> <b>554</b>, 153101 (2021)</a>
[6] <a href="#">Ialovega et al. <i>Nucl. Fusion</i> <b>62</b>, 126022 (2022)</a>	[15] <a href="#">Xu et al. <i>JNM</i> <b>154</b> (2022)</a>
[7] <a href="#">Wright, et <i>Tungsten</i> <b>4</b>, 184–193 (2022)</a>	[16] <a href="#">Song et al. <i>JNM</i> <b>561</b>, 153577 (2022)</a>
[8] <a href="#">Markelj et al. <i>Nuclear Fusion</i> <b>60</b>, 106029 (2020)</a>	[17] <a href="#">Nandipati et al. <i>J. Phys. Condens. M.</i> <b>34</b>, 035701 (2022)</a>
[9] <a href="#">Faney et Wirth <i>M. S. Mater. Sci. Eng.</i> <b>22</b>, 065010 (2014)</a>	[18] <a href="#">Hammond et al. <i>Scientific Reports</i> <b>10</b>, (2020)</a>

**Planning :**

Semestres	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Bibliographie						
Prise en main des outils	Fenics		Abaqus			
Ajout de lois paramétrées d'éclatement dans un modèle décrivant la densité de bulles						
Modélisation de la croissance et de la déplétion d'une bulle						
Couplages avec l'hydrogène						
Confrontations expérimentales (collaborations)						
Rédaction						

**Financement :** Bourse ministérielle. Un support fourni par les projets Eurofusion permettra d'assurer la participation à au moins une conférence par an et à une ou plusieurs écoles d'été. Des séjours courts dans les laboratoires expérimentaux seront prévus.