Offre de stage bac+5 : Caractérisation de tubes en enroulement filamentaire SiC/SiC

Contexte

Depuis l'accident de Fukushima en 2011, une initiative internationale a été lancée afin d'améliorer la sûreté des réacteurs nucléaires et en particulier augmenter la tenue thermomécanique des gaines de combustibles (pièce entre la pastille de combustible et le fluide caloporteur). En particulier, les composites à matrice céramique (CMC) SiC/SiC sont des candidats prometteurs pour ces gaines du fait de leur excellentes caractéristiques thermomécaniques [Lam17]. La fabrication de tubes en SiC/SiC est complexe et peut être décrite selon trois étapes : la réalisation de la préforme fibreuse, le dépôt de la matrice et de l'interphase et la mise aux dimensions de l'éprouvette en recourant, entre autres, à un procédé de rectification [Sau12]. A chaque étape, des défauts – modifications par rapport au nominal - peuvent apparaître, entrainant des variations sur le comportement mécanique.

Dans un premier temps, l'objectif du stage sera de caractériser expérimentalement plusieurs nuances de fabrication, en réalisant des essais de traction sur tubes. Ces essais seront multi-instrumentés afin d'en tirer le plus d'informations possible (extensomètre, stéréo-corrélation d'image numérique, émission acoustique, etc.). Deux points seront étudiés :

- l'effet de l'orientation des fibres (enroulements filamentaires à +/-30°, +/-60° et +/-45°) ;
- l'effet du type de fibres et d'interphase.

L'analyse de la santé matière sera également réalisée, en effectuant des coupes au microscope numérique et de l'analyse d'image pour en particulier déterminer le taux de fibres, de matrice et de porosité et éventuellement mesurer les épaisseurs d'interphases.

L'ensemble de ces informations permettront de valider un modèle numérique élastique multi-échelle développé au sein du laboratoire. Ce modèle multi-échelle permet de prendre en compte les constituants (type de fibre, d'interphase mais également les fractions volumiques de porosité, fibre et matrice), l'architecture (orientation des fibres) et les procédés de rectification. Dans un premier modèle, à l'échelle microscopique (échelle de la fibre et de la matrice), plusieurs cellules élémentaires représentatives devront être réalisées permettant de prendre en compte les variations de fabrication [Roh13]. En particulier, l'influence du taux de fibre, matrice et porosité sur les propriétés élastiques est étudiée. Un ensemble de cas test selon des sollicitations élémentaires permet de reconstruire le tenseur de souplesse homogénéisé. Un second modèle permet de remonter aux propriétés du tube. Il prend en compte des modifications à l'échelle de la structure (orientation des fibres, épaisseurs de rectification variables, etc.) [Mor23]. Ce modèle multi-échelle est actuellement validé pour une seule orientation de fibre et un type de fibre. L'objectif du stage sera alors de valider sur de nouvelles orientations et ajouter au sein du modèle micro l'influence de l'épaisseur de l'interphase.

Dans un dernier temps, la caractérisation du comportement endommageable du tube pourra être réalisée. Pour cela, la caractérisation des cycles de charges/décharges réalisés durant les essais de traction sera réalisée [Mor24]. La mise en place de modèles micromécaniques simplifiés, basés sur les modèles de *shear lag,* pourra également être réalisée afin de mieux comprendre les phénomènes d'endommagement au sein de ces matériaux.

Objectifs et méthodologie

L'objectif de ce stage est de caractériser le comportement en traction de tubes en enroulement filamentaire de CMC SiC/SiC. Le comportement élastique sera comparé avec un modèle numérique multi-échelle afin de

valider que ce dernier est capable de prendre en compte des modifications lors de la fabrication à l'échelle microscopique (type de fibre et d'interphase, taux volumiques des constituants, etc.) et à l'échelle mésoscopique (orientation des fibres, etc.). Dans un second temps, le comportement endommageable pourra être étudié, en analysant les cycles de charges/décharges et en comparant à des modèles simplifiés de type *shear lag*.

Les étapes du travail proposé sont les suivantes :

- bibliographie sur le comportement mécanique des CMC ;
- mise en place des essais de traction sur tube ;
- caractérisation du comportement élastique et endommageable des différentes nuances ;
- caractérisation de la microstructure des différentes nuances ;
- dialogue essais/calculs sur la partie élastique à partir d'un modèle multi-échelle ;
- modélisation micromécanique du comportement endommageable.

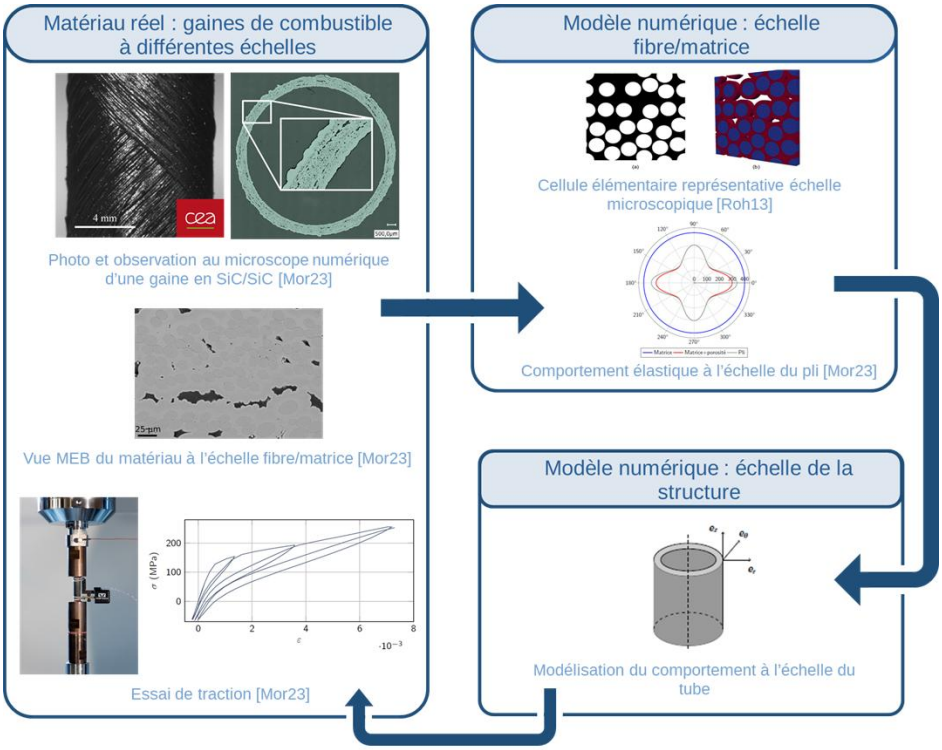


Figure 1- Schéma récapitulatif de la démarche du stage

Déroulement du stage

- Durée du stage : 5/6 mois sur le premier semestre 2027
- Début : démarrage possible en février/mars/avril 2027
- Lieu : ICA Toulouse
- Rémunération : gratification de stagiaire étudiant dans l'enseignement supérieure, soit environ 620 €/mois (https://www.service-public.fr/particuliers/ vosdroits/F32131)
- Possibilité d'être logé gratuitement dans les résidences SUPAERO
- Possibilités de poursuite en thèse sur la modélisation du comportement de CMC

Candidatures CV et lettre de motivation à transmettre par mail.

Contacts

- Claire Morel – ICA (claire.morel@utoulouse.fr)
- Christophe Bouvet – ICA (christophe.bouvet@isae.fr)

- Pablo Navarro – ICA (pablo.navarro@utoulouse.fr)

Bibliographie

[Lam17] K. Lambrinou et al., 2017. Innovative accident-tolerant fuel cladding materials the h2020 il trovatore perspective. Water Reactor Fuel Performance Meeting. 2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting.
[Sau12] C. Sauder et C. Lorrette, 2012. Patent EP2683673 (CEA) : Method for producing a composite including a ceramic matrix.
[Roh13] E. Rohmer, 2013. Caractérisation et modélisation mécanique de tubes composites SiCf/SiC. Thèse de doctorat, Bordeaux 1.
[Mor23] C. Morel, 2023. Influence des défauts de fabrication sur le comportement mécanique de composites tubulaires SiC/SiC. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
[Mor24] C. Morel, et al. The influence of grinding process on the mechanical behavior of SiC/SiC composite tubes under uniaxial tension. Journal of the European Ceramic Society 44.1 (2024): 91-106.