

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Analyse expérimentale et numérique des mécanismes d'endommagement des matériaux composites thermoplastiques dédiés aux réservoirs cryogéniques sans revêtement des lanceurs spatiaux

Référence : **MAS-DMAS-2026-17**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : octobre 2026

Date limite de candidature :

Mots clés

Matériaux innovants, composites thermoplastiques, tomographie synchrotron, mécanique de la rupture, cryogénie, modélisation micromécanique

Profil et compétences recherchées

Ingénieur en 3^e année de Grande Ecole et/ou titulaire d'un Master 2 Recherche

Physique des ondes, mécanique des matériaux, traitement du signal, interaction rayonnement X-matière, mathématiques appliquées

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Depuis quelques années, l'industrie aérospatiale explore l'utilisation de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) pour le développement des futurs lanceurs réutilisables [1-2]. L'intérêt croissant pour les matériaux composites tient principalement à leur potentiel de réduire la masse structurelle des véhicules spatiaux par rapport aux alliages métalliques, tout en garantissant une durée de vie accrue. Parmi eux, les composites à matrice thermoplastique (TP) apparaissent comme des candidats prometteurs pour la réalisation de réservoirs cryogéniques LH₂/LOX sans revêtement [3]. Leur meilleure résistance en fatigue, leur recyclabilité et leur meilleure tolérance aux sollicitations thermomécaniques par rapport aux composites à matrice thermodurcissable (TD) [4], en font des candidats privilégiés. Cependant, la compréhension de leurs mécanismes d'endommagement reste aujourd'hui incomplète à température ambiante et surtout à basse température. De plus, les modèles développés pour les composites TD [5-6] ne sont pas directement transposables aux thermoplastiques, et l'état de l'art en simulation sur TP reste encore limité.

Afin d'explorer ces mécanismes, une première campagne expérimentale a été réalisée au préalable sur des composites à matrice thermoplastique et à matrice thermodurcissable hautes performances, à température ambiante. En collaboration avec le Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris, l'ONERA a mené des essais de traction multi-instrumentés sur la plateforme *Bulky* [7] au synchrotron SOLEIL sur la ligne de lumière ANATOMIX. Ces travaux ont montré que, par rapport aux composites à matrice thermodurcissable, les composites à matrice thermoplastique présentent des fissures matricielles plus courtes et moins susceptibles de traverser toute l'épaisseur du pli [8]. Ces observations confirment l'intérêt des composites thermoplastiques pour les applications réservoirs LH₂/LOX, en ouvrant une perspective prometteuse quant à leur capacité à limiter la percolation des fissures et donc à assurer une meilleure étanchéité intrinsèque.

La thèse proposée s'inscrit dans la continuité de ces travaux et vise à approfondir la compréhension du comportement des composites thermoplastiques en environnement cryogénique. Elle se structure en deux volets complémentaires. Le premier, expérimental exploratoire, consiste à effectuer des essais synchrotron *in situ* mais cette fois en étudiant les mécanismes d'endommagement aux basses températures. Cela nécessitera l'adaptation de la plateforme *Bulky* pour accueillir des conditions cryogéniques et mettre en œuvre les essais thermomécaniques. L'acquisition multi-instrumentée permettra de suivre l'amorçage et la propagation des fissures matricielles durant l'essai.

Le deuxième volet, numérique, consiste à adapter les modèles d'endommagements micromécaniques diffus [9] aux spécificités des composites thermoplastiques à partir des données expérimentales acquises, pour

permettre, une description fine des faciès de fissures et des scénarios de percolation en environnement cryogénique sur ces matériaux. A cette fin, une comparaison approfondie entre les résultats expérimentaux et numérique sera réalisée, constituant une étape clé du projet de thèse. D'autre part, les effets de séquences d'empilements, de procédé de fabrication (plaqué ou tube), seront étudiés en prenant en compte les conditions réelles des essais au synchrotron.

Ainsi, les résultats de cette recherche viseront à alimenter une base de données inédite des mécanismes d'endommagement des composites thermoplastiques, issue d'une instrumentation unique en synchrotron, et mise à disposition de la communauté scientifique et industrielle. Cette base de données fournira des informations essentielles sur l'influence de la morphologie des fissurations dans les composites thermoplastiques sur les chemins de passage de l'hydrogène en conditions cryogéniques, et donc des pertes d'étanchéité. L'intégration de ces données d'essais permettra de développer des modèles phénoménologiques plus robustes et représentatifs, et de contribuer à une montée en maturité technologique pour l'utilisation de ces matériaux dans les réservoirs cryogéniques des lanceurs du futur. Ils s'inscrivent dans le cadre de la feuille de route CNES/ONERA pour les lanceurs réutilisables, visant à préparer la nouvelle génération d'aéronefs, réduire les coûts d'accès à l'espace et limiter son empreinte environnementale grâce à des technologies plus performantes et durables.

Références

- [1] Fikes, John C. *Composite Cryotank Technologies and Demonstration*. No. M14-4124. 2014
- [2] Underhill, K., et al., "Focus on Low-Cost Light-Weight Upper Stage within ESA's Future Launchers Preparatory Programme (FLPP)." (*EUCASS*), Lille. 2022
- [3] Condé-Wolter, Jan, et al. "Hydrogen permeability of thermoplastic composites and liner systems for future mobility applications." *Composites Part A*, 2023
- [4] Krueger, Ronald and Bergan, Andrew, "Advances in thermoplastic composites over three decades—a literature review." 2024
- [5] Bois, Christophe, et al. "A multiscale damage and crack opening model for the prediction of flow path in laminated composite." *Composites Science and Technology* 97, 2014
- [6] Vereecke, Jean, et al., "Explicit modelling of meso-scale damage in laminated composites—Comparison between finite fracture mechanics and cohesive zone model." *Composites Science and Technology*, 253, 2024
- [7] Proudhon, Henry, et al. "Incipient bulk polycrystal plasticity observed by synchrotron in-situ topotomography." *Materials* 11.10, 2018
- [8] Giakoumakis, Georges, et al. "Characterization of the damage mechanisms of aeronautical composite materials via synchrotron in-situ tensile testing." *10th International Symposium on Digital Industrial Radiography and Computed Tomography (DIR2025)*, Paris. 2025
- [9] Doitrand, Aurélien, et al. "Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven polymer matrix composites under quasi-static tensile loading." *Composites Science and Technology* 119, 2015

Collaborations envisagées

CNES (thèse cofinancée)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA	Directeur de thèse
Département : Matériaux et Structures	Nom : Sébastien Johannes
Lieu (centre ONERA) : Châtillon	Laboratoire : Centre des Matériaux - PSL
	Tél. : +33171416311
Contacts : Juan-Manuel García, Georges Giakoumakis, Frédéric Laurin	Email : sebastien.johannes@mines-paristech.fr
Tél. : 01 46 73 45 18	Email : juan_manuel.garcia@onera.fr
Tél. : 01 46 73 37 32	Email : georges.giakoumakis@onera.fr
Tél. : 01 46 73 46 92	Email : frederic.laurin@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>