Offre de stage PFE/M2R

Intitulé : **Etude expérimentale et numérique de la rupture translaminaire de stratifiés composites renforcés par Z-pinning**

Localisation : Institut Clément Ader - 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France
http://institut-clement-ader.org/

Encadrement : Romain Rutar, Christophe Bouvet
romain.rutar@isae-supaero.fr, christophe.bouvet@isae-supaero.fr

Profil recherché :
Etudiant de Master 2 Recherche ou équivalent dans les domaines de la Mécanique et des Matériaux.

Durée : 6 mois à partir de février/mai 2027

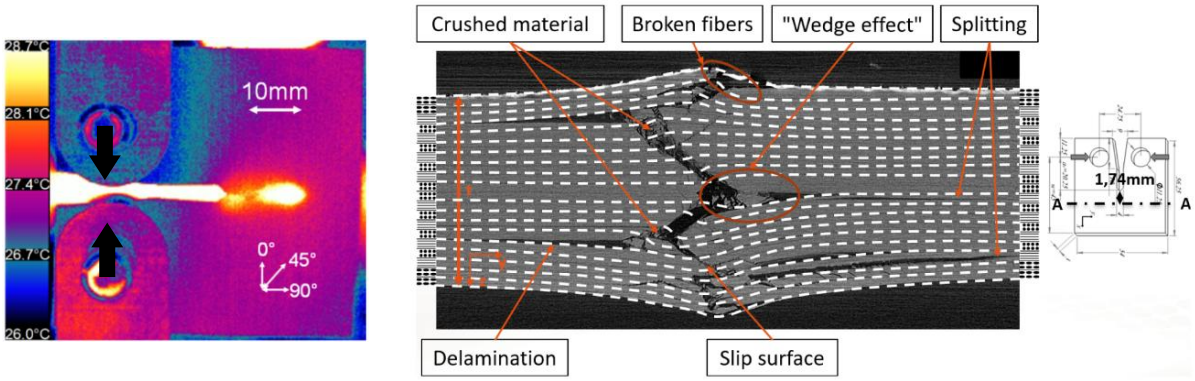
Gratification : environ 625€/mois, possibilité de logement gratuit sur le campus de l'ISAE-SUPAERO

Contexte de l'étude :

La rupture translaminaire correspond à la rupture des fibres du composite stratifié. Ce scénario de rupture se distingue selon si le stratifié est sollicité en traction ou en compression. Ce mode de rupture est largement étudié dans la littérature (Laffan et al., 2010; Pinho et al., 2006) et est généralement caractérisé à l'aide d'essais classiques appelés « *Compact Tension* (CT) » et « *Compact Compression* (CC) », selon si l'objectif est de provoquer une rupture des fibres en traction ou en compression. La caractérisation des modes de rupture dans un composite stratifié repose sur les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture, notamment à l'aide du critère énergétique appelé le taux de restitution d'énergie critique (G_c), qui représente l'énergie nécessaire à l'initiation ou à la propagation d'une fissure.

Lors d'un essai « Compact Compression », l'écrasement progressif du matériau suite au passage du front de fissure (Figure 1a) engendre la combinaison de plusieurs mécanismes de rupture. Ce phénomène se nomme le crushing. En particulier, la zone endommagée génère des débris et des fragments de fibres qui, en s'accumulant sous forme de coin (« wedge effect »), provoquent l'ouverture du stratifié par délaminage, comme visible sur la Figure 1b.

Ces délaminages sont fondamentaux dans le crushing et permettent aux plis de flamber et de rompre individuellement plutôt que de rompre de façon fragile et brutale en bloc.



(a) (b)

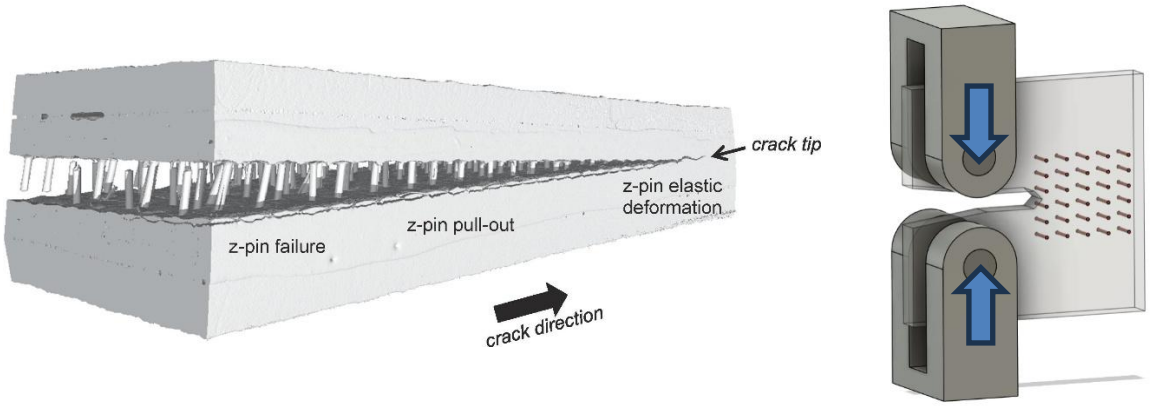
Figure 1: (a) image infrarouge montrant l'échauffement de l'éprouvette après le passage de la fissure en compression (b) coupe A-A en microtomographie par rayons X montrant le processus de "crushing" lors du chargement en compression (Rutar et al., 2023)

Le Z-pinning est une technologie de renfort des matériaux composites dont le but est d'augmenter la résistance au délaminage d'un composite stratifié. La technique consiste à insérer de fines tiges en composite à travers l'épaisseur du stratifié pour retenir l'ouverture des délaminages, comme visible sur la Figure 2a. Cette technologie est une des spécialités du Bristol Composites Institute hébergé à l'Université de Bristol (Royaume-Uni), partenaire de cette étude (Santana De Vega et al., 2022; Yasaee et al., 2014).
Le but est d'étudier l'influence du Z-pinning sur la rupture translaminaire d'un composite stratifié. Des essais CC renforcés par Z-pinning (Figure 2b) seront menés dans le cadre de ce stage. Le Z-pinning est connu pour dégrader les propriétés dans le plan des composites stratifiés, notamment la raideur et la contrainte à rupture en particulier (Hoffmann and Scharr, 2018; Ji et al., 2024). Cependant, son impact sur la rupture translaminaire reste inconnu. Entre autres, un objectif important est d'étudier la capacité du Z-pinning à retenir les délaminages induits durant la phase de crushing de l'essai CC, ainsi que les conséquences cette rétention.

Les activités suivantes seront attendues afin d'apporter de premiers éléments de réponse :

- Recherche bibliographique sur le Z-pinning, les essais Compact Tension et Compact Compression
- Mise en place des essais Compact Tension et Compact Compression : définition, instrumentation, proposition de méthodes d'analyse qualitatives et/ou quantitatives.
- Conduite des campagnes d'essai.
- Post-traitement des essais et rédaction d'un rapport d'essais.

Les essais pourront être multi-instrumentés par caméra thermique, corrélation d'images numériques, cellule d'effort et microtomographie par rayons X afin d'étudier le scénario de rupture et de quantifier les variations de propriétés imputables à la présence de Z-pinning.



(a) (b)

Figure 2 : tomographie par rayons X montrant la propagation de délaminage, retenu par des Z-pins (Mouritz, 2020, courtesy of A. Ravindran) ; (b) éprouvette "Compact Compression" avec renfort local par Z-pins (en rouge)

Cette étude se fait en partenariat entre l'ICA ("ICA," 2026) et le Bristol Composites Institute ("BCI," 2026) hébergé à l'Université de Bristol au Royaume-Uni. Le stage se déroulera en intégralité à l'ICA et aucun séjour obligatoire au Royaume-Uni n'est requis durant le stage. Le candidat doit être en mesure d'obtenir une autorisation administrative d'accès à une ZRR (Zone à Régime Restrictif).

Bibliographie :

BCI, 2026. URL https://www.bristol.ac.uk/composites/

Hoffmann, J., Scharr, G., 2018. Mechanical properties of composite laminates reinforced with rectangular z-pins in monotonic and cyclic tension. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 109, 163–170. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.004

ICA, 2026. URL https://ica.cnrs.fr/

Ji, G., Cheng, L., Wang, Q., Li, J., Ke, Y., 2024. Influence of Z-pin material on the mechanical properties of fine Z-pin reinforced composites. Polym. Compos. 45, 13529–13545. https://doi.org/10.1002/pc.28715

Laffan, M.J., Pinho, S.T., Robinson, P., Iannucci, L., 2010. Measurement of the in situ ply fracture toughness associated with mode I fibre tensile failure in FRP. Part II: Size and lay-up effects. Compos. Sci. Technol. 70, 614–621. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.12.011

Mouritz, A.P., 2020. Review of z-pinned laminates and sandwich composites. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 139, 106128. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106128

Pinho, S.T., Robinson, P., Iannucci, L., 2006. Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites. Compos. Sci. Technol. 66, 2069–2079. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.12.023

Rutar, R., Serra, J., Bausiere, Q., Bouvet, C., 2023. Experimental characterization of tensile and compressive translaminar fracture toughness coupling multi-physics measurements. Eng. Fract. Mech. 291, 109568. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109568

Santana De Vega, E., Allegri, G., Zhang, B., Hamerton, I., Hallett, S.R., 2022. Improving the delamination bridging performance of Z-pins through the use of a ductile matrix. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 163, 107241. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107241

Yasaee, M., Lander, J.K., Allegri, G., Hallett, S.R., 2014. Experimental characterisation of mixed mode traction–displacement relationships for a single carbon composite Z-pin. Compos. Sci. Technol. 94, 123–131. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.02.001