

Caractérisation mécanique multi-échelle de l'interface fibre/matrice de composites renforcés de fibres végétales

Multi-scale mechanical characterization of the fiber/matrix interface in plant fiber-reinforced composites

Florian Boutenel¹, Israa Arafat¹, Adam Leveziel¹, Vincent Placet¹

¹ : Institut FEMTO-ST
Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS
24 rue de l'Épitaphe, F-25000 Besançon

e-mail : florian.boutenel@femto-st.fr, israa.arafat@femto-st.fr, adam.leveziel@femto-st.fr et vincent.placet@femto-st.fr

En lien avec la transition écologique et énergétique, les fibres issues de plantes annuelles constituent des candidats majeurs pour remplacer les renforts synthétiques dans les composites structuraux et multifonctionnels de demain [1]. En outre, la performance mécanique globale du matériau est conditionnée par la qualité de l'interface fibre/matrice [2]. En effet, le transfert d'efforts s'effectue localement entre les fibres et la matrice, où des interactions physico-chimiques complexes ont également lieu. Autrement dit, l'interface fibre/matrice doit être caractérisée aux petites échelles pour mieux comprendre les phénomènes qui s'y déroulent [3]. Dans la finalité de pouvoir prédire et optimiser les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité des composites renforcés de fibres végétales, il convient donc d'adopter une approche multi-échelle afin de corréler le comportement mécanique local de l'interface aux propriétés globales du matériau.

Dans cette étude, des échantillons composites unidirectionnels, associant des fibres de lin (FlaxTape™, Ecotechnilin, France) à une matrice époxy partiellement biosourcée (résine SRGreenPoxy 56 et durcisseur SD 7561, Sicomin, France) et mis en œuvre par thermocompression, ont été caractérisés mécaniquement à différentes échelles (Fig. 1).

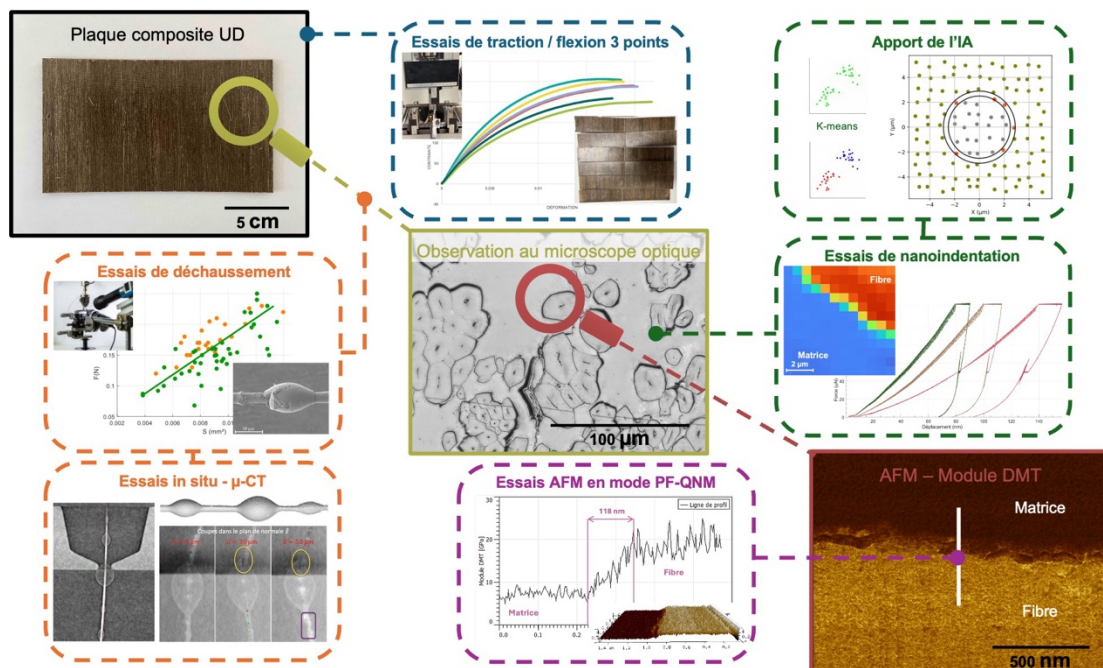


Fig. 1. Approche multi-échelle du comportement mécanique de l'interface fibre/matrice d'un composite lin/époxy

Tout d'abord, des essais de traction et de flexion 3 points ont confirmé que les propriétés macroscopiques du composite ne peuvent pas être correctement estimées en composant uniquement avec celles des fibres et de la matrice. Ainsi, l'interface doit être caractérisée afin de prendre en compte sa contribution dans la réponse globale du matériau. À ce titre, plusieurs techniques expérimentales ont été mises en place pour investiguer l'interface d'un point de vue mécanique à différentes échelles fines. Parmi elles, des essais de déchaussement de microgouttes sur fibre élémentaire ont permis de déterminer la résistance mécanique au cisaillement interfacial (IFSS) [4]. En outre, un dispositif original a été conçu de sorte à réaliser

cet essai de manière in situ dans un tomographe à rayons X [5]. Ceci a permis d'observer, en temps réel, aussi bien les déformations que les mécanismes conduisant à la séparation fibre/matrice [6]. En parallèle, les propriétés élastiques locales ont été évaluées grâce à des essais de nanoindentation. Cependant, bien que les méthodes d'intelligence artificielle constituent des outils d'aide à l'analyse des résultats [7], cette technique expérimentale présente certaines limites (artéfacts de mesure, erreurs d'interpolation, etc.) pour pouvoir rendre compte finement des gradients de propriétés entre la fibre et la matrice. De ce fait, des essais AFM en mode Peak Force-QNM ont été réalisés pour une exploration nanomécanique de l'interface [8]. L'exploitation des cartographies quantitatives du module élastique au niveau de l'interface a mis en évidence une zone de transition, ou interphase, ultrafine d'une épaisseur de l'ordre de 40 à 120 nm [9].

Ces derniers résultats révèlent que, contrairement aux composites conventionnels où une couche organique distincte et relativement épaisse (ensimage) permet de lier la matrice organique aux fibres inorganiques, l'interface forte dans les composites biosourcés résulte principalement des liaisons chimiques locales existant entre les deux constituants organiques (fibre et matrice). Par conséquent, pour pouvoir comprendre pleinement les interactions interfaciales locales, une approche multi-physique, incluant, par exemple, de la spectroscopie infrarouge, doit être menée [10].

En conclusion, les résultats obtenus dans cette étude contribuent à une démarche de modélisation numérique visant à prendre en compte la contribution de l'interface dans la réponse globale du composite. Son comportement mécanique pourra ainsi être mieux prédit, ouvrant la voie à une pleine exploitation du potentiel de ces matériaux biosourcés. Par ailleurs, les techniques expérimentales mises en œuvre dans ces travaux peuvent être déployées dans des environnements spécifiques, par exemple hygrothermiques, afin d'étudier l'effet du vieillissement de l'interface sur la durabilité du composite.

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus financièrement par SUPMICROTECH, le CNRS, la Région Bourgogne-Franche-Comté ainsi que la Graduate School EIPHI (ANR-17-EURE-0002) et ont bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'ANR au titre de France 2030 (ANR-22-PERE-0005). Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant concouru à cette étude, dont Fabien Amiot, Lamine Boubakar, Guillaume Colas, Xavier Gabrion, Yves Gaillard, Emmanuel Ramasso, Sofyan Tahri et Sébastien Thibaud.

Références

- [1] A. Bourmaud, *et al.* « Towards the design of high-performance plant fibre composites », *Progress in Materials Science*, Vol. 97, pp. 347-408, 2018.
 - [2] S. Huang, *et al.* « Characterization of interfacial properties between fiber and polymer matrix in composite materials—A critical review », *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 13, pp. 1441-1484, 2021.
 - [3] F. Boutenel, *et al.* « Caractérisation aux petites échelles de l'interface fibre/matrice de matériaux composites biosourcés », in : Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique, en ligne, 2023.
 - [4] A. Leveziel, *et al.* « Vers une meilleure compréhension de l'essai de déchaussement de microgouttes sur fibre élémentaire », in : Journées Nationales sur les Composites, Gif-sur-Yvette, 2025.
 - [5] A. Leveziel, *et al.* « Vers la conception d'un essai de déchaussement de microgoutte in-situ dans un tomographe à rayons X », in : Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique, en ligne, 2024.
 - [6] A. Leveziel, *et al.* « Suivi de déformations lors d'essais de déchaussement de fibre unitaire in situ par tomographie à rayons X », in : Congrès Français de Mécanique, Metz, 2025.
 - [7] F. Boutenel, *et al.* « Apport de l'apprentissage non supervisé à l'analyse des résultats de nanoindentation : Identification de l'interphase fibre/matrice dans un matériau composite à partir des valeurs de module élastique », in : Colloque Indentation, Besançon, 2025.
 - [8] I. Arafat, *et al.* « Interphase des composites biosourcés : Exploration nanomécanique par AFM PF-QNM », in : Colloque Indentation, Besançon, 2025.
 - [9] I. Arafat, *et al.* « Cartographie quantitative du module d'élasticité, au niveau de l'interface fibre/matrice d'un composite lin/époxy, obtenue par AFM en mode Peak Force », in : Journées Nationales sur les Composites, Gif-sur-Yvette, 2025.
 - [10] I. Arafat, *et al.* « Caractérisation multi-physique de l'interface fibre-matrice de matériaux composites biosourcés », in : Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique, en ligne, 2024.
-