

**Titre de la thèse/Thesis title :**

**Endommagement des fibres végétales et son influence sur la rupture des composites biosourcés : une approche multi-échelle par caractérisation *in situ* sous tomographie à rayons X et modélisation numérique éléments finis**

**Laboratoire d'accueil / Host Laboratory : Institut FEMTO-ST (Département Mécanique Appliquée)**

**Spécialité du doctorat préparé/Speciality : Mécanique des matériaux**

**Mots-clefs / Keywords : Composites — Matériaux biosourcés — Fibres végétales — Rupture — Endommagement — Mécanique Expérimentale — Analyse d'images — Modélisation Éléments Finis**

**Descriptif détaillé de la thèse / Job description**

Dans un contexte de transition écologique et de réduction de l'empreinte carbone des matériaux, l'intégration de constituants biosourcés dans les composites constitue un levier stratégique majeur. Parmi ces solutions, l'utilisation de fibres végétales (telles que le lin ou le chanvre) en substitution des renforts synthétiques dans les composites suscite un intérêt croissant. En effet, ces fibres végétales présentent des propriétés en traction compétitives, pouvant atteindre des niveaux de rigidité spécifique comparables à ceux des fibres de verre. Néanmoins, ces fibres naturelles présentent également des défauts (kink bands, ...) ainsi qu'une variabilité naturelle de structure et de morphologie qui peuvent impacter ses propriétés à rupture et la tenue des pièces en service. Une bonne compréhension des mécanismes d'endommagement des fibres végétales est donc nécessaire afin de les utiliser dans des applications à haute valeur ajoutée. Quelques études dans la littérature s'intéressent à l'endommagement à l'échelle de la fibre végétale, en mettant en œuvre des essais mécaniques *in situ* sous tomographie à rayons X [1,2]. Cependant, un certain nombre de questions restent encore ouvertes à ce jour : où s'initie l'endommagement dans la fibre ? Quelles sont les longueurs caractéristiques en jeu lors de la rupture ? Comment la matrice du composite interagit avec la fibre ? Pour y répondre, un certain nombre de verrous doivent être levés sur (i) la maîtrise d'essais à rupture jusqu'à l'échelle de la fibre élémentaire, (ii) la caractérisation de l'endommagement à ces petites échelles et (iii) l'identification des paramètres et longueurs pertinentes à introduire dans les modèles d'endommagement à l'échelle de la fibre.

L'objectif général de ce projet de thèse est une meilleure compréhension du rôle des différentes échelles de structure des fibres végétales dans leur rupture et celle du composite. Le travail s'appuiera sur des moyens expérimentaux avancés disponibles au Département de Mécanique Appliquée (DMA) pour la caractérisation aux petites échelles, notamment la microtomographie à rayons X ainsi que des dispositifs de micro-traction. Des travaux actuellement menés au DMA ont déjà permis de fabriquer des éprouvettes entaillées jusqu'à l'échelle de la fibre unique (Figure 1) démontrant la faisabilité d'élaboration d'éprouvettes adaptées à des essais à rupture aux petites échelles. Des essais *in situ* sous microtomographie à rayons X seront développés afin de suivre l'initiation et la propagation de l'endommagement à l'échelle microscopique. L'analyse des champs de déformation reposera notamment sur des techniques de corrélation volumique d'images (Digital Volume Correlation, DVC), permettant un accès quantitatif aux mécanismes locaux. Une étude récente a d'ailleurs mis en œuvre cette approche et montré sa pertinence dans la rupture de composites à renforts de fibres de carbone [3]. Sa réalisation sur des composites biosourcés reste un challenge supplémentaire du fait des spécificités des fibres végétales (faible contraste aux rayons X entre fibre et matrice, variabilité morphologique, longueur finie,...) et fera l'objet d'une attention particulière lors de la thèse. Une approche par descente d'échelles sera mise en œuvre : des essais seront d'abord réalisés sur des micro-échantillons de composites unidirectionnels (quelques fibres dans une matrice), puis sur des faisceaux de fibres, avant d'atteindre l'échelle de la fibre unique.

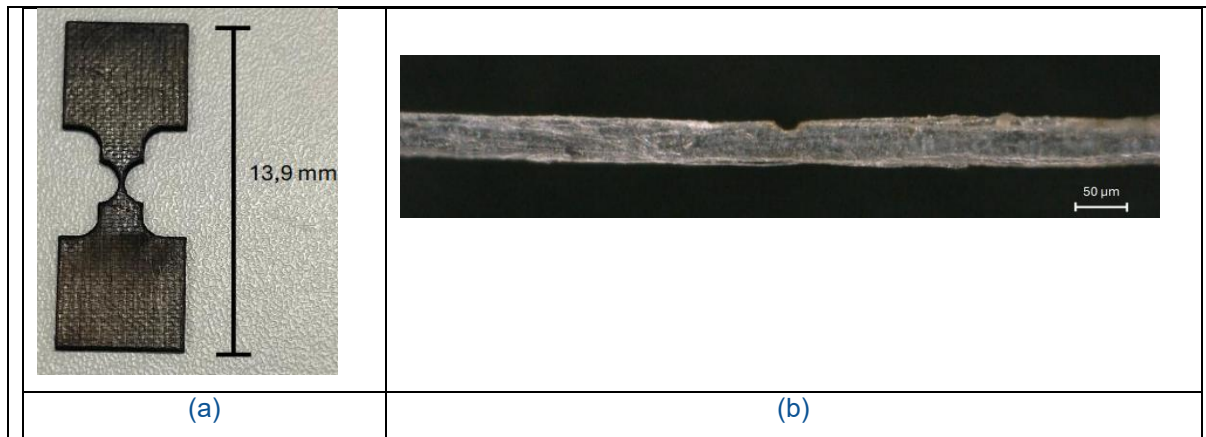


Figure 1 : (a) Micro-échantillon de composite unidirectionnel lin-epoxy obtenu par usinage laser. (b) Fibre de lin entaillée par ablation laser.

Dans un second temps, les essais expérimentaux seront confrontés à des simulations numériques par éléments finis de la rupture de fibres végétales via l'utilisation d'un modèle d'endommagement [4,5]. Les échelles de structures des fibres seront progressivement introduites dans la modélisation ainsi que leur variabilité morphologique (Figure 2b). Le dialogue entre les résultats expérimentaux et ceux issues de la modélisation numérique permettra d'identifier les paramètres du modèle d'endommagement (Figure 2b) pour la fibre végétale, inconnus à ce jour, et de les relier aux longueurs caractéristiques présentes dans le matériau.

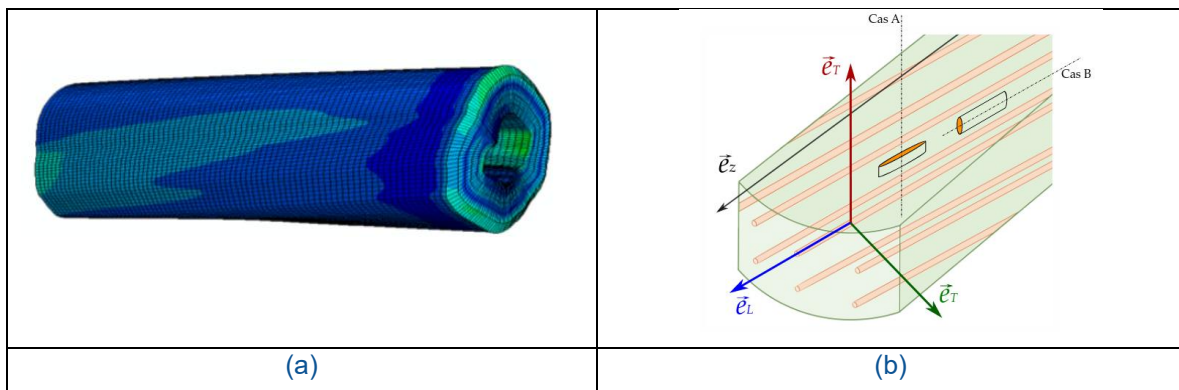


Figure 2 : (a) Distribution de contraintes dans une fibre végétale [4]. (b) Représentation schématique des types de fissures prises en compte dans le modèle d'endommagement de [5].

Ce projet de thèse propose donc une approche à la fois expérimentale et numérique sur la problématique de la rupture aux petites échelles de matériaux biosourcés. En s'appuyant sur un dialogue poussé entre essais expérimentaux et calculs numériques, les résultats de ces travaux de thèse devraient contribuer significativement à améliorer la durabilité des composites à renforts de fibres végétales.

#### Références bibliographiques / Bibliography

- [1] Beaugrand, J., Guessasma, S. & Maigret, JE. (2017) Damage mechanisms in defected natural fibers. Sci Rep 7, 14041 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14514-6>
- [2] Guessasma S and Beaugrand J (2019) Damage Kinetics at the Sub-micrometric Scale in Bast Fibers Using Finite Element Simulation and High-Resolution X-Ray Micro-Tomography. Front. Plant Sci. 10:194. doi: 10.3389/fpls.2019.00194
- [3] Lee Y, et al (2026), 3d strain mapping around fibre breaks using in situ synchrotron computed tomography and digital volume correlation, Composites Part B (*Preprint*)
- [4] Del Mastro, A. (2018) Transition d'échelle entre fibre végétale et composite UD : propagation de la variabilité et des non-linéarités, Thèse de Doctorat
- [5] M. L. Boubakar, F. Trivaudey, D. Perreux & L. Vang. (2002) A meso-macro finite element modelling of laminate structures part I : Time-independent behaviour. Composite Structures, vol. 58, no. 2, pages 271–286. 57, 64, 199

**Profil demandé / Applicant profile**

Étudiant·e en école d'ingénieurs ou en Master 2 dans le domaine de la mécanique ou des matériaux, possédant un goût prononcé pour l'expérimentation, l'analyse d'images et/ou la modélisation numérique. Les profils mixtes expérimental/numérique seront particulièrement appréciés. Une spécialisation dans les composites biosourcés, l'endommagement des matériaux ou la corrélation d'image numérique sera un élément favorisant. Une connaissance en tomographie à rayons X serait également recherchée mais n'est pas une contrainte forte.

## Critères de sélection :

- Qualité du parcours académique,
- Solides bases en mécanique des milieux continus et mécanique des matériaux,
- Connaissances dans le comportement des matériaux, idéalement matériaux composites,
- Intérêt pour la modélisation de l'endommagement,
- Connaissances en simulation numérique par éléments finis,
- Compétences en programmation Python/Matlab,
- Intérêt pour les techniques expérimentales avancées (Tomographie à rayons X, Corrélation d'images numériques).

## Qualités personnelles :

- Goût pour le travail expérimental et la modélisation numérique.
- Curiosité scientifique et fort intérêt pour la recherche,
- Rigueur, autonomie et organisation,
- Aptitude à communiquer à l'écrit et à l'oral.

**Financement : MESRI Etablissement**

Dossier à envoyer pour le 26/05/2026  
Début du contrat : 1<sup>er</sup> Octobre 2026  
Salaire mensuel brut : 2300€

**Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor**

**BOUBAKAR Lamine** ([lamine.boubakar@univ-fcomte.fr](mailto:lamine.boubakar@univ-fcomte.fr))

**Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s)**

**François Villette** (co-encadrant)

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

Application must contain the following documents:

- CV
- Cover letter
- At least 1 reference letter