

## Offre de thèse

# 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 :** Institut FEMTO-ST (Département Mécanique Appliquée)

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

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

### Descriptif détaillé de la thèse

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.

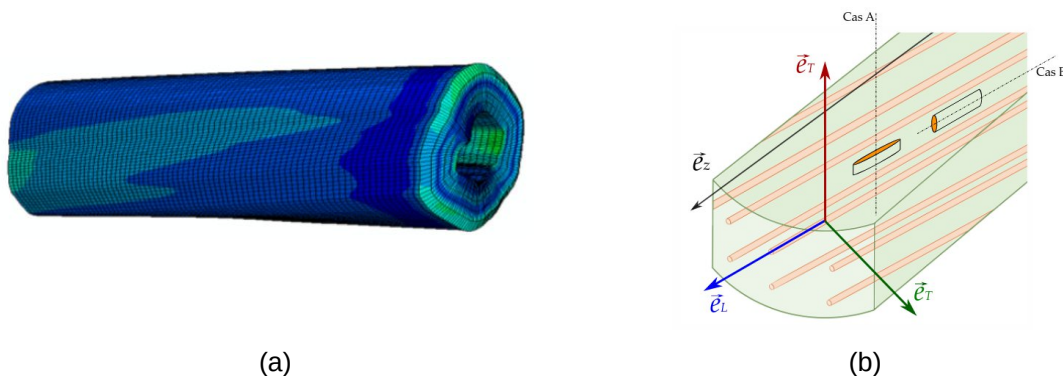


Figure 2 : (a) Distribution de contraintes dans une fibre végétale [4]. (b) Représentation schématique des types de fissures prises en compte dans le modèle d'endommagement de [5].

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

- [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

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 mai 2026**

Début du contrat : 1<sup>er</sup> Octobre 2026

Salaire mensuel brut : 2300€

### Direction de la thèse

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

### Co-directeur(s) et co-encadrant(s)

**François Villette** (co-encadrant, [francois.villette@univ-fcomte.fr](mailto:francois.villette@univ-fcomte.fr))

**Les candidat-es sont invité-es à envoyer leur candidature à François Villette  
([francois.villette@univ-fcomte.fr](mailto:francois.villette@univ-fcomte.fr))**

Le dossier de candidature doit comprendre les documents suivants :

- CV,
- Lettre de motivation,
- Bulletins de notes des deux semestres de M1 et du premier semestre de M2,
- Au moins une lettre de recommandation.

## Doctoral thesis opportunity

# Damage of plant fibres and its influence on the failure of bio-based composites: a multi-scale approach using *in situ* X-ray tomography characterization and finite element numerical modeling.

**Host Laboratory :** Institut FEMTO-ST (Département Mécanique Appliquée)

**Speciality :** Mechanics of Materials

**Keywords :** Composites — Bio-based materials — Plant fibers — Fracture — Damage — Experimental mechanics — Image analysis — Finite element modeling

### Job description

In the context of the ecological transition and efforts to reduce the carbon footprint of materials, the incorporation of bio-based components into composites represents a major strategic opportunity. Among these solutions, the use of plant-based fibers (such as flax or hemp) as a substitute for synthetic reinforcements in composites is attracting growing interest. Indeed, these plant fibers exhibit competitive tensile properties, with specific stiffness levels comparable to those of glass fibers. However, these natural fibers also have defects (kink bands, etc.) as well as natural variability in structure and morphology that can affect their fracture properties and the performance of parts in service. A thorough understanding of the damage mechanisms in plant fibers is therefore necessary to enable their use in high-value-added applications. A few studies in the literature have examined damage at the plant fiber scale, using *in situ* mechanical testing under X-ray tomography [1,2]. However, a number of questions remain unanswered to this day: where does damage initiation occur within the fiber? What are the characteristic lengths involved during fracture? How does the composite matrix interact with the fiber? To answer these questions, a number of obstacles must be overcome regarding (i) the manage of fracture tests down to the single-fiber scale, (ii) the characterization of damage at these small scales, and (iii) the identification of relevant parameters and lengths to be incorporated into fiber-scale damage models.

The overall objective of this thesis project is to gain a better understanding of the role of the different structural scales of plant fibers in their failure and that of the composite. The work will rely on advanced experimental facilities available at the Department of Applied Mechanics (DMA) for small-scale characterization, notably X-ray microtomography as well as micro-tensile testing devices. Work currently underway at the DMA has already enabled the fabrication of notched specimens down to the single-fiber scale (Figure 1), demonstrating the feasibility of producing specimens suitable for small-scale fracture testing. *In situ* tests using X-ray microtomography will be developed to track the initiation and propagation of damage at the microscopic scale. The analysis of strain fields will rely in particular on digital volume correlation (DVC) techniques, providing quantitative insight into local mechanisms. A recent study has, in fact, implemented this approach and demonstrated its relevance in the fracture of carbon fiber-reinforced composites [3]. Applying this approach to bio-based composites remains an additional challenge due to the specific characteristics of plant fibers (low X-ray contrast between fiber and matrix, morphological variability, finite length, etc.) and will be the focus of particular attention in this thesis. A top-down approach will be implemented: tests will first be conducted on micro-samples of unidirectional composites (a few fibers in a matrix), then on fiber bundles, before reaching the single-fiber scale.

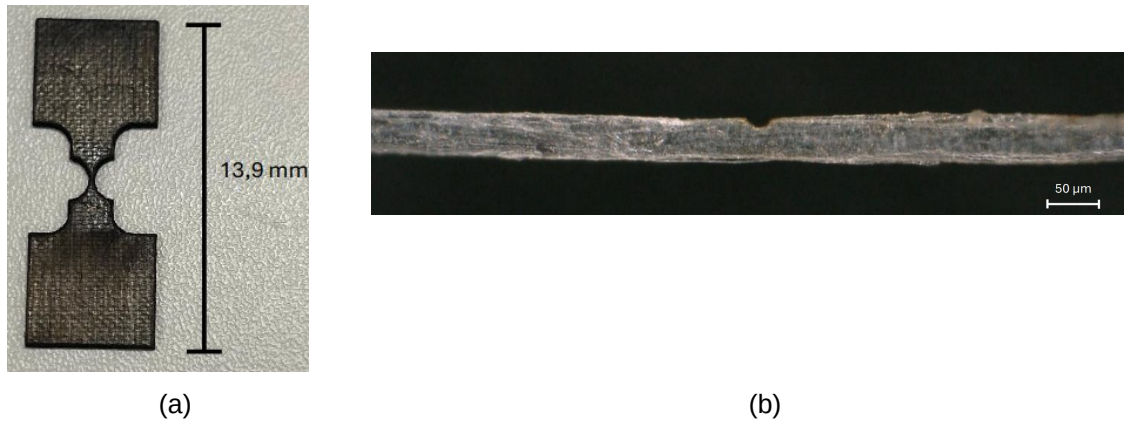


Figure 1 : (a) A micro-sample of unidirectional flax-epoxy composite produced by laser machining. (b) Flax fiber notched by laser ablation.

In a second phase, the experimental results will be compared with finite-element numerical simulations of plant fiber fracture using a damage model [4,5]. The structural scales of the fibers will be progressively incorporated into the modeling, along with their morphological variability (Figure 2b). The comparison between the experimental results and those from the numerical modeling will enable the identification of the damage model parameters (Figure 2b) for plant fibers—which are currently unknown—and their correlation with the characteristic lengths present in the material.

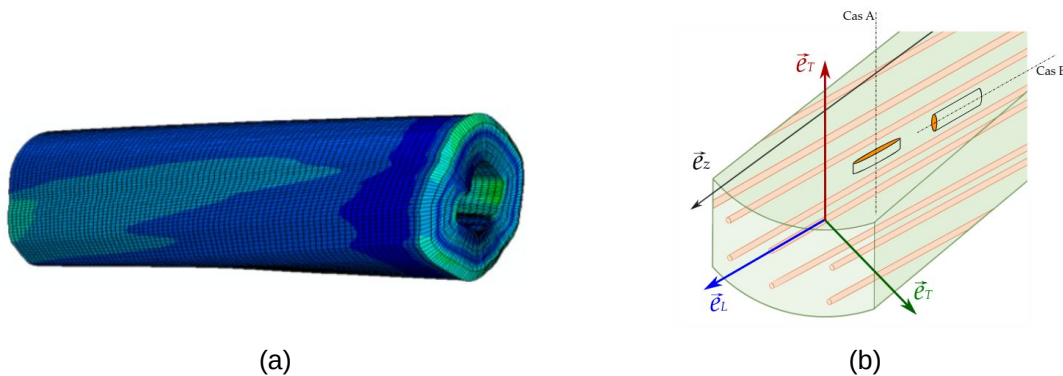


Figure 2 : (a) Stress distribution in a plant fiber [4]. (b) Schematic representation of the types of cracks considered in the damage model from [5].

This thesis project therefore proposes an approach that combines experimental and computational methods to address the issue of fracture at the micro-scale in bio-based materials. By drawing on an in-depth interplay between experimental testing and computational analysis, the results of this thesis research are expected to make a significant contribution to improving the durability of plant-fiber-reinforced composites.

### 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

## Applicant profile

A student currently enrolled in an engineering school or a Master's 2 program in mechanical engineering or materials science, with a strong interest in experimentation, image analysis, and/or numerical modeling. Candidates with a background in both experimental and numerical methods will be particularly sought after. A specialization in bio-based composites, material damage, or digital image correlation would be a plus. Knowledge of X-ray tomography is also desirable but not a strict requirement.

### Selection criteria:

- Quality of academic background,
- Solid foundation in continuum mechanics and materials mechanics,
- Knowledge of material behavior, ideally composite materials,
- Interest in damage modeling,
- Knowledge of finite element numerical simulation,
- Skills in Python/Matlab programming,
- Interest in advanced experimental techniques (X-ray tomography, digital image correlation).

### Personal qualities:

- Enjoyment of experimental work and numerical modeling.
- Scientific curiosity and a strong interest in research,
- Rigor, independence, and organizational skills,
- Ability to communicate effectively in writing and orally.

## Funding : MESRI Etablissement

Application materials must be submitted by **May 26, 2026**

Contract start date: October 1, 2026

Gross monthly salary: €2,300

## Thesis Supervisor

**Lamine Boubakar (lamine.boubakar@univ-fcomte.fr)**

## Co-advisors and co-supervisors

**François Villette (co-encadrant, francois.villette@univ-fcomte.fr)**

**Applicants are invited to submit their applications to François Villette  
(francois.villette@univ-fcomte.fr).**

The application package must include the following documents:

- CV,
- Cover letter,
- Transcripts for both semesters of the first year of the master's program and the first semester of the second year,
- At least one letter of recommendation