

# THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 642

*Ecole doctorale Végétal, Animal, Aliment, Mer, Environnement*

Spécialité : « Statistique, Modélisation, Intelligence artificielle en sciences du vivant et géosciences »

Par

**Vasuki RAJAKUMARAN**

## Multi-scale characterization and numerical modelling of Modern and Ancient flax fiber elements

Caractérisation multi-échelle et modélisation numérique des éléments de fibres de lin modernes et anciens

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 19 décembre 2024

Unité de recherche : INRAE Biopolymères Interactions et Assemblages, Nantes, France

### Rapporteurs avant soutenance :

Hom Dhakal  
Emmanuel de Luycker

Professor, University of Portsmouth, Portsmouth, U.K  
Enseignant Chercheur (HDR), (UTTOP), Tarbes, France

### Composition du Jury :

Président : Prénom Nom

Fonction et établissement d'exercice (8) (à préciser après la soutenance)

Examineurs : Jörg Müssig  
Nadine Allanic  
Armelle Chabot  
Hom Dhakal  
Emmanuel de Luycker

Professor, University of Applied Sciences, Hochschule Bremen  
Professeure des Universités IUT de Nantes (HDR), Nantes, France  
Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel, Bouguenais, France  
Professor, University of Portsmouth, Portsmouth, U.K  
Enseignant Chercheur (HDR), (UTTOP), Tarbes, France

Dir. de thèse : Sofiane Guessasma  
Co-dir. de thèse : Johnny Beaugrand  
Co-encadrant de thèse : Alain Bourmaud

Directeur de Recherche, HDR, INRAE Nantes, France  
Directeur de Recherche, HDR, INRAE Nantes, France  
Ingénieur de Recherche, HDR, IRDL, Lorient, France

### Invité(s)

Vincent Placet

Ingénieur de Recherche, HDR, Institut Femto ST, Besançon, France

**Titre :** Caractérisation multi-échelle des fibres de lin modernes et anciennes

en combinant des méthodes expérimentales et numériques

**Mots clés :** Fibres de lin, microstructure, vieillissement, propriétés mécaniques, modélisation

**Résumé :** Les fibres de lin sont utilisées depuis des millénaires, mais les préoccupations liées au réchauffement climatique et à la pollution des matériaux non biodégradables ont relancé l'intérêt pour celles-ci. Ces fibres naturelles sont étudiées pour de nouvelles applications, notamment comme renforts de composites bio-basés. Ces travaux de recherche ont deux objectifs majeurs : analyser le comportement mécanique des fibres de lin et l'influence de leur microstructure à différentes échelles, puis comprendre l'effet du temps sur leur structure et leurs propriétés en traction. Les caractérisations expérimentales et numériques conduites sur fibres égyptiennes modernes et anciennes, montrent que le vieillissement affecte particulièrement les zones de défauts et les pores le long de l'axe

des fibres, provoquant des ruptures dans ces zones. Ces effets sont observés à diverses échelles et l'approche numérique confirme que les concentrations de contraintes dues à la rugosité et la porosité entraînent des fissures et la rupture des fibres. Ce comportement a été observé pour les fibres modernes et anciennes à différentes échelles. À l'avenir, les modèles numériques devront intégrer des critères d'endommagement et les propriétés d'interface des lamelles moyennes pour les faisceaux ainsi que les propriétés de d'interface, y compris les caractéristiques de la lamelle moyenne pour les faisceaux et les propriétés de frottement fibre-fibre pour les fils.

**Title :** Multi-scale characterization of Modern and Ancient flax fiber elements

by combining experimental and numerical methods

**Keywords :** Flax fibers, microstructure, ageing, mechanical properties, modelling

**Abstract :** Flax fibers have been used by human civilizations for millennia, but increasing concerns about global warming and pollution from non-biodegradable materials have revived interest in plant-based fibers. These natural fibers are being investigated for new uses, particularly as reinforcements in bio-composite materials. This research focuses on two main objectives: first, to analyze the mechanical behavior of flax fibers and how their microstructure affects performance on multiple scales; second, to study how aging alters the fiber's structure and impacts their tensile properties. By examining both modern and ancient Egyptian fibers through experimental and numerical methods, key findings show that aging significantly affects twisted region, middle

lamella and sensitive kink-bands, particularly in ancient fibers, where higher numbers of kink-bands and pores along the fiber axis were observed. These pores trigger fiber breakage at the kink-band regions in yarns, bundles and elementary fibers. This behavior can be confirmed from numerical results which shows stress concentrations caused by surface roughness, porosity, particularly at pore in kink-bands leading to crack initiation and fiber rupture. This behavior was seen across both modern and ancient fibers at different scales. Moving forward, models should incorporate damage criteria and interface properties, including middle lamella characteristics for bundles and frictional properties for yarns.