

Identification des propriétés micromécaniques de Kink Bands au sein de renforts fibreux pour bio composites fabriqués par impression 3D. Application au lin/PLA dans différentes conditions de température et d'humidité

Mots clés : Relation microstructure – comportement, Analyse multi échelle (expérimental – numérique), Biocomposite, Défauts (kink-bands)

Contexte et acquis scientifique

Les bio-composites, particulièrement ceux utilisant des fibres naturelles comme le lin en combinaison avec des matrices polymères biodégradables telles que le PLA (acide polylactique), suscitent un intérêt croissant dans de nombreux secteurs industriels. Ces matériaux offrent des avantages en termes de durabilité, de légèreté, de biodégradabilité et de performances mécaniques satisfaisantes. L'une des techniques prometteuses pour la fabrication de ces bio-composites est l'impression 3D, qui permet de produire des structures complexes avec des renforts de fibres aux orientations contrôlées.

Cependant, les propriétés mécaniques des bio-composites renforcés avec ces fibres naturelles peuvent être affectées par la présence de défauts microstructuraux tels que les *Kink-Bands*. Ces zones de déformation et de dislocations localisées et distribuées le long des renforts fibreux peuvent diminuer la performance mécanique globale du composite.

Les *Kink Bands* apparaissent dans les fibres après des chargements thermo-hygro-mécaniques suffisamment intenses pour endommager localement les corps fibreux des renforts. Les *Kink-Bands* sont alors distribués aléatoirement le long des faisceaux fibreux. Les distances moyennes fibreuses entre ces *Kink Bands* s'apparenteraient à des longueurs critiques de fibres aux extrémités desquelles les sévérités des déformations/dislocations sont à identifier. Il apparaît donc que les *Kink-Bands* soient susceptibles de piloter les modes de ruptures locaux des bio composites depuis les déchaussements fibres matrice (rupture adhésive) jusqu'aux ruptures cohésives. Une attention particulière sera portée sur l'influence de l'environnement extérieur (humidité, température) sur l'apparition et l'influence de ces défauts.

Dans le cadre du projet ANR FLOEME (<https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0008>), les équipes de recherche des partenaires identifient les chaînes de propagations et les phénoménologies de l'apparition de *Kink-Bands* lors du cycle de fabrication des renforts fibreux (depuis le raffinage des fibres jusqu'à leur impression 3D). L'approche actuelle est essentiellement expérimentale et la caractérisation des *Kink-Bands* et des conséquences multi-échelles sur les comportements mécaniques sont encore mal connues.

En appui des approches macroscopiques mécaniques (tests à l'échelle des structures composites) et des approches d'observations micro-géométriques (tomographie), il est aujourd'hui nécessaire de :

- Caractériser finement la micro mécanique des *Kink-Bands* selon les sévérités de déformations et d'endommagements qui les caractérisent
- Comprendre comment ces *Kink-Bands* se comportent mécaniquement selon leurs sévérités
- Caractériser leurs distributions d'apparition sur les renforts fibreux et d'identifier ainsi des pseudo-longueurs critiques au sein des structures composites.
- Comprendre l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés de *Kink-Bands*.

Objectifs scientifiques du projet

L'objectif principal de cette thèse est donc d'identifier et de caractériser les propriétés micromécaniques des *Kink-Bands* et leurs distributions géométriques au sein des renforts de fibres naturelles, notamment le lin, dans des bio-composites fabriqués par impression 3D. L'accent sera mis sur le couple lin/PLA, en raison de ses propriétés écologiques et mécaniques intéressantes pour des applications industrielles. L'étude visera à :

- **A l'échelle des faisceaux fibreux (renforts co-mêlés et pré-consolidés)**

Les renforts se présentent comme des faisceaux fibreux (diamètres équivalents de 0.4 à 0.7 mm) co-mêlés et guipés avec du PLA. Ces renforts sont d'abord consolidés et seront imprimés de manière à :

1. **Modéliser les comportements des *Kink-Bands*** en construisant un modèle micromécanique permettant de construire numériquement des renforts dotés de *Kink Bands* aux distributions et propriétés mécaniques contrôlées.
2. **Identifier expérimentalement les comportements mécaniques** des renforts fibreux et cartographier les distributions des *Kink-Bands* en fonction de conditions d'hygrométrie et de température contrôlée.
3. **Caractériser les *Kink-Bands*** : Étudier la formation, la taille, l'orientation et la distribution des *Kink-Bands* au sein des fibres de lin utilisées comme renfort dans une matrice PLA. Cette partie se fera aux échelles du fil élémentaire et du composite
4. **Recaler les modèles numériques sur les résultats expérimentaux pour** s'assurer que nos modèles reflètent la réalité. Compte tenu des complexités des phénomènes en jeu, le recours au Machine Learning pour recaler les modèles est inévitable. Cette partie permettra de mieux prédire la performance globale du matériau en fonction des défauts microstructuraux identifiés.

- **A l'échelle des structures composites (renforts)**

Le passage à l'échelle composite s'effectuera, dans un premier temps, par l'impression de structures composites unidirectionnelles. Selon l'avancée des travaux, des stratifiés multi directionnelles types QIQH (Quasi Isotropes Quasi Homogènes) ou AERO pourront être fabriqués.

Ces structures seront alors étudiées de la manière suivante :

1. **Modéliser les comportements composites dotés de *Kink-Bands*** en utilisant le précédent modèle micromécanique, afin de construire numériquement des composites dotés de *Kink-Bands* aux distributions et propriétés mécaniques contrôlées.
2. **Identifier expérimentalement les comportements mécaniques** des composites en fonction de conditions d'hygrométrie et de température contrôlée.
3. **Caractériser les *Kink Bands*** : Étudier la formation, la taille, l'orientation et la distribution des *Kink-Bands* au sein des composites fabriqués, en fonction des paramètres de fabrication.
4. **Évaluer l'influence des procédés de fabrication** : Comprendre comment les paramètres d'impression 3D (orientation des fibres, taux de remplissage, températures d'extrusion, etc.) influencent la formation et l'évolution des *Kink-Bands* en termes de *sévérités* et de distributions.

Méthodologie :

- **Approche expérimentale** : Des échantillons de bio-composites lin/PLA seront fabriqués via impression 3D. Des techniques de microscopie électronique (MEB) et de micro tomographie seront utilisées pour observer et caractériser les *Kink-Bands*. Des essais thermo-hygro-mécaniques à différentes échelles (macro et micro) seront réalisés pour évaluer les propriétés locales et globales du matériau.

- **Modélisation numérique** : Une modélisation par éléments finis (FEM) sera développée pour simuler l'apparition des *Kink-Bands* et leur impact sur le comportement mécanique du composite à chacune de ses échelles.
- **Analyse multi-échelles** : Un modèle couplant les échelles microscopique et macroscopique sera élaboré pour mieux comprendre l'effet des *Kink-Bands* sur les propriétés mécaniques globales des bio-composites.

Contributions attendues :

- Amélioration des connaissances sur les mécanismes de formation des *Kink-Bands* dans les renforts fibreux naturels.
- Identification des paramètres de fabrication influençant la formation des *Kink-Bands* et leurs propriétés mécaniques.
- Développement de modèles prédictifs pour optimiser la conception de bio-composites à fibres naturelles fabriqués par impression 3D, en tenant compte des défauts microstructuraux.
- Contribution à la promotion de l'utilisation de bio-composites lin/PLA dans des applications industrielles à haute performance et durabilité.

Cette thèse s'inscrit dans une approche multidisciplinaire visant à renforcer l'utilisation des matériaux biosourcés dans des applications techniques et écologiques. Elle permettra de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des défauts dans les renforts fibreux naturels et de proposer des solutions pour améliorer la durabilité et les performances des bio-composites fabriqués par impression 3D

Bibliographie

- Richely, E., Bourmaud, A., Placet, V., Guessasma, S., Beaugrand, J., 2022. A critical review of the ultrastructure, mechanics and modelling of flax fibres and their defects. Prog Mater Sci. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100851>
- Morgillo M., Brionne L., Melelli A., Ouagne P., Scheel M., Weitkamp T., U. Shah D., Abida M., Beaugrand J., Bourmaud A., 2023. Elucidating links between the mechanical performance of flax fibres and their structural defects, Indus Crops and Prod. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117722>.
- Quereilhac D., Pinsard L., Guillou E., Fazzini M., De Luycker E., Bourmaud A., Abida M., Perrin J., Weitkamp T., Ouagne P., 2023. Exploiting synchrotron X-ray tomography for a novel insight into flax-fibre defects ultrastructure, Indus Crops and Prod. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116655>.
- Quereilhac D., De Luycker E., Guessasma S., Abida M., Perrin J., Weitkamp T., Bourmaud A., Ouagne P., 2024, Synchrotron X-ray microtomography and finite element modelling to uncover flax fibre defect's role in tensile performances, Compos Part A : Appl Sci and Manuf. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108276>

Lieu de thèse : LEM3 – Metz

Date de début : 1^{er} Octobre 2025

Personnes à contacter :

Marwa Abida (ENIM/LEM3) : marwa.abida@univ-lorraine.fr

Stéphane Fontaine (ENSAM/LEM3) : stephane.fontaine@ensam.eu

Eric Fleury (UL/LEM3) : eric.fleury@univ-lorraine.fr