

Contrat doctoral UHA

Etude mécanique multi-échelle d'un fil de lin : approche expérimentale et théorique

Mots-clés : fibre, fil, caractérisation expérimentale, modèle mécanique, traction, torsion, frottement

Environnement du projet

Directeurs de thèse : Marie-Ange Bueno (PR)

Co-encadrant (s) : Camille François (MCF, LPMT) et Thomas Weisser (MCF, IRIMAS)

marie-ange.bueno@uha.fr, camille.francois@uha.fr, thomas.weisser@uha.fr

Unité de recherche :

Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT UR 4365)

11, rue Alfred Werner – 68200 Mulhouse

www.lpmt.uha.fr

Le Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles est une unité de recherche de l'Université de Haute Alsace. Il compte au total 80 membres. Il est un des rares laboratoires français dont l'activité est exclusivement centrée sur le *Textile et la Science des fibres* et des matériaux fibreux. Le LPMT est impliqué dans tous les secteurs où le matériau fibreux est présent, à savoir les *Textiles pour l'Homme* (ingénierie tissulaire, biomatériaux textiles, ingénierie des matériaux confectionnés, textiles intelligents au service de l'Homme), les *Textiles de Structures* (cordes, câbles et tresses, textiles intelligents pour la surveillance des structures, textiles de renforts et matériaux composites) et les *Textiles et l'Environnement* (matériaux fibreux biosourcés, recyclage de matériaux fibreux et filtration). Il est spécialisé dans la conception de matériaux fibreux, le développement de méthodes de caractérisation et d'obtention de structures fibreuses, de l'échelle nanométrique à l'échelle macroscopique. A chaque échelle, sont étudiés des ensembles mono, bi et tridimensionnels en faisant le lien entre le procédé, la structure et leurs propriétés.

Contexte du projet

Contexte sociétal et économique

Du fait des contraintes environnementales fortes (pollution, consommation d'eau, impact carbone dus aux transports de marchandises à travers la planète), les fibres biosourcées en particulier le lin et le chanvre, mais également l'ortie, sont l'objet de nombreux travaux de recherche en France et plus largement en Europe. En effet, la France est le plus gros producteur au monde de lin textile (plus de 60% de la production mondiale). Cependant en 2005 la dernière filature de lin (entreprise transformant la fibre de lin en un fil) a fermé au profit de pays à moindre coût de main d'œuvre et de structure. Aujourd'hui, plusieurs filatures ont vu le jour en France, la première ayant ouvert fin 2019 en Alsace. Le point important est qu'il ne s'agit pas de simples relocalisations d'usines mais dans certains cas de réelles innovations. En effet, l'enjeu industriel est fort car il est nécessaire de produire aujourd'hui de façon différente, à savoir plus écologique (réduction de la consommation d'énergie et d'eau). La

maîtrise des nouveaux procédés de fabrication de fil, qui génèrent de nouvelles morphologies des fibres constitutives du fil (distribution en longueur et finesse), est alors fondamentale.

Le challenge scientifique à lever est donc de pouvoir estimer a priori les propriétés mécaniques d'un fil au regard des propriétés de ses fibres constitutives et de sa structure. Le présent projet vise ainsi à proposer un outil de modélisation qui, à partir de données expérimentales issues de tests de caractérisation à l'échelle des fibres, permettra de prédire le comportement en traction d'un fil. Cet outil devra être suffisamment précis et robuste pour permettre d'envisager son utilisation dans un contexte industriel quotidien.

Pour ce faire, la stratégie choisie consiste à revisiter et adapter des modèles analytiques de prédiction du comportement mécanique de fils basés sur le comportement en traction des fibres constitutives et le frottement inter-fibres. Ces modèles anciens ont :

- d'une part été établis pour des fibres, de type laine ou coton, dont la morphologie, en particulier la finesse, ne dépend pas (finesse) ou peu (longueur) du procédé de fabrication, ce qui n'est pas le cas des fibres dites libériennes (lin, chanvre, ortie), pour lesquelles l'échelle de la fibre utilisée dans le fil est rarement celle de la fibre élémentaire ;
- d'autre part été pensés à une époque où les moyens numériques étaient quasi inexistantes.

En revanche, ils présentent l'avantage d'être accessibles et utilisables par un industriel, même s'ils sont potentiellement moins précis que d'autres modèles beaucoup plus coûteux en temps de calcul et en moyens expérimentaux mis en œuvre (Bral [1]).

Ce projet pourra s'appuyer sur la complémentarité entre la (riche) littérature existante, les compétences spécifiques en matériaux fibreux, en caractérisation expérimentale et en modélisation mécanique des encadrants. Au niveau du laboratoire, ce projet s'inscrit à l'interface entre les champs d'expertise « Conception et modélisation » et « Caractérisation ». Il bénéficie également du soutien d'un partenaire industriel local pour la fourniture de matière première (fibres et fils).

Contexte scientifique

L'étude et la modélisation du comportement mécanique des fils est l'un des principaux sujets de recherche dans le domaine textile, initié dès 1907 dans les travaux de référence réalisés et publiés par Gégauff [2]. De 1945 à 1975, de nombreuses études théoriques ont permis de développer un formalisme mathématique et de proposer des modèles analytiques décrivant les caractéristiques structurelles qui influencent ce comportement. On note en particulier les deux ouvrages de synthèse publiés par Hearle [3] puis par Zurek [4], encore maintenant considérés comme des références. Or, la diffusion de ces résultats s'est trouvée à l'époque limitée par leur complexité mathématique, l'absence de moyens de calcul efficaces, ainsi que les importantes évolutions des processus techniques de filature au cours des années 80 et 90. Ces modèles n'ont donc jamais pleinement trouvé leur place auprès des industriels.

Ces dix dernières années, les progrès dans le domaine du calcul numérique ont permis de nouvelles avancées dans ce domaine : calculs par éléments finis/discrets pour la modélisation de structures filées 1D [5,6] ; intelligence artificielle pour l'estimation de relation entre paramètres caractéristiques des fibres et des fils, via des procédés de filature [7]. Or, les fils textiles issus de fibres naturelles sont très différents des structures de cordes/câbles en fibres polymères, notamment en raison de leur forte

hétérogénéité, et les modèles de haut niveau issus d'algorithmes d'apprentissage ne permettent pas d'établir de liens directs avec les phénomènes physiques en jeu. Il est donc toujours nécessaire de poursuivre le développement et l'utilisation de modèles mécaniques théoriques possédant des fondements physiques forts. Plutôt que de les « redécouvrir » il s'agit de reprendre leur étude en détail et d'utiliser les outils numériques à disposition pour les rendre exploitables dans un contexte industriel [8]. Cela suppose également de mettre en place des étapes de corrélation par rapport à des données d'essais afin d'assurer la validité de ces modèles et d'évaluer leur prédictivité.

Le but de ce projet est donc de proposer un modèle et des outils de simulation permettant de prédire le comportement en traction d'un filé de fibres naturelles en fonction de la torsion appliquée. De manière classique (cf. courbe d'interprétation de la relation entre résistance et torsion d'un fil [9,10]), celui-ci devra non seulement décrire le comportement structural du fil (issu du comportement des fibres et de géométrie du fil) mais également tenir compte des interactions inter-fibres.

Descriptif du projet

La démarche suivie dans ce projet de thèse s'appuiera sur trois grands axes :

- Expérimental : 1) caractériser les propriétés des fibres en traction et en frottement, 2) caractériser les propriétés des fils correspondant en traction en particulier la ténacité (ou contrainte de rupture), 3) étudier et caractériser les phénomènes de frottements inter-fibres ;
- Théorique : modéliser les différents aspects du comportement mécanique d'un fil à partir des propriétés en traction et en frottement des fibres, calculer sa résistance en traction ;
- Applicatif : implémenter les différents modèles, identifier les paramètres d'entrée et de sortie pertinents, définir les notions de performances attendues (en fonction des applications industrielles visées) ;

et contribuera à répondre aux tâches suivantes :

Tâche 1 : Etude et synthèse bibliographique sur la modélisation du comportement mécanique d'un filé de fibres

Il s'agira dans un premier temps d'effectuer une synthèse détaillée des ouvrages et publications de référence (Hearle [3], Zurek [4], Frydrych [10], Pan [11], Neckar [12]). Elle permettra dans un premier temps d'introduire le modèle de référence basé sur un fil multi-filamentaire (issu de fibres continues infinies), de structure hélicoïdale, soumis à une certaine torsion. Dans un second temps, elle s'intéressera à la modélisation des principaux aspects du comportement mécanique des fibres au sein d'un fil : compacité, migration, mobilité et pilosité [8]. Selon la même méthode mais en utilisant la loi du cabestan, les frottements inter-fibres seront également modélisés (Gégauff [2]). Un modèle complet du comportement mécanique d'un filé de fibres pourra ainsi être proposé.

Tâche 2 : Mise en place d'un protocole d'essais permettant d'obtenir les paramètres caractéristiques à l'échelle de la fibre et du fil

Cette tâche débutera par l'identification et la prise en main des dispositifs d'essais classiques nécessaires à ce projet : mesure de masse linéique (finesse), mesure des longueurs, mesure de l'épaisseur des fibres, essais de traction (Baley [13]), mesure du frottement fibre/fibre selon différents

angles (Tournalias [14]). Au regard du caractère biosourcé des fibres considérées, une attention particulière devra être portée à la caractérisation de la variabilité du comportement de la fibre technique (directement prélevé sur les rubans ou les mèches alimentant le continu à filer). Ces essais permettront également de caractériser les propriétés mécaniques des filés de fibres obtenus en sortie de continu à filer, pour différents paramètres de process (la torsion sera traitée en priorité).

Tâche 3 : Développement, implémentation et validation d'outils de simulation permettant d'estimer le comportement mécanique d'un filé de fibres

Après avoir pris en main le logiciel de calcul numérique (Matlab), les différents modèles développés dans la tâche 1 seront implémentés. Plusieurs phases de test seront réalisées afin de valider les résultats de simulation par rapport aux études de référence issue de littérature, puis par rapport aux résultats d'essais obtenus dans la tâche 2.

Les éventuelles différences constatées permettront d'identifier des comportements traduisant les phénomènes d'interaction entre les fibres à l'intérieur du fil [15]. A terme, un modèle semi-empirique permettant d'ajuster les prédictions du modèle pourra être proposé et validé.

Tâche 4 : Application des outils de modélisation à l'aide à la conception de structures textiles

Cette tâche vise à relier les développements effectués dans les tâches précédentes aux problématiques rencontrées par les industriels du domaine.

Une première étape consistera à identifier les propriétés physiques et/ou mécaniques généralement employées pour caractériser les performances d'un fil, en fonction du domaine application concerné (retordage/cordage, tissage, tricotage) [8]. Il s'agira ensuite d'étudier le lien entre ces propriétés et les grandeurs mécaniques calculées en sortie du modèle de fil proposé.

Une seconde étape concernera la prise en compte de la variabilité des grandeurs d'entrée du modèle de fil et l'étude de son influence sur les comportements simulés. Elle permettra à terme de définir des notions de conception robuste d'un fil (par rapport aux propriétés des fibres, à leur hétérogénéité, à la structure choisie), et d'aider à l'identification de réglages a priori des différents process de mise en forme des fibres.

Références bibliographiques

- [1] Bral A., Daelemans L. et Degroote J. A novel technique to simulate and characterize yarn mechanical behavior based on a geometrical fiber model extracted from microcomputed tomography imaging, *Textile Research Journal*, published on line, 00405175221137009, 2022.
- [2] Gégauff C., Force et élasticité des filés en coton, *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, vol. n°Avril, p.153-213, 1907.
- [3] Hearle J.W.S., Grosberg P. et Backer S., *Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics*, Wiley-Interscience, New York, 1969.
- [4] Zurek W., *The structure of yarn* [traduit du polonais], USDA and the National Science Foundation, New Orleans, 1975.
- [5] Vu T.D., Durville D. et Davies P., Finite element simulation of the mechanical behavior of synthetic braided ropes and validation on a tensile test, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 58, p.106-116, 2015.
- [6] Seguin A. et Crassous J., Twist-Controlled Force Amplification and Spinning Tension Transition in Yarn, *Physical Review Letters*, vol. 128, n°7, p.078002, 2022.

- [7] Admuthe L.S. et Apte S., Adaptive Neuro-fuzzy Inference System with Subtractive Clustering: A Model to Predict Fiber and Yarn Relationship, *Textile Research Journal*, vol. 80, n°9, p.841-846, 2010.
- [8] Elmogahzy Y., 1 - Structure and mechanics of yarns in *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies (Second Edition)*, Woodhead Publishing, p.1-25, 2019.
- [9] Oxtoby E., *Spun yarn technology*, Butterworth & Co. (Publishers Ltd.), London, 1987.
- [10] Frydrych I., A New Approach for Predicting Strength Properties of Yarn, *Textile Research Journal*, vol. 62, n°6, p.340-348, 1992.
- [11] Pan N. et Brookstein D., Physical properties of twisted structures. II. Industrial yarns, cords, and ropes, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 83, n°3, p.610-630, 2002.
- [12] Neckar B. et Das D., *Theory of structure and mechanics of yarns*, Woodhead Publishing, 2018.
- [13] Baley C., Analysis of the flax fibres tensile behavior and analysis of the tensile stiffness increase, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, n°7, p939-948, 2002.
- [14] Tournalias M., Bueno M.-A., Fassi G., Aktas I. et Wielhorski Y., Influence of friction angle between carbon single fibres and tows: Experimental analysis and analytical model, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 124, 105478, 2019.
- [15] De Jong H. G., Yarn-to-Yarn Friction in Relation to some Properties of Fiber Materials, *Textile Research Journal*, vol. 63, n°1, p.14-18, 1993.

Profil recherché et modalités de candidature

Profil recherché : BAC+5 en mécanique textile, mécanique des matériaux, connaissances en expérimentation, notions de calcul numérique.

Calendrier pour candidater :

- 13 avril : date limite de candidature (descriptions des pièces à fournir ci-dessous),
- une audition par visio ou en présentiel avec le directeur de thèse et les encadrants est à prévoir,
- 23 et 24 mai : audition des candidats par la commission de l'antenne de l'école doctorale,
- 26 mai : notification officiel des résultats aux candidats.
- Début du travail septembre ou octobre 2023.

Dossier à transmettre pour candidater

- CV détaillé,
- lettre de motivation,
- relevés de notes de master ou du diplôme considéré comme équivalent et le classement (si connu).