

# **Etude expérimentale de l'évolution morphologique de mèches sous sollicitations multiaxiales représentatives des procédés d'enroulement filamenteux et de pultrusion**

## ***Experimental investigation on morphologic evolution of tow under continuous multiaxial loads representative of filament winding and pultrusion.***

**Alexandre Guilloux<sup>1</sup> et Julien Valette<sup>1,2</sup>**

1 : Société TENSYL  
48, rue Jacques de Vaucanson, Pôle Arts et Métiers, 17180 PERIGNY  
e-mail : [alexandre.guilloux@tensyl.com](mailto:alexandre.guilloux@tensyl.com) et [julien.valette@tensyl.com](mailto:julien.valette@tensyl.com)

2 : Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) UMR CNRS 5295  
Département MPI, Université de Bordeaux  
15, rue Naudet CS 10297 33175 GRADIGNAN Cedex  
e-mail [julien.valette@tensyl.com](mailto:julien.valette@tensyl.com)

### **Résumé**

Ce travail présente le développement et l'évaluation d'un banc de mesure modulable pour la caractérisation continue des propriétés géométriques et mécaniques d'une mèche textile. Le dispositif permet d'exercer des sollicitations combinées en traction et compression de la mèche. Une boucle d'asservissement fermée régule les paramètres de procédé, tels que la tension et la vitesse de déroulement.

Les 1<sup>ers</sup> résultats mettent en évidence le bon fonctionnement du dispositif et permettent de décrire l'évolution de la morphologie des mèches sollicitées avec des actions mécaniques représentatives des procédés d'enroulement filamenteux et de pultrusion. Une analyse statistique des propriétés des mèches mesurées offrira de nouvelles perspectives pour l'optimisation des procédés continus.

### **Abstract**

This work presents the development and evaluation of a modular measurement bench for the continuous characterization of the geometric and mechanical properties of a textile tow. The system allows to apply tension and compression to the tow and measures its dimensions. A closed control loop regulates process parameters such as tension and unwinding speed.

The initial results show that the system performs effectively, and is capable of identifying the morphology evolution of the tow under mechanical load conditions similar to filament winding and pultrusion conditions. The possibility of statistical analysis of the properties measured will open up new prospects for optimising continuous processes using these tows.

**Mots Clés :** Mèche, compression, fibres de carbone, essai continu

**Keywords :** Yarn, compaction, carbon fibres, continuous test.

## **1. Introduction**

Les procédés de mise en œuvre de type pultrusion ou enroulement filamenteux sont des procédés industriels permettant d'obtenir des structures avec une très bonne répétabilité. Ils offrent l'avantage d'un haut degré d'automatisation, des temps de mise en œuvre courts et permettent de réaliser des pièces présentant un taux de renfort élevé.

La principale difficulté de ces procédés est d'ajuster leurs paramètres opératoires, tels que la tension des mèches, la vitesse de déplacement de celles-ci, la température, ... afin de maîtriser la qualité finale de la pièce.

Les paramètres opératoires optimaux sont fonctions des objectifs du composite à réaliser et des caractéristiques des matières premières employées. Pour les renforts fibreux, utilisés sous forme de

mèche, de quelques mm de large et dixième de mm d'épaisseur, rassemblant par des liaisons faibles plusieurs milliers ou dizaines de milliers de filaments de quelques micromètres, de nombreux travaux [1, 2] ont montré une forte variabilité des propriétés dimensionnelles.

La caractérisation de différentes grandeurs de ces mèches sous des sollicitations uniaxiales, que ce soit en traction longitudinale [3] ou en compression transverse [4] est effectuée sur la base d'échantillons en nombre limité, très communément moins de 10 et la manipulation nécessaire pour les prélever de la bobine induit une importante variabilité sur les mesures dimensionnelles de la mèche [1]. Cette combinaison de fortes variabilités, intrinsèques et induites par manipulation des mèches, pose donc la question de la représentativité des résultats obtenus. De plus, ces caractérisations ne reflètent pas les sollicitations multiaxiales caractéristiques des procédés continus [5]. Des travaux plus récents [6] présentent des dispositifs capables de dissocier la sollicitation longitudinale dans l'axe de la fibre et celle dans la direction transverse [7]. Ces études démontrent clairement l'influence d'une sollicitation dans une direction sur le comportement dans une autre direction [8,9]. Cependant les conditions aux limites utilisées dans ces travaux ne reproduisent pas toujours fidèlement celles des procédés continus, notamment en ce qui concerne les sollicitations en compression, qui sont appliquées de manière discrète [7].

Sur la base de ces constatations, les auteurs ont développé et réalisé un banc d'essai multiaxial capable de soumettre la mèche à un état de sollicitation mécanique continue tout en mesurant ses déformations à une fréquence et sur une longueur de mèche permettant une analyse statistique des mesures.

## 2. Présentation du dispositif

Le dispositif est composé de 3 modules principaux (Fig.1), le premier et le dernier ont pour fonction d'acheminer la mèche dans la zone de mesure dans des conditions similaires à celles des dispositifs industriels de fabrication. Ils sont reliés à une IHM (Interface Homme Machine) qui permet de définir les paramètres de vitesse d'avance et tension de la mèche. Chacun de ces 2 modules intègre un capteur de force qui mesure la tension de la mèche, en amont et en aval du module de mesure, permettant ainsi d'évaluer le frottement dans le module de mesure.

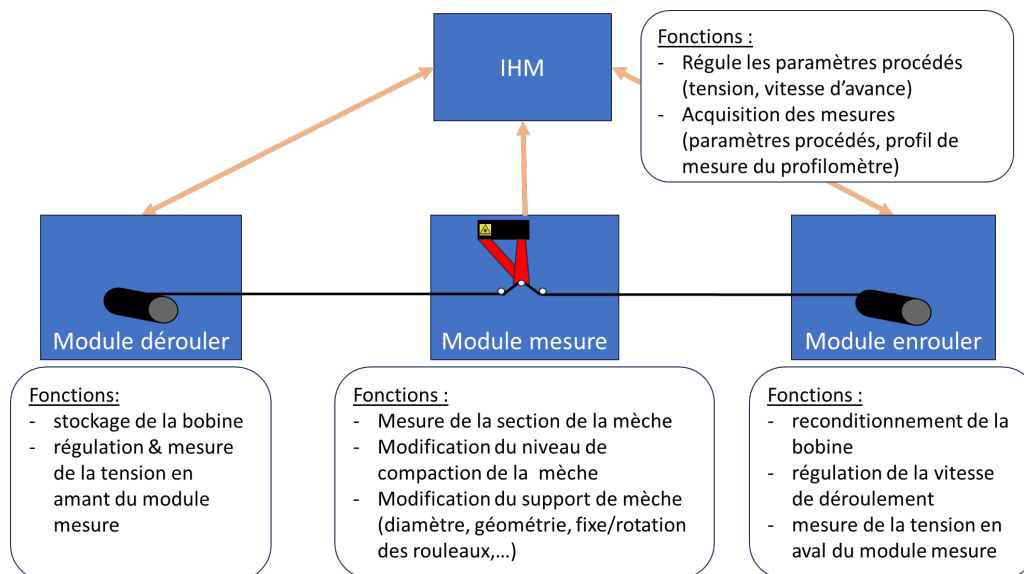


Fig. 1. Dispositif de mesures dimensionnelles en continu d'une mèche de carbone.

Le module de mesure est constitué de plusieurs rouleaux qui assurent le positionnement de la mèche sur un rouleau support de la mesure. La mise en tension de la mèche exerce une contrainte de compaction dépendante du diamètre du rouleau support, de la largeur de la mèche et de la tension longitudinale [10] (Fig. 2). Une mise en position précise de cet ensemble de rouleaux est effectuée par une vis micrométrique pour tenir compte de l'influence de l'angle d'enroulement sur l'étalement de la mèche [11].

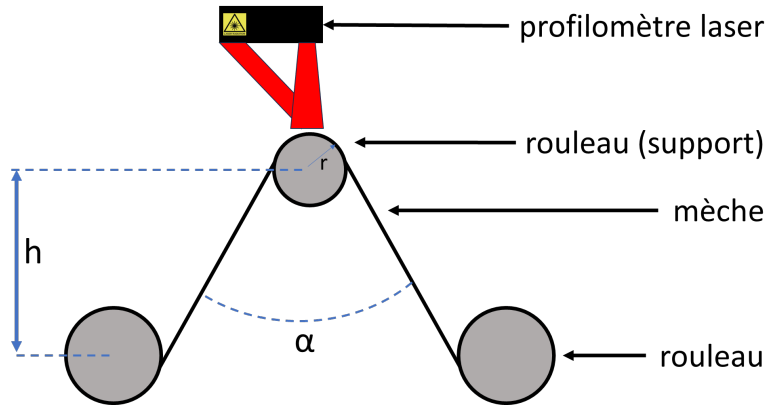


Fig. 2. Module de mesure.

Un profilomètre laser (linéarité de  $2\mu\text{m}$  selon l'axe de l'épaisseur et une résolution de  $39\mu\text{m}$  selon l'axe de la largeur) permet d'enregistrer le profil de la face supérieure de la mèche ainsi que la position du rouleau pour obtenir une position relative des points de mesure, et par conséquent l'épaisseur de la mèche (Fig. 3). Un post-traitement est effectué sur le nuage de points obtenu pour obtenir la largeur, la section et l'épaisseur moyenne de la mèche.

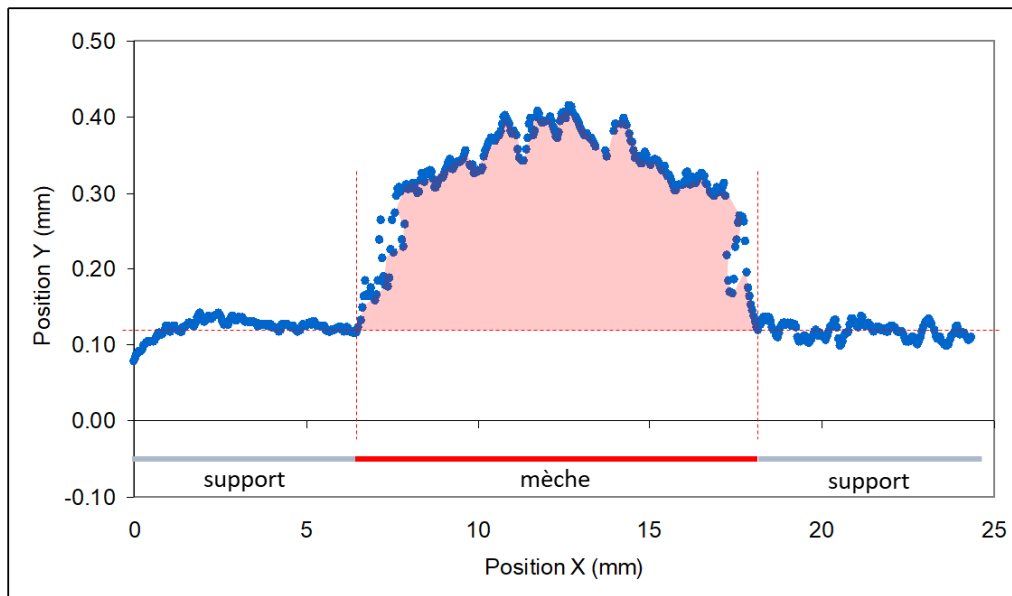


Fig. 3. Points de mesures de la section de la mèche et du support.

Pour chaque condition expérimentale, plusieurs profils sont enregistrés à une fréquence prédéfinie le long de la mèche. Une analyse statistique de chaque profil est ensuite effectuée pour connaître les valeurs moyennes et dispersions.

### 3. Présentation des résultats

Les essais sont réalisés sur une même bobine de mèche T700SC-24K-50C (tab.1) en utilisant un rouleau support de diamètre 15mm et avec 2 niveaux de tension différents (8N et 18N).

Nombre de filaments	Masse linéique (g/1000m)(*)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
24000	1650	1.8

Tab. 1. Caractéristiques des mèches testées (données fabricant).

Un profil de mesure est enregistré tous les 5 mm sur une longueur de 3m. Le tableau 2 résume les grandeurs moyennes obtenues pour les 2 niveaux de tension sachant que la surface de la mèche a été calculée à partir de la méthode des trapèzes (Fig. 3).

	Largeur (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Épaisseur (mm)
Tension = 8N	10.631 <sup>+0.830</sup>	2.275 <sup>+0.090</sup>	0.215 <sup>+0.014</sup>
Tension = 18N	9.154 <sup>+1.314</sup>	1.992 <sup>+0.086</sup>	0.222 <sup>+0.032</sup>

Tab. 2. Grandeurs dimensionnelles obtenues (moyenne et écart type) à partir de 600 profils de mesure.

L'augmentation de la tension exercée sur la mèche diminue sa largeur tout en augmentant son épaisseur et la surface de la mèche diminue avec l'augmentation de la tension.

Le taux volumique de fibre (TVF) est calculé en utilisant la surface calculée (S) et les données du fabricant : masse linéique ( $\rho_l$ ), masse volumique ( $\rho_v$ ) (Eq. 1)

$$TVF = \frac{\rho_l}{S} \quad (\text{Eq. 1})$$

La pression de compaction ( $\sigma$ ) est calculée en fonction du rayon du rouleau (R), de la largeur de mèche (l) et de la tension (T) (Eq. 2) [7].

$$\sigma = \frac{T}{l \times R} \quad (\text{Eq. 2})$$

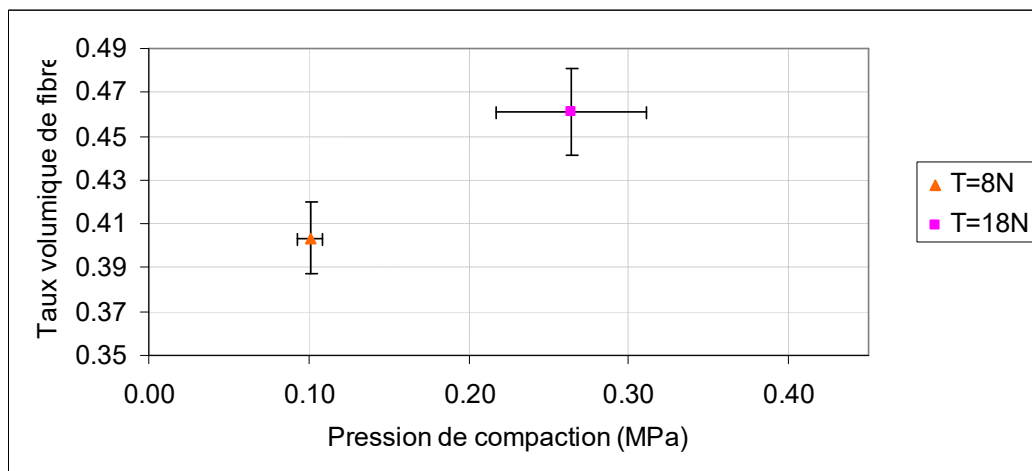


Fig. 4. Taux volumique de fibre en fonction de la compaction pour différentes tensions.

Les valeurs moyennes des taux volumique de fibre calculées sont différentes en fonction de la tension et de la compaction appliquée sur la mèche. Les écarts types obtenus pour le taux volumique de fibre sont suffisamment faibles pour bien distinguer les résultats en fonction de la tension. Plus la tension, et donc la compaction exercée sur la mèche, est importante plus le taux volumique de fibre augmente.

#### **4. Conclusions**

Les procédés industriels tels que la pultrusion et l'enroulement filamentaire permettent de fabriquer des structures composites avec un haut degré d'automatisation et une excellente répétabilité. Ces procédés nécessitent toutefois un contrôle précis des paramètres opératoires (tension des mèches, vitesse) et une maîtrise des propriétés des matières premières, pour garantir une qualité optimale des pièces.

Un banc d'essai multiaxial (traction et compression), a été développé pour évaluer les comportements mécaniques des mèches de carbone sous sollicitations continues. Le dispositif comprend trois modules : deux modules, dérouleur et enrouleur pour acheminer la mèche dans des configurations similaires à celles de machines industrielles et sans manipulations manuelles, et un module de mesure avec un profilomètre laser permettant de suivre en continu la section de la mèche. Des 1ers essais ont été réalisés sur des mèches T700SC-24K-50C, avec deux niveaux de tension. La mesure continue a permis de collecter un grand volume de données, avec 600 profils obtenus pour chacune des tensions imposées et de bien mettre en évidence l'influence de la tension.

Le banc permet de caractériser les morphologies des mèches (dimensions, taux volumique de fibres) en fonction des sollicitations mécaniques, indépendamment de la variabilité dimensionnelle des mèches.

Des nouveaux essais doivent maintenant être réalisés pour identifier le comportement de mèches sous différentes combinaisons de sollicitations multiaxiales et confirmer ces premières constatations.

#### **Remerciements**

Les auteurs de ce travail remercient la Région Nouvelle Aquitaine pour son soutien.

## Références

- [1] Wijaya, W., Bickerton, S., & Kelly, P. A. Meso-scale compaction simulation of multi-layer 2D textile reinforcements: A Kirchhoff-based large-strain non-linear elastic constitutive tow model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106017, 2020.
- [2] Pierre Badel, « Analyse mesoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X », Thèse INSA Lyon, 2008.
- [3] Jean-Emile Rocher, « Caractérisation expérimentale et modélisation à l'échelle mésoscopique du comportement de tissus 3D de mèches coméleées », Thèse Université Orléans 2014.
- [4] Audrey Wendling, « Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composites tissés », Thèse. INSA de Lyon, 2013.
- [5] Carosella, Stefan, Sebastian Hügle, Florian Helber, et Peter Middendorf. « A Short Review on Recent Advances in Automated Fiber Placement and Filament Winding Technologies ». *Composites Part B: Engineering* 287: 111843, 2024
- [6] Rubino, M., Wielhorski, Y., & Roux, S. Transverse compaction of twisted carbon yarns: Experiment and elastoplastic Mohr–Coulomb modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 176, 107873, 2024
- [7] J.Valette, A. Guilloux, A. Gillet, « Etude expérimentale du comportement mécanique de mèches sous sollicitations multiaxiales », Comptes-rendus des 21èmes Journées Nationales sur les Composites, Bordeaux INP, 2019.
- [8] A. Pouchias and all, Experimental characterization of compaction behavior of roving based reinforcements, *ECCM21 Volume 5 – Manufacturing*, 2024.
- [9] Valette and all, Compressibility of carbon fiber tows subjected to combined tension and compression, in dry or lubricated state , *ECCM21 Volume 2 – Material Science*, 2024
- [10] Faria, Hugo. « Analytical and Numerical Modelling of the Filament Winding Process ». PhD Thesis 2013.
- [11] Ehshan ul-Haq and all, Friction dynamics in mechanical bar spreading for unidirectional thin ply carbon fiber, *ECCM21 Volume 5 – Manufacturing*, 2024.