

# Confrontation numérique / expérimental d'un modèle mécanique de bobinage de mèche pour l'enroulement filamentaire.

## *Numerical / experimental comparison of a mechanical model of tow winding for filament winding*

Corentin Fréville<sup>1</sup>, Arnaud Gillet<sup>1</sup>, Alexandre Guilloux<sup>2</sup>, Eric Lacoste<sup>1</sup> et Julien Valette<sup>1,2</sup>

1 : Univ. Bordeaux,  
CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295,  
F-33400, Talence, France  
e-mail : [corentin.freville@u-bordeaux.fr](mailto:corentin.freville@u-bordeaux.fr), [arnaud.gillet@u-bordeaux.fr](mailto:arnaud.gillet@u-bordeaux.fr) et [eric.lacoste@u-bordeaux.fr](mailto:eric.lacoste@u-bordeaux.fr)

2 : 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)

### Résumé

L'utilisation d'outils de simulations de procédés est aujourd'hui essentielle afin de pouvoir suivre l'état des constituants au cours des différentes étapes de fabrication. Ces outils constituent une aide importante pour l'optimisation des performances de la pièce finale.

Ce travail a pour objectif de comparer les résultats numériques d'un modèle mécanique de bobinage de mèches pour l'enroulement filamentaire avec les résultats expérimentaux obtenus à partir d'un dispositif instrumenté. Le modèle et le banc expérimental permettent respectivement de prédire et mesurer l'évolution, au cours d'un bobinage circonférentiel, de l'épaisseur des couches.

Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité du modèle à prédire l'évolution de la géométrie de la pièce. Ces premiers résultats encourageants offrent des perspectives d'évolution pour compléter le modèle par une prise en compte d'autres phénomènes présents lors du procédé d'enroulement, comme l'écoulement de la résine et les échanges thermiques.

### Abstract

Nowadays, the use of simulation tools is essential in order to be able to track the condition of our components during the various manufacturing steps. Those tools are a significant help in optimizing the performance of our final part.

This work aims to compare numerical results of a mechanical model of tow winding for filament winding with experimental results obtained thanks to an instrumented device. This model and the experimental bench make it possible to predict, during a circumferential winding, geometric characteristics of a tow.

The obtained results highlight the ability of our model to monitor the evolution of the geometrical characteristics of our part. These first encouraging results offer prospects for development to complete the model by tacking into account other phenomena induced by the winding process, such as the resin flow and thermal exchanges.

**Mots Clés :** Enroulement filamentaire, Simulation numérique, Modèle mécanique

**Keywords :** Filament winding, Numerical simulation, Mechanical model

## 1. Introduction

Le procédé de mise en œuvre de composites par enroulement filamentaire permet d'obtenir des structures avec une très bonne répétabilité. Il offre l'avantage d'un haut degré d'automatisation, des temps de mise en œuvre courts et permet de réaliser des pièces présentant un taux de renfort élevé. Ce procédé consiste à acheminer une mèche de carbone, imprégnée ou non, via différents rouleaux et à la bobiner autour d'un mandrin en rotation, permettant la réalisation de pièces possédant une symétrie de révolution (tube, réservoir haute pression, ...) [1,2].

Le recours à des outils de simulation du procédé, qui permettent de prédire le déroulement des différents phénomènes physiques mis en œuvre (thermiques, chimiques et mécaniques) est

incontournable. Ces outils permettent potentiellement de suivre l'état des constituants (renforts et matrices) lors des différentes étapes de la mise en œuvre du procédé. Ils constituent donc une aide précieuse pour optimiser les performances du composite final d'un point de vue mécanique (statique et fatigue), ainsi que d'un point de vue économique (cadence et consommation de matières premières).

Therani *et al.* [3] proposent un modèle axisymétrique, centré exclusivement sur la phase d'enroulement (viscosité de la résine constante). Les mèches sont traitées comme le mélange d'un fluide incompressible (la matrice) et d'un solide (mèche).

Zaho *et al.* [4] proposent un modèle thermochimique pour prédire l'évolution de la température lors de la cuisson, intégrant l'exothermie de la réaction de polymérisation. La mèche est traitée comme un matériau non linéaire [5] lorsque la résine est à l'état liquide, puis comme un solide élastique lorsque la résine est polymérisée.

Enfin, Cai et Gutowski [6] proposent un modèle de la phase d'enroulement, en intégrant le couplage mécanique de la compaction de la mèche avec l'écoulement de la résine fluide dans un milieu poreux. Ils montrent que dans le cas d'enroulement filamentaire par voie humide, pour certaines plages de valeurs de viscosité, perméabilité et vitesse de bobinage, le processus d'écoulement entre l'enroulement des différentes couches peut être négligé, de sorte que la modélisation du processus peut être simplifiée et représentée comme l'application d'une pression de consolidation pour presser un réseau de fibres.

L'utilisation de tels outils implique de disposer d'une loi de comportement de mèche dans les conditions de son utilisation, de connaître les conditions de sollicitation de la mèche au cours du procédé d'enroulement filamentaire et de disposer de modèles décrivant les phénomènes physiques principaux qui y sont présents.

## **2. Le comportement des mèches**

Afin d'identifier le comportement des mèches, sèches ou imprégnées de résine, différents types d'essais peuvent être effectués. On peut citer les essais de compression transverse [7, 8, 9] et les essais en traction-compression [10].

La caractérisation des mèches de l'étude (mèches T700SC-12000-60E) a été réalisée à partir d'un dispositif instrumenté de traction-compression. Une mèche sous tension est placée sur une plaque de verre attachée au bâti de la machine de traction. La mèche est ensuite comprimée et l'évolution de sa largeur et de son épaisseur est suivie respectivement grâce à une caméra placée sous la plaque de verre et grâce à deux capteurs linéaires de position.

## **3. Les essais de bobinage**

Les essais de bobinage sont réalisés sur un pilote d'enroulement filamentaire (Fig. 1) équipé d'un système de régulation de la tension au niveau du cantre. Les mesures dimensionnelles sont réalisées à l'aide d'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), placé au-dessus du mandrin du pilote de procédé.

Afin de mesurer l'évolution de l'épaisseur totale lors d'un bobinage, la mèche est bobinée à  $90^\circ$  par rapport à l'axe de rotation du mandrin, sans déplacer le chariot, sur une épaisseur de 15 couches. Ce bobinage est effectué sur un mandrin de 150mm de diamètre sur lequel un traitement de surface a été appliqué pour permettre une bonne détection des contours des mèches.

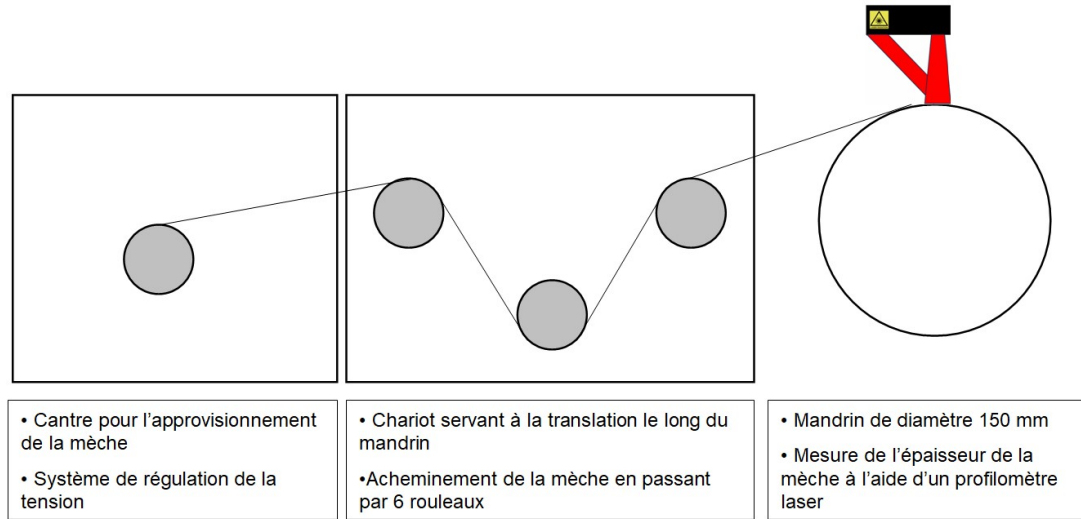


Fig. 1. Schéma du dispositif de mesure

Le profilomètre permet d'enregistrer le profil de chacune des mèches déposées sous la forme d'un nuage de points (Fig. 2). Un profil, pris sur la même zone du mandrin à chaque tour, est enregistré pour chaque couche du bobinage et un post-traitement est effectué en calculant la moyenne et l'écart type de la position Z des points compris dans une zone de mesure correspondant à 60% de la largeur de la mèche, centré sur cette dernière. Cette plage de mesure permet d'éviter l'influence des bords dans le résultat.

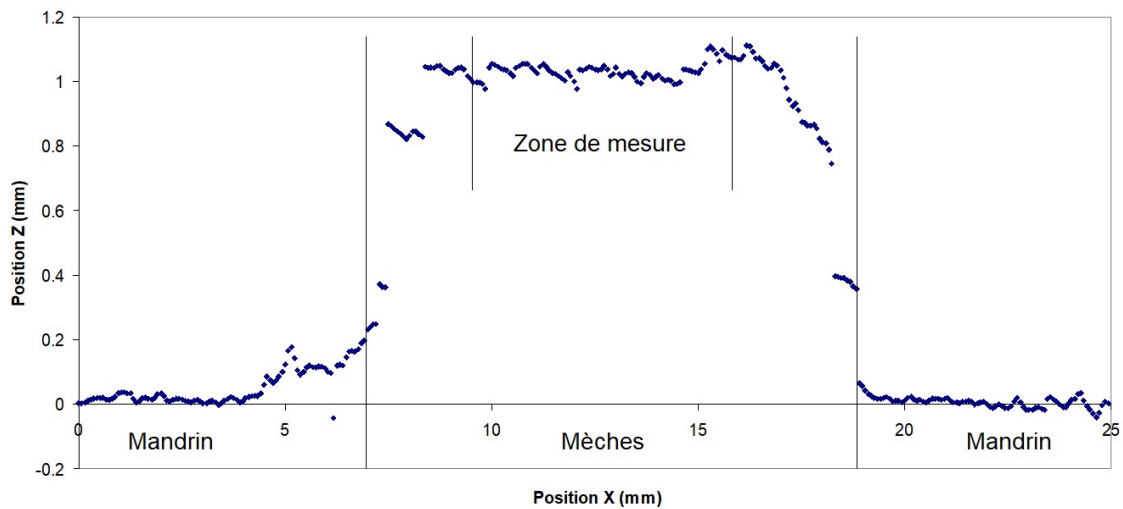


Fig. 2. Nuage de points de la mèche et du mandrin

#### 4. Modélisation du bobinage

L'objectif du modèle est de fournir, au fur et à mesure du dépôt des couches successives, les valeurs de plusieurs propriétés : épaisseur totale, taux volumique de fibres, taux d'avancement ou de réticulation de la résine employée, ...

Actuellement, le modèle est limité à l'enroulement de mèches sèches et suit l'évolution de l'épaisseur totale du bobinage. Pour ce faire, on se place dans le repère axisymétrique et on pose les hypothèses suivantes :

- Le mandrin a un comportement linéaire élastique et est supposé indéformable selon l'axe Z.

- On suppose une symétrie de révolution.
- Les propriétés géométriques de la mèche (épaisseur, largeur, comportement) correspondent à une valeur moyenne des essais de cette étude.

Les équations du modèle sont résolues par une méthode numérique de type éléments finis. Chaque couche est maillée de manière indépendante et la gestion des contacts entre chaque couche est faite en utilisant des multiplicateurs de Lagrange. Chaque nouvelle couche enroulée sur le mandrin exerce une contrainte radiale liée à la tension de l'enroulement [7] :

$$\sigma_{rr} = \frac{T}{r} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec T la tension linéique de l'enroulement, et r la position radiale de la couche bobinée.

Le principe du modèle est le suivant :

- Pour déposer une nouvelle couche, on applique la pression P, égale à la contrainte radiale, comme condition limite au niveau du rayon extérieur de la dernière couche et on calcule les déformations de l'ensemble couches bobinées + mandrin associé (Fig. 3a).
- On recherche le rayon interne initial de la nouvelle couche, inférieur au rayon externe du bobinage précédent (Fig. 3b).
- On ajuste ce rayon interne tel qu'une fois déformé pour atteindre ce rayon externe, la tension associée soit égale à la tension d'enroulement (Fig. 3c).

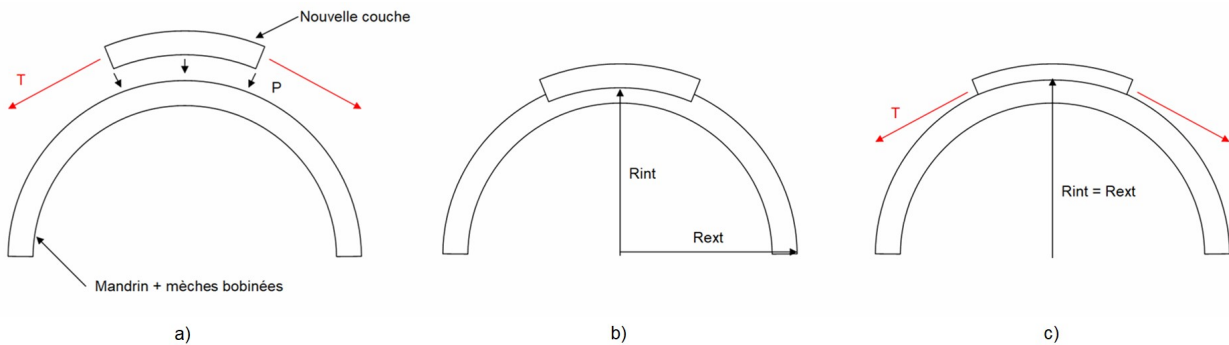


Fig. 3. a) Recherche du diamètre extérieur, b) et c) Recherche du rayon interne

L'organigramme simplifié du modèle numérique est représenté sur la Fig. 4.

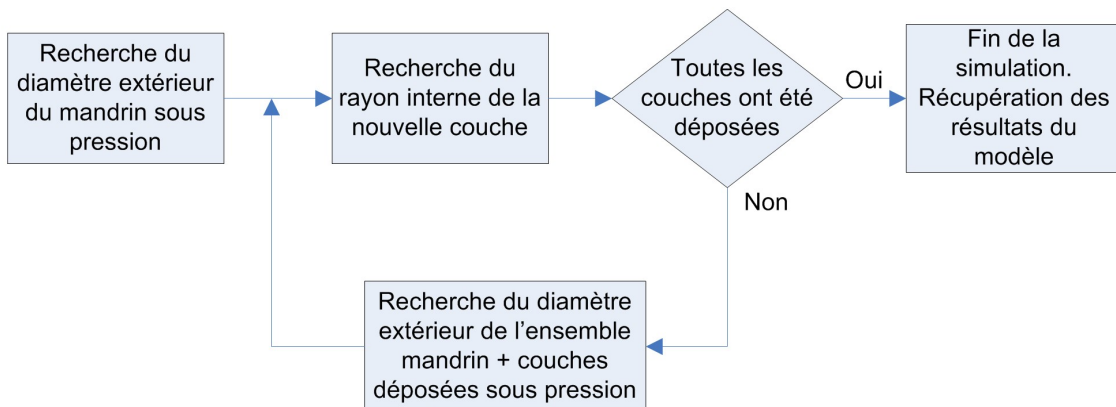


Fig. 4. Méthode de résolution numérique

Une fois la simulation terminée, on obtient le champ de déplacement de chaque couche à chaque étape du bobinage et on peut donc en déduire l'évolution de l'épaisseur totale bobinée au cours d'un enroulement circonférentiel.

## 5. Résultats et discussions

Les résultats sont présentés sur la Fig. 5. Pour les mesures expérimentales, les résultats correspondent à la valeur moyenne des positions Z de la zone de mesure (Fig. 2) déterminée à chaque couche et les barres d'incertitudes correspondent à l'écart type associé.

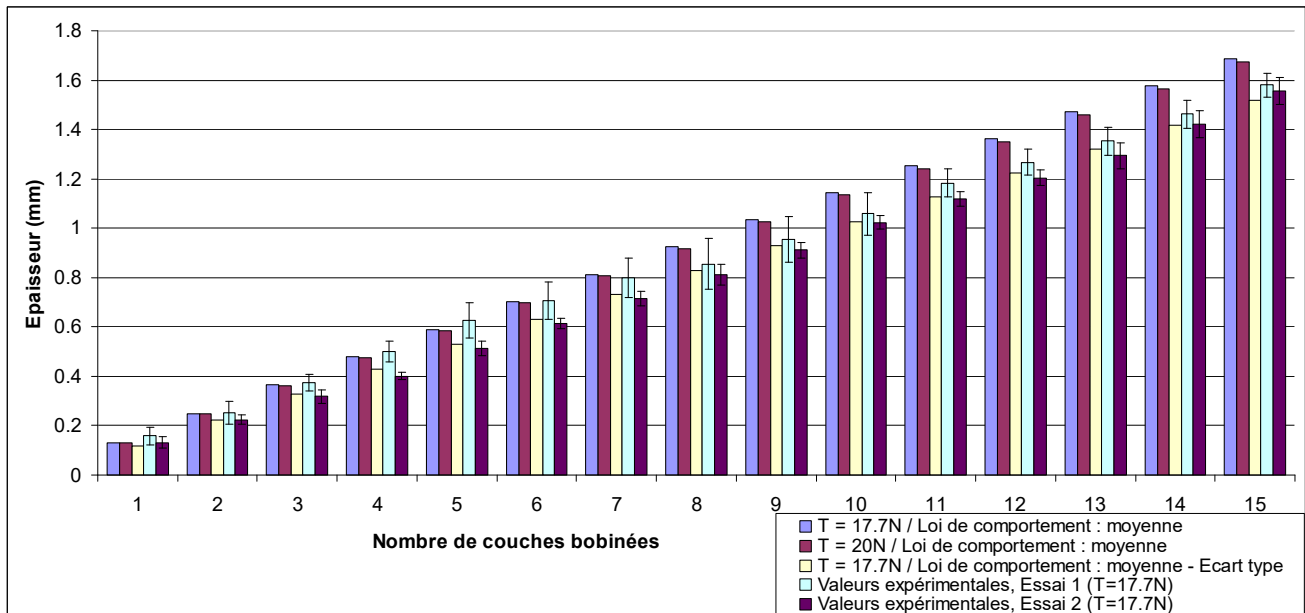


Fig. 5. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

La régulation de la tension est faite en amont du pilote de procédé (cf. Fig. 1). Cette tension est donc légèrement sous-estimée à cause des frottements dus aux différents rouleaux sur lesquels la mèche doit passer. De plus, lors de la détermination de la loi de comportement, le choix a été fait de faire une moyenne sur les résultats de la campagne d'essais. Or la géométrie de la mèche étant variable, cette loi de comportement peut-être source d'incertitude.

Trois simulations ont été effectuées pour traiter ces incertitudes. La première consiste à appliquer la même tension que la consigne utilisée lors des essais, et d'employer la loi de comportement moyenne. Dans la deuxième simulation, la tension est majorée de 13%, et la loi de comportement est la loi moyenne. Enfin, dans la troisième simulation, la tension retenue est égale à la consigne utilisée lors des essais, et la loi de comportement correspond à la moyenne des essais minorée d'un écart type afin de rendre compte de la variabilité de la géométrie de la mèche et de son comportement.

On peut constater que les valeurs expérimentales sont encadrées par les différentes valeurs obtenues numériquement, en prenant en compte les incertitudes.

## 6. Conclusions et perspectives

Un modèle d'enroulement filamentaire permettant de prévoir l'état de déformation des couches a été proposé. Ce modèle est actuellement limité au cas de mèches non imprégnées, et enroulées circonférentiellement. Un dispositif expérimental a été mis au point afin de mesurer l'évolution de l'épaisseur d'un bobinage au cours du temps dans les mêmes conditions. La comparaison entre les

résultats numériques et expérimentaux montre la capacité du modèle à prédire l'évolution de l'épaisseur des mèches au cours d'un bobinage circonférentiel ainsi que sa sensibilité aux diverses sources d'incertitude.

Concernant le pilote de procédé d'enroulement filamentaire, l'ajout d'un capteur de tension juste avant la dépose des mèches permettrait de supprimer les incertitudes liées aux frottements des différents rouleaux acheminant la mèche.

Pour l'outil de simulation numérique, on a pu constater sa sensibilité concernant les dimensions de la mèche. Il peut donc être intéressant d'effectuer plusieurs simulations en ne considérant pas uniquement les valeurs moyennes mais également les valeurs minimale et maximale d'épaisseur et de largeur des mèches.

Ainsi, cette première étape montre la capacité du modèle à rendre compte de l'évolution de l'épaisseur. Des travaux complémentaires sont en cours pour :

- i) Valider les prédictions pour des niveaux de tension différents
- ii) Simuler le comportement de couches hélicoïdales.

L'objectif à plus long terme est d'évaluer la capacité de ce modèle dans le cas de mèches imprégnées de résine.

## Remerciements

Les partenaires de ce travail remercient la Région Nouvelle Aquitaine pour son soutien dans le cadre du laboratoire commun FAC2D et l'ANR dans le cadre du projet MPM4RER.

## Références

- [1] M. Quanjin, M.R.M. Rejab, M.S. Idris, B. Zhang, M.N.M. Merzuki, N.M. Kumar, « Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using MIT app inventor », *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 469, 2019.
- [2] S.T. Peters, « Composite Filament Winding », *ASM International*, 2011.
- [3] A. Agah-Tehrani, H. Teng, « Analysis of fiber motion during wet filament winding of the composite cylinders with arbitrary thickness », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 29 n° 21, pp. 2649-2668, 1992.
- [4] L. Zhao, S. C. Mantell, D. Cohen, R. McPeak, « Finite element modelling of the filament winding process », *Composite Structures* Vol. 52 n° 3-4, pp. 499-510, 2001.
- [5] Z. Cai, T. Gutowski, « The 3-D Deformation Behavior of a Lubricated Fiber Bundle », *Journal of Composite Materials* Vol. 26, n° 8, pp. 1207-1237, 1992.
- [6] Z. Cai, T. Gutowski, « Winding and Consolidation Analysis for Cylindrical Composite Structures », *Journal of Composite Materials* Vol. 26 n° 8, pp. 1374-1399, 1992.
- [7] A. Sakkalatty Dharmalingam, J. Hemmer, A.S. Lectez, C. Binetruy, S. Comas-Cardona, « Evolution of single carbon and glass fibrous tow cross-sections in dry and lubricated states during compaction perpendicular to the fibres », *Composites Part B* 148, pp. 235-242, 2018.
- [8] W. Wijaya, S. Bickerton, P.A. Kelly, « Meso-scale compaction simulation of multi-layer 2D textile reinforcements: A Kirchhoff-based large-strain non-linear elastic constitutive tow model », *Composites Part A* 137, 2020.
- [9] Y. R. Kim, S. P. McCarthy, J. P. Fanucci, « Compressibility and relaxation of fiber reinforcements during composite processing », *Polymer composites* Vol.12, pp. 13-19, 1991.
- [10] A. Guilloux, A. Gillet, J. Valette, J. Bailly, « Compressibility of carbon fibre tows subjected to combined tension and compression, in dry or lubricated state », in : Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Conference on Composite Materials Vol.2, pp.770-775, 2023.