

## **CoqFib : approches de coques spécifiques pour la mise en forme des renforts composites à fibres continues**

### *CoqFib : specific shell approaches for the forming process of continuous fibre composite reinforcement*

**Bruno Cotrim<sup>1</sup>, Baptiste Lacroix<sup>2</sup> et Théo Perrin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>E. Valot, P. Vidal, M. D'Ottavio, O. Polit

<sup>2</sup>J. Colmars, A. Platzer, E. Vidal-Sallé, P. Boisse

<sup>3</sup>G. Arnold, M. Tournalias, K. Gautier, P. Wang

1 : LEME

Université Paris Nanterre

92410 Ville d'Avray

e-mail : b.ribeirocotrim@parisnanterre.fr

2 : LaMCoS

INSA Lyon

69621 Villeurbanne

e-mail : baptiste.lacroix@insa-lyon.fr

3 : LPMT

Université de Haute-Alsace

68093 Mulhouse

e-mail : theo.perrin@uha.fr

### **Résumé**

L'objectif de ce travail est de développer des outils numériques originaux et complémentaires, spécifiques aux renforts fibreux, pour la simulation du drapage des renforts de composites et des préimprégnés. Les trois axes de développement suivants sont proposés pour répondre à cette problématique : (i) analyse de la déformation des mèches fibreuses à l'échelle mésoscopique, développement d'Elément Fini (EF) solide-poutre ; (ii) analyse de la mise en forme des composites basée sur des EF de coque et de solide coque fibreuses avec prise en compte de l'écrasement transverse ; (iii) comportement mécanique, essais de caractérisation et de validation.

### **Abstract**

The aim of this work is to develop original and complementary numerical tools, specific to fibrous reinforcements, for simulating the draping of composite reinforcements and prepregs. The following three directions of development are proposed to address this issue : (i) analysis of the deformation of fibrous yarns at the mesoscopic scale, development of solid-beam Finite Element (FE) ; (ii) analysis of shape forming process based on shell and fibrous shell solid FE's including transverse normal effect ; (iii) mechanical behavior, characterization and validation experimental tests.

**Mots Clés :** tissu, modélisation numérique, caractérisation, mise en forme

**Keywords :** tissu, numerical modeling, characterisation, forming process

## **1. Introduction**

La simulation de la mise en forme des matériaux composites fait l'objet d'un nombre conséquent de recherches depuis deux décennies. Elle est néanmoins plus récente et moins avancée que la simulation de la mise en forme des métaux et des polymères. Une partie importante des approches utilisées pour la simulation de la mise en œuvre des composites consiste à utiliser des méthodes développées pour les métaux et les polymères et à les adapter pour les composites. Pourtant la physique de la déformation des renforts fibreux est très spécifique.

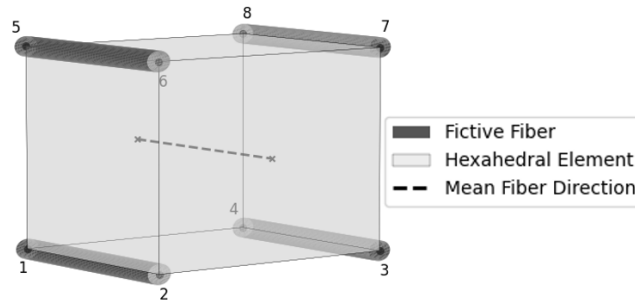


FIG. 1. – Schématisation de l'élément de solide-poutre.

Le comportement d'un matériel tissé est complexe, où des milliers de fibres microscopiques constituent une mèche qui à son tour est traitée dans un tissu. Le phénomène est donc multi-échelle : les propriétés d'un renforcement tissé (macro-échelle) sont déterminées par les interactions entre différentes mèches (meso-échelle) dont les propriétés sont alors caractérisées par les interactions entre les fibres (micro-échelle).

Ainsi, dans ce résumé, nous présenterons successivement les travaux mésoscopique, macroscopique et enfin, les travaux expérimentaux menés pour caractériser et valider les modèles numériques développés.

## 2. Solide-poutre pour l'échelle mésoscopique

### 2.1. Introduction

Cette partie s'intéresse au développement de simulations à l'échelle mésoscopique. À cette échelle, les modèles doivent être capables de rendre compte des défauts de mise en forme qui échappent aux simulations macroscopiques (zones à faible densité de fibres, ou gaps, décohésion, etc.) et fournir une cartographie de la densité volumique de fibres ; ces informations s'avèrent essentielles pour poursuivre les étapes de simulation du procédé, notamment les étapes d'écoulement de la résine dans les procédés RTM.

À l'échelle mésoscopique, les mèches (paquets de fibres) sont modélisées par un milieu continu équivalent isotrope transverse à la direction de fibres. Des progrès importants ont été faits dans les vingt dernières années par la communauté [1]. Une grande partie de ces travaux a contribué à la fabrication de géométries réalistes pour alimenter les codes de calculs, notamment à partir d'observations tomographiques. La communauté a également développé des méthodes numériques, principalement par élément finis, pour la simulation de textiles. Enfin, une réflexion importante a été menée sur les lois de comportement adaptées à ces milieux [2].

Dans le projet CoqFib, nous avons travaillé à la mise en place d'un élément de solide-poutre adapté à la modélisation mésoscopique des mèches.

### 2.2. Méthode

#### 2.2.1. Élément fini de solide poutre

L'élément fini proposé dans ce travail est un élément de solide-poutre. Il peut être vu comme la superposition d'un élément solide à huit nœuds, et d'éléments de poutre fictive dans une direction privilégiée (voir figure 1). Ces poutres additionnelles permettent de prendre en compte la rigidité de flexion des mèches sans ajouter de degrés de liberté additionnels, notamment en utilisant la méthode des éléments voisins [3].

L'énergie de déformation totale dans l'élément  $W$  est décomposée en différentes contributions :

$$W = W_{\kappa} + W_{\lambda} + W_{\mu} + W_{\tau} + W_{\gamma} \quad (\text{Eq. 1})$$

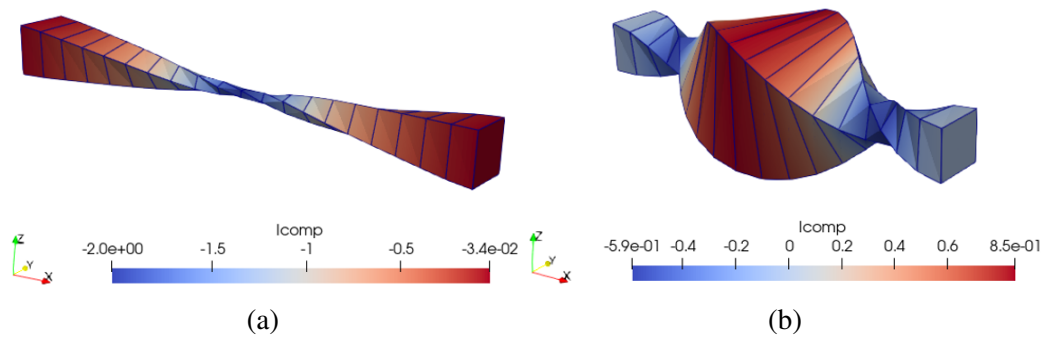


FIG. 2. – Simulation séquentielle de torsion flambement sur un paquet de fibres : a) étape de torsion ; b) étape de flambement.

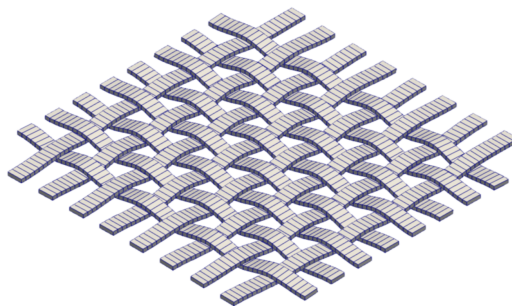


FIG. 3. – modèle numérique d'une cellule de tissé.

où  $W_\kappa$  et  $W_\lambda$  sont les énergies de flexion et tension dans les fibres fictives,  $W_\mu$  est l'énergie de compaction de la mèche,  $W_\gamma$  l'énergie déviatorique dans la section de la mèche, et  $W_\tau$  représente le cisaillement longitudinal dans la mèche.

Les trois contributions  $W_\mu$ ,  $W_\tau$  et  $W_\gamma$  sont adaptées des travaux de [2]. Les modes concernant les mèches fictives sont inspirés de [3]. L'élément a été implémenté dans un code élément finis en dynamique explicite développé au laboratoire.

### 2.3. Résultats

L'élément de solide-poutre permet de simuler le comportement de paquets de fibres (mèches) à l'échelle mésoscopique. À l'échelle de la mèche, cela permet de simuler des chargements complexes incluant de la torsion de fil, et des modifications importantes de la section transversale de la mèche. La figure 2 montre une simulation multi-étapes, incluant une étape de pré-torsion du paquet de fibres, et une étape de flambement. La simulation est réalisée avec une géométrie simplifiée (un élément dans l'épaisseur du paquet de fibres).

Après une série de validations à l'échelle du paquet de fibres, l'élément est finalement utilisé pour la modélisation d'un tissage. L'entrelacement des mèches est simulé pour obtenir un modèle géométrique de tissé (Figure 3) ; cette géométrie tissée constitue le point de départ pour des simulations à l'échelle du tissu (macroscopique).

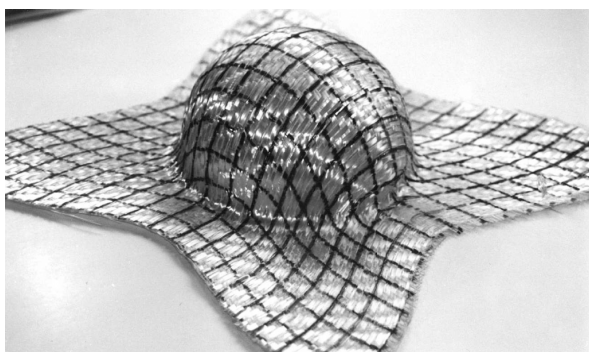
## 3. Simulation à l'échelle macroscopique

La simulation à l'échelle macroscopique nous permet de vérifier la faisabilité d'une forme déterminée lors de l'étape de mise en forme (Fig. 4a) [4] : une mauvaise orientation finale des fibres et l'apparition de défauts, comme le plissement, impactent négativement les propriétés finales et l'écoulement de la résine ; pour un empilement, le compactage augmente le volume de fibres et donc les propriétés finales du matériau, au détriment de l'écoulement de la résine.

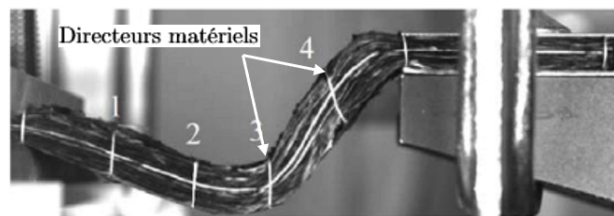
La déformation à cette échelle est complexe. La réponse mécanique d'une couche de tissu est pilotée

par 4 mécanismes découplés [5] : l'extension des fibres (faible, car le tissu est quasi inextensible dans la direction des fibres), le cisaillement dans le plan du tissu, la flexion hors plan du tissu et le glissement entre mèches. Les approches discontinues tiennent mieux compte du comportement décrit ci-dessus, mais elles nécessitent que chaque mèche et point de contact soient modélisés, ce qui augmente le coût de calcul. Des modèles continus, bien que moins précis et incapables de reproduire le glissement entre les mèches, sont toujours capables de donner des résultats suffisamment précis pour un coût de calcul moindre.

Lorsqu'elles sont empilées, les couches peuvent glisser les unes par rapport aux autres, et la grande rigidité en tension prévient le développement d'extensions de flexion. Le déplacement des lignes initialement perpendiculaires à la ligne moyenne (directeurs matériels, Fig. 4b) est piloté par la condition d'inextensibilité, et entraîne l'apparition de courbure sans relation directe avec la rotation des directeurs matériels. De plus, l'épaisseur ne reste pas constante. Les modèles classiques du premier ordre (Kirchhoff-Love ou Reissner-Mindlin) ne peuvent donc pas être utilisés pour modéliser le comportement d'un empilement de couches.



(a)



(b)

FIG. 4. – Déformation à l'échelle macroscopique : (a) Pièce mise en forme par un poinçonnage hémisphérique [6] (b) Rotation des directeurs matériels pour un empilement de couches de tissu [7]

Dans ce travail, on va donc utiliser une cinématique basée sur le modèle de couche homogène équivalente d'ordre un [8] pour décrire la déformation d'un empilement. L'idée est de représenter l'empilement en ne s'intéressant qu'aux deux surfaces basse et haute. On a donc les déplacements dans les trois directions comme inconnues cinématiques, pour les deux surfaces. La rotation des directeurs matériels et la distance entre les surfaces supérieure et inférieure sont donc automatiquement déduites et cela permet aussi d'identifier le comportement dans la direction normale. Un élément fini de coque (Fig. 5a) et un élément fini de solide-coque (Fig. 5b) triangulaires ont été développés pour modéliser numériquement une couche ou un empilement de couches de tissu. Le modèle hyperélastique [9] est utilisé pour l'extension des fibres et le cisaillement plan entre mèches. La flexion hors plan est modélisée par deux approches différentes de la littérature : le triangle de Kirchhoff discret, DKT [10], et la méthode des éléments voisins [11].

#### 4. Approche expérimentale

Les rigidités de flexion et de cisaillement dans le plan sont nettement inférieures à la rigidité de traction des fils. Ainsi, pour que le renfort puisse draper la forme des moules lors de la mise en forme, la structure textile devra se déformer. Le cisaillement est le comportement prépondérant lors de la mise en forme. La rigidité en flexion, quant à elle, intervient dans la géométrie des plis qui, s'ils se situent sur la zone utile de la pièce, sont considérés comme des défauts [12]. La rigidité de cisaillement augmente avec l'augmentation de l'angle de cisaillement à cause de la compression latérale des fils [13]. Le taux de recouvrement augmente, jusqu'à ce que les fils soient complètement en contact latéralement. Or, la rigidité de flexion augmente avec l'augmentation de la densité du tissu [14]. La définition des

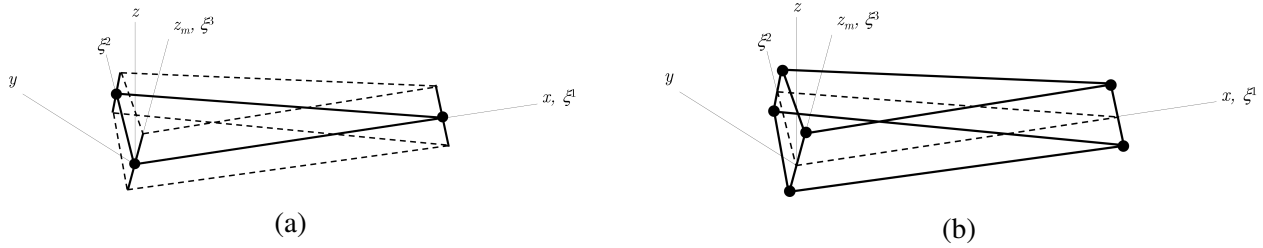


FIG. 5. – Les éléments finis triangulaires proposés : (a) EF coque à 3 nœuds (b) EF solide-coque à 6 nœuds.

lois de comportement, notamment en flexion et en cisaillement, est primordiale pour la simulation par éléments finis. Ces lois de comportement sont en général découplées et caractérisées séparément. Une étude expérimentale a donc été menée afin de déterminer si le cisaillement d'un renfort a un impact sur sa rigidité en flexion.

#### 4.1. Méthode et analyse

Afin de maîtriser la géométrie lors de l'essai de flexion, le deuxième module du système d'évaluation Kawabata (KES) a été choisi. Le tissu sélectionné est une toile tissée à partir des fils de lin comélé avec des multifilaments de Polyamide 12. Les échantillons sont préalablement cisailés en plusieurs zones (voir Fig. 6 (a)) : une zone constituée de tissu cisailé (zone A) et quatre zones constituées de fils (zone B). Avec l'augmentation de l'angle de cisaillement, les dimensions de l'échantillon évoluent. En faisant l'hypothèse de la conservation d'énergie, il est possible de définir un moment de flexion unitaire normalisé par la largeur permettant de comparer les échantillons entre eux. Le comportement en flexion n'est ni élastique ni linéaire dû aux frottements à l'échelle des fils et à l'échelle des fibres. Le modèle choisi est donc une adaptation du modèle de Dahl qui est une généralisation du modèle de Coulomb [15, 16] :

$$\frac{dm_A(\kappa)}{d\kappa} = B_0 \left( 1 - \frac{M_1(\kappa)}{M_0} \text{sign} \frac{d\kappa}{dt} \right)^n + B \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $M_1(\kappa)$  est le moment lié à la courbure de l'échantillon  $\kappa$  (considérée homogène et donc constante sur tout l'échantillon),  $m_A$  est le moment unitaire de la zone A,  $B_0$  est la rigidité de flexion aux faibles courbures,  $M_0$  est le moment limitant décrivant l'influence maximale du frottement sur le comportement en flexion,  $n$  est un facteur de forme (habituellement fixé  $n = 1$  [16]) et  $B$  est la rigidité décrivant le comportement élastique qui intervient à partir d'une certaine courbure.

#### 4.2. Résultats

Les essais sur les fils seuls décrivent un comportement identique pour chaque angle de cisaillement. Comme un essai de flexion hors de l'axe implique un couplage entre torsion et flexion, cela signifie que la rigidité en torsion des fils est très faible. De plus, une relation linéaire a été observée entre ces trois paramètres et la courbure, voir Fig. 6 (b).

Ainsi le cisaillement a une influence importante sur le comportement en flexion, notamment aux faibles courbures avec une augmentation relative d'environ 40% pour  $B_0$  et  $M_0$ . Le modèle proposé pourra, dans de prochains travaux, être intégré aux simulations afin de mieux décrire le comportement en flexion lors des essais de mise en forme aux échelles mésoscopique et macroscopique, objets des sections précédentes.

### 5. Conclusions

Des travaux numériques et expérimentaux ont été introduits succinctement dans ce résumé, pour modéliser le comportement et la mise en forme de tissus et d'empilements de couches de tissu à

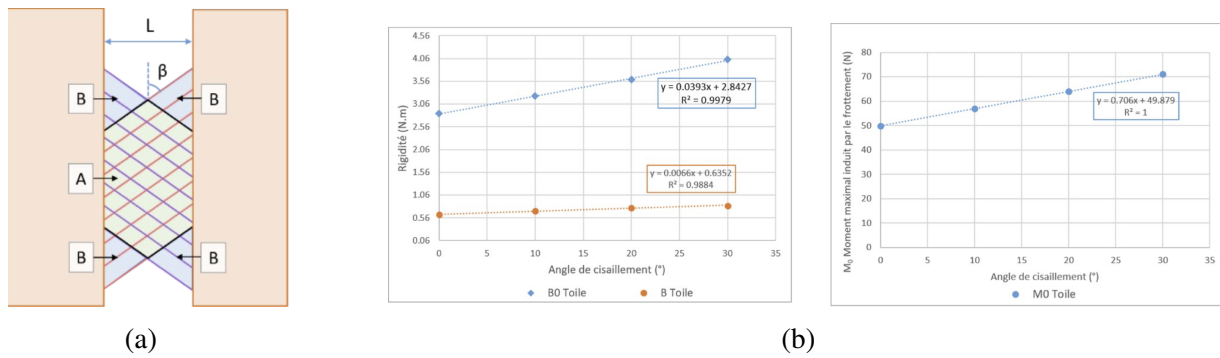


FIG. 6. – (a) Définition des différentes zones sur l'échantillon cisailé; (b) évolution des paramètres  $B$ ,  $B_0$  et  $M_0$  en fonction de la courbure.

différentes échelles.

Ce projet bénéficie d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), sous la référence ANR-21-CE06-0040.

## Références

- [1] Y. Wielhorski, A. Mendoza, M. Rubino, S. Roux « Numerical modeling of 3D woven composite reinforcements : A review », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 154, pp. 106729, 2022, ISSN 1359835X.
- [2] A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, P. Boisse « Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements », *Composites Science and Technology* Vol. 71 n° 14, pp. 1623–1631, 2011, ISSN 02663538.
- [3] R. Bai, E. Guzman-Maldonado, R. Zheng, J. Colmars « Influence of in-plane bending behaviour on textile composite reinforcement forming », *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 273, pp. 109206, 2024, ISSN 00207403.
- [4] E. Sozer, P. Simacek, S. Advani « Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites », in : S. Advani, K.-T. Hsiao (Eds.), *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, chap. 9, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, ISBN 978-0-85709-067-6, , pp. 245–309, 2012.
- [5] C. D. Rudd, A. C. Long, K. N. Kendall, C. G. E. Mangin « Preform design and manufacture », in : C. D. Rudd, A. C. Long, K. N. Kendall, C. G. E. Mangin (Eds.), *Liquid Moulding Technologies*, chap. 6, Woodhead Publishing, Warrendale, PA, USA, ISBN 978-1-85573-242-1, , pp. 151–202, 1997.
- [6] B. Liang, P. Boisse « A review of numerical analyses and experimental characterization methods for forming of textile reinforcements », *Chinese Journal of Aeronautics* Vol. 34 n° 8, pp. 143–163, 2021.
- [7] B. Liang, J. Colmars, P. Boisse « A shell formulation for fibrous reinforcement forming simulations », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 100, pp. 81–96, 2017, ISSN 1359-835X.
- [8] E. Carrera « Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells », *Archives of Computational Methods in Engineering* Vol. 9, pp. 87–140, 2002, ISSN 1359-835X.
- [9] Y. Aimène, E. Vidal-Sallé, B. Hagège, F. Sidoroff, P. Boisse « A Hyperelastic Approach for Composite Reinforcement Large Deformation Analysis », *Journal of Composite Materials* Vol. 44 n° 1, pp. 5–26, 2010.
- [10] J.-L. Batoz, K.-J. Bathe, L.-W. Ho « A study of three-node triangular plate bending elements », *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Vol. 15 n° 12, pp. 1771–1812, 1980.
- [11] F. Sabourin, M. Brunet « Detailed formulation of the rotation-free triangular element 'S3' for general purpose shell analysis », *Engineering Computations* Vol. 23 n° 5, pp. 469–502, 2006, ISSN 0264-4401.
- [12] P. Boisse, J. Huang, E. Guzman-Maldonado « Analysis and Modeling of Wrinkling in Composite Forming », *J. Compos. Sci.* Vol. 5 n° 3, pp. 81, 2021.
- [13] L. Liu, J. Chen, X. Li, J. Sherwood « Two-dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* Vol. 36 n° 1, pp. 105–114, 2005.
- [14] M. Sadoughi, A. N. Boushehri, N. Ezazshahabi « Contribution of bending and shear behavior of woven fabrics in the characterization of drape », *Indian J. Fibre Text. Res.* Vol. 45 n° 2.
- [15] P. R. Dahl « Solid Friction Damping of Mechanical Vibrations », *AIAA J.* Vol. 14 n° 12, pp. 1675–1682, 1976.
- [16] C. NgoNgoc, P. Bruniaux, J. Castelain « Modelling friction for yarn/fabric simulation : Application to bending hysteresis », in : 14th European simulation symposium, Dresden, Germany, 2002.