

Approche numérique et expérimentale pour l'étude du comportement des composites câbles textiles - élastomères

Numerical and experimental approach for the study of the behavior of textile cables - elastomer composites

Gianluca Auteri¹, Jan Neggers¹ et Damien Durville¹

¹ : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 3 rue Joliot-Curie, Gif-sur-Yvette 91190, France.

e-mail : gianluca.auteri@centralesupelec.fr et jan.neggers@centralesupelec.fr et damien.durville@centralesupelec.fr

Résumé

Les câbles textiles sont couramment utilisés pour renforcer les élastomères. Leur dimension et leur architecture complexe limitent souvent à l'échelle macro les informations qui peuvent être extraites expérimentalement. L'analyse par éléments finis permet d'accéder à des quantités à l'échelle du filament, révélant les mécanismes à l'origine de la réponse globale, profondément liés à l'architecture. Dans ce travail, la simulation des câbles textiles, considérés isolément ou dans une matrice élastomère, est abordée à l'aide d'un code dédié aux simulations d'enchevêtrements fibreux : *Multifil*. Une particularité des renforts textiles est que leur géométrie initiale n'est pas connue a priori et dépend fortement du processus de fabrication. Dans un premier temps, l'outil de simulations est utilisé pour reproduire numériquement le processus de fabrication de la corde. Dans un deuxième temps, cela permet de simuler avec précision des essais expérimentaux tels que la traction, la flexion 3 points, la compression. Enfin, pour aller plus loin, un cas plus complexe est présenté : le flambage hélicoïdal, une instabilité du câble en compression. En utilisant la tomographie à rayons X, la trajectoire du câble est extraite et comparée aux résultats des simulations, montrant, une fois de plus, une bonne reproduction du mécanisme.

Abstract

Textile cords are widely used to reinforce elastomers. Their dimension and complex architecture often limit to the macro-scale the information that can be extracted experimentally. Finite element analysis allows access to filament-scale quantities, revealing the mechanisms behind the global response, deeply linked to the architecture. In this work, the simulation of textile cords and their composite is tackled using a dedicated code for the simulations of fibrous entanglements : *Multifil*. A peculiarity of textile reinforcements is that their initial geometry is not known a priori and is strongly dependent on the manufacturing process. Hence, the approach chosen here is to numerically reproduce the manufacturing process of the cord. This allows accurate simulations of experimental tests such as traction, 3-point bending, compression. To go further, a more complex case is presented : helical buckling, an instability of the cord in compression. Using x-ray tomography, the cord trajectory is extracted and compared with simulations results, showing, once again, a good reproduction of the mechanism.

Mots Clés : câbles textiles, élastomère, éléments finis, comparaison expérimentale.

Keywords : textile cords, elastomer, finite element analysis, experimental comparison.

1. Introduction

Les renforts textiles sont communément utilisés pour renforcer des matrices élastomères dans de nombreuses applications industrielles. Un câble textile peut être décrit comme une structure hiérarchique, composée de deux ou plusieurs surtors torsadés, eux-mêmes composés de nombreux fils polymères torsadés (PET, Nylon, etc.). Lorsque l'ensemble est soumis à une sollicitation macroscopique, il est essentiel de pouvoir capturer sa réponse à l'échelle filamentaire pour comprendre le comportement mécanique du renfort textile. Les quantités à cette échelle ne sont généralement pas facilement accessibles expérimentalement, d'où la nécessité de simulations fiables.

2. Méthodologie

Les câbles textiles sont caractérisés par de grandes déformations et un grand nombre d'interactions de contact - frottement. Ces problèmes sont traités efficacement par le code *Multifil*, spécialement conçu pour les simulations des assemblages textiles enchevêtrés. Chaque filament est représenté par des éléments de poutre 1D enrichis cinématiquement, avec des interactions de contact- frottement et de grandes déformations. Un solveur implicite est utilisé pour résoudre le problème non linéaire global, sous des hypothèses quasi-statiques [1]. La matrice est représentée par un maillage 3D non-conforme superposé, composé d'éléments linéaires hexaédriques. Le couplage entre les filaments et la matrice est assuré au niveau d'éléments de liaison ponctuels par la pénalisation du déplacement relatif entre une particule à la surface des filaments et la particule correspondante de la matrice qui se superpose [2]. Une loi de comportement élastique non linéaire, obtenue à partir de tests de traction, est utilisée pour les filaments textiles. La matrice élastomère suit une loi hyperélastique de Mooney- Rivlin, dont les coefficients sont obtenus expérimentalement.

Une particularité des câbles textiles est que l'organisation des filaments n'est pas connue a priori. Une description analytique de la géométrie ne suffirait donc pas à une représentation exacte. Au contraire, la disposition des filaments dépend fortement du processus de fabrication. Pour cette raison, la stratégie choisie ici est de reproduire numériquement la procédure d'assemblage des câbles textiles. La première étape du processus de fabrication, appelée surtordage (Fig. 1.a), consiste à prendre un paquet de filaments droits désordonnés et à leur appliquer une torsion. Dans le processus industriel, la torsion est appliquée pendant que le paquet de fils passe sur un rouleau, ce qui crée ce que l'on appelle le phénomène de migration, une disposition particulière des filaments qui se déplacent du centre du câble vers la périphérie et vice-versa [3]. La reproduction numérique de la procédure industrielle permet de reproduire les phénomènes de migration, en obtenant une distribution des orientations des filaments comparable à celle mesurée expérimentalement [4]. La deuxième étape du processus d'assemblage, le retordage (Fig. 1.b) consiste à tordre deux surtors ensemble avec une torsion égale mais opposée à celle appliquée lors de la torsion d'un seul surtors. Dans le composite réel, une couche de colle est appliquée autour du câble pour augmenter ses performances d'adhérence. La colle en elle-même est capable de modifier le comportement du câble, car elle bloque les déplacements relatifs entre les filaments externes. Il est donc important de le reproduire numériquement, d'où l'étape de encollage (Fig. 1.c) au cours de laquelle, des éléments de liaisons 1D sont créés entre les particules de filaments situés sur la circonférence du câble, auxquels on affecte des propriétés mécaniques pour représenter la rigidité du film de colle. Enfin, pour créer le composite, le câble est couplé à la matrice (Fig. 1.d).

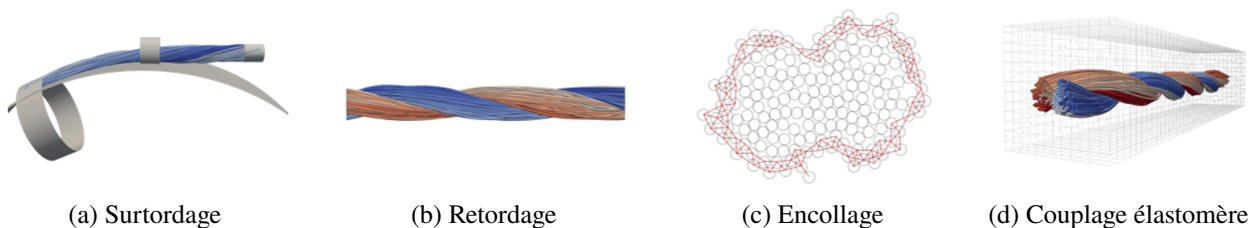


FIG. 1. – Les étapes du processus de fabrication simulé de composites élastomères- câbles textiles.

3. Résultats

3.1. Tests mécanique : traction, flexion, compression

Une fois la géométrie initiale du câble mise en place, il est possible de simuler différents essais mécaniques afin d'obtenir la réponse du câble et de la comparer aux résultats expérimentaux. Différents essais standard sont normalement effectués après chaque étape du processus de fabrication. Il est donc possible de vérifier la précision de la reproduction numérique du processus de fabrication à chaque

moment. L'essai de traction est généralement effectué sur des renforts bruts après le retordage. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est présentée sur la figure 2.a pour un essai de traction jusqu'à la rupture. L'application de colle modifie normalement les propriétés de flexion du câble, qui peuvent être estimées à l'aide d'un essai de flexion 3 points. La figure 2.b montre une simulation de ce test et sa comparaison avec l'expérience, pour un câble encollé. Enfin, la figure 2.c. montre un essai de compression sur l'ensemble du composite. Ce cas est le plus complet puisqu'il implique également la matrice d'élastomère et le couplage entre celle-ci et les filaments. Même pour ce cas, nous montrons une fois de plus une bonne correspondance avec les résultats expérimentaux. Dans la courbe expérimentale, plusieurs chutes sont présentes pour permettre au tomographe d'acquérir des scans, qui seront utilisés pour extraire des informations sur le mécanisme de flambage hélicoïdal présenté dans la section 3.2.

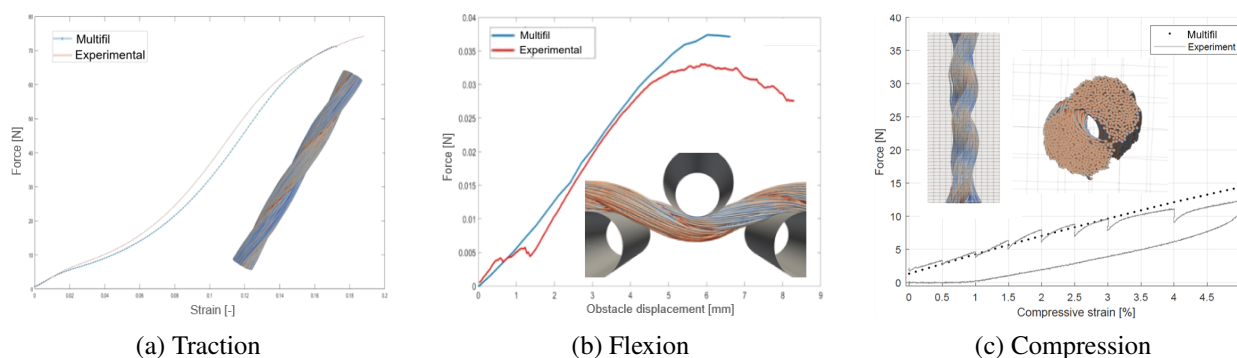


FIG. 2. – Comparaison expérimentale - numérique pour divers essais mécaniques.

3.2. Un cas complexe : le flambage hélicoïdal

La comparaison numérique-expérimentale peut se faire à différents niveaux. Normalement, les deux éléments sont comparés à un niveau macro, en utilisant des courbes de chargement pour différents essais, comme cela a été fait ci-dessus. Cependant, il peut être intéressant de pousser la comparaison plus loin pour valider la capacité de l'outil de simulation à reproduire des mécanismes à plus petite échelle. Dans cette optique, nous nous sommes concentrés sur une instabilité de flambage particulière qui se produit en compression : le flambage hélicoïdal. Ce phénomène est connu dans la littérature pour les poutres entourées d'une matrice [5], mais n'a jamais été observé pour les composites textile-élastomère. Il consiste en un flambage tridimensionnel de l'axe du câble dans une configuration hélicoïdale. Expérimentalement, des essais de compression in situ par tomographie à rayons X sont réalisés pour obtenir un scan du composite à différents niveaux de compression. Les volumes 3D sont ensuite post-traités pour obtenir la trajectoire de l'axe central du câble. Le test est également reproduit numériquement et le même post-traitement est appliqué. La figure 3 montre les trajectoires de l'axe en flambage hélicoïdal, obtenues expérimentalement et numériquement, pour deux élastomères de rigidité différente.

L'amplitude du flambage montre une dépendance inverse par rapport à la rigidité de l'élastomère. L'amplitude de l'hélice est également mesurée pendant la compression, de 0% à 5% de déformation globale. Tant les résultats expérimentaux que numériques montrent une phase stable suivie d'une augmentation rapide de l'amplitude de flambage après une déformation de compression de 4%.

4. Conclusion

Le cadre de simulation présenté permet une reproduction précise de l'architecture interne des renforts textiles. Il est ainsi possible de reproduire numériquement des essais expérimentaux. Cela peut être extrêmement utile pour 1) une conception virtuelle d'un nouveau design 2) une investigation des origines à l'échelle du filament du comportement mécanique global. En outre, nous avons étendu la

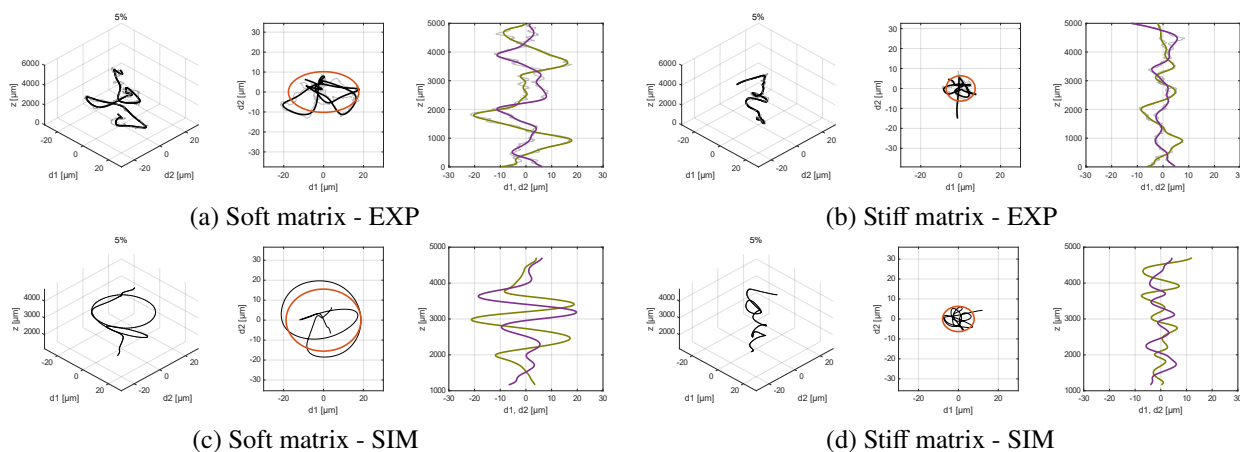


FIG. 3. – Trajectoires du centre du câble en flambage hélicoïdal obtenues expérimentalement et numériquement pour une matrice souple et une matrice rigide, à une déformation de compression globale de 5%. Une ellipse (en orange) est adaptée sur la vue de dessus pour mesurer l'amplitude du flambage. Les lignes verte et violette sur la vue latérale représentent les deux directions planaires orthogonales formant le flambage 3D.

comparaison numérique-expérimentale à un phénomène d'instabilité complexe. Cette validation sur un tel type de chargement faisant intervenir des mécanismes complexes montre la capacité de l'outil à reproduire les phénomènes à petites échelles contrôlant le comportement de composites textile - élastomère.

Références

- [1] D. Durville « Contact-friction modeling within elastic beam assemblies : an application to knot tightening », *Computational Mechanics* Vol. 49 n° 6, pp. 687–707, 2012.
- [2] D. Durville « Microscopic approaches for understanding the mechanical behaviour of reinforcement in composites », in : *Composite reinforcements for optimum performance*, Elsevier, , pp. 461–485, 2011.
- [3] W. Morton, K. Yen « 5—The arrangement of fibres in fibro yarns », *Journal of the Textile Institute Transactions* Vol. 43 n° 2, pp. T60–T66, 1952.
- [4] A. Sibellas « Cordes textiles torsadées à fibres continues : Caractérisation de la structure et modélisation du comportement mécanique en extension », Ph.D. thesis, thèse de doctorat dirigée par Maire, Éric Matériaux Lyon 2019, 2019.
- [5] T. Su, J. Liu, D. Terwagne, P. M. Reis, K. Bertoldi « Buckling of an elastic rod embedded on an elastomeric matrix : planar vs. non-planar configurations », *Soft Matter* Vol. 10 n° 33, pp. 6294–6302, 2014.