

# Principaux facteurs influençant le comportement en compression des cordes textiles : une approche par éléments finis à méso-échelle

G. Auteri<sup>1</sup>, J. Neggers<sup>1</sup>, D. Durville<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 3 rue Joliot-Curie, Gif-sur-Yvette 91190, France.  
{gianluca.auteri,jan.neggers,damien.durville}@centralesupelec.fr

---

**Résumé** — Les composites d'élastomères/câblés textiles constituent le cœur de la structure des pneumatiques. Sous l'effet des déformations de compression, le renfort textile est endommagé par la formation de défauts de type kink band. Des simulations par éléments finis à l'échelle des filaments sont réalisées avec le logiciel *Multifil*. Pour reproduire la complexité architecturale de l'assemblage, le processus de fabrication est reproduit par des simulations. Les essais de compression uniaxiale mettent en évidence les effets liés au taux de torsion, aux propriétés mécanique de la colle et du mélange élastomère sur les déformations développées au niveau des filaments, et donc sur les dommages potentiels dus à la fatigue.

**Mots clés** — compression, câblés textiles, éléments finis, fatigue.

---

## 1 Introduction

Les composites à base d'élastomère renforcés par des câblés textiles sont utilisés dans diverses applications industrielles telles que les pneumatiques, les tuyaux et les bandes transporteuses. Ils se caractérisent par une forte rigidité, dans le sens des fibres polymères torsadées (PET, nylon, etc.), combinée à une grande flexibilité, dans le plan perpendiculaire aux renforts. Ces propriétés répondent aux besoins des pneumatiques, où des nappes de renforts élastomère/câblés textiles sont utilisées pour former la nappe carcasse, chargée de reprendre une partie importante des efforts dans le pneu (Figure 1).

La zone basse du pneu (Figure 1) est la partie proche de la fixation à la jante. Cette zone, comparée au reste du pneu, se caractérise par une forte épaisseur. Pour cette raison, les câbles textiles sont soumis à une compression uniaxiale, due à la charge du véhicule, lorsque le pneu est en contact avec le sol. La compression est plus prononcée lorsque l'architecture du pneu comprend deux couches de cordes textiles. Dans la Figure 1, les isocontours indiquent les valeurs d'allongement dans la direction des cordes, le bleu représentant la compression. Par contre, ils sont aussi soumis à la traction, due à la pression de gonflage. En raison du roulement des pneus, ces nappes de renfort sont soumises à des sollicitations alternées en traction / compression conduisant à des endommagements en fatigue des filaments.

Pour les cycles de fatigue en traction-compression, un des mécanismes conduisant à la perte de résistance du câblé est l'initiation et la propagation de kink bands dans les filaments textiles (Figure 1). Ce défaut est généré par un flambage localisé dans la structure orientée des fibres [1], sous l'effet des déformations de compression. Ce défaut, qui apparaît en compression, affaiblit la fibre et la rend susceptible de se rompre sous l'effet de la tension [2].

La complexité architecturale des câblés textiles et les dimensions des filaments (diamètre  $\sim 20 \mu\text{m}$ ) impliqués limite les informations qui peuvent être extraites des expériences à des quantités mesurables à l'échelle macro. L'analyse par éléments finis apparaît alors comme un outil utile pour prédire à l'échelle méso les différents mécanismes impliqués dans l'endommagement des câblés textiles et pour comprendre l'influence de divers facteurs sur le comportement en compression.

## 2 Méthodologie

Les câblés textiles se distinguent par des architectures spécifiques et une mécanique complexe, où l'arrangement et les interactions entre les filaments individuels jouent un rôle majeur. Un outil dédié à la simulation par éléments finis du comportement d'assemblages textiles, *Multifil* [3], est utilisé dans ce

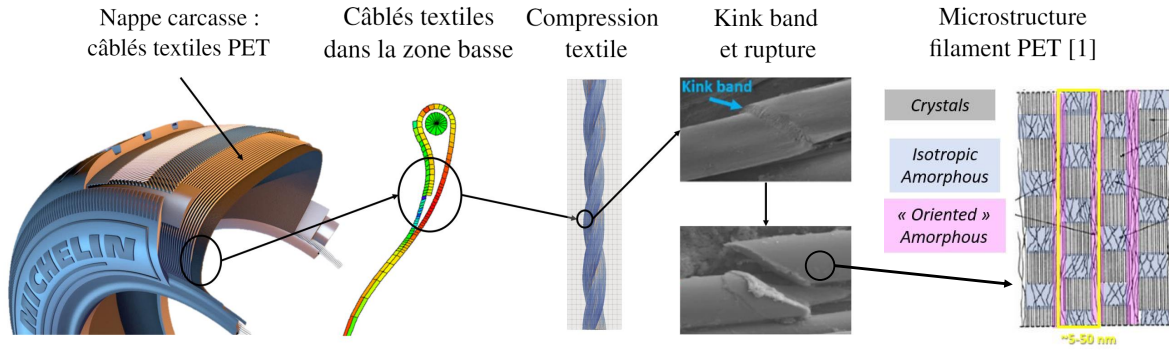


FIGURE 1 – Compression du textile dans le pneu à différentes échelles.

travail, pour reproduire le procédé d'élaboration de ces câblés et simuler l'application de chargements sur des éprouvettes de composite élastomère/câblé textile.

## 2.1 Simulations par éléments finis à méso-échelle *Multifil*

Dans *Multifil* chaque filament est représenté par un modèle de poutre 1D. Le problème général traité est l'équilibre mécanique d'un ensemble de poutres subissant de grandes déformations et développant des interactions de contact-frottement. Un solveur implicite est utilisé pour résoudre le problème non linéaire global, sous des hypothèses quasi-statiques. Le modèle de poutre 3D utilisé décrit la cinématique de chaque section de poutre en exprimant la position  $\boldsymbol{x}$  de chaque particule matérielle  $\boldsymbol{\xi}$  de la poutre sous la forme d'un développement de Taylor au premier ordre par rapport à ses coordonnées transverses  $\xi_\alpha$  :

$$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{\xi}) = \boldsymbol{r}_0(\xi_3) + \xi_\alpha \boldsymbol{g}_\alpha(\xi_3) \text{ avec } \alpha = (1, 2), \quad (1)$$

où  $\boldsymbol{r}_0(\xi_3)$  est la position du centre de section, et les vecteurs  $\boldsymbol{g}_\alpha(\xi_3)$  sont deux directeurs de la section, non contraints par rapport à leur norme ou à l'angle qu'ils forment. L'utilisation de ces deux directeurs déformables permet d'une part de s'affranchir du formalisme des grandes rotations, et d'autre part de prendre en compte des modes de déformation de la section. Suivant ce modèle, le tenseur de déformation de Green Lagrange s'exprime sous la forme d'un développement à l'ordre 2 par rapport aux coordonnées transverses :

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{\xi}) = E_0(\xi_3) + \xi_\alpha E_\alpha(\xi_3) + \xi_\alpha \xi_\beta E_{\alpha\beta}(\xi_3), \quad (2)$$

où  $E_0$ ,  $E_\alpha$  et  $E_{\alpha\beta}$  représentent respectivement les parties constante, linéaires et quadratiques du tenseur des déformations par rapport aux coordonnées transverses.

Pour traiter la structure multi-échelle intrinsèque des textiles, une hiérarchie entre les composants est définie dans le code. Les conditions limites peuvent alors être appliquées dans un cadre hiérarchique, pour chaque composant (par exemple un brin) par rapport à un repère mobile attaché à un composant de niveau hiérarchique supérieur (par exemple la corde). En ce qui concerne les lois de comportement, les filaments sont modélisés par l'élasticité non linéaire, obtenue à partir d'essais expérimentaux de traction sur les filaments. Pour la loi de comportement dans la section, l'hypothèse d'isotropie est faite et un coefficient de Poisson contrôle l'expansion transversale. La matrice en élastomère est modélisée par la loi hyperélastique de Mooney-Rivlin, en tenant compte également de l'incompressibilité.

### 2.1.1 Fabrication du composite textile-élastomère

Les assemblages textiles sont caractérisés par une disposition particulière des filaments, qu'il n'est pas possible de décrire analytiquement. Pour obtenir un modèle le plus proche de la réalité, la voie choisie ici est de reproduire le processus de fabrication de la corde. Le point de départ du processus de fabrication par simulation est un ensemble de filaments textiles, sur chacun desquels un désordre sinusoïdal est imposé avec des paramètres aléatoires (amplitude, fréquence et orientation), afin de simuler le plus fidèlement possible la situation réelle d'un ensemble de filaments désordonnés avant la torsion. La première étape, le surtordage (Figure 2.a), vise à torsader une mèche de filaments pour former un

brin. Au cours de cette phase, une représentation précise du processus industriel est essentielle pour reproduire la migration des filaments. Il s'agit du phénomène par lequel les filaments tendus tentent de relâcher leur tension en migrant vers le cœur du fil, tandis que les filaments moins tendus sont déplacés vers l'extérieur; en d'autres termes, les filaments tendent à trouver une position qui minimise leur état de contrainte de compression/traction [4]. Un filament en cours de migration est surligné en noir sur la figure 2.a. L'application des conditions de bord appropriées joue un rôle clé dans la reproduction des phénomènes physiques corrects. Alors qu'une rotation globale est appliquée à une extrémité, des conditions hiérarchiques spécifiques sont appliquées aux filaments. En particulier, la translation dans les plans transversaux et la rotation par rapport à l'axe longitudinal sont bloquées en moyenne pour tous les filaments, par rapport à un système de référence local qui tourne avec l'extrémité. Ce faisant, l'extrémité du câble n'est pas soumise à une rotation rigide, au contraire, tous les filaments peuvent changer de position en se déplaçant dans toutes les directions et en assurant en même temps une rotation globale de la section. La deuxième étape, le retordage (figure 2.b), applique une torsion égale mais de signe opposée à deux brins, créant ainsi un câble équilibré. La troisième et dernière étape de fabrication est l'assemblage du composite (figure 2.c). Dans le composite, un film de colle est placé autour de la corde pour améliorer l'adhésion avec la matrice. Cet aspect est également pris en compte dans la simulation. Un algorithme identifie les filaments impliqués dans le contour extérieur de la corde dans des sections transversales discrétisées le long de l'axe longitudinal. Dans un plan transversal (mais aussi longitudinalement entre deux sections), le comportement de la colle est alors modélisé en introduisant des éléments 1D couplant la position de deux particules de filaments voisines avec un coefficient proportionnel au module d'élasticité de la colle. Enfin, la matrice de gomme, discrétisée par un maillage non-conforme à celui des filaments, est superposés et couplés au maillage des éléments de poutre. Concrètement, des éléments structurels 1D sont introduits pour coupler les déplacements des paires de particules de la matrice et des filaments dans le contour extérieur de la corde.

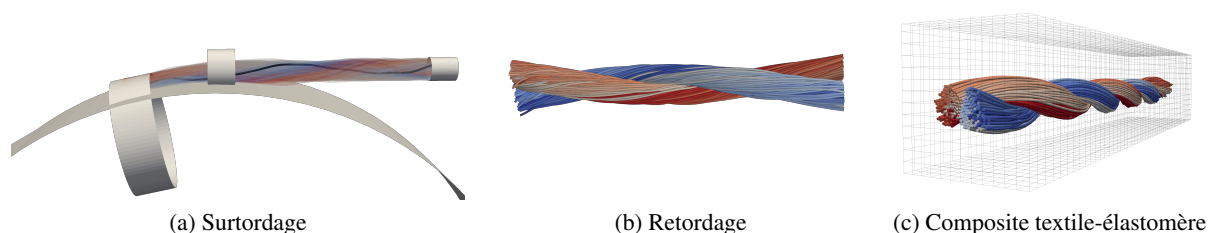


FIGURE 2 – Flux de travail de simulation dans *Multifil* pour fabriquer le composite textile-élastomère.

### 3 Résultats et discussion

Des essais de compression sont effectués sur le composite dans différentes conditions afin d'évaluer la réponse à l'échelle mésoscopique de la corde. Étant donné le nombre important de filaments modélisés, une manière efficace d'examiner les quantités de sortie consiste à tracer leur distribution sur tous les nœuds des filaments, plutôt que les valeurs minimales ou maximales absolues. Dans ce cas, l'endommagement par kink band est supposé être créé dans les filaments en réponse à une contrainte de compression longitudinale (déformation minimale  $\epsilon_{min}$ ) accumulée en n'importe quel point de la section transversale du filament.

#### 3.1 Effet torsion

La simulation du processus de fabrication de l'assemblage textile permet de reproduire des cordes avec différents niveaux de torsion. Le niveau de torsion a une influence importante sur les performances mécaniques d'une corde. En effet, la torsion agit essentiellement sur l'orientation moyenne des filaments élémentaires par rapport à l'axe de la corde. La comparaison de la distribution des déformations minimales, sous compression uniaxiale globale, pour deux niveaux de torsion différents (Figure 3), met en évidence un déplacement du pic vers des valeurs de compression plus sévères dans le cas d'une basse torsion. En effet, plus la torsion est basse, plus les filaments sont alignés sur l'axe de chargement, et plus ils ont tendance à se déformer dans leur direction longitudinale.

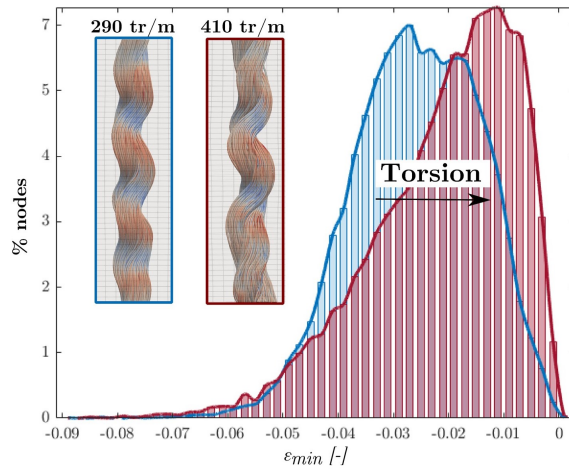


FIGURE 3 – Distribution des déformations minimales dans les filaments pour deux niveaux de torsion différents (290 tr/m et 420 tr/m).

### 3.2 Effet colle

Un film de colle est appliqué autour de la corde textile pour améliorer l'adhérence avec le mélange. Cet élément est essentiel car il garantit la cohésion du composite, mais il peut avoir un impact sur l'endurance du textile. De plus, l'étude de l'impact de la couche de colle sur le textile prend de l'importance étant donné les récentes orientations des fabricants pour développer de nouvelles formulations de colle plus écologiques. Une analyse de sensibilité sur le module élastique des éléments de colle montre une tendance monotone en termes d'effet à méso-échelle. Quand la rigidité de la colle augmente, la distribution des déformations minimales nodales se déplace vers des valeurs de déformation en compression plus sévères, comme le montre la figure 4. Cela peut s'expliquer par l'effet de confinement circonférentiel que la colle exerce sur le câble. Une comparaison visuelle de l'assemblage textile comprimé avec différentes rigidités de colle donne une idée de l'impact de ce paramètre sur le comportement en compression. La corde sans colle (0 MPa dans la Figure 4), réagit à la compression plutôt par une ouverture des deux brins ; dans le cas contraire, lorsque la corde est entourée d'une colle rigide, la structure globale subit un flambage généralisé de type hélicoïdal. En d'autres termes, il s'agit d'une compétition entre deux mécanismes de dissipation de la compression globale : l'ouverture entre les deux brins et le flambage généralisé. L'un ou l'autre étant plus ou moins activé en fonction de certains paramètres architecturaux de la corde.

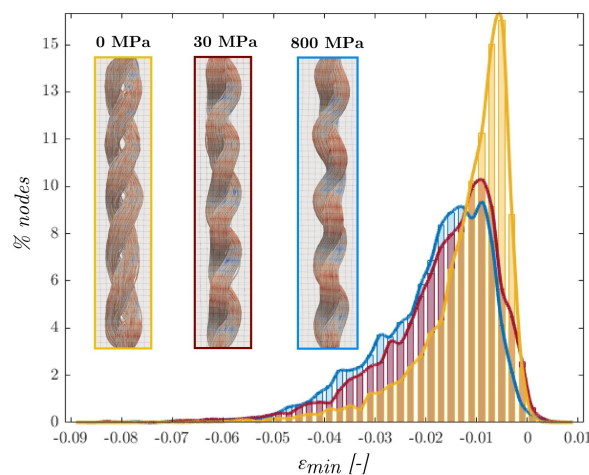


FIGURE 4 – Distribution des déformations minimales dans les filaments pour deux niveaux différents de module d'élasticité de la colle (0 MPa, 30 MPa et 800 MPa).

### 3.3 Effet mélange

Le dernier effet étudié est l'impact de la rigidité de la matrice en élastomère sur le câble textile. Même si ce paramètre de conception est souvent fixé par d'autres considérations structurelles, il est toujours important d'évaluer les conséquences qu'il peut avoir sur l'endommagement des fibres. Une comparaison est proposée entre un composé d'élastomère souple et un composé d'élastomère rigide. Le rapport entre les modules élastiques à 10 % de déformation est d'environ un facteur 4, même si le matériau est toujours modélisé dans les simulations avec un comportement hyperélastique de Mooney-Rivlin. Dans ce cas, une matrice plus rigide a un impact négatif sur les filaments, comme le montre la figure 5. En fait, la matrice rigide, confinant la corde, ne lui laisse aucun espace pour s'ouvrir ou se déformer, les filaments sont alors forcés d'absorber la compression longitudinalement, étant ainsi exposés aux dommages de la compression par fatigue.

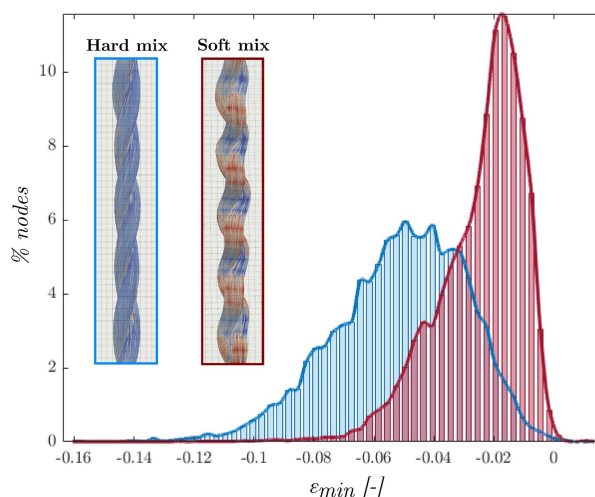


FIGURE 5 – Distribution des déformations minimales dans les filaments pour deux matrices ayant des rigidités différentes.

## 4 Conclusion

Ce travail vise à étudier le potentiel des simulations par éléments finis à méso-échelle pour les câblés textiles utilisés dans les matériaux composites. La méthodologie présentée a permis de reproduire la complexité architecturale des assemblages textiles. L'analyse à cette échelle met en évidence l'impact de certains paramètres de conception en termes de déformation en compression au niveau des filaments. En particulier, sont mis en évidence 1) l'effet positif de la torsion 2) l'effet négatif de la rigidité de la couche de colle 3) l'effet négatif de la rigidité de l'élastomère sur l'endommagement potentiel des filaments textiles.

## Références

- [1] Prevorsek, DC and Kwon, YD and Sharma, RK d, *Structure and properties of Nylon 6 and PET fibres : the effects of crystallite dimensions*, Journal of materials science, 2310-2328, 1977.
- [2] Dobb, M. G., D. J. Johnson, and B. P. Saville, *Compressional behaviour of Kevlar fibres*, Polymer 22.7, 960-965., 1981.
- [3] D. Durville, *Contact-friction modeling within elastic beam assemblies : an application to knot tightening*, Computational Mechanics 49.6, 687-707, 2012.
- [4] Morton, W. E., and K. C. Yen, *The arrangement of fibres in fibro yarns*, Journal of the Textile Institute Transactions 43.2, T60-T66, 1952.