

Caractérisation du frottement entre composants pour la simulation numérique de câbles tressés synthétiques

N. Dumergue¹, D. Durville², M. Arhant³, P. Davies⁴

¹ IFREMER, Brest, France, nicolas.dumergue@ifremer.fr

² Centrale Supélec, Saclay, France, damien.durville@centralesupelec.fr

³ IFREMER, Brest, France, mael.arhant@ifremer.fr

⁴ IFREMER, Brest, France, peter.davies@ifremer.fr

Résumé — Pour la modélisation des câbles textiles et de leurs terminaisons, une identification précise des paramètres de frottement entre composants est nécessaire. Pour ce faire, l'essai standardisé « Yarn-on-Yarn » est communément étudié. Ici, celui-ci est investigué tant du point de vue expérimental que numérique. Le modèle numérique nous permet notamment de quantifier l'incertitude lié à l'emploi de formules analytiques existantes. Cependant, cet essai présente différentes limites. A ce titre, nous proposons un nouvel essai pour identifier le coefficient de frottement entre les composants de câble textile. Enfin, des premiers résultats de simulation de portions de corde tressée ainsi que des premières pistes de modélisation d'un raccord par épissure sont présentées.

Mots clefs — Coefficient de frottement, câble synthétique, identification inverse

1. Introduction et contexte

Les épissures sont le mode de terminaison le plus utilisé pour les câbles textiles. Pour autant leur dimensionnement reste principalement empirique. L'identification du coefficient de frottement entre les composants d'un câble constitue un enjeu fort pour une meilleure compréhension de la transmission des efforts au sein d'une épissure.

Dans le domaine des cordages synthétiques, l'essai « Yarn on Yarn » (standardisé dans la norme D3412 [3]) est un essai communément utilisé pour caractériser le frottement et l'abrasion entre torons. L'utilisation de formules approchées pour l'évaluation du coefficient de frottement limite la précision de la mesure du coefficient de frottement par cet essai. A ce jour, il n'existe pas de formulation analytique ou semi-analytique permettant de résoudre de façon exacte le problème en contact frottant de deux câbles torsadés qui pourrait être utilisée pour calculer le coefficient de frottement à partir de l'essai « Yarn-on-Yarn ». Il existe cependant deux modèles analytiques approchés. Le modèle de Goksoy [1] qui considère que la géométrie de la torsade peut être assimilée à une hélice de pas et rayon constant. Le modèle de Hobbs [2], quant à lui, fait l'hypothèse d'une distribution de pression uniforme le long de la ligne de contact entre les deux portions de brins en contact, considérant les torons comme des hélices à pas et à rayon variables. L'écart de prédiction du coefficient de frottement entre les deux modèles peut atteindre 40%. Nous proposons donc d'utiliser un modèle éléments finis permettant d'approcher de façon plus précise le coefficient de frottement.

La nature dynamique de l'essai « Yarn-on-Yarn » induit des effets d'inerties qui perturbent la mesure des efforts de frottement. Ainsi, nous proposons une variante de cet essai qui a l'avantage d'être symétrique et permet la réalisation d'une mesure quasi statique du coefficient de frottement.

Dans cette étude, nous présenterons tout d'abord la variante proposée de l'essai « Yarn on Yarn » associée avec une adaptation du modèle de Hobbs pour l'évaluation du coefficient de frottement. Dans une seconde partie, nous présentons le modèle numérique que nous utilisons pour simuler l'essai « Yarn on Yarn » et qui sera également utilisé pour modéliser la variante de l'essai que nous proposons.

1. Caractérisation expérimentale du coefficient de frottement

L'essai « Yarn on Yarn » est un essai pour évaluer la résistance à l'abrasion de brins textiles. Dans cet essai, une torsade du brin sur lui-même est maintenu dans un montage à 3 poulies (voir Figure 1).

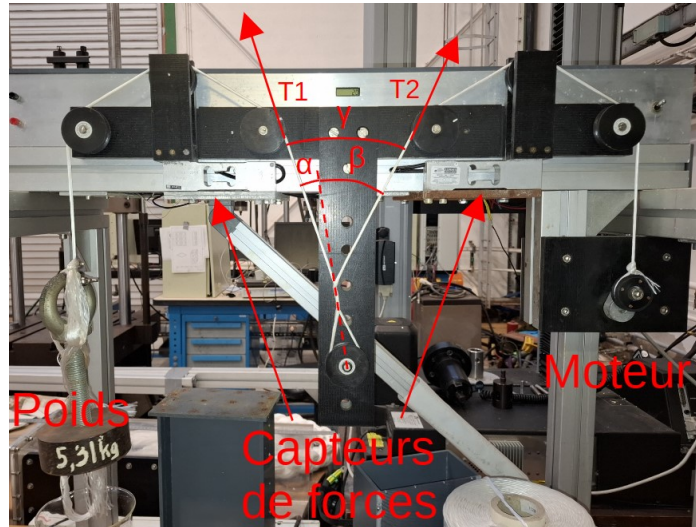


Figure 1: Essai Yarn-on-Yarn

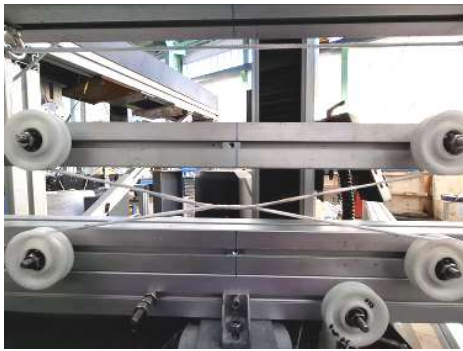
A une extrémité, le brin est maintenu sous tension par suspension d'un poids tandis qu'à l'autre extrémité un déplacement est imposé par un bras fixé à l'axe d'un moteur. Ce déplacement imposé induit un déplacement relatif et donc un frottement entre les deux portions du brin formant la torsade.

Nous utilisons la formulation analytique proposée par Hobbs ([2]) pour évaluer le coefficient de frottement à partir de l'essai « Yarn on Yarn ». Elle consiste à considérer que la géométrie des brins est hélicoïdale à pas et rayons variables et à section circulaire indéformable de rayon r . La pression sous le brin est considérée constante (ce qui n'est pas démontrée dans l'étude de Hobbs). La longueur de la ligne de contact entre les deux brins est approximée par une hélice de rayon r et d'angle d'enroulement γ . Ces deux approximations rendent la formule approchée et peuvent être source d'erreur dans l'estimation du coefficient de frottement.

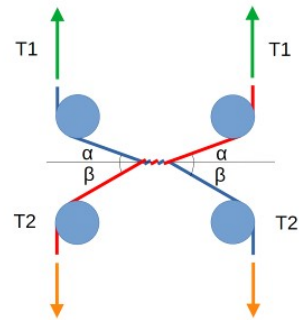
Le mouvement oscillatoire imposé par le moteur (fréquence de 1 Hz dans la norme) induit des effets dynamiques qui peuvent perturber de façon importante la mesure du coefficient de frottement. Pour cette raison, nous proposons donc une version symétrique de l'essai pour laquelle le déplacement imposé à l'aide d'une machine de traction est à vitesse constante, présenté en Figure 2.a et Figure 2.b. La détermination du coefficient de frottement pour ce nouvel essai se fait à l'aide l'équation 1, présentée ci-après :

$$\mu = \frac{(T_1 - T_2) \sin(\gamma/2)}{\pi N_S (T_1 \sin^2(\alpha) - T_2 \sin^2(\beta))} \quad \text{Equation 1}$$

Avec α , β étant les angles et les tensions en amonts en aval de la torsade T_1 et T_2 sont telles que définies sur la figure, N_S le nombre de spires d'enroulements (pour un brin).



(a)



(b)

Figure 2: Montage symétrique proposé pour la détermination du coefficient de frottement (a) Photo du montage (b) Schéma du montage

2. Modèle numérique

2.1 Modélisation et simulation de l'essai yarn-on-yarn

Dans un premier temps, un modèle de simulation de l'essai yarn-on-yarn est construit en vue d'identifier le coefficient de frottement par comparaison des courbes d'efforts mesurés expérimentalement et issue de simulation. Le logiciel Multifil [4], développé en interne pour la simulation de milieux enchevêtrés, et reposant sur un solveur implicite, est utilisé pour cette simulation.

Dans cette approche, les poulies utilisées dans l'essai sont représentées par des surfaces analytiques associées à des corps rigides pilotables en translation et en rotation. Des éléments de contact sont construits entre le fil, représenté par un modèle de poutre à sections déformables et la gorge de la poulie. Plusieurs éléments de contact sont générés sur chaque section de poutre au niveau des nœuds à proximité des poulies, chaque élément de contact associant une particule matérielle déterminée sur la section du fil à la particule correspondant à sa projection dans la gorge de la poulie. En tenant compte de ces interactions de contact, la torsade de trois pas constituant le cœur du dispositif yarn-on-yarn est progressivement mise en place en effectuant des phases successives de translation et de rotation des poulies (Figure 3).

D'autres éléments de contact sont construits entre les portions de fils venant au contact pour former la torsade entre les poulies. Ces éléments de contact sont générés à partir d'une discrétisation d'une géométrie intermédiaire construite comme la moyenne des fibres moyennes des deux portions de fils proches l'une de l'autre. Ainsi déterminés à partir d'une discrétisation indépendante de la géométrie intermédiaire, ces éléments de contact associent des couples de particules matérielles situées sur les surfaces des portions de fil, à des positions quelconques relativement aux éléments fins discrétisant le fil. Ces éléments de contact sont régénérés itérativement au cours de chaque incrément de chargement de manière à considérer des couples de particules effectivement proches l'une de l'autre, tout en tenant compte du déplacement relatif entre les deux portions de fil en contact. Ces éléments de contact permettent de suivre avec précision les interactions de contact frottant qui se développent au niveau de la torsade de l'essai yarn-on-yarn (Figures 4 et 5).

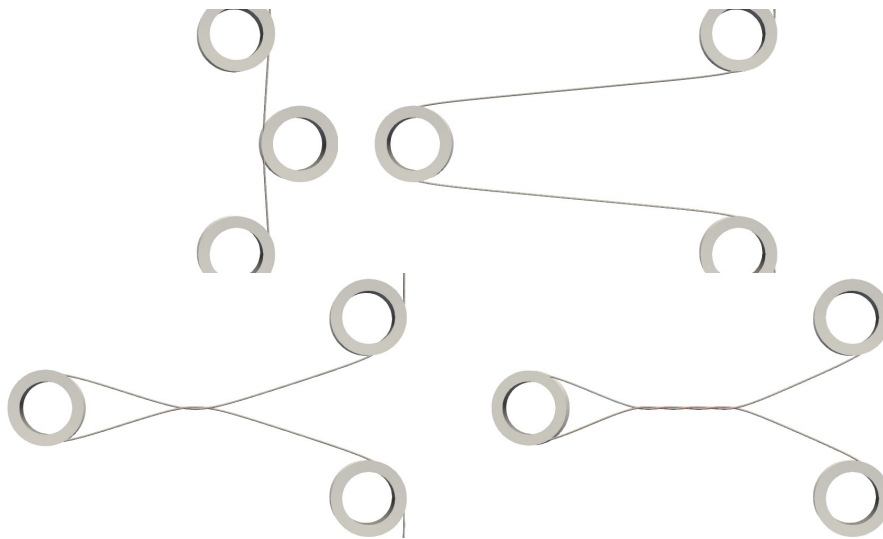


Figure 3 : vues de différentes étapes intermédiaires de la simulation de la mise en place de l'essai yarn-on-yarn.

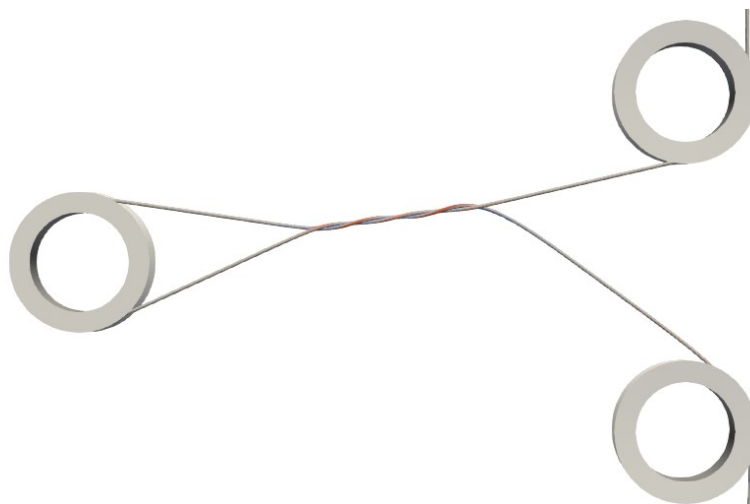


Figure 4 : configuration de l'essai yarn-on-yarn lors de la phase de traction

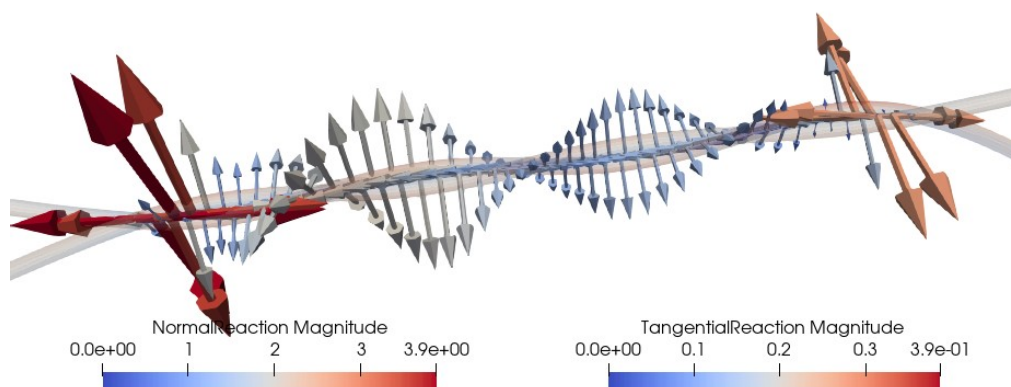


Figure 5 : visualisation des réactions normales et tangentielles au niveau de la torsade dans la phase de traction de l'essai yarn-on-yarn.

Cette première étude numérique va permettre une meilleure compréhension de cet essai Yarn on Yarn d'un point de vue numérique, pour ensuite basculer dans un second temps sur un modèle numérique du nouvel essai proposé en Figure 2. Enfin, la finalité de cette étude se porte sur la modélisation des frottements dans un cordage synthétique. Les problématiques liées à la modélisation de ces structures est discutée dans la section suivante.

2.2 Modélisation et simulation d'une portion de corde tressée

Une problématique relative à la modélisation d'une portion de corde tressées vient du fait que les trajectoires des brins au sein de la tresse ne sont pas définies a priori, mais sont déterminées par les interactions entre ces brins au cours du procédé de tressage. Plutôt que de simuler le procédé d'assemblage, l'approche suivie ici [5] consiste à partir d'une configuration arbitraire, au sein de laquelle les brins ayant des orientations d'hélice opposées se croisent avec d'importantes interpénétrations. À chacun de ces croisements, le motif de tressage détermine lequel des brins doit se positionner au-dessus ou en-dessous de l'autre. Cette orientation de superposition définie par le motif de tressage est utilisée pour modifier l'orientation des réactions normales de contact déterminées par le modèle de contact afin de séparer progressivement les brins au niveau de ces croisements. À l'issue de cette phase de séparation progressive, on obtient une configuration initiale correspondant à un équilibre mécanique, et dans laquelle les différents brins respectent les conditions de superposition définies par le motif de tressage (Figure 6).

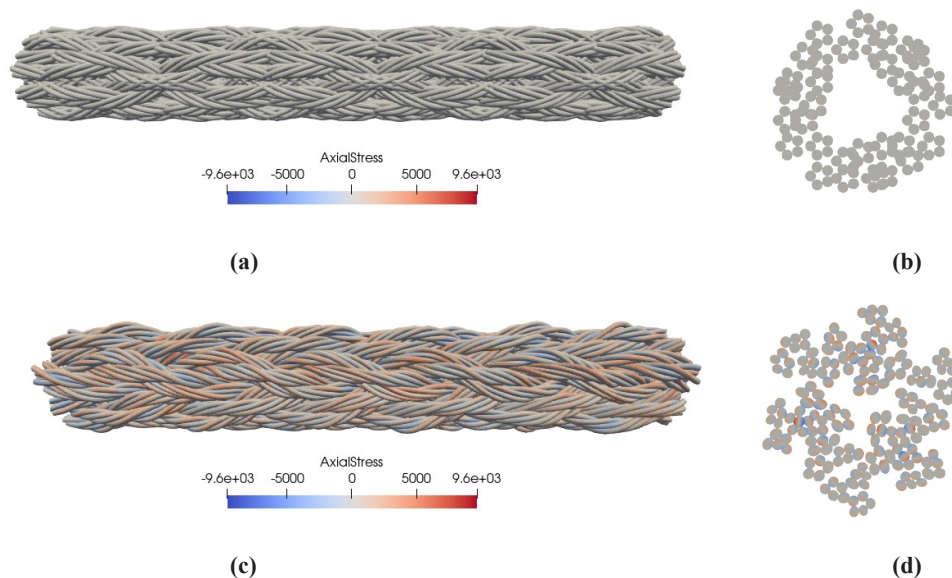


Figure 6: vue et coupe de la configuration arbitraire de départ (a et b) et de la configuration initiale déterminée par séparation progressive des brins (c et d)

2.3 Approche de la modélisation et de la simulation d'épissures

Une première approche de la tenue mécanique des épissures est prévue en mettant en œuvre les éléments de modélisations décrits ci-dessus, notamment en insérant une première portion de tresse, au centre d'une seconde portion de tresse, en utilisant une surface analytique rigide de forme conique destinée à ouvrir un espace au cœur de la seconde portion. Les essais de caractérisation du frottement doivent permettre d'identifier les paramètres du modèle de frottement qui conditionne les transferts d'effort entre les portions de tresses raccordées par épissure.

Références

- [1] ASTM D3412/D3412M-13. Standard test method for coefficient of friction, yarn to yarn. West Conshohocken, PA: ASTM, 2013
- [2] Hobbs RE, Ridge IML. A new estimate of the yarn-on-yarn friction coefficient. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2018;53(4):191-196. doi:10.1177/0309324718760883
- [3] ASTM D3412/D3412M-13. Standard test method for coefficient of friction, yarn to yarn
- [4] Durville, D. (2012). Contact-friction modeling within elastic beam assemblies: an application to knot tightening. *Computational Mechanics*, 49(6), 687-707.
- [5] Vu, T. D., Durville, D., & Davies, P. (2015). Finite element simulation of the mechanical behavior of synthetic braided ropes and validation on a tensile test. *International Journal of Solids and Structures*, 58, 106-116.