

Caractérisation du frottement inter-mèches de verre : confrontation essais/calculs par éléments finis selon une formulation ALE

Characterisation of friction between glass tows : comparison of experiments and finite element simulations using an ALE formulation

Hugo Jamet^{1,2}, Guillaume Helbert¹, Florent Bouillon² et Nahienne Hamila¹

1 : PTR5, IRDL - UMR CNRS 6027

ENIB

945 Av. du Technopôle, 29280, Plouzané

e-mail : hugo.jamet@enib.fr, guillaume.helbert@enib.fr, nahiene.hamila@enib.fr

2 : SAFRAN CERAMICS

Safran Ceramics, a technology platform of Safran Tech, 105 avenue Marcel Dassault, F-33700 Mérignac, France

e-mail : florent.bouillon@safrangroup.com

Résumé

Le frottement inter-mèches est un phénomène crucial affectant le comportement des tissés. Cependant, sa compréhension et sa modélisation restent complexes de par les nombreux paramètres (force normale, vitesse, angles, ensimage...) mis en jeu. Afin de mieux cerner l'influence des différents paramètres sur le frottement, un banc d'essai de frottement sans capteur de force a été développé ainsi que le modèle d'éléments finis associé. Ce dernier est basé sur une formulation Arbitrary Eulerian Lagrangian qui assure une gestion simplifiée des contacts et des glissements inter-mèches, ainsi qu'une plus grande rapidité et robustesse de calcul en comparaison d'un modèle en formulation Lagrangienne. La confrontation des résultats de simulations avec les courbes expérimentales a permis d'aboutir à la formulation d'une loi de frottement et à l'identification de ses paramètres.

Abstract

Inter-tow friction is a crucial phenomenon affecting the behaviour of woven fabrics. However, understanding complex because of the many parameters (normal force, speed, angles, sizing, etc.) involved. In order to gain a better understanding of the influence of the various parameters on friction, a friction test bench without a force sensor was developed, along with the associated finite element model. The latter is based on an Arbitrary Eulerian Lagrangian formulation, which provides simplified management of contact and inter-tow sliding, as well as greater speed and robustness compared with a Lagrangian formulation. Comparison simulation results with the experimental curves led to the formulation of a friction law and the identification of its parameters.

Mots Clés : mèches de verre, frottement, ALE, éléments finis

Keywords : glass fibers, friction, ALE, finite elements

1. Introduction

Les composites faits à partir de préformes [1] connaissent une utilisation grandissante dans le domaine du transport car ils permettent d'alléger les structures [2]. Les fibres utilisées dans les préformes peuvent être courtes [3] ou longues [4] mais quelle que soit leur longueur les mèches de fibres frottent entre elles lors de la production et de la mise en forme de la préforme. Différentes méthodes de production de préformes comme le cardage [5], le tissage [6], le tricotage [7], le tressage [8] ou encore l'aiguilletage [9] sont utilisées selon les applications. Le frottement inter-mèches joue un rôle prépondérant dans toutes ces méthodes et est donc un phénomène clef dans la production des préformes.

Le montage de Howell [10] a beaucoup été utilisé pour mesurer le coefficient de frottement inter-mèches. Dans celle-ci une mèche est suspendue verticalement par son extrémité supérieure et tendue

à l'autre extrémité par un poids mort. Une mèche horizontale supporte la mèche suspendue perpendiculairement à son axe afin qu'elle forme un angle β avec la direction verticale. La mèche horizontale est mise en mouvement latéralement et entraîne la mèche verticale par frottement jusqu'à atteindre un angle limite θ par rapport à la position d'origine. Le coefficient de frottement peut être obtenu avec l'équation suivante :

$$\mu_{app} = \frac{\sin \theta}{\sin \beta} \quad (\text{Eq. 1})$$

Ce montage se démarque par sa simplicité, la facilité à faire varier les paramètres et ne nécessite pas de capteur de force particulier. C'est pourquoi nous avons retenu ce dernier et conçu un banc de frottement inspiré de celui d'Howell. Afin de ne pas se limiter aux fortes hypothèses ayant conduit à la relation (Eq. 1) et afin d'étendre l'étude à ce qui se passe après le glissement, il paraît nécessaire de développer un modèle numérique associé à ce banc. Les modèles Arbitray Lagrangian Eulerian (ALE) sont une nouvelle approche très prometteuse pour représenter le glissement entre mèches dans les tissés, car cette formulation facilite grandement la recherche et la gestion du contact [11]. À ce jour et à notre connaissance, aucune méthode de caractérisation n'utilise la formulation Arbitray Lagrangian Eulerian, qui se prête pourtant très bien à l'implémentation robuste de lois de frottement complexes.

Ainsi, cette étude présente une méthode de caractérisation du frottement entre mèches. Dans un premier temps, un banc d'essai utilisant un post-traitement optique pour mesurer le glissement d'une mèche par rapport à une autre est présenté. Ensuite, le modèle éléments finis associé faisant appel à une formulation ALE est détaillé. Enfin, les courbes numérique et les courbes expérimentales sont comparées pour valider le modèle.

2. Méthode

2.1. Partie expérimentale

Le banc de frottement présenté dans ce qui suit s'inspire largement de celui développé par Howell [10]. Le schéma de fonctionnement et une photographie du dispositif sont présentés en figure 1. Le principe de l'essai est similaire à celui d'un archet frottant sur une corde de violon. Une première mèche dite "horizontale" est mise en tension et translatée selon sa direction. Une deuxième mèche fixée au bâti par son extrémité supérieure est mise en tension selon la direction verticale et repose ainsi sur la première. Cela génère donc un effort "radial" réciproque entre les deux mèches. Du point de vue de la mèche verticale, cet effort représente un effort normal. Le mouvement de la mèche horizontale va donc par frottement créer un effort tangentiel qui aura pour effet d'entraîner la mèche verticale. Le suivi du point d'intersection entre les deux mèches U_i en fonction du déplacement du chariot U_c est donc caractéristique de la loi de frottement inter-mèches.

Les mèches sont composées de fibres de verre et ont directement été prélevées sur une nappe tissée. La mise en tension se fait par des masselottes calibrées au mg près, suspendues à l'extrémité basse de chaque mèche. Un chariot supportant la mèche horizontale est en liaison glissière par rapport au bâti et peut donc se déplacer horizontalement. Au début de l'essai, la mèche verticale est placée telle qu'elle forme un angle de $\alpha = 90^\circ$ avec la mèche horizontale ce qui correspond à $\theta = 0^\circ$ ou encore $U_i = 0$ mm. La mesure des déplacements U_i et U_c est effectuée par mesures optique à l'aide d'un appareil photographique numérique prenant des images en rafales à une fréquence constante.

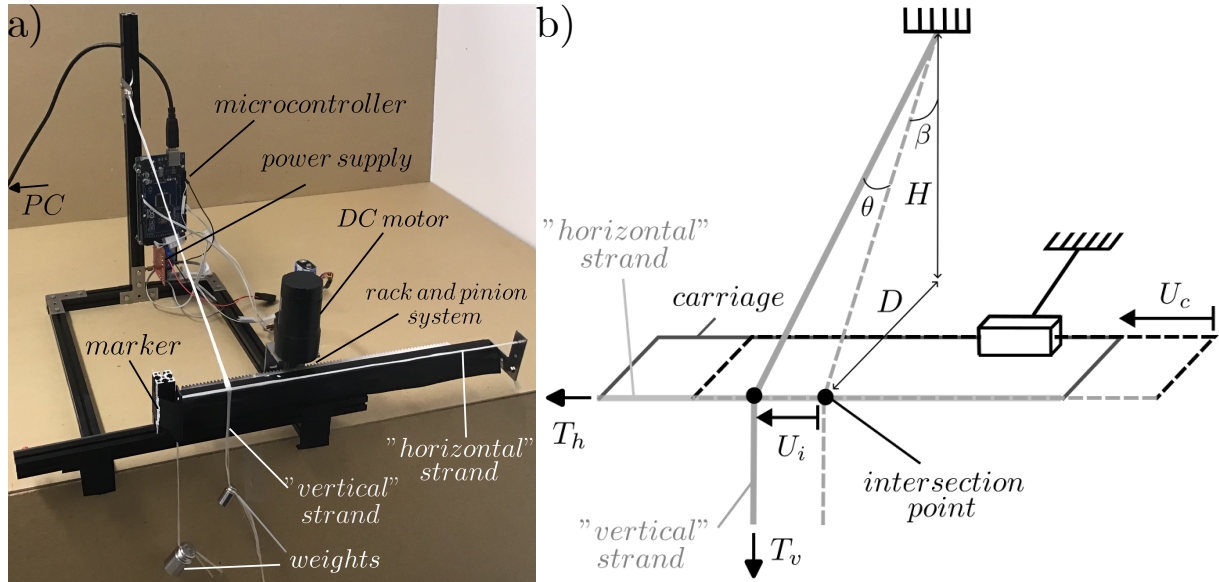


FIG. 1. Dispositif expérimental : a) photo, b) schéma

2.2. Partie numérique

2.2.1. Formulation ALE

Le modèle permettant de reproduire les essais réalisés se doit d'être simple, robuste et rapide. La difficulté majeure réside dans la gestion du contact mèche-mèche. Afin de grandement simplifier la recherche du point de contact et de réduire la taille du modèle, la formulation Arbitrary Lagrangian Eulerian déjà utilisée pour modéliser les systèmes câbles poulies [12, 13, 14] et les glissements dans les tissés [11, 15] a été retenue. Cette formulation introduit un degré de liberté supplémentaire en chaque nœud représentant le glissement de la matière d'un élément à un autre noté u_s et dont la vitesse associée est notée v_s . Ainsi, plutôt que de rechercher le point de contact entre les deux mèches et de calculer les efforts aux nœuds pour empêcher leur interpénétration dans une formulation lagrangienne, la matière se déplace de part et d'autres des nœuds associés au point de contact réputé connu. Des éléments barres ont été retenus puisque les mèches ont une rigidité en flexion très faible par rapport à leur rigidité en traction.

2.2.2. Gestion du contact mèche-mèche avec frottement

Liaison cinématique des nœuds en contact

La gestion du contact entre les deux mèches est réalisée en plaçant un nœud sur chaque mèche au point de contact connu en début de simulation. Les degrés de liberté spatiaux de ces nœuds sont ensuite liés cinématiquement afin qu'ils conservent le même déplacement.

Calcul de l'effort normal

La direction normale du contact mèche-mèche est calculée à partir des deux éléments adjacents au nœud de contact. Pour ce faire, on considère le triangle formé par les trois nœuds contenus dans les deux éléments présentés sur la Figure 2. La hauteur issue du point de contact est calculée puis le vecteur lié à cette hauteur est normalisé pour obtenir la normale sortante \vec{n} :

$$\vec{n} = \frac{(\vec{x}_2 - \vec{x}_1)\eta_{min} + \vec{x}_1 - x_{contact}}{\|(\vec{x}_2 - \vec{x}_1)\eta_{min} + \vec{x}_1 - x_{contact}\|_2} \quad (\text{Eq. 2})$$

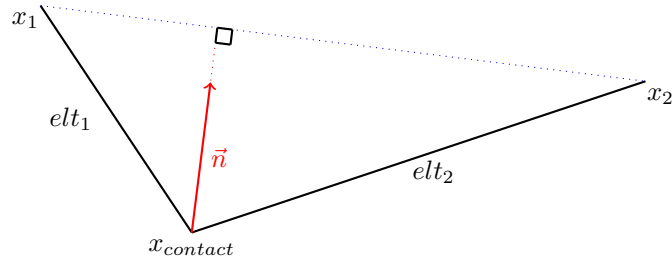


FIG. 2. Schéma du calcul du vecteur normal : $x_{contact}$ est le nœud de contact, elt_1 et elt_2 sont les deux éléments qui contiennent le nœud de contact, x_1 et x_2 sont les seconds nœuds des éléments 1 et 2

Avec η_{min}

$$\eta_{min} = \arg \min_{\eta \in [0,1]} (|(\vec{x}_2 - \vec{x}_1)\eta + \vec{x}_1 - \vec{x}_c||_2) \quad (\text{Eq. 3})$$

L'effort normal de contact F_n est pris comme étant la norme selon \vec{n} des forces internes spatiales du nœud de contact $\vec{F}_{contact}$:

$$F_n = \left| \vec{n} \cdot \vec{F}_{contact} \right| \quad (\text{Eq. 4})$$

Calcul de l'effort tangentiel

L'effort tangentiel F_t est calculé à partir d'une loi de Amontons modifiée reprise des travaux de Vu et al. [16] prenant en compte le caractère anisotrope du frottement et la vitesse du chariot V_c , ainsi qu'un comportement non linéaire vis à vis de la force normale.

$$F_t = \frac{\mu_{app}}{\sin(\alpha)} \left(\frac{F_n}{F_0} \right)^{\gamma-1} F_n \quad \mu_{app} = \lambda V_c + \mu_s \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec μ_{app} le coefficient de frottement apparent, dépendant de la vitesse du chariot V_c , mesuré lorsque les mèches forment un angle $\alpha = 90^\circ$ dans le plan le horizontal. μ_s est le coefficient de frottement statique et λ traduit la dépendance de μ_{app} à la vitesse du chariot. $\sin(\alpha)$ permet de prendre en compte l'évolution de la surface de contact en fonction du déplacement et donc la nature anisotrope du frottement. F_0 et μ_{app} jouent le même rôle, l'avantage de cette paramétrisation réside dans le fait d'avoir un coefficient de frottement et non un facteur d'échelle. Enfin, γ permet de prendre en compte l'évolution de la force normale en fonction de la compaction des mèches. En effet, lorsque l'effort normal augmente les mèches sont plus compactées ce qui augmente leur surface de frottement mutuelle. Avec ce modèle, il est possible de revenir à un modèle de Coulomb anisotrope en prenant $\gamma = 1$. Enfin, ce modèle n'est pas adapté au frottement longitudinal (cas où α vaut 0).

Cône de frottement

En formulation ALE, la position des efforts par rapport au cône de frottement est réalisée grâce à un système patin/ressort permettant de savoir si les mèches adhèrent ou glissent entre elles. Le lecteur peut se référer à [17, 11] pour plus de détails. La condition d'adhérence s'écrit :

$$|k_f(u_s - u_s^{c\hat{o}ne})| < F_t \quad (\text{Eq. 6})$$

où k_f est la rigidité du ressort modélisant le contact entre les deux mèches et $u_s^{c\hat{o}ne}$ est l'abscisse curviligne du centre du cône de frottement qui est mise jour au cours du calcul. t_f est le temps caractéristique de l'amortissement linéaire qui permet d'amortir des oscillations dues à la résolution

explicite du système. La force de frottement F_f relative au degré de liberté en glissement est calculée ainsi :

$$F_f = \begin{cases} -k_f((u_s - u_s^{\text{cône}}) + t_f v_s), & \text{Si adhérence} \\ -(sign(v_s)F_t + k_f t_f v_s), & \text{Si glissement} \end{cases} \quad (\text{Eq. 7})$$

2.3. Modèle d'Eléments Finis

La simulation se décompose en trois étapes :

1. La première consiste à prétendre la mèche horizontale . Pour cela, les frottements sont désactivés, tandis que les déplacements spatiaux des points d'accroche du chariot (nœuds 1 et 3) sont maintenus fixes (le nœud 3 devient donc momentanément Eulérien).
2. La deuxième consiste à prétendre la mèche verticale. Les frottements sont toujours désactivés, et les déplacements spatiaux des points d'accroche du chariot sont maintenus fixes. Un effort vertical est cette fois ci progressivement appliqué au nœud 7.
3. La troisième étape correspond à la mise en mouvement du chariot (cf Figure 3b)). Les frottements sont alors activés. Un déplacement horizontal est appliqué identiquement aux nœuds 1 et 3 selon une vitesse constante pour simuler le déplacement du chariot.

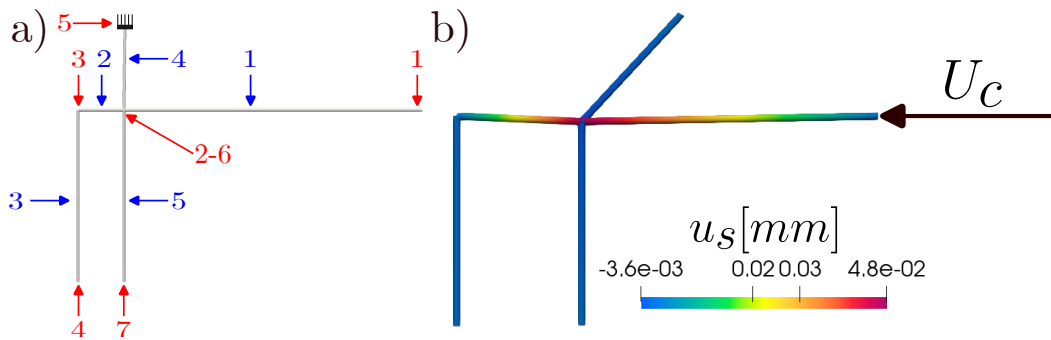


FIG. 3. a) Schéma du modèle éléments finis (nœuds en rouge / éléments en bleu, b) Simulation à l'issue de l'étape 3 : déplacement du chariot U_c

D'après la Figure 3 b), on observe comme attendu un glissement à travers les nœuds 2 (qui représente un des deux points de contact inter-mèches) et 3 sous l'effet de la tension de la mèche horizontale. De même, on observe un flux de matière à travers les nœud 6 qui est le second point de contact inter-mèches. À la fin de la simulation, on constate un flux de matière à travers ce même noeud (et de façon moindre à travers le nœud 2), ce qui signifie que le contact inter-mèches est bien entré dans le régime de glissement correspondant à surface du cône de frottement.

3. Résultats et analyse

3.1. Influence de l'angle de la mèche verticale

Afin de vérifier que le modèle numérique et les expériences suivent la tendance décrite par Howell, trois configurations d'essais avec différents angles β sont réalisées (voir Figure 4 a)). Il apparaît alors que les résultats d'essais sont répétables même si aucune tendance ne se dégage. À l'inverse, les résultats numériques suivent le modèle d'Howell, en diminuant H et en augmentant donc β la mèche verticale se met à glisser de plus en plus tard.

3.2. Influence de la tension de la mèche verticale

Sur la Figure 4 b), l'influence de la tension verticale T_v est étudiée. La tension souhaitée est appliquée à l'aide d'une masse variable m_v , attachée à la mèche verticale. La mèche verticale commence à glisser pour une valeur de déplacement du chariot plus faible en augmentant T_v . Néanmoins, plus T_v est élevée plus la vitesse de glissement est faible. Ce qui fait que les courbes ont une pente après glissement plus importante lorsque T_v augmente. Cette différence de pente fait que les enveloppes se rapprochent lorsque le chariot atteint un déplacement de plus de 100 mm. Cette tendance est d'autant plus marquée sur les courbes numériques avec 5g et 10g qui tendent à se croiser.

3.3. Influence de la vitesse

Sur la Figure 4 c), l'influence de la vitesse du chariot V_c sur le déplacement du point d'intersection est affichée. Il apparaît que le glissement commence pour un déplacement du chariot plus faible lorsque V_c augmente. Les courbes ayant la plus grande et la plus petite vitesse sont monotones alors que la courbe avec $V_c = 40 \text{ mm.s}^{-1}$ a une phase de forte croissance puis de décroissance due à l'évolution du cône de frottement au cours de l'essai. Les essais sont répétables pour toutes les valeurs de V_c étudiées. Le modèle arrive à reproduire correctement les courbes monotones mais pas les instabilités de la courbe avec $V_c = 40 \text{ mm.s}^{-1}$. Cependant, le début du glissement et la plage de la courbe pour un déplacement du chariot de plus de 100 mm sont correctement représentés par le modèle lorsque $V_c = 40 \text{ mm.s}^{-1}$.

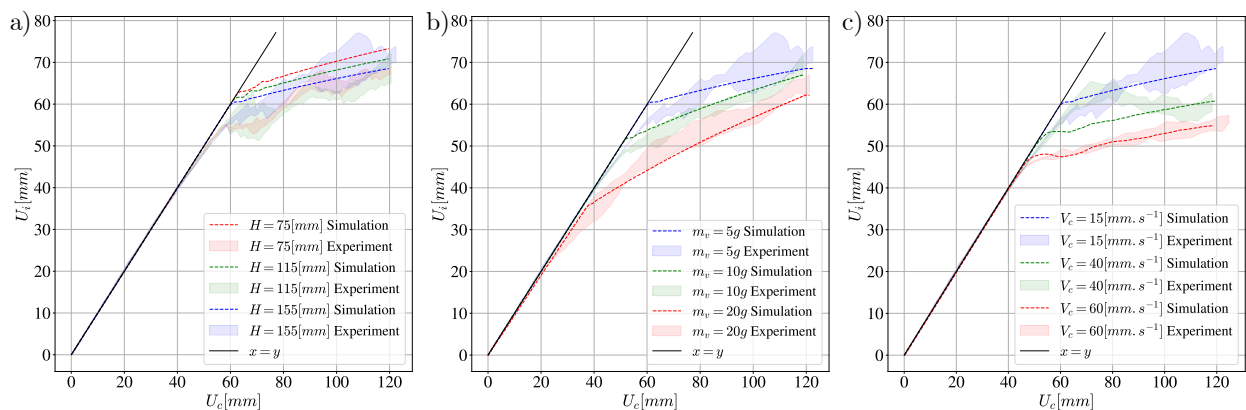


FIG. 4. Déplacement du point d'intersection en fonction du déplacement du chariot : a) influence de la distance H , b) influence de la masse verticale m_v , c) influence de la vitesse du chariot V_c

4. Conclusion

Dans cette étude, une loi de frottement a ainsi été développée. Elle permet de prendre en compte, les effets de la prétension des mèches, la vitesse du chariot et l'anisotropie du frottement. En parallèle, des expériences ont été réalisées pour caractériser les paramètres de la loi de frottement permettant de recalibrer les courbes numériques sur les courbes expérimentales. Les principaux résultats de cette étude sont :

- Une banc de frottement sans capteur de force et simple d'utilisation a été développé ainsi qu'un modèle d'Eléments Finis associé basé sur une formulation ALE.
- Le glissement a lieu plus tôt en augmentant la tension de la mèche verticale T_v mais la vitesse de glissement v_s diminue avec l'augmentation de T_v .
- Le coefficient de frottement apparent μ_{app} diminue avec la vitesse du chariot V_c .

Remerciements

Ce travail est financé par l'ANRT et le groupe SAFRAN

Références

- [1] P. Wambua, R. Anandjiwala « A review of preforms for the composites industry », *Journal of industrial textiles* Vol. 40 n° 4, pp. 310–333, 2011.
- [2] N. M. Aly « A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability », in : IOP conference series : materials science and engineering, vol. 254, IOP Publishing, , pp. 042002, 2017.
- [3] C. L. Tucker III, E. Liang « Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites : Review and evaluation », *Composites science and technology* Vol. 59 n° 5, pp. 655–671, 1999.
- [4] C. Santiuste, X. Soldani, M. H. Miguélez « Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components », *Composite structures* Vol. 92 n° 3, pp. 691–698, 2010.
- [5] O. Rajapov, S. Fayzullaev, S. Makhkamova « Transportation of chemical fibers and investigation of the process of chemical fiber carding in the unit of the licker-in carding machine », *Transportation Research Procedia* Vol. 63, pp. 2796–2802, 2022.
- [6] Z. Yang, Y. Jiao, J. Xie, L. Chen, W. Jiao, X. Li, M. Zhu « Modeling of 3D woven fibre structures by numerical simulation of the weaving process », *Composites Science and Technology* Vol. 206, pp. 108679, 2021.
- [7] S. Sha, A. Geng, Y. Gao, B. Li, X. Jiang, H. Tao, L. Luo, X. Yuan, H. Ke, X. Hu, et al. « Review on the 3-D simulation for weft knitted fabric », *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* Vol. 16, pp. 15589250211012527, 2021.
- [8] K. Bilisik « Three-dimensional braiding for composites : A review », *Textile research journal* Vol. 83 n° 13, pp. 1414–1436, 2013.
- [9] X. Chen, L. Chen, C. Zhang, L. Song, D. Zhang « Three-dimensional needle-punching for composites—A review », *Composites Part A : Applied science and manufacturing* Vol. 85, pp. 12–30, 2016.
- [10] H. G. Howell « 27—Inter-Fibre Friction », *Journal of the Textile Institute Transactions* Vol. 42 n° 12, pp. T521–T533, 1951.
- [11] J. Simon, N. Hamila, S. Comas-Cardona, C. Binetruy « A yarn-scale woven fabric model including significant slippage formulated within the Arbitrary Lagrangian Eulerian framework », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 420, pp. 116741, 2024.
- [12] Y. Peng, Y. Wei, M. Zhou « Efficient modeling of cable-pulley system with friction based on arbitrary-Lagrangian-Eulerian approach », *Applied Mathematics and Mechanics* Vol. 38 n° 12, pp. 1785–1802, 2017.
- [13] X. Du, J. Du, H. Bao, X. Chen, G. Sun, X. Wu « Dynamic analysis of the deployment for mesh reflector antennas driven with variable length cables », *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* Vol. 14 n° 11, pp. 111006, 2019.
- [14] B. Zhou, M. Accorsi, J. Leonard « Finite element formulation for modeling sliding cable elements », *Computers & Structures* Vol. 82 n° 2-3, pp. 271–280, 2004.
- [15] J. Simon « Numerical simulation and experimental investigation of the forming of tailored fibre placement preforms : a mixed embedded-ALE finite element formulation », Ph.D. thesis, École centrale de Nantes, 2022.
- [16] A. Vu, W. Groupe, M. de Rooij, R. Akkerman « A mesoscopic model for inter-yarn friction », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 180, pp. 108070, 2024.
- [17] G. Cirio, J. Lopez-Moreno, D. Miraut, M. A. Otaduy « Yarn-level simulation of woven cloth », *ACM Transactions on Graphics (TOG)* Vol. 33 n° 6, pp. 1–11, 2014.