



HAL
open science

Un modèle analytique de friction pour les mèches de fibres placées par Tailored Fibre Placement

Jessy Simon, Sébastien Comas-Cardona, Christophe Binetruy, Nahiene Hamila, Benjamin Masseteau

► **To cite this version:**

Jessy Simon, Sébastien Comas-Cardona, Christophe Binetruy, Nahiene Hamila, Benjamin Masseteau. Un modèle analytique de friction pour les mèches de fibres placées par Tailored Fibre Placement. JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606816

HAL Id: hal-04606816

<https://hal.science/hal-04606816>

Submitted on 10 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un modèle analytique de friction pour les mèches de fibres placées par Tailored Fibre Placement

An analytical friction model for the fibre tows deposited by Tailored Fibre Placement

Jessy Simon¹, Sébastien Comas-Cardona², Christophe Binétruy², Nahiene Hamila¹ et Benjamin Masseteau³

1 : IRDL, UMR CNRS 6027
ENI Brest
945 Av. du Technopôle, F-29200 Brest
e-mail : jessy.simon@enib.fr

2 : GeM, UMR CNRS 3183
Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes
1 rue de la Noë, F-44300 Nantes
e-mail : sebastien.comas@ec-nantes.fr

3 : IRT Jules Verne
Nantes Université
F-44000 Nantes

Résumé

La technologie Tailored Fibre Placement (TFP) peut être utilisée pour renforcer localement un renfort fibreux classique comme un tissé. Néanmoins, l'ajout d'une direction de fibre supplémentaire peut nuire à la formabilité de la préforme. Pour contrer cet effet négatif, permettre aux mèches TFP de glisser sur le matériau support est une option intéressante [1]. Pour ce faire la prédiction de l'effort de frottements s'opposant au glissement des mèches est nécessaire. Ainsi, ce travail propose une méthode d'identification des interactions de frottements des mèches TFP avec le matériau support et le fil de couture basée sur des essais d'extraction de mèches (pullout). Une étude paramétrique est menée pour mettre en évidence l'influence des paramètres de couture et un modèle analytique est proposée. Finalement, une régression linéaire permet d'exprimer les paramètres du modèle en fonction des paramètres de la couture.

Abstract

The Tailored Fibre Placement technologie (TFP) can be used to locally reinforce another conventional textile such as woven fabrics. However, the formability of the resulting preform can be negatively affected by the presence of an additional strong material direction preventing in-plane shear for instance. Allowing the fibre tows to slip over the backing material is a possible option [1] to reduce or even remove this effect. The prediction of the force required to make the fibre tows slip is necessary. In this sense, this work proposes an identification method of the friction interactions between the fibre tows and the other constituents (backing material and stitching yarn) based on pullout experiments. A parametric study is carried out to highlight the influence of the stitching parameters and an analytical model is developed. Finally, a linear regression is achieved to express the model's parameters as function of the stitching parameters.

Mots Clés : Tailored Fibre Placement, Pullout, Experimental, Modèle analytique

Keywords : Tailored Fibre Placement, Pullout, Experimental, Analytical model

1. Introduction

La technologie de placement de fibres Tailored Fibre Placement illustrée dans la figure Fig.1 (a) permet de produire de manière additive un renfort fibreux dans lequel la trajectoire des fibres est curviligne. Avec cette méthode, une préforme peut-être fabriquée dans son intégralité avant d'être mise en forme. Simon et al. [2] ont démontré la possibilité de mettre en forme des préformes TFP sur des géométries

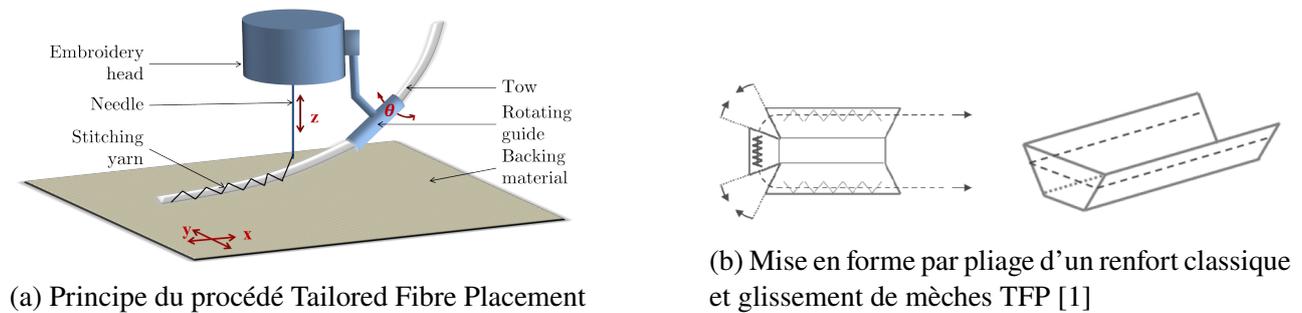


FIG. 1. – Procédé TFP utilisé et exemple de mise en forme avec renfort local glissant

à double courbure dont le design initial permet d'obtenir des propriétés finales orthotropes. Dans ces travaux, un modèle éléments finis a été développé et validé pour le formage de préformes TFP dont le matériau support a été enlevé avant mise en forme.

Si cette technologie permet de fabriquer une préforme, elle peut aussi servir à renforcer localement un renfort fibreux classique comme un renfort tissé. L'ajout de fibres pour renforcer localement une préforme autour d'une discontinuité géométrique comme un trou est possible et permet de supprimer les concentrations de contraintes [3]. Cependant, lors de la mise en forme de renforts classiques sur des géométries complexes, un cisaillement plan, se traduisant par un changement d'angle entre les réseaux de fibres, est nécessaire. Ce mode de déformation est lié à l'inextensibilité des fibres réparties selon une ou plusieurs directions dans un renfort classique. Ainsi, l'ajout d'un renfort local, ou autrement dit, l'ajout d'une direction de fibre supplémentaire, peut modifier la formabilité initial du renfort classique et entraîner des défauts dans la pièce finale. Pour pallier à ce problème de formabilité généré par l'ajout de directions de fibre, Fial et al. [1] ont étudié la possibilité de permettre aux mèches ajoutées par TFP de glisser sur le renfort classique le long de la trajectoire imposée par la couture. Dans cette étude, un accoudoir a été mise en forme en combinant le pliage du matériau support et le glissement des mèches de renfort venant refermer les parties coupées du renfort classique (Fig.1 (b)). Ils ont utilisé des travaux précédents basés sur des essais de pull-out pour déterminer les paramètres de couture permettant aux mèches TFP de glisser. Cependant, les résultats publiés de ces mesures ne sont pas exploitables et aucun modèle analytique n'a été proposé pour prédire la force de frottement s'opposant au glissement des mèches dans la couture.

Afin de faire de cette mobilité relative, entre le matériau support et les mèches de fibres, un degré de liberté supplémentaire pour le design ce type de préformes, une étude approfondie des interactions des mèches de fibres avec le matériau support et le fil de couture lors du glissement est nécessaire. Dans ce sens, le travail présenté ici propose une méthode pour mesurer les efforts de friction sur les mèches dans une préforme TFP. Cette méthode s'appuie sur le principe du pull-out dans lequel plusieurs mèches parallèles entre-elles sont extraites simultanément d'une préforme composée d'une seule couche. Une étude paramétrique est menée pour déterminer l'influence des paramètres de production, à savoir, ceux de la couture, sur l'effort de friction. Pour cela, un modèle analytique est proposé et ses paramètres sont identifiés à l'aide d'une procédure automatique pour chaque design du plan d'expérience. Ensuite, une régression linéaire permet de trouver une expression des paramètres du modèle analytique en fonction des paramètres de couture. Finalement, l'effet des paramètres de couture sur les paramètres du modèle est discuté et des hypothèses formulées par observation des premières mesures sont validées.

2. Méthode de caractérisation des efforts de frottements dans une préforme TFP

L'objectif de cette étude expérimentale est de mesurer l'effort de frottement s'opposant au glissement des mèches en contact avec le matériaux support et contraintes de se déplacer dans le chemin prescrit par la couture. Les paramètres de couture représentés dans la figure Fig.2 sont susceptibles d'avoir une influence sur cet effort et sont donc étudiés. La méthode de pullout a été largement utilisée pour étudier

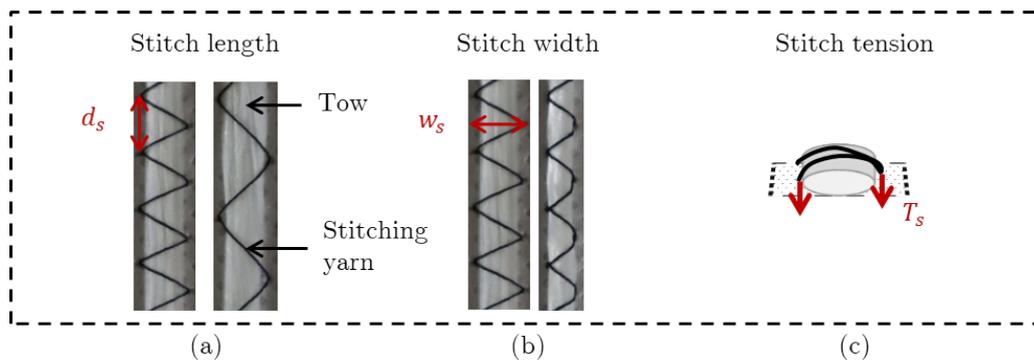
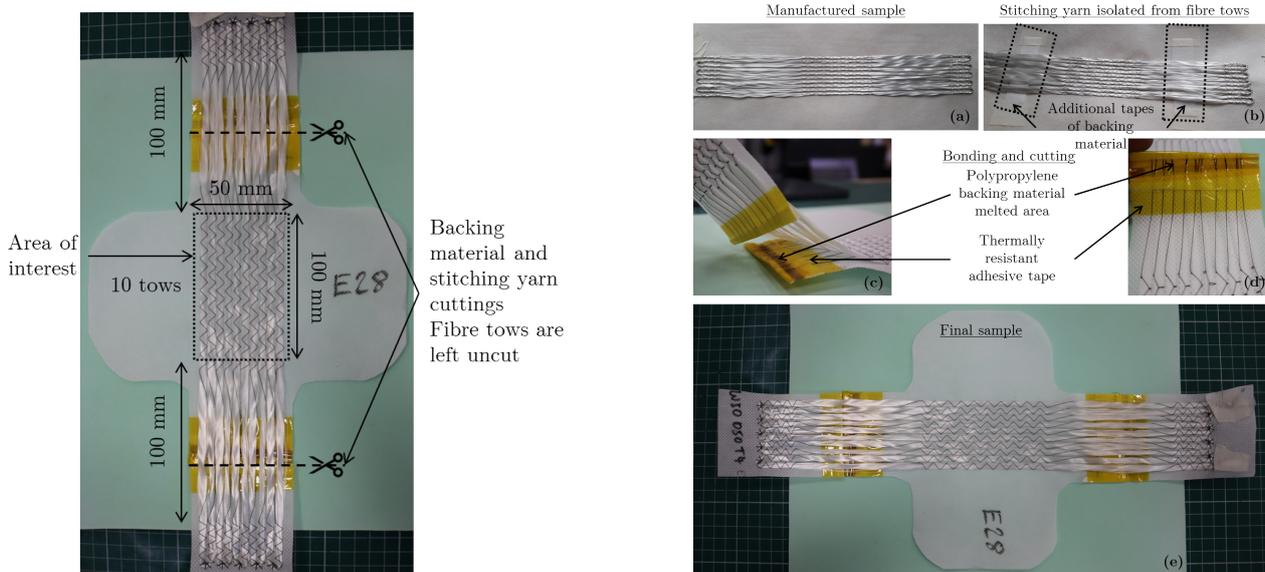


FIG. 2. – Paramètres de couture du procédé TFP : Longueur (gauche), largeur (milieu) du point de couture et tension du fil (droite)



(a) Configuration de l'éprouvette : dix mèches droites placées en parallèle avec un espace latéral suffisant pour éviter le surpiquage et une longueur d'étude par mèche de 100 mm.

(b) Procédure de découpage du support et du fil de couture : dix mèches droites placées en parallèle avec un espace latéral suffisant pour éviter le surpiquage. Longueur d'étude par mèche de 100 mm.

FIG. 3. – Configuration (a) et préparation de l'éprouvette (b)

les interactions liées au frottements entre les fibres, notamment dans les renforts tissés [4]. L'extraction d'une ou plusieurs mèches est possible et la forme de la courbe force-déplacement obtenue dépend des conditions limites, notamment du maintien des mèches transverses dans le cas des renforts tissés. Dans notre cas, il s'agit de faire glisser une (ou plusieurs) mèche sur un matériaux support. Bien que la nature du support utilisé peut affecter le résultat en fonction de son état de surface, un support non-tissé en polypropylène est utilisé. Une éprouvette est montrée dans la figure Fig.3 (a). Le support est fixé dans un cadre. Dix mèches parallèles entre elles et suffisamment espacées pour éviter le surpiquage sont extraites simultanément. Extraire plusieurs mèches permet d'obtenir un effort suffisant pour être mesuré précisément avec une cellule de 1 kN. Combiné avec une longueur utile de 100 mm par mèche, l'utilisation de plusieurs mèches permet d'obtenir une longueur d'étude suffisamment importante pour moyenner les effets liées aux variations introduites par le procédé TFP lors de la dépose des mèches, par la préparation des éprouvettes ou par la géométrie même de la mèche continue.

Puisque les mèches sont initialement maintenues sur le support, ce dernier, ainsi que la couture doivent être coupés en dehors de la zone d'étude afin que les mèches puissent être extraites. Afin d'éviter une

perte de tension dans la fil de couture en découpant le support, de l'adhésif a été appliqué avant de faire fondre une partie du film polymère (Fig. 3 (b)) pour garantir le maintien du fil de couture. Une étude paramétrique est réalisée afin d'analyser l'effet des paramètres de couture sur l'effort de frottement. Le plan d'expérience associée est donnée dans le tableau suivant (Tab.1). Deux valeurs sont utilisées pour chacun des trois paramètres donnant un total de 8 configurations possibles. Pour chaque configuration une image à la même échelle de la couture est donnée permettant de visualiser l'effet des paramètres de couture sur la géométrie de la mèche. Trois répétitions par configuration sont effectués avec une vitesse de 10 mm/min. Les différentes courbes force-déplacement obtenues sont présentées dans la figure Fig. 4 et commentées dans la section suivante.

TAB. 1. – Configurations de l'étude paramétrique

Design	w_s	d_s	T_s	Samples' id			Stitching pattern
				1	2	3	
1	5.0	5.0	4	3	27	28	
2	2.5	5.0	4	4	25	26	
3	5.0	5.0	6	6	19	21	
4	5.0	2.5	6	7	17	18	
5	2.5	2.5	6	8	15	16	
6	2.5	2.5	4	9	13	14	
7	5.0	2.5	4	10	11	12	
8	2.5	5.0	6	22	23	24	

3. Analyse des résultats et élaboration du modèle analytique de frottements

Quelque soit la configuration, les résultats montrés dans la figure Fig. 4 témoignent d'une bonne répétabilité des essais. Seules les courbes des éprouvettes 9 et 16 ne sont pas exploitables. En fait, après observation de ces deux éprouvettes, un à deux points de couture étaient présents au sein d'une des mèches. Une étude préliminaire avait permis de montré que le surpiquage ne permettait pas un glissement suffisamment important des mèches et empêchait l'analyse des résultats.

On observe une bonne répétabilité de la forme de la courbe au sein de chaque configuration avec peu d'écart en terme d'amplitude. On peut décomposer chaque courbe en une partie statique correspondant à la mise en tension des mèches et une partie dynamique correspondant au glissement effectif (Fig.5). En fonction de la configuration, on peut observer deux oscillations de périodes respectives T_1 et T_2 dont l'une est amortie. La deuxième oscillation de période plus grande est moins visible sur les configurations ayant la grande valeur de longueur de point de couture. Une observation qualitative permet de faire l'hypothèse que la période de la petite amplitude amortie (T_1) est égale à deux fois la longueur du point de couture. Cette hypothèse sera confirmé par la suite.

Un des objectifs de ce travail est de proposer un modèle analytique permettant de représenter le

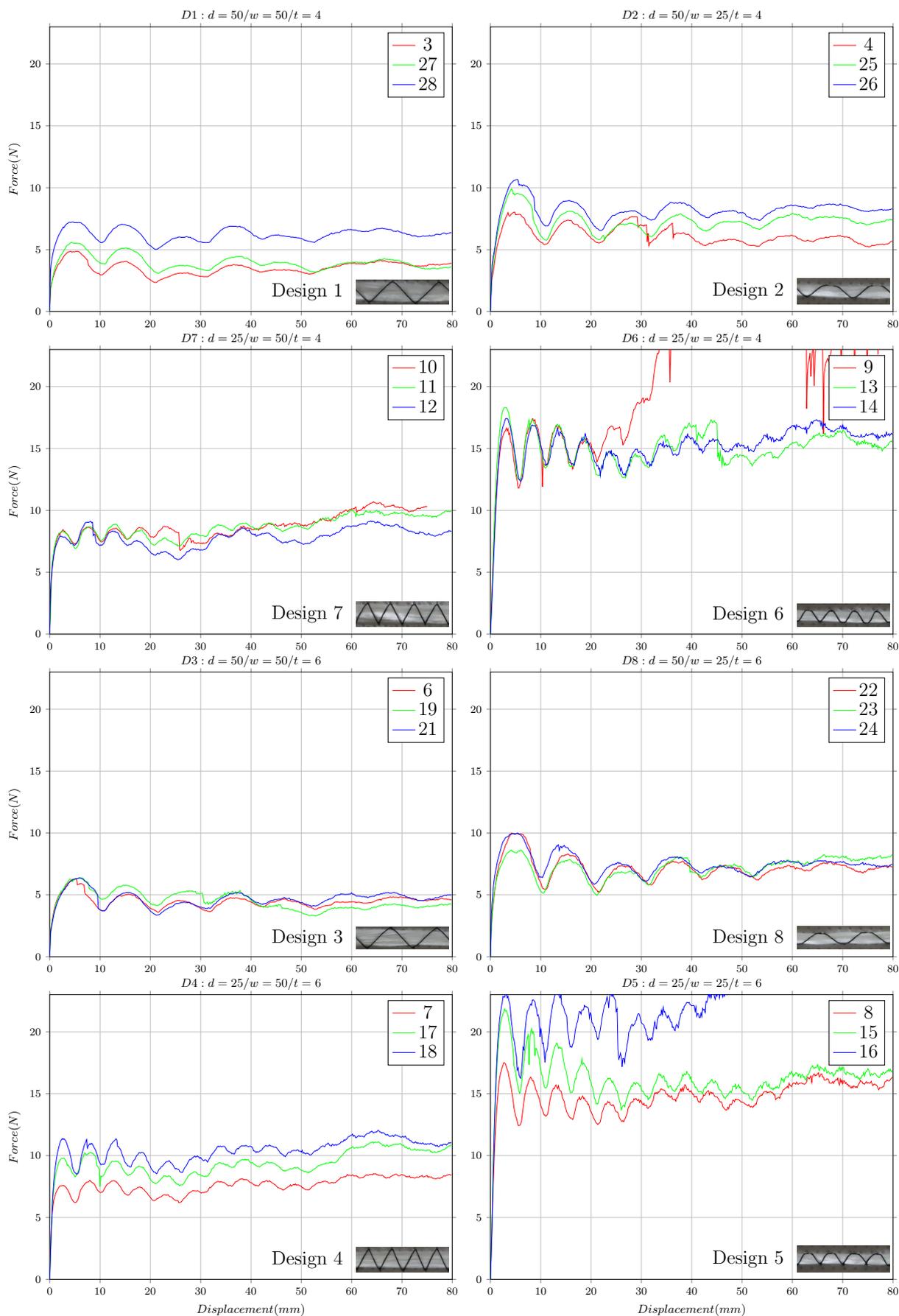


FIG. 4. – Courbes force-déplacement avec répétition pour les 8 configurations du tableau Tab. 1

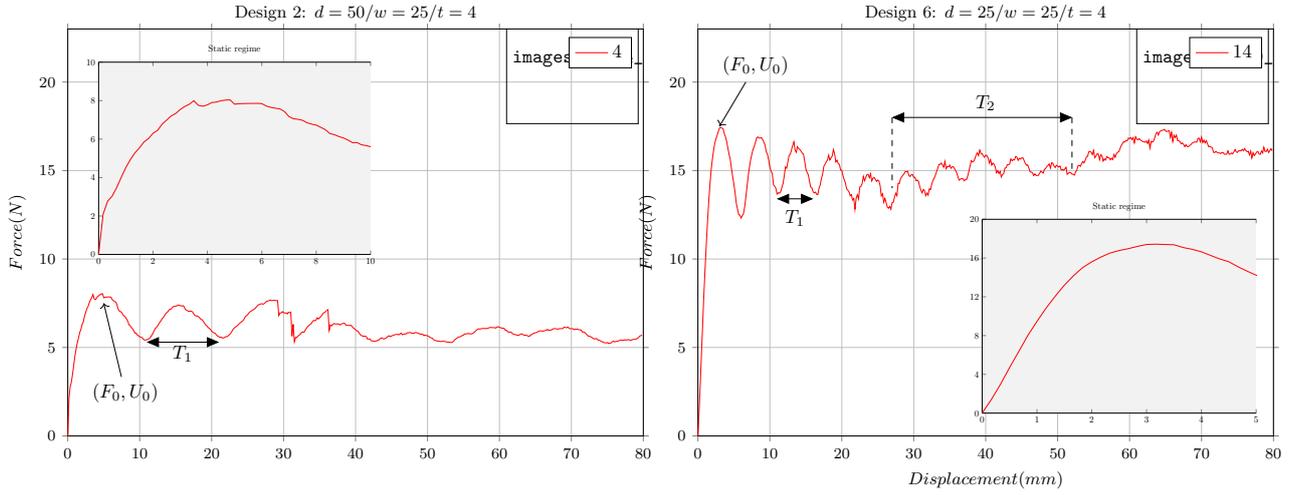


FIG. 5. – Mise en évidence des oscillations pour deux configurations

comportement observé. Le modèle suivant prenant en compte les deux oscillations a été élaboré :

$$\begin{aligned}
 F_{dynamic}(u) = & \underbrace{A_1 d(u) \cos(2\pi f_1(u - U_0))}_{\text{Première oscillation (amortie)}} \\
 & + \underbrace{A_2 \cos(2\pi f_2 u + \phi_2)}_{\text{Deuxième oscillation}} \\
 & + \underbrace{A_0}_{\text{valeur moyenne}}
 \end{aligned} \tag{Eq. 1}$$

avec :

- $F_{dynamic}(u)$ est la force de frottement (en N) en fonction du déplacement u (en mm) pour la partie dynamique
- A_1 est l'amplitude associée à la première oscillation (en N)
- $d(u)$ est une fonction représentant l'amortissement associée à la première oscillation
- f_1 est la fréquence associée à la période T_1 (en mm^{-1})
- U_0 est le déplacement où commence la partie dynamique (en mm)
- A_2 est l'amplitude de la deuxième oscillation (en N)
- f_2 est la fréquence associée à la période T_2 (en mm^{-1})
- ϕ_2 est la phase associée à la deuxième oscillation (en radian)
- A_0 est la valeur moyenne de la force (en N)

Les paramètres de ce modèle analytique ont été identifiés pour chaque répétition de chaque configuration. Pour cela, une procédure automatique d'identification a été mise en place. Elle se compose d'une analyse fréquentielle permettant d'extraire les deux fréquences f_1 et f_2 . L'extraction des minima et maxima locaux permet de tracer deux enveloppes dont la différence donne l'évolution de l'amplitude de l'oscillation amortie :

$$d(u) = \exp\left(-\sqrt{\frac{u}{c}}\right) \tag{Eq. 2}$$

avec c un paramètre traduisant la rapidité de l'amortissement. Afin d'obtenir les paramètres restants, un algorithme d'optimisation est utilisé pour minimiser l'écart entre le modèle et la mesure. Les résultats obtenus et affichés dans la figure Fig. 6 montrent une très bonne corrélation entre les données mesurées et le modèle proposé.

4. Identification des paramètres du modèle en fonction des paramètres de couture

Le tableau Tab. 2 donne les valeurs des paramètres du modèle pour chaque configuration. Puisque deux valeurs ont été utilisées pour chaque paramètre de couture, une régression linéaire a été effectuée pour identifier l'expression des paramètres du modèle en fonction des paramètres de couture. Le tableau Tab. 3 donne la valeur des coefficients pour chaque paramètre du modèle. L'absence de terme en lien avec le paramètre de tension T_s montre que l'influence de la tension du fil de couture n'a pas pu être identifiée. Cela peut s'expliquer par un écart trop faible entre les deux valeurs de tension choisies qui n'a pas permis d'obtenir une variation significative supérieure aux variations de l'étude expérimentale. Les coefficients de corrélation de A_1 , A_0 , U_0 , F_0 et f_1 sont très satisfaisants. En particulier, on peut voir que la période T_1 associée à f_1 vaut exactement le double de d_s . En termes d'influence, la longueur et la largeur du point de couture ont une influence similaire sur la valeur moyenne A_0 de la force de frottements ainsi que sur la valeur maximale F_0 . Alors que la fréquence de la première oscillation f_1 ne dépend que de la longueur du point de couture, son amplitude et le facteur d'amortissement ne dépendent que de la largeur. Concernant l'amortissement observée, il peut être associé à la plasticité de la section de la mèche. En effet, le chemin créé par la couture contraint la géométrie de la mèche et déforme la mèche dans le plan et hors plan [5]. Par conséquent, au fur et à mesure que la mèche glisse, le réarrangement des fibres s'opère et nécessite de moins en moins d'effort. La deuxième oscillation a été attribuée à la géométrie même de la mèche qui présente une ondulation régulière.

TAB. 2. – Valeurs des paramètres du modèle pour chaque configuration

Model parameters	A_1 (N)	c (mm)	f_1 (mm ⁻¹)	A_2 (N)	f_2 (mm ⁻¹)	ϕ_2 (radian)	A_0 (N)	U_0 (mm)	F_0 (N)
1	2.406	9.818	0.096	0.432	0.037	3.630	5.268	5.288	6.487
2	5.098	6.714	0.095	0.378	0.036	4.118	7.718	5.926	9.954
3	2.740	8.972	0.096	0.369	0.036	4.110	4.509	5.880	5.970
4	2.457	7.724	0.194	0.642	0.036	4.165	8.910	2.760	10.307
5	5.252	6.707	0.196	0.734	0.033	4.579	15.258	3.211	18.245
6	5.331	7.212	0.195	0.818	0.036	3.755	14.507	3.386	17.028
7	1.694	8.083	0.195	0.569	0.038	3.825	7.350	2.530	8.154
8	5.687	6.544	0.096	0.422	0.035	4.453	7.140	5.259	9.682

TAB. 3. – Coefficients de la régression linéaire des paramètres du modèle en fonction des paramètres de couture

	A_1	c	f_1	A_2	A_0	U_0	F_0
Intercept	8.36	4.94	0.294	0.977	33.29	0.355	38.15
d_s	-	-	-0.0039	-0.0114	-0.466	0.105	-0.501
w_s	-0.121	0.0752	-	-	-0.438	-	-0.524
$d_s \times w_s$	-	-	-	-	0.00674	-	0.00769
R	0.95	0.65	1	0.74	0.98	0.96	0.97
R^2	0.90	0.42	1	0.55	0.95	0.93	0.95

5. Conclusion

Cette étude expérimentale a été réalisée afin de caractériser les interactions des mèches de fibres avec le matériaux support et le fil de couture dans une préforme TFP. Une étude paramétrique basée sur des essais de pullout a permis de mettre en évidence et de quantifier l'influence des paramètres de couture sur la force s'opposant au glissement des mèches. Pour cela, un modèle analytique a été proposé et permet de représenter fidèlement les données mesurées. Une régression linéaire a ensuite été réalisée pour exprimer les paramètres du modèle en fonction de ceux de la couture.

Les résultats obtenus sont cohérents et prometteurs néanmoins l'influence de la tension du fil de

couture n'a finalement pas pu être quantifiée. L'étude de l'influence de la courbure de la mèche ou de la déformation du matériau support (cisaillement pour un renfort tissé par exemple) seraient des pistes de travail intéressantes.

Références

- [1] J. Fial, M. Harr, P. Böhrer, P. Middendorf « Automated wet compression moulding of load-path optimised TFP preforms with low cycle times », *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* Vol. 406, pp. 012018, 2018, ISSN 1757-899X.
- [2] J. Simon, N. Hamila, C. Binetruy, S. Comas-Cardona, B. Masseteau « Design and numerical modelling strategy to form Tailored Fibre Placement preforms : Application to the tetrahedral part with orthotropic final configuration », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 158, pp. 106952, 2022, ISSN 1359835X.
- [3] J. H. S. Almeida, L. Bittrich, A. Spickenheuer « Improving the open-hole tension characteristics with variable-axial composite laminates : Optimization, progressive damage modeling and experimental observations », *Composites Science and Technology* Vol. 185, pp. 107889, 2020, ISSN 02663538.
- [4] Y. Zhou, M. Ali, X. Gong, D. Yang « An overview of yarn pull-out behavior of woven fabrics », *Textile Research Journal* Vol. 89 n° 2, pp. 223–234, 2019, ISSN 0040-5175, 1746-7748.
- [5] K. Uhlig, M. Tosch, L. Bittrich, A. Leipprand, S. Dey, A. Spickenheuer, G. Heinrich « Meso-scaled finite element analysis of fiber reinforced plastics made by Tailored Fiber Placement », *Composite Structures* Vol. 143, pp. 53–62, 2016, ISSN 02638223.

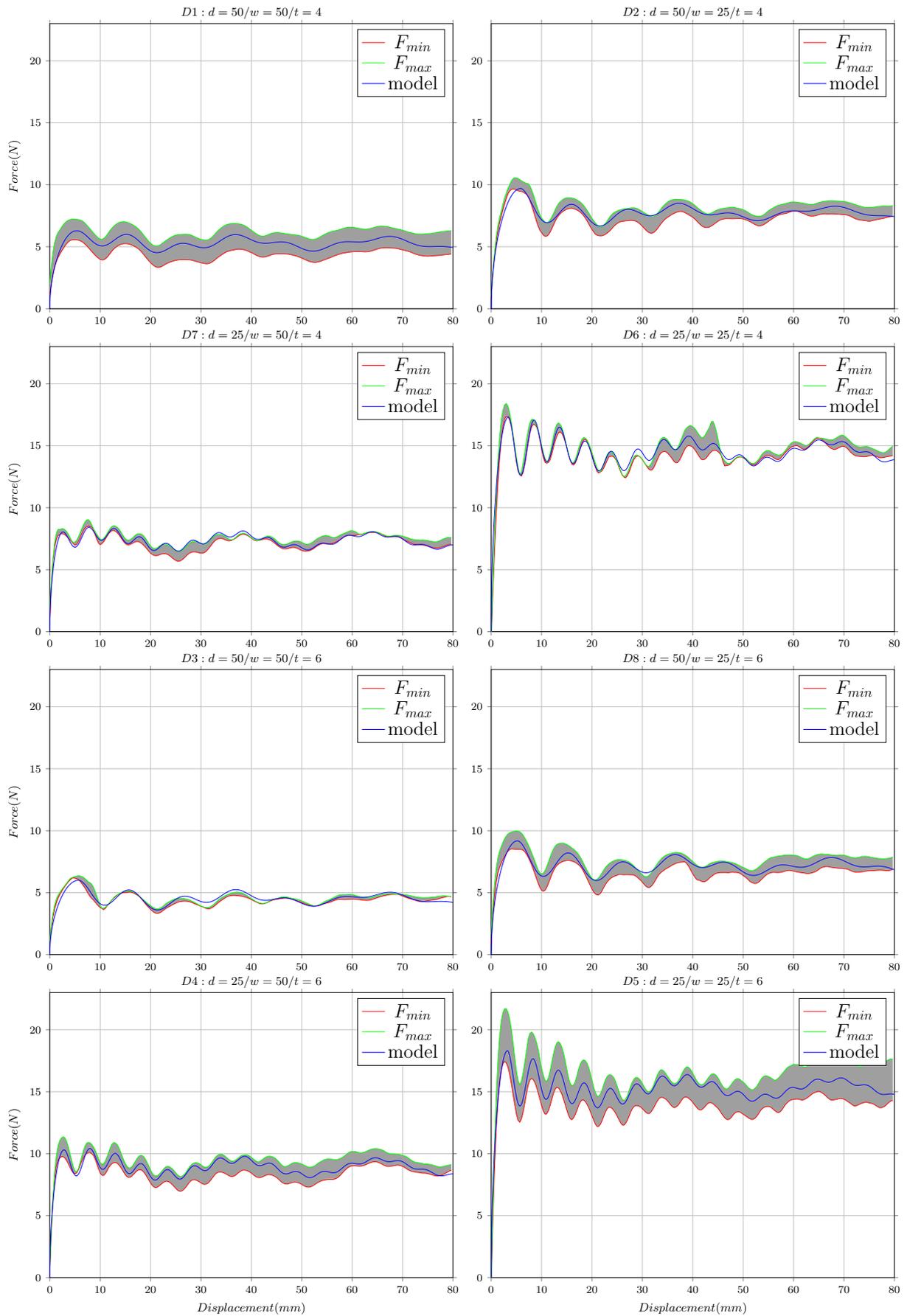


FIG. 6. – Modèle analytique identifié pour chaque configuration. L'intervalle grisé correspond aux valeurs minimales et maximales des données mesurées