

Etude expérimentale du comportement mécanique de mèches sous sollicitations multiaxiales.

Experimental investigation on tow mechanical behaviour under multiaxial loads.

Julien Valette^{1,2}, Alexandre Guilloux¹, Arnaud Gillet²

1 : Société TENSYL
48, rue Jacques de Vaucanson, Pôle Arts et Métiers,
17180 PERIGNY
e-mail : {alexandre.guilloux, julien.valette }@tensyl.com

2 : Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) UMR CNRS 5295
Département MPI, Université de Bordeaux
15, rue Naudet CS 10297 33175 GRADIGNAN Cedex
e-mail : arnaud.gillet@u-bordeaux.fr

Résumé

Les procédés de mise en œuvre de type pultrusion ou enroulement filamentaire permettent d'obtenir des structures avec une très bonne répétabilité. Ils offrent l'avantage d'un haut degré d'automatisation, des temps de mise en œuvre courts et permettent de réaliser des pièces présentant un taux de renfort élevé. Le choix optimal des conditions opératoires (vitesse, tension, température, ...) implique une capacité à décrire finement les phénomènes physiques mis en jeu. La particularité de ces procédés est de solliciter en traction les mèches de manière continue toute en appliquant des sollicitations transverses à certaines étapes du procédé : compression dans le convergent d'un outillage de pultrusion, écrasement sur le mandrin dans le cas de l'enroulement.

Dans le but de caractériser le comportement des mèches dans des conditions de mise en œuvre, un moyen d'essai prototype a été conçu pour caractériser le comportement en compression de mèches textiles soumises à un niveau de tension contrôlé. Les premiers résultats, réalisés sur des mèches de carbone, sont présentés. L'analyse de ces essais est ensuite exploitée pour proposer des pistes d'amélioration du dispositif.

Abstract

Continuous processes such as pultrusion or filament winding allow manufacturing composite with very good repeatability. They offer the advantage of a high degree of automation, short manufacturing times and make it possible to produce parts with high fibre volume fraction.

The optimal choice of operating conditions (speed, yarn tension, temperature ...) requires being able to accurately describe the physical phenomena involved. The particularity of these processes is to continuously pull the yarns while simultaneously applying transverse loads during some steps of the process: compression in the convergent of pultrusion tooling, crushing on the mandrel in the case of filament winding.

In order to characterize the behaviour of the yarns under manufacturing conditions, a prototype test device has been designed to characterize the compression behaviour of yarns subjected to a controlled tension level. The first results, made on carbon yarns, are presented. The analysis of these preliminary tests is then exploited to propose ways to improve the device.

Mots Clés : Mèche, compression, fibres de carbone, déformations non élastiques

Keywords : Yarn, compaction, carbon fibres, Non-elastic deformations

1. Introduction

Les procédés de mise en œuvre de type pultrusion ou enroulement filamentaire sont des procédés industriels permettant d'obtenir des structures avec une très bonne répétabilité. Ils offrent l'avantage d'un haut degré d'automatisation, des temps de mise en œuvre courts et permettent de réaliser des pièces présentant un taux de renfort élevé. La qualité des pièces obtenues est pilotée par les

paramètres opératoires, dont la combinaison optimale peut être approchée grâce à des outils de simulation de procédés. Cela implique une compréhension fine des phénomènes physiques (thermiques, chimiques et mécaniques) mis en jeu lors de la mise en œuvre.

En particulier, il semble incontournable de disposer d'une loi de comportement de mèche dans les conditions de mise en œuvre. La particularité de ces procédés est de solliciter en traction les mèches de manière continue tout en appliquant des sollicitations transverses à certaines étapes du procédé : compression dans le convergent d'un outillage de pultrusion, écrasement sur le mandrin dans le cas de l'enroulement.

Les mèches sont constituées d'un très grand nombre de filaments (6000 à 50000). Par convention, on dénomme échelle mésoscopique l'échelle de la mèche, individuelle ou au sein d'une armature textile, et microscopique celle des filaments. La majorité des travaux expérimentaux se sont portés sur des comportements 1D, en traction longitudinale [1] ou en compression transverse [2] à l'échelle mésoscopique et, pour des raisons pratiques, souvent sur des renforts, i.e. mèches structurées dans une armature textile, avec un recalage à posteriori [3].

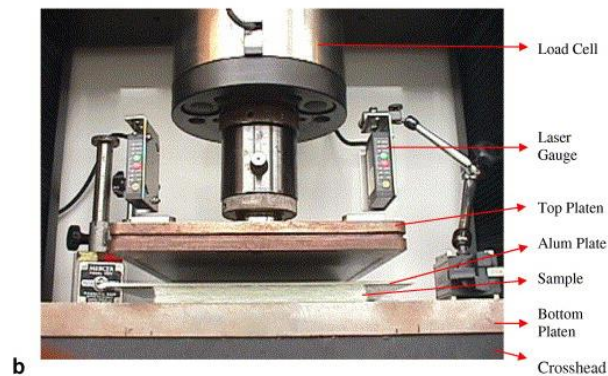


Fig 1. Dispositif de compression 1D (d'après [4])

Sur des essais de compression (fig. 1), Somashekar *et al.* [4] mettent en évidence des déformations permanentes et un comportement dépendant du temps.

Dharmalingam *et al.* [5] utilisent un système de mesure optique, par scanner chromatique confocal, permettant de mesurer la largeur et l'épaisseur de mèches de verre ou de carbone soumises à un effort de compression. Des mesures sur des morceaux de mèche de 50 mm de long pour des efforts de compression entre 2 et 150N montrent deux familles de comportements selon que la largeur de la mèche augmente peu ou beaucoup sous l'effort de compression.

Afin de comprendre le comportement mésoscopique d'un ensemble de fibres, Latil *et al.* [6] ont réalisé des essais de compression d'un assemblage artificiel de 69 fibres courtes de 11 mm de long, dans un micro-rhéomètre spécifique permettant d'appliquer des vitesses de déformation très faibles, $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et des mesures d'effort jusqu'à 500N. Pour un état de compaction donnée, l'arrangement tridimensionnel des fibres est obtenu en plaçant le dispositif dans un microtomographe. Après un conséquent travail de post-traitement permettant de décrire la position de chaque fibre et leurs contacts, une densification de l'assemblage de fibres sous l'effort de compaction est mise en évidence ainsi que la relation du comportement transverse de l'assemblage à la densité des contacts entre fibres.

Suite à des difficultés de corrélation entre un modèle de comportement mésoscopique [7] et des résultats d'essai de compaction transverse, mettant en œuvre une observation par microtomographe de renforts textiles, Wang *et al.* [8] ont cherché à caractériser le comportement de la mèche seule.

Pour cela il a mis en place un dispositif pour mesurer le comportement en compression longitudinale et l'expansion transverses associée de mèches. Des échantillons de mèches, de 10 à 15 mm de longueur, sont soumis à un effort de compression et leur déformation longitudinale et transverse est mesurée optiquement. La rigidité longitudinale des mèches mesurées apparaît très faible et associée à une extension transverse élevée.

On notera enfin que plusieurs auteurs ont aussi mesuré le comportement des mèches imprégnées et observé une évolution de leur comportement par rapport à la condition à sec [5,6,9,10].

Nous présentons un dispositif expérimental permettant de caractériser le comportement en compression transverse de mèches textiles sollicitées simultanément en tension. Le travail présenté est ici réalisé sur un montage prototype qui vise à développer ces essais mécaniques et à mettre en évidence les éventuelles difficultés afin de définir un moyen d'essai et un protocole adaptés aux faibles niveaux de déformation attendus.

2. Méthode expérimentale

2.1 Description du moyen expérimental

Un moyen a été conçu pour caractériser le comportement en compression de mèches textiles soumises à un niveau de tension contrôlé, dont le schéma de principe est représenté figure 2. La mèche repose sur une plaque de verre fixée à une platine métallique de forte raideur. Une ouverture a été pratiquée dans la platine afin de pouvoir observer la mèche lors de la sollicitation. La mèche est mise en tension grâce à des masses calibrées. Un plateau, de 27x37 mm², lié à la traverse d'une machine d'essai mécanique (machine électromécanique 100kN, MTS) permet d'appliquer une sollicitation de compression transverse sur la mèche. L'effort de compression est enregistré avec un capteur 20kN. Le déplacement relatif du plateau par rapport à la plaque de verre est mesuré avec deux capteurs LVDT. Lors des essais, des photos sont prises avec un appareil photo placé sous le montage. Les caractéristiques des capteurs sont récapitulées dans le tableau 1.

type mesure	marque capteur	référence	Caractéristiques
Déplacement	Ametek Solartron technology	DP10S	précision de 0.005mm (5µm)
Force	MTS	20kN	classe 0.5 (certification COFRAC mai 2018)
Largeur avec analyse d'images	Digital Mikroskop Kamera	DigiMicro 2.0 Scale	2 Megapixel (1600x1280) zoom x200

Tab. 1. Caractéristiques techniques des moyens de mesure

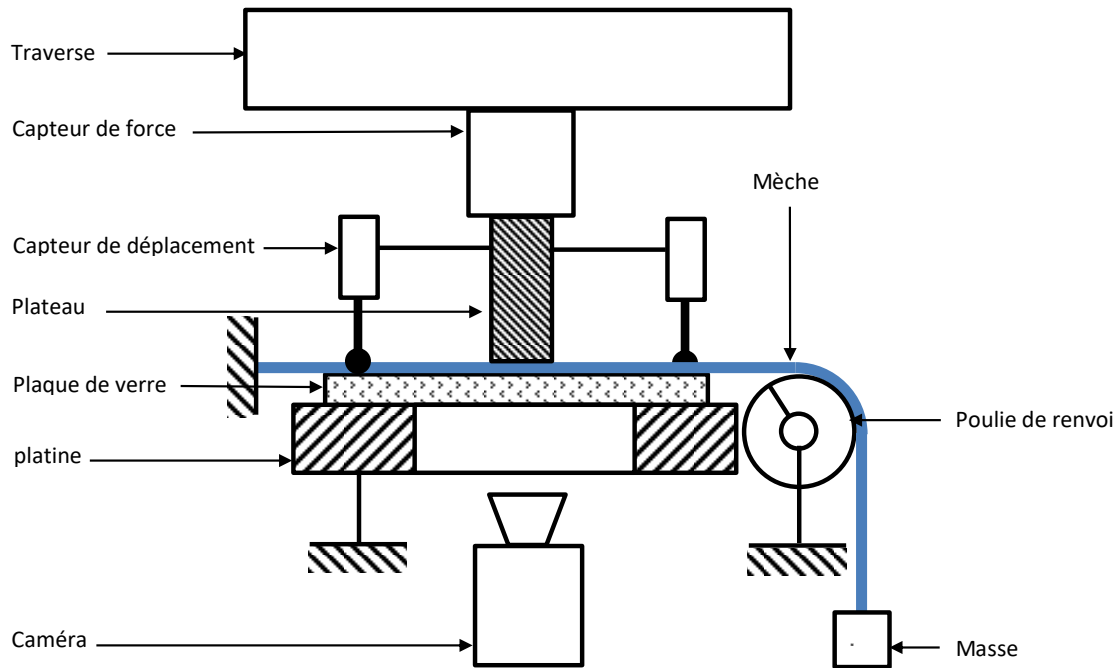


Fig. 2 Schéma de principe du moyen expérimental

2.2 Protocole de mesure

Des essais préliminaires ont mis en évidence que la rigidité du montage d'essai affectait les données brutes mesurées. Il est donc apparu obligatoire de corriger le déplacement mesuré par les capteurs LVDT en intégrant la raideur du montage. Le protocole d'essai comprend 4 étapes.

1) Essai à vide pour quantifier la raideur du montage

Le plateau descend à une vitesse imposée de 0.2 mm/min jusqu'à ce que l'effort atteigne 1000N. Le déplacement mesuré par les palpeurs est enregistré à une fréquence de 2 Hz. Cette première étape permet d'obtenir l'évolution du déplacement de la plaque de verre sous charge. Le plateau est ensuite remonté pour dégager la zone de travail.

2) Mise en place de la mèche

La mèche est déposée manuellement sur la plaque en verre en évitant tout vrillage et en la centrant par rapport au champ optique de la caméra.

3) Mise en tension de la mèche

Une extrémité de la mèche est attachée au bâti, l'autre est fixé à un plateau supportant des masses calibrées. La mèche est ensuite maintenue en tension pendant une durée de 20 minutes afin d'assurer la stabilisation de ses dimensions (cf. Fig. 4 section 3).

4) Application de la sollicitation en compression.

Le plateau est positionné à une distance de 5 fois l'épaisseur théorique de la mèche pour garantir l'absence de contact. Le capteur de force est taré, puis le plateau descend à une vitesse de 0,2 mm/min jusqu'à ce que l'effort atteigne 500N. Les déplacements des capteurs, l'effort de compression et des images de la mèche sont enregistrés à une fréquence de 2 Hz.

2.3 Calibration

L'épaisseur d'une mèche est mesurée en soustrayant la déflexion sous charge du montage à la valeur brute du déplacement mesuré, selon la relation (Eq. 1).

$$e = u_0 - u_v(F) - u_m(F) \quad (\text{Eq. 1})$$

Où e correspond à l'épaisseur de la mèche, u_0 à la distance mesurée par les capteurs au moment du contact lors de l'essai à vide, u_v le déplacement à vide correspondant à l'effort courant et u_m le déplacement mesuré lors de l'essai sur mèche. Par convention, le contact est défini lorsque l'effort atteint une valeur supérieure à 10N, qui correspond à l'erreur de 0 du capteur.

Pour valider cette correction d'épaisseur, des essais ont été effectués sur un clinquant en acier dont l'épaisseur a été contrôlée au micromètre (épaisseur $0.1\text{mm} \pm 2\mu\text{m}$).

La prise en compte de l'essai à vide permet d'obtenir une évolution de l'épaisseur du clinquant constante, en moyenne de 0.097mm (3 essais ont été réalisés, on obtient un écart type de $2\mu\text{m}$ sur la mesure d'épaisseur).

3. Résultats expérimentaux

Des essais ont été réalisés sur des mèches T700 SC 12K-50C [11]. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.

Nombre de filaments	Largeur (mm) (*)	Epaisseur (mm) (*)	Masse linéique (g/1000m)(**)	Masse linéique (g/1000m)(***)	Densité (g/cm ³)(***)
12000	6	0.13	820±20	800	1.8

Tab. 2. Caractéristiques des mèches testées

(*) Valeurs mesurées au pied à coulisse, mèche en sortie de la bobine de stockage

(**) Valeurs mesurées pour 4m linéaire, valeur moyenne

(***) Données fabricant

L'ensemble des mèches testées sont tirées de la même bobine.

3.1 Essais à vide

Chaque essai sur mèche est précédé d'un essai à vide, réalisé pour déterminer la raideur du montage et déterminer la position relative du plateau par rapport à la plaque de verre. La figure 3 représente l'évolution du déplacement en fonction de l'effort, pour trois essais.

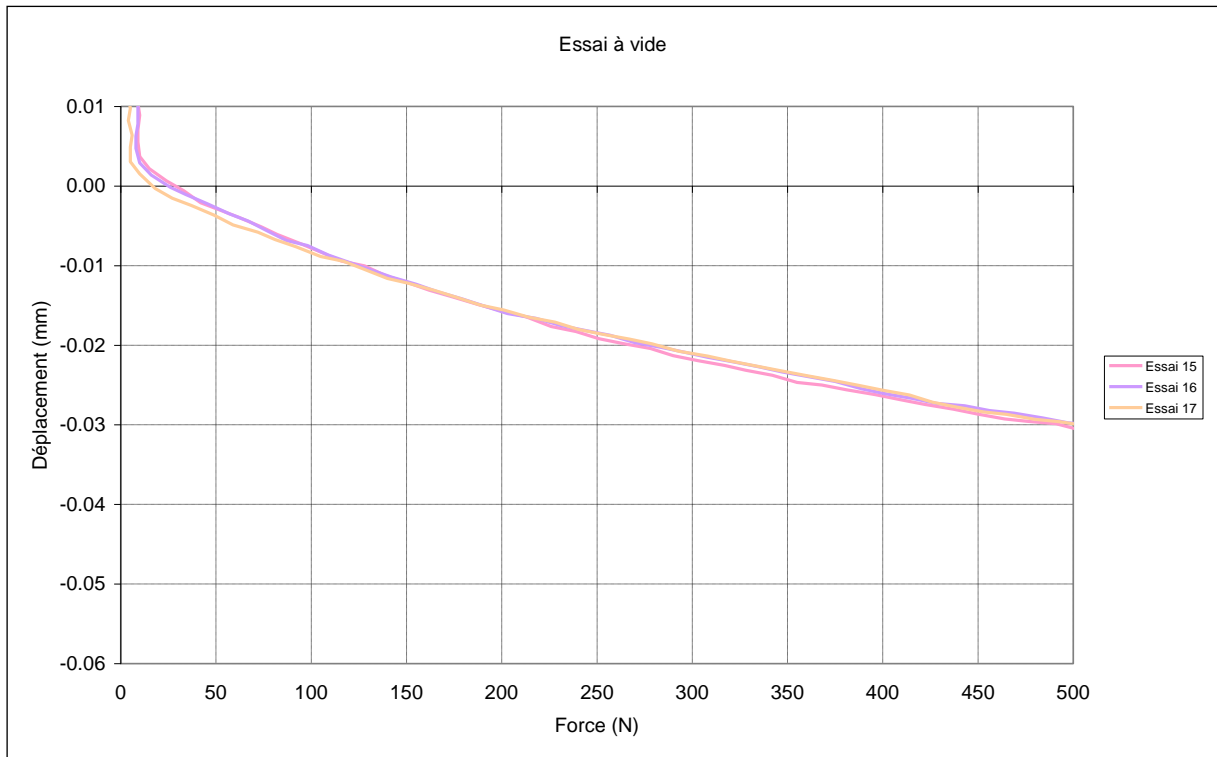


Fig. 3. Essai à vide : relation Déplacement-effort.

La répétabilité de la mesure est très bonne, les écarts de déplacement entre les essais sont inférieurs à $1\mu\text{m}$. En outre, pour l'effort maximum appliqué à une mèche, le déplacement induit par la déformation du montage est de 0.03mm . Au regard de l'épaisseur de la mèche, ce déplacement est relativement important (27% pour une mèche d'épaisseur 0.11mm).

3.2 Evolution de la largeur de la mèche en tension

La largeur d'une mèche est mesurée avec un outil de traitement d'image programmé sur le logiciel MatLab. Pour cela, les images enregistrées lors d'un essai sont tout d'abord converties en niveaux de gris. Une opération de seuillage permet ensuite de séparer la mèche du fond. La valeur du seuil est déterminée de façon automatique avec la méthode d'Otsu [12]. On obtient ainsi une image seuillée, où les pixels correspondant au fond sont noirs, et les pixels correspondant à la mèche sont blancs. L'image seuillée est ensuite parcourue ligne par ligne afin d'identifier le passage du fond à la mèche (front montant), puis de la mèche au fond (front descendant). Deux droites parallèles sont ensuite associées aux points des fronts montant et descendant par régression linéaire. La résolution des images permet d'observer une longueur de mèche de l'ordre de 10mm , pour une largeur de l'ordre de $6\text{ à }7\text{mm}$.

La figure 4 présente l'évolution de la largeur de mèches en tension en fonction du temps, avant l'application d'un effort presseur.

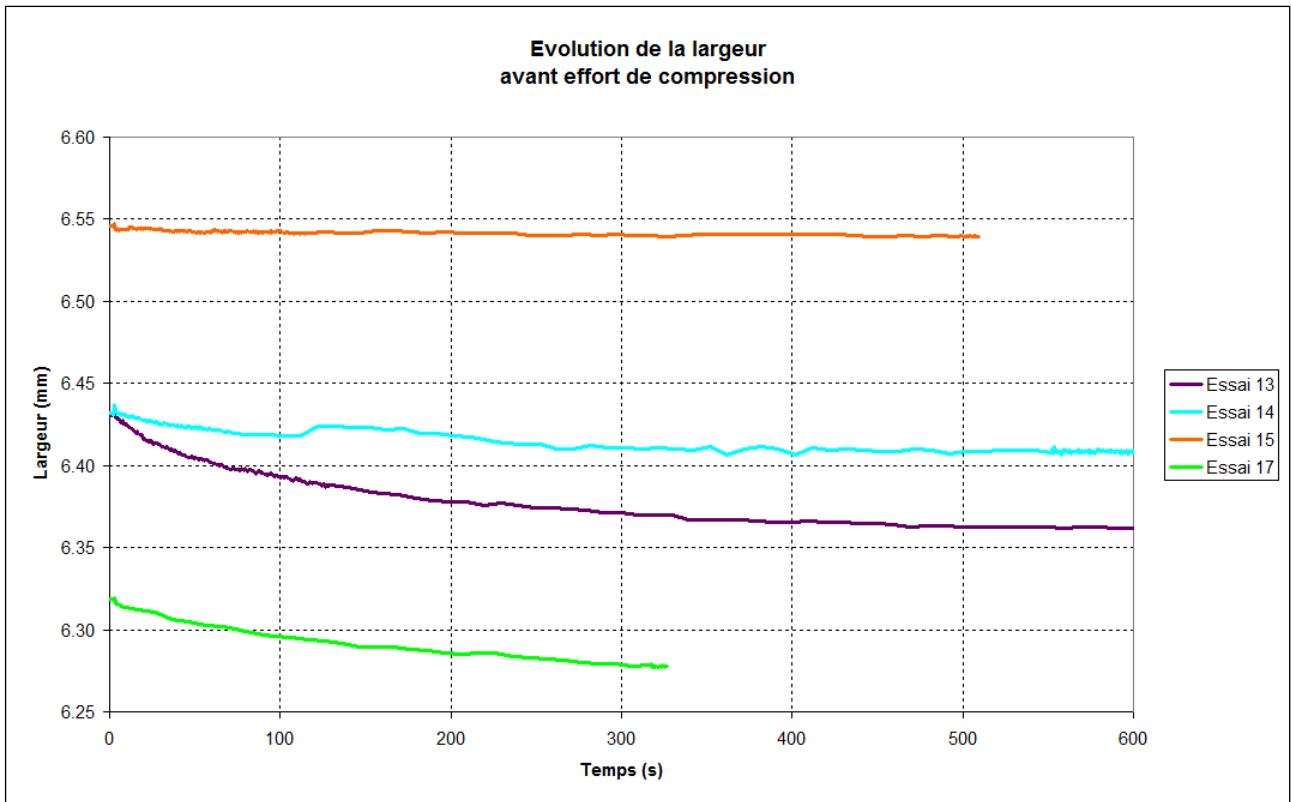


Fig. 4. Evolution de l'épaisseur de mèche, soumises à une tension constante de 9N, en fonction du temps.

Sur l'ensemble des essais effectués, la largeur d'une mèche n'évolue plus pour des durées supérieures à 20 minutes. Cette évolution de la largeur peut être liée à un réarrangement des filaments en tension. L'effet retard peut être attribué à la présence d'ensimage (1% en masse selon données fabricant). On constate en outre une dispersion importante des largeurs (initiales et stabilisées) mesurées. Cette dispersion peut-être due à la mèche elle-même ou aux manipulations faites pour positionner la mèche sur le montage.

3.3 Essai de compression d'une mèche en tension

Les essais sont réalisés avec une tension constante de 9N. La figure 5 représente l'évolution de l'effort de compression en fonction de la largeur. On constate que la largeur de la mèche varie fortement pour un effort presseur faible. L'évolution de la largeur est non linéaire jusqu'à un niveau d'effort de 150 N à partir de ce seuil, la réponse force-largeur est linéaire.

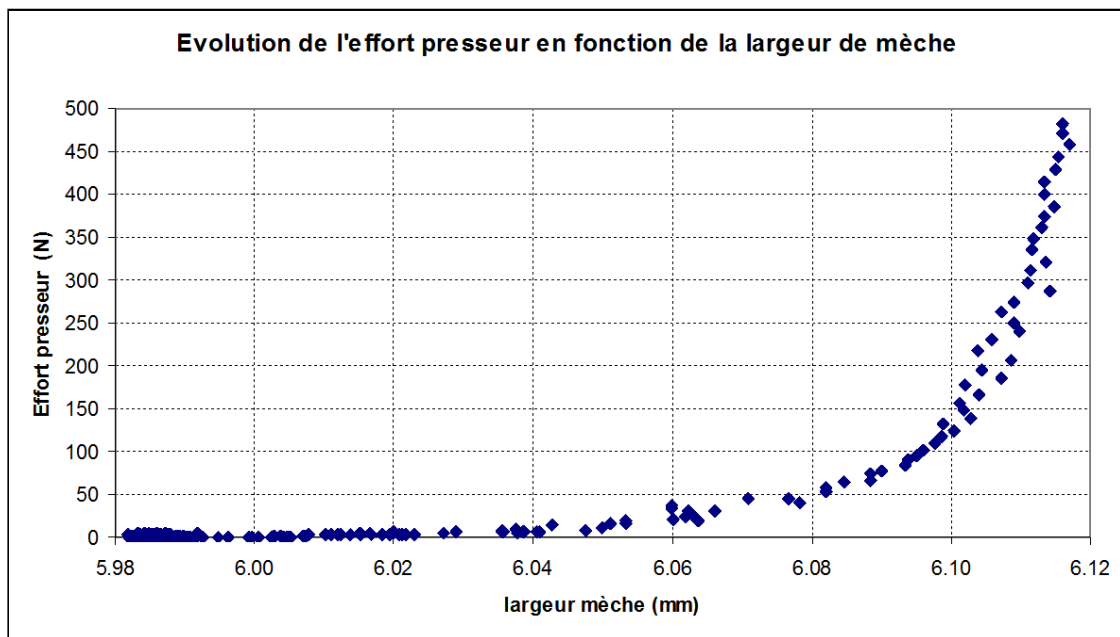


Fig. 5. Evolution de l'effort presseur en fonction de la largeur

La figure 6 représente l'évolution de l'épaisseur en fonction de l'effort presseur. On constate une dispersion importante des épaisseurs initiales, comprises en 0,16 et 0,13 mm. Les mèches présentent un comportement non linéaire marqué jusqu'à des niveaux d'effort de 150 N. à partir de ce seuil, la réponse force-déplacement est linéaire. Ces résultats sont conformes aux comportements que l'on trouve dans la littérature pour des mèches sans tension [6].

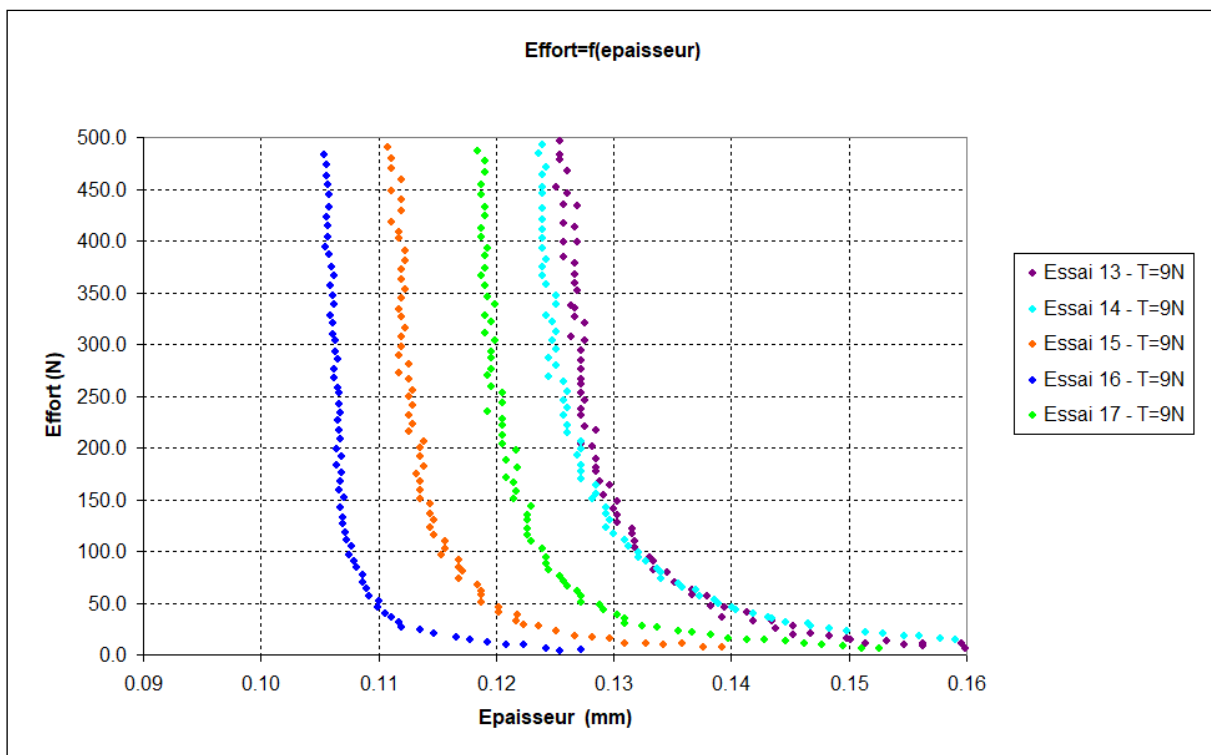


Fig. 6. Evolution de l'épaisseur en fonction de l'effort presseur

4. Conclusion

Afin d'étudier les procédés de fabrication continue de type pultrusion ou enroulement, il est nécessaire de disposer d'une loi de comportement de mèches dans les conditions de leur utilisation. Pour cela, un montage prototype a été réalisé permettant de suivre les déformations transversales de mèche pour une condition aux limites de tension constante et d'effort de compression variable.

La répétabilité et la justesse du moyen doivent encore être confirmées. Pour la mesure d'épaisseur, des essais préliminaires sur des clinquants métalliques semblent prometteurs. Ce travail reste à faire pour la mesure de largeur.

Les essais réalisés sur des mèches de carbone ont mis en évidence une évolution transitoire de la largeur de la mèche sollicitée en tension. Ce phénomène peut être attribué à la présence d'ensimage, ce qui sera à confirmer avec des essais complémentaires.

Les faibles valeurs des grandeurs mesurées nécessitent une attention particulière aux regards des efforts de compression appliqués et des corrections, notamment vis à vis de la raideur du montage, doivent être appliquées. Les déformations du montage sous charge représentent environ 30% de l'épaisseur d'une mèche. Même si la déformation du montage est prise en compte dans le post traitement, des modifications sont en cours pour augmenter la raideur du montage.

Soumise à un effort de compaction, la réponse en déformation transverse est classiquement non linéaire. Les différentes mesures effectuées par prélèvement de mèches issu d'un même rouleau montrent une forte dispersion de sa largeur et son épaisseur.

Avant d'étudier l'influence de la valeur de la tension de la mèche sur son comportement en compression, les dispersions de mesures obtenues entre les différents essais nous obligent à balayer les différences sources possibles d'inexactitudes : positionnement de la mèche, sensibilité des capteurs... qui vont orienter les évolutions prochaines du dispositif.

Références

- [1] Jean-Emile Rocher, « Caractérisation expérimentale et modélisation à l'échelle mésoscopique du comportement de tissus 3D de mèches coméleées », thèse Univ. Orléans 2014.
- [2] Audrey Wendling, « Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composites tissés », thèse. INSA de Lyon, 2013.
- [3] Pierre Badel, « Analyse mesoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X », thèse INSA Lyon, 2008.
- [4] A.A. Somashekar, S. Bickerton, D. Bhattacharyya, « Exploring the non-elastic compression deformation of dry glass fibre reinforcements », *Composites Science and Technology* 67 (2007) 183–200
- [5] A. Sakkalatty Dharmalingam, J. Hemmer, A.-S. Lectez, C. Binetruy, S. Comas-Cardona, « Evolution of single carbon and glass fibrous tow cross-sections in dry and lubricated states during compaction perpendicular to the fibers », *Composites Part B* 148 (2018) 235–242.
- [6] P. Latil, L. Orgéas, C. Geindreau, P.J.J. Dumont, S. Rolland du Roscoat, "Towards the 3D in situ characterisation of deformation micro-mechanisms within a compressed bundle of fibres", *Composites Science and Technology* 71 (2011) 480–488
- [7] P. Badel, E. Vidal-Sallé, E. Maire, P. Boisse, « Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale », *Composites Science and Technology* 68, 2433–2440, 2008.
- [8] D. Wang, N. Naouar, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, "Longitudinal compression and Poisson ratio of fiber yarns in meso-scale finite element modeling of composite reinforcements", *Composites Part B* 141 (2018) 9–19
- [9] S. Comas-Cardona, P. Le Grogneq, C. Binetruy, P. Krawczak, « Unidirectional compression of fibre reinforcements. Part 1: A non-linear elastic-plastic behaviour », *Composites Science and Technology* 67 (2007) 507–514
- [10] S. Bickerton, M.J. Buntain, A.A. Somashekar "The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms" *Composites: Part A* 34 (2003) 431–444
- [11] Torayca® T700 Data sheet, <https://www.toraycma.com/page.php?id=661>, consulté le 17 avril 2019.
- [12] Otsu, N., "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.