

Identification des propriétés mécaniques dynamiques sur fibre unitaire

Dynamical mechanical properties identification for single fibre

Fanny PELISSON¹, Pauline BUTAUD¹, Vincent PLACET² et Morvan OUISSE¹

¹ Supmicrotech, Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST
F-25000 Besançon, France

e-mail : fanny.pelisson@femto-st.fr , pauline.butaud@femto-st.fr, morvan.ouisse@femto-st.fr

² Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST
F-25000 Besançon, France

e-mail : vincent.placet@femto-st.fr

Résumé

En raison de leur dimension microscopique, la mesure du comportement vibratoire des fibres est complexe à réaliser. Le manque de connaissances sur leurs propriétés dynamiques, telles que le facteur de perte et le module de stockage, peut entraîner une mauvaise compréhension des phénomènes dynamiques mis en jeu à l'échelle des composites. Les fibres végétales suscitent un vif intérêt en tant que renfort composites en raison du faible impact environnemental de leur production et de leur capacité de stockage du CO₂. De la réduction du bruit au confort de l'utilisateur, l'amortissement représente une réelle source d'intérêt. Comprendre le comportement dynamique des fibres végétales permettrait de mieux appréhender le comportement dynamique des composites et d'optimiser leurs performances. Cet article présente une méthode pour caractériser le comportement dynamique des fibres unitaires à l'échelle des fibres. Cette caractérisation dynamique des fibres végétales repose sur un essai vibratoire et l'acquisition rapide d'images. Cette approche permet, de déterminer le module de stockage et le facteur de perte des fibres. Elle est illustrée sur des fibres élémentaires de verre, de PA11 et de lin et peut être étendue à d'autres types de fibres.

Abstract

Due to the microscopic scale of the fibre, measuring their dynamic behaviour is complicated to achieve. This lack of knowledge about their dynamic properties such as fibre loss factor and storage modulus leads to poor understanding of the dynamical phenomena involved at the composite scale. Due to their environmentally friendly production and the CO₂ storage they represent, plant fibres are of great interest as a reinforcement for composites. Moreover, from noise reduction to user comfort, damping is a major source of interest. Understanding the dynamic behaviour of plant fibres would provide a better understanding of the dynamic behaviour of the composites. This article presents a method for characterising the behaviour of plant fibres at the fibre level. This dynamic characterisation of fibres is based on vibration excitation and image tracking. This method allows the determination of the storage modulus and the loss factor of fibres. Glass, PA11 and flax fibres are used to illustrate its applicability. This method can be generalised to other types of fibres.

Mots Clés : Facteur de perte – Module de stockage – Fibre de verre/PA11/lin

Keywords : Loss factor – Storage modulus – Glass/PA11/flax fibre

1. Introduction

Le domaine des composites est en constante évolution, allant des applications à hautes performances à une utilisation quotidienne de loisir. Les composites renforcés par des fibres végétales gagnent en popularité en raison de leurs avantages écologiques. En effet, le faible impact environnemental lors de leur production fait des fibres végétales une alternative attrayante aux fibres synthétiques. La figure issue de l'étude de Liu et al [1], présente un diagramme d'Ashby du facteur de perte en fonction du module de stockage pour différentes classes de matériaux (Fig. 1.a). Cette figure met en évidence que la plupart des composites renforcés par des fibres végétales affichent un meilleur amortissement que les composites à fibres synthétiques. Wielage et al. [2] ont examiné les propriétés dynamiques de composites polypropylène (PP) renforcés par des fibres de lin, de chanvre ou de verre par analyse dynamique mécanique. Ils montrent que le module de stockage augmente tandis que le facteur de

perte diminue avec l'augmentation de la fraction volumique de fibres. Par ailleurs, F. Duc et al. [3] ont comparé les propriétés des composites à matrice époxy/PLA4 ou PP, renforcés par des fibres de lin : une augmentation du module de stockage avec l'ajout de fibres dans la matrice (Fig. 1.b) est observée, les conclusions sur le facteur de perte (Fig. 1.c) sont beaucoup moins évidentes. En effet, pour l'époxy, l'ajout de fibres augmente le facteur de perte, pour la matrice PLA4, le facteur de perte n'est pas impacté, pour une matrice PP, l'ajout de fibres réduit le facteur de perte du composite. Il est clair qu'une simple loi des mélanges ne suffit pas à expliquer ce comportement en termes d'amortissement du composite. La compréhension de ces comportements et de leurs mécanismes sous-jacents est encore limitée et peu expliquée. Par conséquent, il est essentiel d'explorer en détail les différentes propriétés et paramètres qui peuvent influencer le comportement dynamique de ces matériaux. Les sources d'amortissement sont multiples, incluant la matrice, la fibre, les interfaces fibre/matrice, les interfaces fibre/fibre, l'interphase, et bien d'autres encore [1]. À ce jour, un seul article rapporte une valeur de facteur de perte du lin à l'échelle de la fibre [4], et aucun n'a étudié spécifiquement l'amortissement du verre à l'échelle de la fibre, se limitant souvent à l'échelle du verre massif [5]. C'est pourquoi, dans cet article, nous proposons d'explorer le comportement vibratoire de fibres individuelles. Pour ce faire, un protocole expérimental est développé afin de déterminer les modules de stockage et les facteurs de perte de fibres élémentaires de lin, de PA11 et de verre. La section 2 décrit le protocole expérimental et les méthodes d'identification proposées. La section 3 présente les résultats et les discussions associées. Enfin, la section 4 conclut cet article et présente les perspectives associées à ces travaux.

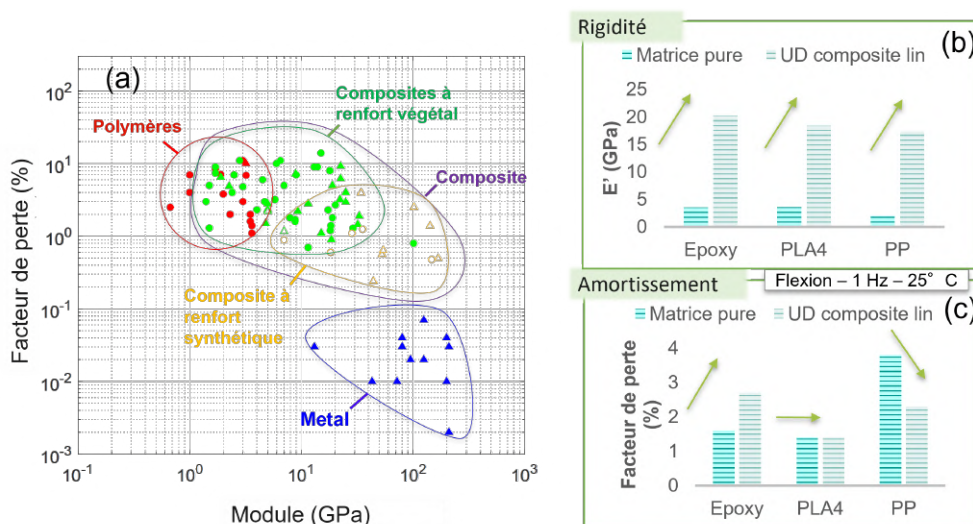


Fig. 1. – (a) Diagramme d'Ashby du facteur de perte en fonction du module de stockage [1], (b) Module et facteur de perte de matrices pures et des composites à renforts de lin associés [3]

2. Protocole expérimental

2.1. Préparation des échantillons

Trois types de fibres ont été sélectionnés pour cette étude : la fibre de verre, la fibre de PA11 et la fibre de lin. Ce choix a été fait dans le but d'obtenir un échantillon représentatif des différents comportements dynamiques en termes d'amortissement et de rigidité : la fibre de verre est connue pour sa rigidité élevée et son faible amortissement, la fibre de PA11 présente une rigidité plus faible mais un fort niveau d'amortissement et la fibre de lin offre un potentiel de combinaison entre rigidité et amortissement [6]. Chaque fibre est individuellement extraite du faisceau et placée dans un cadre en papier adhésif. Ce cadre permet d'isoler la fibre en attendant que sa base soit immergée dans un bloc de résine. Pour faciliter son encastrement, la base du cadre en papier est découpée, laissant dépasser

une partie de la fibre. Une longueur d'environ 2 mm de la fibre est ensuite noyée dans une matrice de GreenPoxy. Cette étape garantit une fixation stable de la fibre dans la matrice, favorisant ainsi une analyse précise de son comportement dynamique. Afin de minimiser l'effet de la remontée capillaire sur la fibre et de garantir des conditions d'encastrement robustes, la résine est déposée sous forme de "blob" [7]. Une vue d'ensemble de la fibre placée dans son support Greenpoxy est présentée (Fig. 2.a). Une remontée capillaire (Fig. 2.b) peut tout de même se produire à la base de l'encastrement mais reste minimale et peut être prise en compte dans le modèle numérique. Après réticulation pendant 48 heures à température ambiante, les échantillons sont prêts pour les essais. Quatre fibres de chaque type (lin, verre, PA11) ont été utilisées dans cette étude.

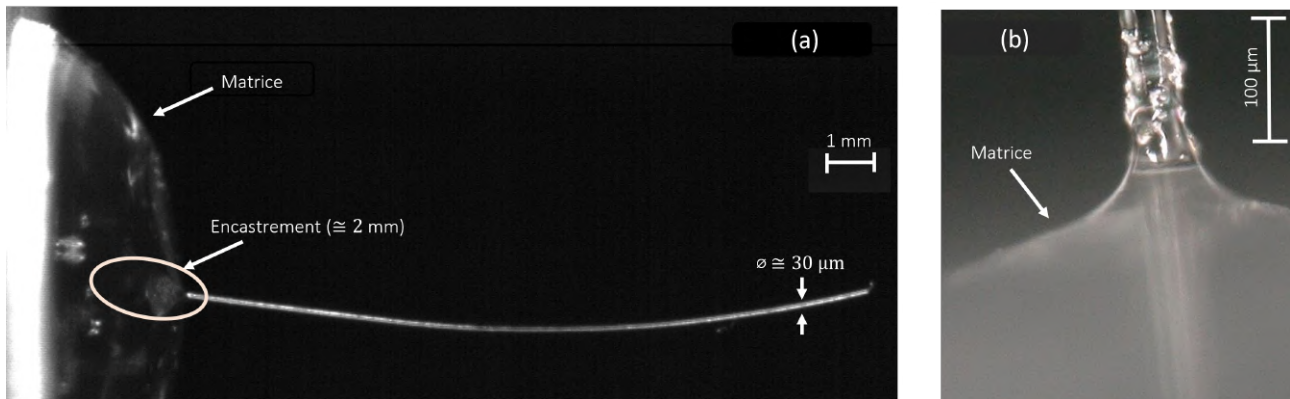


FIG. 2. – (a) Fibre de PA11 encadrée à sa base dans un "blob" de GreenPoxy, (b) mise en évidence d'une remontée capillaire sur une fibre de PA11 observée au microscope $\times 300$.

2.2. Mesure du facteur de perte

Le dispositif expérimental (Fig. 3) comprend une caméra ultra-rapide (jusqu'à 1700 Hz, RD Vision) et un vibromètre laser (OFV 505 Polytec). La caméra ultra-rapide enregistre les mouvements de la fibre après excitation à sa base par un actionneur piézoélectrique (APA60-SM Cedrat Technology). Le vibromètre laser mesure la vitesse du point d'excitation à la base de la fibre.

En mesurant simultanément le déplacement en bout de fibre et celui de la base, ce dispositif expérimental permet d'obtenir les déplacements de la fibre après arrêt de l'excitation. Cela permet de caractériser les propriétés vibratoires de la fibre et d'analyser les phénomènes d'amortissement qui y sont associés.

La fibre est sollicitée en régime harmonique, à une fréquence proche de sa première fréquence propre. Après l'arrêt de l'excitation, les images de la fibre sont enregistrées pendant la période transitoire où la fibre retourne à son état d'équilibre. Les déplacements de la fibre sont ensuite suivis par corrélation d'images. En analysant les déplacements à l'extrémité de la fibre, une courbe amortie est obtenue (fig. 3c). Le facteur de perte est déterminé à l'aide du décrétement logarithmique, qui est calculé selon l'expression suivante :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x(t_0)}{x(t_0 + nT)},$$

où n est le nombre de périodes considérées, t_0 est l'instant correspondant au premier maximum relevé avec une amplitude $x(t_0)$, et $t_0 + nT$ est l'instant correspondant au maximum local situé n pseudo-périodes plus tard, avec une amplitude $x(t_0 + nT)$. Le facteur de perte η est ensuite calculé à partir de l'expression :

$$\eta = \frac{2}{\sqrt{1 - 4\frac{\pi^2}{\delta^2}}}.$$

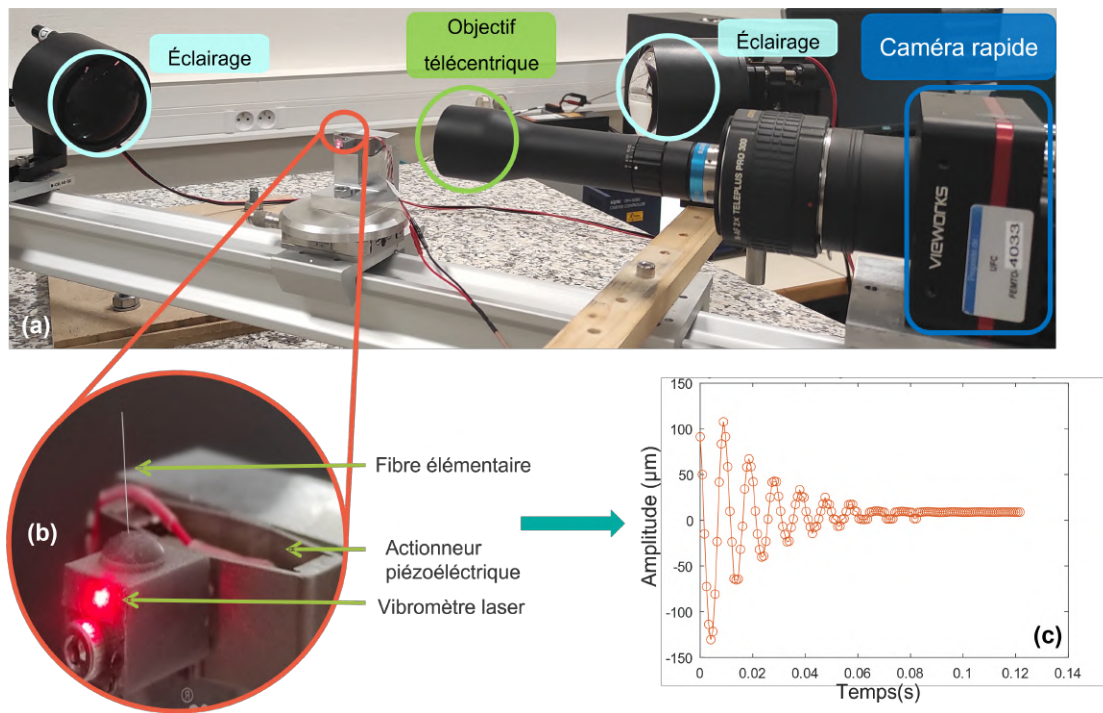


FIG. 3. – (a) Dispositif expérimental, (b) zoom sur la fibre dans le plot et (c) amplitude des déplacements en bout de fibre pour un essai en régime libre

2.3. Identification du module de stockage

L'identification du module de stockage de la fibre nécessite de disposer d'un modèle de comportement de la fibre. La première fréquence propre de la fibre est déterminée à partir de la corrélation d'images et de la courbe des déplacements obtenue précédemment. On suppose que le mouvement de la fibre est régi par un modèle de poutre (homogène et de section connue) en flexion, ce qui permet d'identifier le module par :

$$E' = E_{mod} \times \left(\frac{f_{exp}}{f_{mod}} \right)^2,$$

où E_{mod} est le module choisi arbitrairement dans le modèle, f_{exp} est la fréquence propre identifiée lors des essais, et f_{mod} est la fréquence propre obtenue avec le modèle.

Une étude de sensibilité est réalisée avec un modèle éléments finis afin d'identifier les paramètres influents de l'essai. Il est montré que la longueur d'encastrement et l'angle d'encastrement n'ont pas d'influence significative sur la fréquence propre et l'amortissement de la structure. Le paramètre ayant la plus grande contributions sur l'amortissement de la structure est l'amortissement de la fibre. Le modèle éléments finis utilisé est composé d'une fibre modélisée avec des éléments poutres et une matrice avec des éléments solides. La masse volumique choisie pour chaque type de fibre et la matrice est répertoriée dans le tableau 1. Une étude géométrique préliminaire de la fibre est réalisée pour tenir compte de sa variabilité, les échantillons sont examinés au microscope KEYENCE VHX. Les coordonnées de la fibre et de l'encastrement sont ensuite extraites et utilisées dans le modèle éléments finis. Cette méthode permet d'obtenir des résultats précis lors de l'identification des paramètres dynamiques de la fibre.

Prop.	Matrice	Verre	PA11	Lin
ρ (kg/m ³)	1250 [8]	2500 [7]	1030 [9]	1450 [6]

TAB. 1. – Propriétés mécaniques des différents éléments

3. Résultats et discussion

Le module de stockage et le facteur de perte sont identifiés à l'échelle de la fibre unitaire pour le lin, le verre et le PA11. Les résultats présentés (Fig. 4) mettent en évidence les différences d'amortissement entre les fibres de lin, de PA11 et de verre. Les résultats confirment que le lin présente des capacités

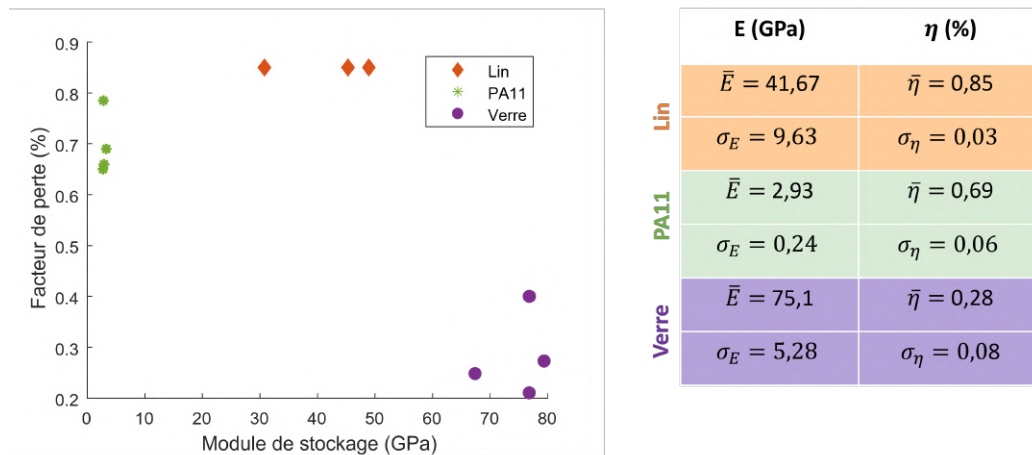


FIG. 4. – Facteur de perte en fonction du module de stockage pour des fibres de lin, PA11 et verre pour des essais vibratoires en régime libre (moyennes et écarts-types sur 4 fibres)

d'amortissement (0,85%) plus grande que le PA11 (0,69%), lui-même plus amortissant que le verre (0,28%). En ce qui concerne le module de stockage, le PA11 montre une stabilité autour de 2,15 GPa, tandis que le lin atteint environ 41,7 GPa et le verre se situe autour de 73,4 GPa.

Ces résultats sont en accord avec la littérature. En effet, le facteur de perte du lin se rapproche de la valeur mesurée dans l'étude de Davies et al. [4] (0,9%), tout comme le module de stockage du lin se situe dans la fourchette mentionnée par Charlet et al. [6] ([30-80] GPa). Pour le PA11, les valeurs de facteur de perte et de module de stockage obtenues dans notre étude sont similaires à celles identifiées dans l'article de référence [9] (0,7% et 2,18 GPa). De même, la fibre de verre présente des valeurs de facteur de perte ([0,001-0,2]%) et de module de stockage (73 GPa) qui sont cohérentes avec la littérature. Les résultats obtenus dans cette étude et leur comparaison avec les valeurs de référence de la littérature permettent de valider la méthode utilisée. Cependant, il est important de noter que les écarts-types obtenus sont parfois élevés, notamment pour les fibres de verre (pourtant aux propriétés stables) où l'écart-type du module de stockage est de 5,28%. Plusieurs sources d'incertitudes ont été identifiées. Tout d'abord, en l'absence de données précises sur la densité de la fibre (difficulté à peser une fibre unitaire), l'identification du module de stockage est incertaine. Une autre limitation importante concerne le contrôle de l'environnement extérieur de la fibre pendant les essais. Les variations de température, d'humidité, de pression et les perturbations extérieures peuvent avoir un impact sur les résultats expérimentaux. Pour minimiser ces variations, la fibre pourrait être isolée dans une enceinte à environnement contrôlé, les conditions expérimentales seraient alors mieux contrôlées.

4. Conclusions

Cette étude analyse les propriétés dynamiques de fibres de verre, de PA11 et de lin, en caractérisant leur comportement d'amortissement et de rigidité (facteur de perte et module de stockage). Les résultats ont confirmé la rigidité élevée de la fibre de verre avec peu d'amortissement, la capacité d'amortissement supérieure de la fibre de PA11 et le compromis intéressant entre rigidité et amortissement offert par la fibre de lin. Les modules de stockage et les facteurs de perte obtenus sont cohérents avec la littérature. Des limitations subsistent, notamment liées aux hypothèses de modélisation (géométrie et

masse volumique). Des améliorations recommandées incluent l'isolation de la fibre dans une boîte sous vide et l'obtention de données plus précises sur la densité des fibres.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (projet MIDIFIC ANR-22-CE51-0001) et bénéficie du soutien de la Graduate School EIPHI (projet ANR-17-EURE-0002)

Références

- [1] T. Liu, P. Butaud, V. Placet, M. Ouisse « Damping behavior of plant fiber composites : A review », *Composite Structures* Vol. 275, pp. 114392, 2021.
- [2] B. Wielage, T. Lampke, H. Utschick, F. Soergel « Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic-mechanical properties », *Journal of materials processing technology* Vol. 139 n° 1-3, pp. 140–146, 2003.
- [3] F. Duc, P. Bourban, C. Plummer, J.-A. Manson « Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 64, pp. 115–123, 2014.
- [4] G. C. Davies, D. M. Bruce « Effect of environmental relative humidity and damage on the tensile properties of flax and nettle fibers », *Textile Research Journal* Vol. 68 n° 9, pp. 623–629, 1998.
- [5] P. Lenk, G. Coult « Damping of glass structures and components », in : *Challenging Glass Conference Proceedings*, vol. 2, , pp. 341–350, 2010.
- [6] K. Charlet « Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques », Ph.D. thesis, Université de Caen/Basse-Normandie, 2008.
- [7] D. Perrin, M. Alteirac, S. Corn, M. E. Shanahan « A novel method for the measurement of elastic moduli of fibres », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 38 n° 1, pp. 71–79, 2007.
- [8] « Epoxy Resin Green 56. (s.d.). Sicomin » .
- [9] F. D. M. C.Barrere « Résines époxy réticulées par des polyamines : structure et propriétés », *Revue de l'institut français du pétrole* Vol. 52 n° 3, pp. 317–335, 1997.