



HAL
open science

Analyse comparative du comportement mécanique et vibratoire de composites organiques en résine Elium renforcée de fibres de lin et de verre

Thuy Quynh Truong Hoang

► **To cite this version:**

Thuy Quynh Truong Hoang. Analyse comparative du comportement mécanique et vibratoire de composites organiques en résine Elium renforcée de fibres de lin et de verre. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621551

HAL Id: hal-01621551

<https://hal.science/hal-01621551>

Submitted on 23 Oct 2017

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.

Analyse comparative du comportement mécanique et vibratoire de composites organiques en résine Elium renforcée de fibres de lin et de verre

Comparative analysis of mechanical and vibration behaviors of organic composites made of Elium resin reinforced with flax and glass fibers

S. Essid¹, A. Monti^{1,2}, T. Q. Truong Hoang¹, Z. Jendli¹, A. El Mahi²

1 : ESTACA'LAB, Laboratoire de Structures et Matériaux, ESTACA,
Campus Ouest, Rue Georges Charpak, BP 76121, 53061 Laval cedex 9

e-mail : safa.essid@univ-lehavre.fr, thuy-quynh.truong-hoang@estaca.fr, zouhaier.jendli@estaca.fr

2 : LAUM, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,
Université du Maine

Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans

e-mail : arthur.monti@univ-lemans.fr, abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr

Résumé

Les fibres végétales, en particulier les fibres de lin, sont fortement développées en France et en Europe. Grâce à leur faible densité, leurs propriétés mécaniques intéressantes, elles peuvent se substituer aux fibres de verre pour permettre d'atteindre de nouveaux marchés. Les caractéristiques mécaniques des fibres de lin sont largement étudiées dans la littérature. Cependant, leur caractère amortissant n'est pas suffisamment mis en valeur. Dans ce contexte, ce travail a pour but de mener une étude comparative, d'un point de vue mécanique et vibratoire, de deux composites à base d'une résine thermoplastique EliumTM renforcée par de fibres de lin et de verre. Ces composites élaborés par infusion de résine liquide ont été caractérisés en traction pour déterminer leurs propriétés mécaniques. Pour un taux volumique légèrement supérieur, le composite à fibres de verre semble présenter des caractéristiques mécaniques plus intéressantes par rapport à celui à fibres de lin. Par ailleurs, leur caractère amortissant a été identifié par des essais de vibration en configuration de poutre encastree/libre. L'amortissant modal mesuré permet d'en déduire le facteur de perte spécifique caractérisant la capacité d'absorption des vibrations. Les résultats obtenus démontrent que les fibres de lin amortissent plus de vibration par rapport aux fibres de verre.

Abstract

Natural fibers, in particular, flax fibers have been highly developed in France and in Europe. Thanks to their low density, their attractive mechanical properties, they can substitute glass fibers in order to achieve new markets. Their mechanical properties are widely studied in the literature. However, their damping property has not sufficiently been explored. In this context, the objective of this study is to compare mechanical and vibration properties of two composites made of thermoplastic resin, EliumTM, reinforced by flax and glass fibers. These composites obtained by vacuum assisted resin transfer molding, were characterized in tensile test in order to determine their mechanical behavior. For a slightly higher fiber volume fraction, the glass fiber composite seems to have better mechanical properties compared to that of flax fiber. Otherwise, their damping properties were identified by vibration tests with clamped/free beam configuration. The measured damping ratio can be used to deduce the specific damping loss factor characterizing vibration absorption capacity. The obtained results demonstrate that flax fibers possess higher damping properties than glass fibers.

Mots Clés: fibres de lin, fibre de verre, thermoplastique, comportement mécanique, comportement vibratoire.

Keywords: flax fibers, glass fibers, thermoplastic, mechanical behavior, vibration behavior.

1. Introduction

Les composites renforcés de fibres naturelles constituent une alternative intéressante à certains types de composites synthétiques, répondant aux exigences réglementaires et aux contraintes normatives écologiques [1-2]. D'autre part, ces fibres naturelles notamment végétales (lin, chanvre, etc.) constituent une opportunité de valorisation des ressources locales en Europe et spécialement en France [3-4]. De plus, certaines fibres végétales telles que le lin, possèdent des propriétés spécifiques comparables voire supérieures à celles des fibres synthétiques telles que les fibres de verre [5-6]. Ce constat offre donc un potentiel pour l'allègement des structures utilisées dans diverses applications notamment le transport [7]. Le développement de l'utilisation des composites à fibres végétales dans ces structures requière une maîtrise de leur comportement mécanique et vibratoire [8-12].

L'objectif de cette étude est de réaliser la fabrication des matériaux composites en résine thermoplastique Elium-150 renforcée, d'une part, de fibres de lin et d'autre part, de fibres de verre et de les caractériser de point de vue propriétés mécaniques et vibratoires. En somme, le but de l'étude est de prouver et de valoriser le potentiel des fibres de lin vis-à-vis celles de verre.

2. Protocoles expérimentaux

2.1 Matériau

Les deux matériaux composites fabriqués lors cette étude sont constitués d'une matrice thermoplastique Elium-150 renforcée, d'une part, par des plis de lin bidirectionnels et d'autre part, par des plis de verre bidirectionnels (Fig. 1). La résine et les deux types de renforts sont fournis respectivement par Arkema, Terre de Lin et Saertex. La spécificité de la résine Elium-150 provient de sa grande fluidité qui facilite la mise en œuvre de composites par des procédés identiques à ceux utilisés pour les résines thermodurcissables. Cette résine est récente et peu étudiée dans la littérature [12-13], d'où l'intérêt de l'utiliser dans les composites de l'étude afin d'identifier ses principales caractéristiques. Par ailleurs, son caractère thermoplastique permet d'envisager le recyclage de ces matériaux.

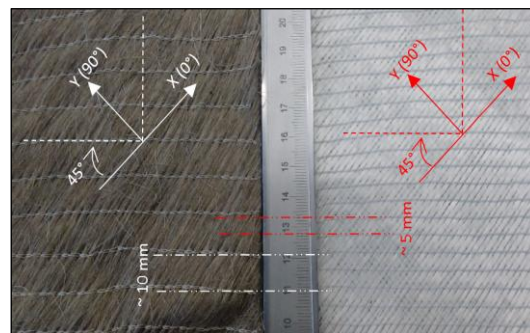


Fig.1. Définition des orientations sur les plis de lin et de verre.

Chaque pli en fibres de lin se présente sous la forme de deux voiles unidirectionnels, ayant une masse volumique de 400 g/m^2 chacun, sans tissage, superposés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Pareillement, chaque pli en fibres de verre est constitué de deux voiles unidirectionnels de 440 g/m^2 . Pour les deux configurations, le maintien des fibres et des voiles est réalisé grâce à un fin fil de couture en coton orienté à $\pm 45^\circ$ par rapport à ceux derniers. La couture est espacée d'environ 10 mm pour le pli en lin tandis que pour celui en verre le pas est d'environ 5mm. Le système d'axe considéré dans la suite de l'étude est celui illustré sur la figure 1. L'orientation (0°) est portée par la direction des fibres sur le premier voile externe du composite.

2.2 Procédé de mise en œuvre des composites

Dans le but d'identifier le comportement mécanique et vibratoire de ces matériaux, des éprouvettes ont été fabriquées par le procédé d'infusion de résine liquide. Les fibres de lin ont été étuvées à une température de 110°C pendant 5 heures en accord avec une étude de la littérature [14]. Ensuite, deux couches de fibres de lin séchées sont superposées symétriquement sur un moule préalablement ciré. Les fibres sont recouvertes par un tissu d'arrachage, deux tissus de drainage et finalement, une bâche appropriée. Une fois que la phase de mise en place est effectuée, un contrôle de l'étanchéité est réalisé en utilisant un détecteur de fuites par ultrason. La résine est alors préparée séparément dans un récipient en y ajoutant un catalyseur à hauteur de 1.5 % de la masse totale de cette dernière. L'infusion est ensuite réalisée sous une dépression égale à -0.5 bar et le montage repose sous cette dépression jusqu'à une polymérisation complète de la résine.

Le composite stratifié à fibres de lin est constitué de deux plis, soit quatre voiles bidirectionnels. Cependant, celui à fibres de verre est constitué de quatre plis, soit huit voiles bidirectionnels. Les deux configurations de composites stratifiés réalisés en fibres de lin $[0^\circ/90^\circ]_s$ et en fibres de verre $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ sont symétriques et équilibrées. Ce choix est adopté afin d'assurer une représentativité dans les critères lors de la comparaison des deux configurations verre et lin. En effet, les densités respectives sont très différentes, celle du verre est de 2600 kg/m³ tandis que celle du lin est de 1400 kg/m³. Il s'agit donc de comparer les composites constitués des deux types de renforts tout en ayant une même épaisseur dans les éprouvettes et un même taux volumique des fibres. Après fabrication, des mesures des taux volumiques du renfort dans les composites ont été effectuées par la méthode de calcination pour le verre et par la mesure d'immersion pour le lin [15]. Les résultats obtenus confirment des taux en volume de l'ordre de 44% pour le verre et de 40% pour le lin.

2.3 Essais mécaniques de traction

Les éprouvettes de traction sont découpées sous forme haltère de longueur utile égale à 50 mm et de largeur égale à 10 mm pour celle en résine Elium-150 seule et 20 mm pour les composites. Les essais mécaniques de traction sont réalisés dans un premier temps sur des éprouvettes de résine Elium seule puis sur le composite en fibres de lin et celui en fibres de verre. Les orientations des fibres par rapport à la direction de la traction sont de 0°, 45° et 90°. Le but de ces essais de traction uni-axiale en quasi-statique est de déterminer les propriétés mécaniques des composites. A savoir, le module de Young, le coefficient de Poisson, la contrainte et la déformation à la rupture pour les éprouvettes découpées dans les directions longitudinale et transversale et le module de cisaillement pour les éprouvettes découpées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'orientation des fibres. Le banc d'essai de traction utilisé est une machine type INSTRON modèle 3369. Les déformations longitudinale et transversale sont obtenues au moyen de deux extensomètres. La vitesse de l'essai est égale à 1mm/min. Pour chaque configuration de composites, cinq éprouvettes ont été testées assurant une reproductibilité des résultats.

2.4 Essais vibratoires

Les échantillons testés, en Elium-150 et en composites, sont découpés sous forme rectangulaire de largeur égale à 20 mm et de longueurs de 300 mm. Trois longueurs d'encastrement 40, 80, 120 mm ont été appliquées en extrémité des échantillons afin d'évaluer l'influence de la surface de fixation sur les modes propres (fig. 2). Par ailleurs, les éprouvettes des deux configurations de composites lin et verre sont testées en vibration suivant les orientations 0°, 15°, 30°, 45° et 90° par rapport à l'orientation des fibres. Le banc expérimental utilisé se compose d'un bloc d'encastrement de l'éprouvette, d'un marteau d'impact et d'un vibromètre laser Polytec relié à

un analyseur dynamique. Cet analyseur permet la numérisation des signaux et leur traitement grâce à un logiciel développé au laboratoire.

La figure 2 illustre le principe de l'expérience. L'excitation est réalisée par un marteau de choc agissant à l'extrémité encadrée de l'éprouvette. Cependant, la réponse de l'échantillon est détectée par le vibromètre laser au niveau de son extrémité libre. Ce protocole permet d'exciter une large gamme de modes. La fréquence maximale atteinte est de l'ordre de 5 KHz. Pour chaque orientation des fibres, trois éprouvettes ont été testées.

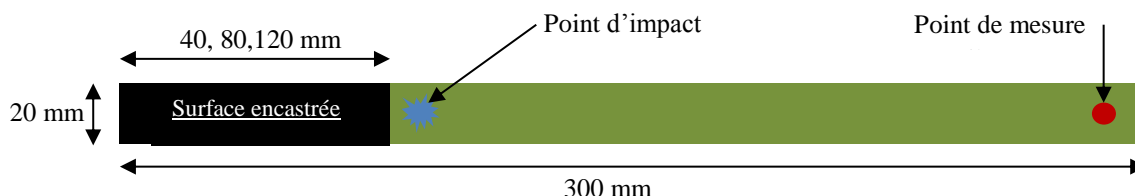


Fig.2. Illustration du dispositif des essais vibratoires.

3. Résultats et discussions

3.1 Comportement mécanique

L'analyse des courbes de contraintes - déformations dans la direction longitudinale présentées en figure 3, met en évidence une phase élastique nettement limitée en terme de contrainte pour la résine seule et pour le composite à fibres de lin. Cette première phase du comportement est suivie par une deuxième non linéaire plus prononcée sur le composite en lin par rapport au composite en verre. Du fait de la très courte plage de la première partie élastique dans le composite à fibres de lin, certains auteurs proposent de déterminer deux modules d'Young et ce par la mesure des pentes dans les deux parties de la courbe [16]. L'un, mesuré sur la toute première zone élastique, correspondant au module d'Young au sens strict et l'autre, complémentaire, est mesuré sur la seconde partie de la courbe. En ce qui concerne cette étude, le module d'Young est déterminé dans la première partie linéaire élastique de la courbe. A taux volumiques de renforts comparables, le composite à fibres de verre présente un module d'Young de l'ordre de 23 GPa pour une valeur de 9 GPa pour le composite à fibres de lin (tab.1). En ce qui concerne la contrainte à rupture, l'écart est assez marqué entre le niveau de la contrainte à rupture du composite à fibres de verre (315 MPa) face à celui en lin (70 MPa) et à la résine seule (42 MPa). L'effet de renforcement est donc plus accentué en termes de résistance dans le cas du composite à fibres de verre que celui à fibres de lin (fig. 3).

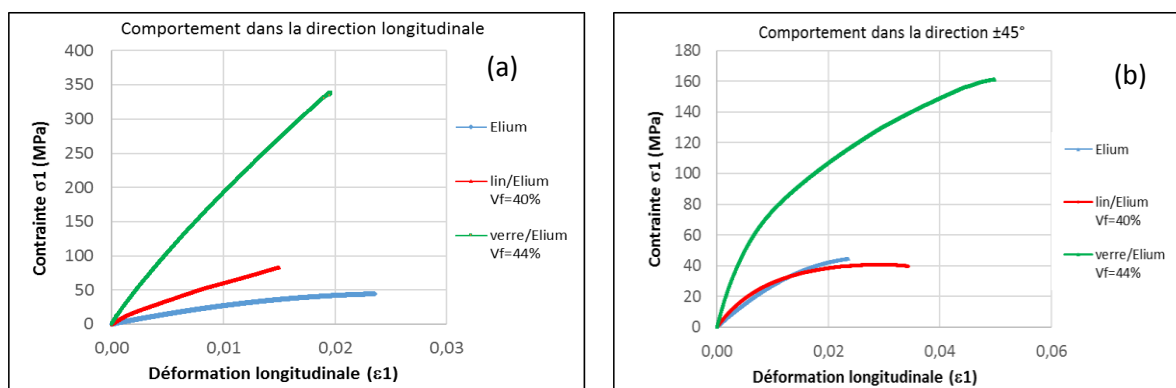


Fig. 3. Courbes de contrainte-déformation de l'Elium et des composites lin/Elium et verre/Elium : (a) comportement dans la direction longitudinale 0° , (b) comportement dans la direction $\pm 45^\circ$.

En contrepartie, l'analyse des courbes de contraintes – déformations, dans la direction à $\pm 45^\circ$, met en évidence un comportement plutôt plastique pour les trois matériaux. On remarque que les courbes de traction de l'Elium seule et du composite à fibres de lin sont très proches dans la phase élastique. Ce qui signifie, pour cette direction à $\pm 45^\circ$, que les fibres de lin n'ont que peu d'effet de renforcement et que c'est plutôt la résine qui résiste au cisaillement. En revanche, on observe que les fibres de verre interviennent bien dans la rigidification du matériau en cisaillement, avec une pente et une contrainte à la rupture nettement plus importantes que les deux autres matériaux. Par ailleurs, les modules de cisaillement G_{12} sont déterminés à travers la pente de la courbe contrainte en cisaillement plan (τ_{12}) et déformation en cisaillement (γ_{12}).

- La contrainte en cisaillement plan τ_{12} , calculée selon l'équation 1.

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (\text{Eq. 1})$$

- La déformation en cisaillement γ_{12} , calculée selon l'équation 2.

$$\gamma_{12} = \varepsilon^L - \varepsilon^T \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec, F : la charge, b : la largeur de l'éprouvette, h : l'épaisseur de l'éprouvette et ε^L et ε^T : déformation longitudinale et transversale.

Dans le but de comparer les propriétés mécaniques en traction des composites en lin et en verre, les propriétés mécaniques obtenues sont reportées dans le tableau 1. Comme les plis sur les composites sont bidirectionnels, il est aisé de constater que les propriétés mécaniques sont équivalentes dans les deux directions 0° et 90° pour chaque composite que ce soit à fibres de verre ou à fibres de lin. D'autre part, on remarque que la rigidité du composite à fibres de verre est deux fois plus importante que celle du composite à fibres de lin. Les valeurs de la contrainte à rupture pour les composites à fibre de verre sont nettement supérieures à celles établies pour les composites à fibre de lin. Quant à la déformation à rupture, elle est de l'ordre de 1.7% pour le composite en verre contre 1.2% pour le composite en lin.

	Module d'Young (MPa)	Contrainte à rupture(MPa)	Déformation à rupture(%)	Module de cisaillement (MPa)
Elium™	3278 ^{±348}	42 ^{±1.8}	2.1 ^{±0.1}	
Lin/Elium [0°]	8957 ^{±1031}	70.8 ^{±9.7}	1.2 ^{±0.2}	-
Verre/Elium [0°]	23091 ^{±2298}	315 ^{±31}	1.8 ^{±0.1}	
Lin/Elium [90°]	9020 ^{±927}	81 ^{±7}	1.2 ^{±0.1}	-
Verre/Elium [90°]	24540 ^{±2893}	338 ^{±22.3}	1.7 ^{±0.09}	
Lin /Elium[45°]	-	-	-	5531 ^{±2201}
Verre/Elium [45°]	-	-	-	14146 ^{±1267}

Tab. 1. Récapitulatif des propriétés mécaniques déterminées après un essai de traction de l'Elium et des stratifiés lin/Elium et verre/Elium.

Ces valeurs sont transformées en propriétés spécifiques en les divisant par les densités respectives des composites. Les densités en question sont déterminées par calculs selon la loi de mélange. A ce propos, les densités de la fibre de lin et de verre sont considérées à partir des données issues des fournisseurs de matière, respectivement 1400 kg/m³ et 2600 kg/m³. La densité de la résine d'Elium mesurée est de 1130 kg/m³.

En ramenant aux valeurs spécifiques, l'écart entre les propriétés spécifiques de composite en lin et en verre diminue. Les résultats spécifiques déterminés sont présentés sur la figure 4.

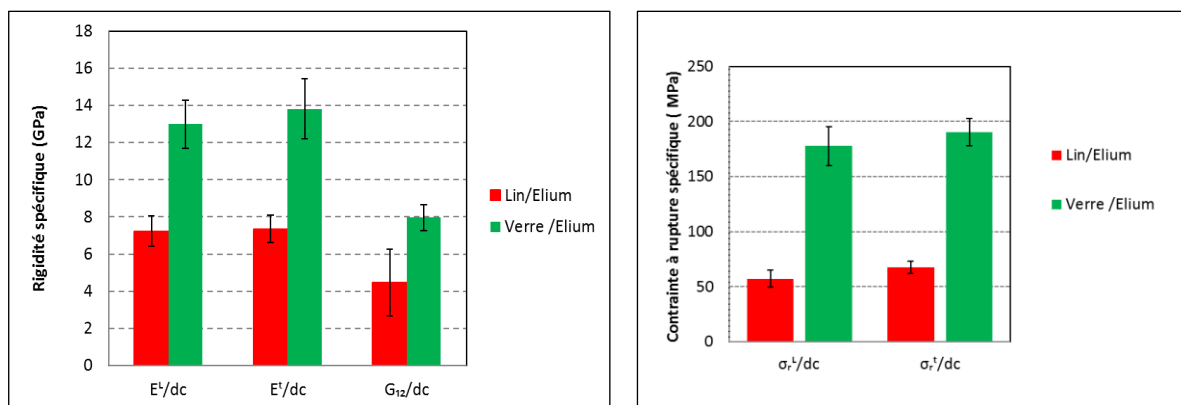


Fig. 4. Evolution des propriétés mécaniques spécifiques des fibres de lin par rapport à des fibres de verre.

Il en résulte que, pour un taux volumique légèrement supérieur, le composite à fibres de verre présente des caractéristiques mécaniques spécifiques plus importantes par rapport à celui à fibres de lin. Néanmoins, au regard des résultats issus d'autres études de la littérature [5-6-9], les propriétés spécifiques des deux composites constitués de lin et de verre doivent être plutôt comparables. En effet, plusieurs facteurs liés aux phases constitutives du composite, mais aussi à la mise en œuvre, peuvent expliquer ce constat. Il apparaît, sur certaines zones sur le pli de lin, des désalignements macroscopiques de fibres induisant en conséquence une répartition peu voire pas homogène des fibres. A une échelle plus fine, la microstructure des fibres élémentaires du lin constitue une source de variabilité [17-18]. On cite également, la chimie superficielle complexe de la fibre de lin qui complique sa compatibilité et son adhésion à la résine [19]. D'autre part, les porosités ont un effet néfaste sur les propriétés mécaniques et le taux résiduel de ces porosités, évalué dans le cas du composite de lin, est de l'ordre de 3%. Il est intéressant de noter que les porosités sont dues, d'une part, au procédé de mise en œuvre, et d'autre part aux cavités liminales existantes dans les fibres végétales [20]. Par ailleurs, le taux d'humidité dans le renfort joue un rôle prépondérant sur la qualité de l'interface Lin/Elium, sur les propriétés mécaniques du lin et en conséquence sur ceux du composite. Une mesure précise de l'évolution du taux d'humidité résiduel dans le lin exprimé en fonction du temps de séchage serait très utile. En parallèle, le choix de la température de séchage du lin est un facteur déterminant puisqu'une température élevée peut dégrader ses propriétés mécaniques [14].

3.2 Comportement vibratoire

L'analyse modale des éprouvettes est réalisée en mesurant la réponse de l'extrémité libre de ces dernières, suite à l'excitation produite à côté de la partie encastree. Ainsi, les propriétés modales ont été mesurées au moyen de la fonction de réponse en fréquence (FRF) obtenue, qui représente la réponse mesurée (amplitude) en fonction de la fréquence. Ensuite, les signaux recueillis sont traités en utilisant la méthode de Circle-Fitting [10]. Ce traitement permet de déterminer, à la fois, le facteur d'amortissement ξ et la fréquence propre à chaque mode. Le facteur de perte η est obtenu en multipliant ce facteur d'amortissement ξ par deux. Afin de comparer les propriétés amortissantes des fibres de lin et des fibres de verre, les facteurs de perte η déterminés sont rapportés par les densités des composites.

La figure 5 présente l'évolution du facteur de perte spécifique en fonction de la fréquence pour la résine d'Elium seule et des composites en lin et en verre, dont l'orientation des fibres est égale à 0° .

A l'issue de l'analyse des différentes matières, les résultats des mesures vibratoires montrent que la résine Elium-150 seule possède un caractère amortissant assez intéressant. Ce facteur affiche des valeurs maximales à faibles fréquences et diminue avec l'augmentation de celles-

ci. Ce mécanisme dissipatif est lié au comportement viscoélastique de la résine thermoplastique. Par ailleurs, les facteurs de perte spécifiques établis pour les deux composites semblent être assez stables avec l'augmentation de la fréquence. Néanmoins, celui du composite à fibres de lin est deux fois plus élevé que celui du composite à fibres de verre. Ce facteur dépend de l'orientation et de la nature du renfort. En effet, les fibres de lin présentent des caractéristiques viscoélastiques prononcées du fait de leur structure et de leur composition. Les parois concentriques sont composées des microfibrilles de cellulose et favorisent ainsi les mécanismes de friction qui dissipent l'énergie [10-21].

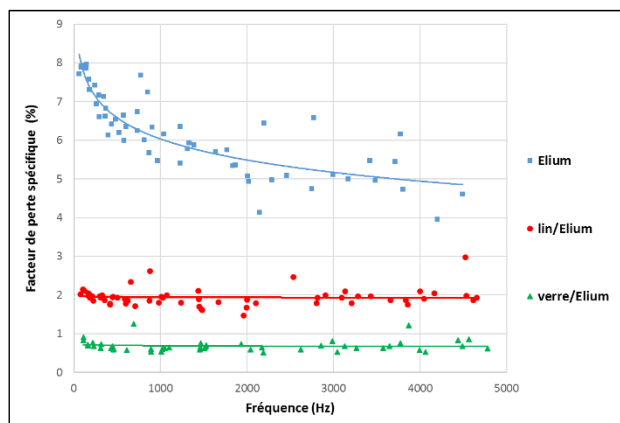


Fig. 5. Courbes du facteur de perte spécifique en fonction de la fréquence de l'Elium, et les composites lin /Elium et verre/Elium à 0°.

La figure 6 présente l'évolution du facteur de perte spécifique en fonction de l'orientation des fibres pour les deux composites en lin et en verre. On constate que ce facteur de perte évolue avec l'orientation des fibres. L'amortissement maximal est obtenu à 30° et 90° pour le composite en lin. En revanche, pour les stratifiés à base des fibres de verre l'amortissement est plus élevé lorsque le renfort est orienté à $\pm 45^\circ$. On constate également que l'amortissement des stratifiés à base des fibres de verre est le même pour les orientations 0° et 90°. Ceci conforte l'homogénéité du tissu bidirectionnel du verre et la similitude des propriétés dans les deux sens, contrairement au tissu bidirectionnel du lin.

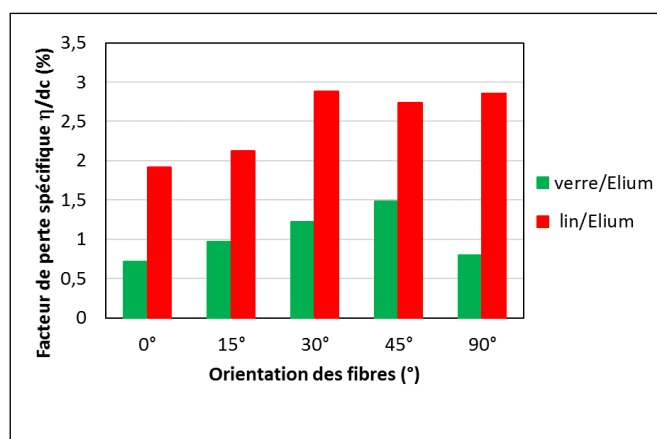


Fig. 6. Evolution du facteur de perte spécifique en fonction de l'orientation des fibres des composites lin/Elium et verre/Elium.

Les résultats de la caractérisation vibratoire des matériaux sont inversement proportionnels à ceux de la caractérisation mécanique. Il ressort que plus les propriétés mécaniques des composites sont importantes moins leurs propriétés vibratoires sont bonnes.

4. Conclusions

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le cadre de l'étude des propriétés mécanique et vibratoire des matériaux composites à base d'une résine thermoplastique renforcée dans un cas par des fibres végétales de lin et dans l'autre par des fibres de verre. L'originalité de cette étude réside dans l'utilisation d'une nouvelle résine thermoplastique liquide innovante. Grâce à sa fluidité, les matériaux composites sont mis en œuvre par infusion, un procédé plutôt réservé habituellement aux résines thermodurcissables. La résine seule et les composites en fibres de lin et en fibres de verre en différentes configurations ont été caractérisés mécaniquement en traction quasi-statique et par analyse vibratoire. L'analyse des résultats résume, d'une part, que pour un taux volumique légèrement supérieur, le composite à fibres de verre présente des caractéristiques mécaniques plus importantes que celui à fibres de lin. Pour comprendre ce constat, il serait fort intéressant de procéder à une caractérisation mécanique des tissus et des fibres élémentaires de lin afin de mieux évaluer leurs propriétés et les classer ainsi par rapport à celles synthétiques. Le recours à des observations microscopiques sur le composite permettrait de mieux apprécier l'état de l'interface fibre-matrice avant et après la sollicitation mécanique et ainsi évaluer l'état de la microstructure et explorer les mécanismes de dégradation du comportement mécanique. Un intérêt particulier peut être porté à la détermination du taux d'humidité dans le renfort. D'autre part et d'un point de vue vibratoire, cette étude a démontré la capacité d'un matériau composite à fibres de lin dans l'absorption des vibrations. Ces fibres végétales possèdent un facteur d'amortissement plus important que celui des fibres de verre quelques soit l'orientation des fibres sur un composite stratifié. Les résultats vibratoires sont en bon accord avec les résultats mécaniques. En effet plus la structure est rigide, moins elle est amortissante et réciproquement.

Remerciements

Les auteurs remercient l'association FiMaLin pour le financement de cette étude et les sociétés Arkema, Terre de Lin et Saertex pour la fourniture des différentes matières pour les composites.

Références

- [1] A. Le Duigou, P. Davies, C. Baley, « Replacement of glass/unsaturated polyester composites by flax/PLLA biocomposites: is it justified? », *Journal of Biobased Mater Bioenergy*, vol. 5, pp. 1-17, 2011.
- [2] Halada K., « Ecomaterials », *Bull Jpn Inst Metals*, 1992, 31, pp. 505-512.
- [3] Rapport de l'institut technique du lin, 2008.
- [4] A. DUREUIL, « Une structuration nécessaire de la filière des agrocomposites en France », *Le magazine des matières premières et des ingrédients renouvelables*, 2013.
- [5] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman, « Flax fibre and its composites- A review », *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 296-317, 2014.
- [6] E. BODROS, I. PILLIN, N. MONTRELAY, C. Baley, « Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications? », *Composites Science and Technology*, 2007, pp. 462-470.
- [7] M. Marzano, P. Celle, « les matériaux composites », ANFA, 2014.
- [8] C. Baley, « Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness », *Composites Part A: Applied Science and manufacturing*, pp. 939-948, 2002.
- [9] C. Baley, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1-12, 2005.
- [10] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, L. Guillaumat, « Experimental and finite elements analysis of the vibration behaviour of a bio-based composite sandwich beam », *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 466-475, 2017.
- [11] A. El-Hafidi, P.B. Gning, B. Piezel, M. Belaid, S. Fontaine, « Determination of dynamic properties of flax fibres reinforced laminate using vibration measurements », *Polymer Testing*, vol. 57, pp. 219-225, 2017.

- [12] Mondher Haggui, Zouhaier Jendli, Ali Akrouf, Abderrahim El Mahi, Mohamed Haddar, « Damage identification in flax fibre composite with thermoplastic matrix under quasi-static loading ». International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing A3M'2016. Hammamet, 19-21 December 2016, Tunisia.
- [13] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, L. Guillaumat, «Mechanical behavior and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission», Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 90, pp. 100-110, 2016.
- [14] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bourmaud, P. Davies, « influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites», Composites: Part A, vol. 43, pp. 1226-1233, 2012.
- [15] Y. Lebaupin, M. Chauvin, T-QT. Hoang, F. Touchard, A. Beigbeder «Influence of constituents and process parameters on mechanical properties of flax fibre-reinforced polyamide 11 composite». Journal of Thermoplastic Composite Materials, pp. 1-19, 2016.
- [16] F. Bensadoun, K.A.M. Vallons, L.B. Lessard, I. Verpoest, and A.W. Van Vuure, «Fatigue behaviour assessment of flax epoxy composites». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 82, pp. 253-266, 2016.
- [17] N. Martin, N. Mouret, P. Davies, C. Baley, «Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites», Industrial Corps and Products, pp. 755-767, 2013.
- [18] G. Coroller, A. Lefeuvre, A. Le Duigou, A. Bourmaud, G. Ausias, T. Gaudry, C. Baley, «Effect of flax fibres individualization on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, pp. 62-70, 2013.
- [19] H. Lilholt, A.B. Bjerre, « Composites based on jute-fibres and polypropylene matrix, their fabrication and characterization ». Proceedings of the 18th international symposium on materials science. Polymeric composites – expanding the limits. pp. 411-23, 1997.
- [20] B. Madsen, A. Thygesen, H. Lilholt, « Plant fibre composites-porosity and volumetric interaction », Composites Science and Technology, pp. 1584-1600, 2007.
- [21] F. Duc, P.E. Bourban, J.-A.E. Manson, « The role of twist and crimp on the vibration behavior of flax fiber composites ». Composites Science and Technology, Vol. 102, pp. 94-99, 2014.