

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Analyse du comportement vibratoire d'un éco-composite à différents  
niveau d'endommagement**

M. Haggui<sup>a</sup>, A. El Mahi<sup>b</sup>, Z. Jendli<sup>c</sup>, A. Akrou<sup>d</sup> et M. Haddar<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Université du Mans (LAUM), Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

<sup>b</sup>Le Mans Université, Laboratoire d'acoustique de l'UM, UMR CNRS 6613, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France

<sup>c</sup>ESTACA LAB, Parc Universitaire Laval Changé Rue Georges Charpak, 53061 Laval, France

<sup>d</sup>Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique de l'ENIS, Route de Soukra Km 4, 3038 Sfax, Tunisie

<sup>e</sup>Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, LA2MP, Route Soukra Km 4, 3038 Sfax, Tunisie  
mondher.haggui.etu@univ-lemans.fr

Cette étude présente la caractérisation vibratoire d'un matériau éco-composite stratifié composée des fibres de lin et d'une résine thermoplastique. Dans un premier temps, des essais d'analyse modale ont été effectués sur des éprouvettes unidirectionnelles saines pour différentes orientation des fibres. Ensuite, l'étude a été établie sur des échantillons sollicités en traction à différentes niveau de chargement. Enfin, une interprétation des résultats a permis de mettre en évidence l'influence d'endommagement sur le comportement vibratoire du composite. L'étude expérimental a été réalisé à l'aide d'un marteau d'impact dans le cas d'une configuration encastrée/libre. Les résultats obtenus pour les différentes éprouvettes permettent de décrire l'évolution de l'amortissement ainsi que le module d'Young en fonction de la fréquence. Ce travail a permis de montrer que l'utilisation de matrice thermoplastique renforcé de fibres de lin augmente les propriétés d'amortissement des composites qui ont montrés une sensibilité à l'introduction d'endommagement.

## 1 Introduction

Durant les dernières années, l'intérêt des scientifiques et des industriels aux composites organiques et à leur fonctionnalisation s'est accru et a occupé une place privilégiée dans le domaine de la recherche et du développement des matériaux. Ainsi, l'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les structures composites est susceptible d'apporter un fort potentiel d'innovation. En effet, l'origine naturelle justifie les avantages de biodégradabilité et la recyclabilité du renfort. L'amortissement vibratoire et l'isolation thermique et sonore constituent des fonctionnalités intégrées recherchées et fort complémentaires aux caractéristiques et propriétés mécaniques spécifiques des fibres végétales qui se trouvent comparables à celles des fibres synthétiques [1]. Néanmoins, à l'heure actuelle, nombreuses interrogations renvoient vers des mécanismes complexes et qui ne sont toujours pas complètement maîtrisés. A titre d'exemple, le comportement non-linéaire de la fibre est difficile à appréhender et à représenter sans la considération d'un aspect statistique. Aussi, à l'échelle du composite, les phénomènes d'endommagement et de rupture ainsi que leurs mécanismes dépendent majoritairement de la qualité des interfaces. La compatibilité constitue alors un critère primordial dans l'association du renfort à la matrice. D'autre part, le milieu environnement constitue un facteur déterminant et ce de par la sensibilité des différentes phases du composite aux variations de la température et à la reprise d'humidité. De surcroit, en particulier pour les biocomposites thermoplastiques, le comportement mécanique est dépendant du type de la sollicitation qu'elle soit du type quasi-statique, dynamique ou encore cyclique.

Par ailleurs, l'étude du comportement vibratoire des biocomposites s'avère fondamentale pour élargir leur champ d'applications. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'étude des propriétés d'amortissement vibratoire des composites à renfort fibres naturelles.

Dans ce contexte, Daoud et al. [2] ont étudié le comportement vibratoire de biocomposites constitué de fibre de lin et d'une résine GreenPox commercialisée par SICOMIN. Les résultats fournis montrent une importante capacité d'amortissement de ces composites en configuration unidirectionnelle (UD). En comparant des plaques Verre/Epoxy et Lin/Epoxy de même épaisseur, Prabhakaran et al. [3] ont montré que le composite renforcé de fibres de lin permet d'améliorer le coefficient d'amortissement de plus de 50%. Aussi, Monti et al. [4] ont étudié le comportement vibratoire des sandwichs et leurs constituants, plus particulièrement des peaux constituées de fibres de lin. Les résultats trouvés mettent en évidence une capacité d'amortissement de la structure intégrant les fibres de lin. Pour atteindre un meilleur compromis entre les performances mécaniques et les propriétés vibratoires, Assarar et al. [5] ont développé et caractérisé des composites hybrides constitués de fibres naturelles et synthétiques.

A travers cette étude, l'objectif est de déterminer le comportement mécanique et vibratoire d'un matériau composite à base d'une résine thermoplastique Elium renforcée en fibre de lin. Afin d'évaluer les propriétés mécaniques, des essais de caractérisation ont été menés, dans un premier temps, en traction quasi-statique jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Ensuite, les essais sont reconduits sur des éprouvettes en traction à différents niveaux de chargement sans atteindre la rupture. Les échantillons endommagés obtenus sont alors caractérisés en vibration et leurs résultats sont comparés à ceux d'échantillons sains. D'autres paramètres, tels que l'orientation des pli en UD-

0 ou [0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> ont été étudiés pour mettre en évidence leurs influences sur le facteur d'amortissement et la fréquence de résonance.

## 2 Protocoles expérimentaux

### 2.1 Matériaux et mise en œuvre

Le matériau étudié est un composite réalisé par la technique d'infusion de résine liquide. Il est basé sur l'utilisation d'une matrice thermoplastique Elium, fournie par ARKEMA, renforcée par des fibres de lin. La procédure de mise en œuvre consiste à déposer les fibres de lin séchées sous forme de voile selon la séquence d'empilement souhaitée directement sur un moule ciré sous un tissu d'arrache et d'un milieu drainant. Ensuite, l'ensemble est recouvert par une bâche étanche. L'infusion de résine est assurée par un tuyau d'entrée relié à une gaine spiralée (figure 1).

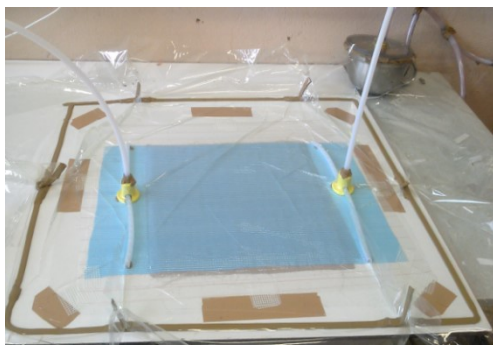


Figure 1: Mise en œuvre du composite.

Deux configurations du composite ont été élaborées et qui, une fois découpés, permettent d'obtenir des échantillons unidirectionnels à différentes orientations du renfort (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90°) ainsi que des échantillons croisés symétriques [0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>.

### 2.2 Essai mécanique

Dans le but de caractériser le matériau étudié en quasi-statique des essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction MTS universelle équipée d'un capteur d'effort de 100 kN (figure 2).



Figure 2: Essai de traction.

### 2.3 Essai de vibration

L'étude du comportement vibratoire a été réalisée à l'aide d'une analyse modale en configuration poutre encastrée-libre selon la norme ASTM E 756-98 [6]. Les échantillons sont encastrés par une de leurs extrémités. Ensuite, une excitation à l'aide d'un marteau d'impact est appliquée en un point proche du côté encastré. La réponse est mesurée du côté libre par un vibromètre laser. Les résultats, une fois analysés, permettent d'obtenir les réponses fréquentielles. Ainsi, les fréquences de résonances et les facteurs d'amortissements  $\eta$  sont évalués.

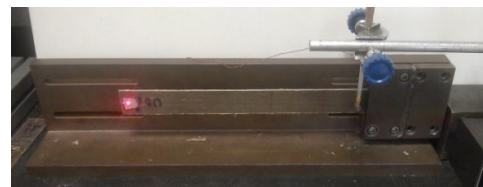


Figure 3: Dispositif expérimental.

Le coefficient d'amortissement est calculé à l'aide de la méthode de bande passante [2] (Eq1) :

$$\eta = \frac{\Delta f_i}{f_i} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (1)$$

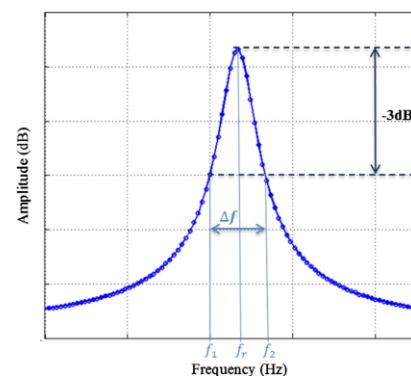


Figure 4: Méthode de la bande passante [2].

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Caractéristiques mécanique

Le comportement en traction des composites en configurations unidirectionnel UD-0 et croisé sont représentés sur la figure 5. L'allure de l'évolution de la contrainte vs. La déformation montre la présence de trois phases principales. Deux parties sont quasi linéaires et séparées par un coude. Ce comportement traduit une courte phase linéaire élastique suivie d'une non linéarité associée probablement à des mécanismes d'endommagement et de rupture microscopique. Par ailleurs, la troisième phase est linéaire et se termine par la rupture de l'échantillon.

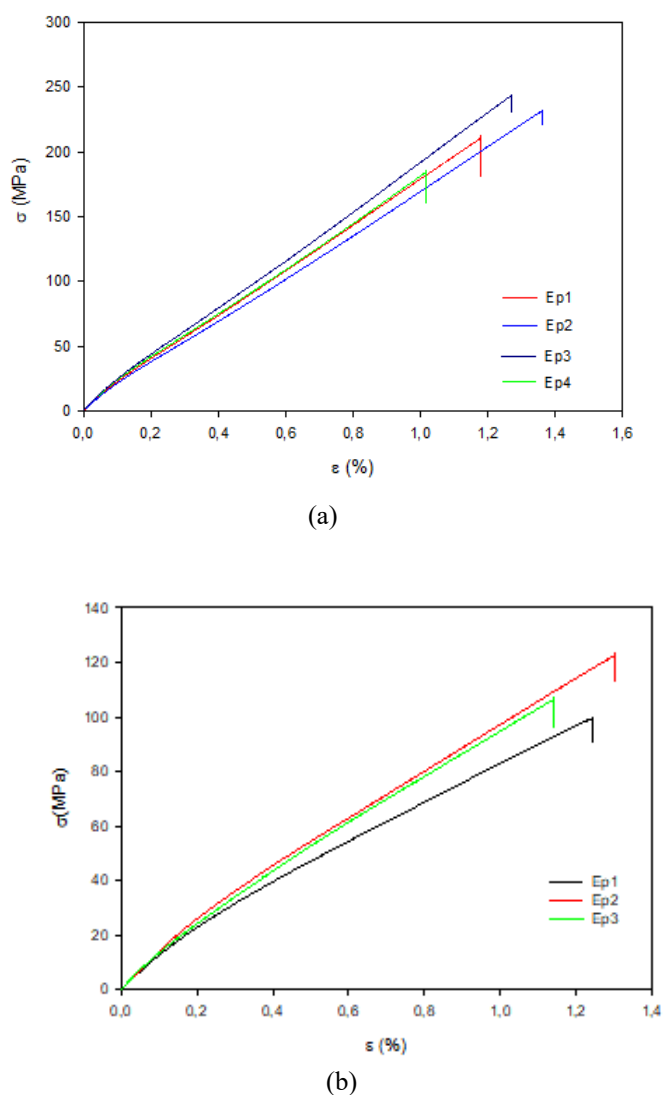


Figure 5: Comportement en traction longitudinal de composite : (a)UD-0,(b)  $[0_2/90_2]_s$ .

Le tableau 1 illustre les propriétés mécaniques des composites utilisés pour cette étude.

Tableau 1: Caractéristique mécanique de composites Elium/lin unidirectionnel et croisé [8].

Propriétés élastique		Contrainte à la rupture	
Composante	Valeur	Composante	Valeur
$E_L$ (GPa)	23	$\sigma_{Lrupt}$ (MPa)	210
$E_T$ (GPa)	3.2	$\sigma_{Trupt}$ (MPa)	7.5
$E_{45}$ (GPa)	3.65	$\sigma_{LTrupt}$ (MPa)	115
$\nu_{LT}$	0.35		

### 4 Comportement vibratoire

#### 4.1 Comportement de la matrice

Dans le but de caractériser le comportement de la matrice seule, une analyse vibratoire comparative est développée sur la résine Elium utilisée dans cette étude, ainsi que sur la résine thermodurcissable GreenPoxy.

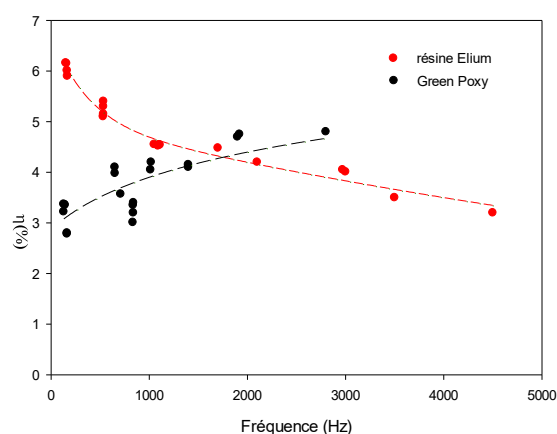


Figure 6: Comportement vibratoire des résines pures.

Les résultats obtenus pour les éprouvettes de résine sont présentés sur la figure 6. Les évolutions du facteur de perte en fonction de la fréquence sont présentées. Il apparaît que, pour la résine Elium, l'amortissement décroît ensuite il atteint une valeur quasi asymptotique contrairement à la résine GreenPoxy. En effet, les différences des structures macromoléculaires spécifiques aux polymères thermodurcissable et thermoplastique peuvent être à l'origine de ce type de comportement. L'organisation et la mobilité des chaînes moléculaires jouent un rôle primordial dans les mécanismes de dissipation de l'énergie vibratoire [7].

### 4.2 Effet de l'orientation des fibres

Des essais ont été réalisés sur des échantillons unidirectionnels à différentes orientations des fibres. Les résultats sont décrits par la variation du facteur d'amortissement en fonction de fréquence et illustrés par la figure 7.

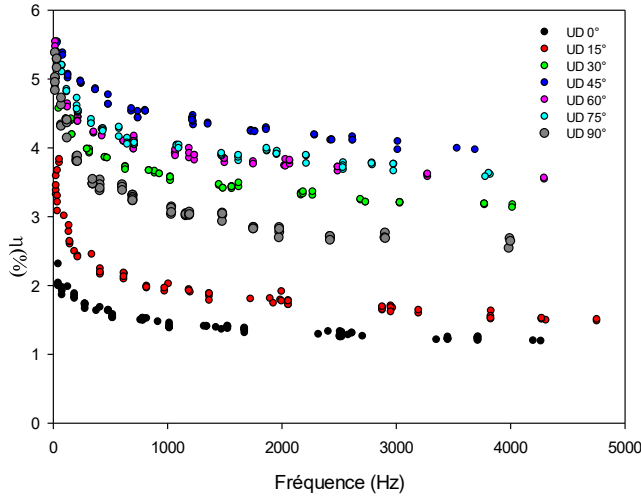


Figure 7 : Effet de l'orientation des fibres.

On remarque que le comportement vibratoire des éprouvettes dépend fortement de l'orientation des fibres. En effet, les valeurs d'amortissement les plus faibles sont enregistrées pour l'UD-0. Par contre, pour l'UD-45 les valeurs d'amortissement sont très proches de celles trouvées pour la résine seule.

La détermination des fréquences de résonance permet de déduire le module d'Young à partir de l'équation suivante :

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{e^2 C_n^2} \tag{2}$$

$\rho$  : densité du composite

$f_n$  :  $n^{\text{ème}}$  fréquence de résonance

$e$  : épaisseur de poutre

$C_1 = 0.55959; C_2 = 3.5069; C_3 = 9.8194$

$C_n = (\frac{\pi}{2})(n - 0.5)^n$  pour  $n > 3$

L'évolution du module d'Young en fonction des fréquences des différentes configurations est présentée par la figure 8.

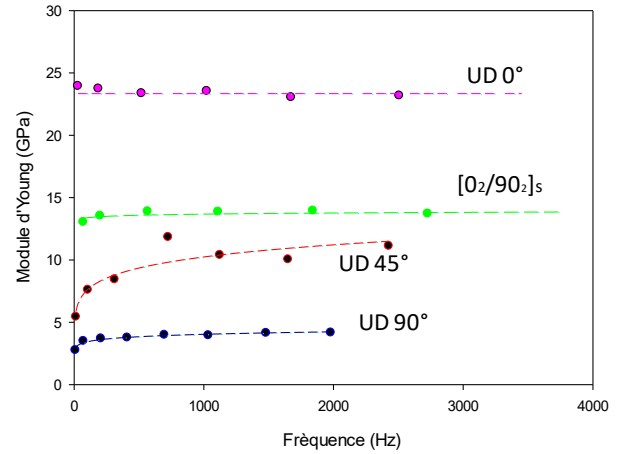
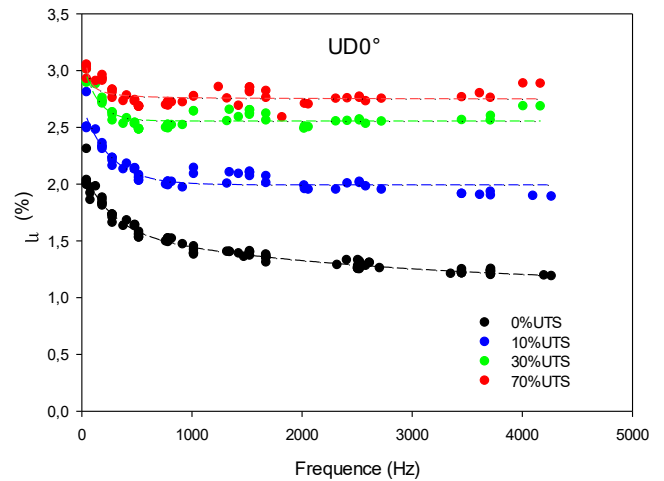


Figure 8. Evolution du module d'Young.

La figure 8 confirme que les valeurs du module d'Young obtenues au moyen des essais de vibration sont en concordance avec les résultats obtenus suite aux essais de traction statique, plus particulièrement dans le cas du composite UD-0. Pour le UD-45 et le UD-90, le module longitudinal est croissant pour les faibles fréquences ensuite, il se stabilise pour atteindre les valeurs trouvées en statique.

### 4.3 Effet de l'endommagement :

Afin d'étudier l'influence de l'endommagement sur le comportement vibratoire de composite Elium/fibre de lin, des échantillons unidirectionnels et croisés ont été sollicités en traction à différents niveaux de chargement. Ensuite, une analyse modale a été établie pour évaluer l'évolution de l'amortissement en fonction de la fréquence pour chaque niveau de chargement (figure 9).



(a)

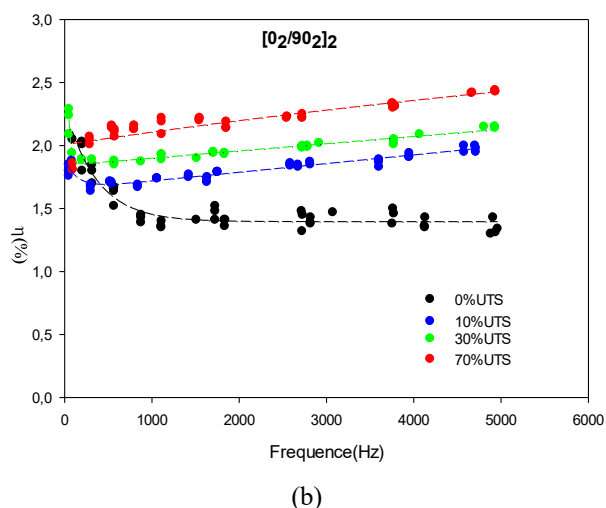


Figure 9: Effet de l'endommagement: (a) UD-0, (b)  $[0_2/90_2]_s$ .

Les résultats montrent que l'introduction de l'endommagement augmente la valeur d'amortissement. Plusieurs paramètres à différentes échelles peuvent être à l'origine de ce comportement. En effet, au cours du chargement, plusieurs mécanismes d'endommagements apparaissent tel que la fissuration matricielle, le déchaussement des fibres, le délaminage et la rupture de fibres [8]. Ces mécanismes, plus particulièrement, la fissuration matricielle créent des vides à l'intérieur du composite et favorisent l'amortissement des vibrations. La rupture de fibre semble accroître la participation de la matrice à l'effet d'amortissement.

## 5 Conclusion

Cette étude présente une analyse expérimentale du comportement mécanique et vibratoire de matériaux composites à base de résine thermoplastique Elium et de fibres naturelles de lin. Une analyse a été établie dans le cas de flexion de poutre en configuration encastree-libre. Dans un premier temps, des essais ont été menés sur la matrice constituée de résine pure. Cela a permis de déduire que les polymères thermoplastiques dissipent une importante quantité d'énergie. Ensuite, différentes configurations de composites ont été testées afin de mettre en évidence l'influence de l'orientation du renfort sur les propriétés dynamiques. Enfin, une étude de l'influence de l'endommagement sur le comportement vibratoire du composite a été établie. Les échantillons ont été sollicités à

différents niveaux de chargement en traction ensuite testés en vibration. Les résultats ont permis de mettre en évidence la contribution de l'endommagement vis-à-vis de la réponse vibratoire du matériau biocomposite.

## Références

- [1] P.Wambua, J.Ivens, I.Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Composites Science and Technology*, 63, 1259–126(2003).
- [2] H. Daoud, A. El Mahi, J-L.Rebière, M. Taktak, M. Haddar, Characterization of the vibrational behaviour of flax fibre reinforced composites with an interleaved natural viscoelastic layer, *Applied acoustics*, (2016).
- [3] S. Prabhakaran, V. Krishnaraj, M. Senthil, R. Zitoune, Sound and Vibration Damping Properties of Flax Fiber Reinforced Composites, *Procedia Engineering*, 97 :573–581, (2014).
- [4] 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*, 110, 466-475, (2017).
- [5] M.Assarar, W. Zouari, H. Sabhi, R. Ayad, and J-M. Berthelot, Evaluation of the damping of hybrid carbon flax reinforced composites, *Composite Structures*, 132, 148–154, (2015).
- [6] "ASTM E756-98 : Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials."
- [7] F. Duc, P. E. Bourban, C. J. G. Plummer, and J. E. Mnson, "Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites," *Compos. Part A*, vol. 64, pp. 115–123, (2014).
- [8] M. Haggui, A. El Mahi, Z. Jendli, A. Akrou, M. Haddar, Static and fatigue characterization of flax fiber reinforced thermoplastic composites by acoustic emission, *Applied acoustics*, (2018).