

Caractérisation du comportement vibratoire des composites renforcés par des fibres hybrides lin/carbone

Ben Ameer Mariem^{1,2},

El Mahi Abderrahim¹,

Rebiere Jean-Luc¹,

Beyaoui Moez²,

Abdennadher Moez²,

Haddar Mohamed²

¹ Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (LAUM UMR CNRS 6613)
Le Mans Université, Av. O. Messiaen 72085 Le Mans Cedex 9, France

² Laboratoire de recherche de Mécanique, Modélisation et Production (LA2MP)
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Département Génie Mécanique, Route Soukra, 3038 Sfax, Tunisie

Résumé :

Ce travail présente une étude expérimentale du comportement vibratoire des composites stratifiés à fibres hybrides lin/carbone et à matrice époxy. Le principal objectif de cette étude consiste à analyser l'effet de l'hybridation, la séquence d'empilement et l'orientation des fibres sur les propriétés dynamiques des matériaux composites à fibres lin/carbone. Les propriétés mécaniques et les facteurs de perte sont déterminés en flexion de poutres pour différentes longueurs en configuration encastree/libre. Les résultats obtenus ont montré que la position des couches de lin dans les composites hybrides joue un rôle majeur sur les propriétés dynamiques des composites.

1. Introduction

Les matériaux composites renforcés par des fibres de verre, de carbone et de Kevlar connaissent un développement continu dans tous les domaines industriels tels que la marine, l'aéronautique, le sport, etc. De nos jours, les composites renforcés par des fibres naturelles s'émergent dans l'application des matériaux composites, car elles sont écologiques et leurs ressources sont renouvelables [1]. En outre, leur pouvoir intrinsèque à dissiper l'énergie vibratoire est très important. De nombreux travaux ont été menés afin de caractériser les composites renforcés par des fibres végétales de lin, jute, chanvre, etc [2]. Yan *et al.* [3] et Monti *et al.* [4] ont évalué les caractéristiques mécaniques des composites renforcés par des fibres naturelles de lin.

La connaissance des caractéristiques mécaniques statiques et de fatigue ne sont pas suffisantes pour le développement des composites biosourcés dans les applications de haute performance. Ce développement nécessite des informations supplémentaires de leurs propriétés dynamiques, notamment l'amortissement. En effet, la dissipation d'énergie constitue un facteur essentiel dans la conception mécanique des structures. D'où un amortissement suffisant est indispensable pour réduire les vibrations des structures et éviter la rupture par fatigue. Monti *et al.* [5] et Daoud *et al.* [6] ont étudié les propriétés dynamiques des composites renforcés par des fibres de lin. Duc *et al.* [7] et Cheour *et al.* [8] ont comparé les propriétés mécaniques et les propriétés d'amortissement des composites renforcés par des fibres de carbone, de verre et de lin. Ils ont montré que les composites renforcés par des fibres de lin présentent des valeurs d'amortissement relativement plus élevées par rapport aux autres composites alors qu'ils possèdent des propriétés mécaniques plus faibles. Dans ce cadre, certaines études ont suggéré de produire des composites hybrides avec une combinaison de fibres de carbone et de lin dans la même matrice [9]. Assarar *et al.* [10] ont étudié les propriétés dynamiques des composites hybrides à fibres tissés lin/carbone dans le but d'améliorer leurs propriétés d'amortissement et réduire les vibrations tout en gardant des propriétés mécaniques relativement importantes.

En s'insérant dans cette sphère, des essais expérimentaux de vibration libre ont été réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques et les coefficients d'amortissement des composites unidirectionnels à fibres de carbone et de lin. Le but de cette analyse est d'évaluer l'effet de l'orientation, de la séquence d'empilement et de l'hybridation des fibres sur les propriétés dynamiques des composites étudiés.

2. Matériaux et protocole expérimental

1. Matériaux et procédé de mise en œuvre

Plusieurs stratifiés non hybrides et hybrides ont été préparés par imprégnation des fibres de lin unidirectionnelles de 200 g/m² et des fibres de carbone unidirectionnelles de 300 g/m² avec la résine époxy SR 1500 mélangée avec 33% du durcisseur SD 2505. Tout d'abord, les fibres ont été découpées et puis les fibres de lin ont été séchées dans une étuve pendant une heure à 110 °C. La mise en œuvre des matériaux composites est réalisée par moulage au contact sous vide par la technique dite « du sac ». Elle consiste à imprégner les différentes couches à température ambiante et les mettre sous vide entre un moule et un contre moule. L'ensemble est ensuite mis dans un sac bien étanche, sous vide avec une dépression de 0.5 bar pendant 7 heures. Les plaques obtenues sont exposées à la température ambiante pendant au moins deux jours pour s'assurer de la polymérisation complète de la résine.

Tableau 1 : Désignation des composites stratifiés non hybrides et hybrides.

Stratifié	Séquence d'empilement	Epaisseur (mm)	Fraction volumique des fibres		Densité (Kg/m ³)
			Lin (%)	Carbone (%)	
[L ₃] _s	L / L / L / L / L / L	3.1	32	0	1140
[L ₂ /C] _s	L / L / C / C / L / L	2.7	22	19	1181
[L/C ₂] _s	L / C / C / C / C / L	2.4	12	37	1266
[C/L ₂] _s	C / L / L / L / L / C	2.8	22	19	1175
[C ₂ /L] _s	C / C / L / L / C / C	2.4	12	37	1234
[C ₃] _s	C / C / C / C / C / C	2	0	56	1340

Les éprouvettes sont ensuite découpées suivant 3 orientations (0° , 45° et 90°) à l'aide d'une scie à ruban diamanté à partir des plaques de surface $400 \times 400 \text{ mm}^2$. La longueur et la largeur des éprouvettes sont respectivement de 300 mm et 25 mm et l'épaisseur dépendant du stratifié considéré.

Quatre types de stratifiés hybrides avec différentes séquences d'empilement sont présentés dans le tableau 1. Ils ont été élaborés pour étudier l'effet du type d'hybridation sur l'amortissement des composites. L'épaisseur, la fraction volumique et la densité de chaque plaque dépendent du stratifié considéré, leurs valeurs sont présentées dans le Tableau 1.

2. Dispositif expérimental

L'étude expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres pour différentes longueurs : 150, 200 et 250 mm et 3 orientations de fibres (0° , 45° et 90°). La figure 1 montre le dispositif expérimental utilisé pour étudier les vibrations des poutres en configuration encastrée/libre ; les poutres sont encastrées en une extrémité et libre à l'autre. L'éprouvette est excitée en un point à l'aide d'un marteau d'impact PCB 070A02 et la réponse est détectée en un autre point à l'aide d'un vibromètre laser Polytec. Ce vibromètre est constitué d'une tête optique OFV 303 associée à un contrôleur OFV 3001.

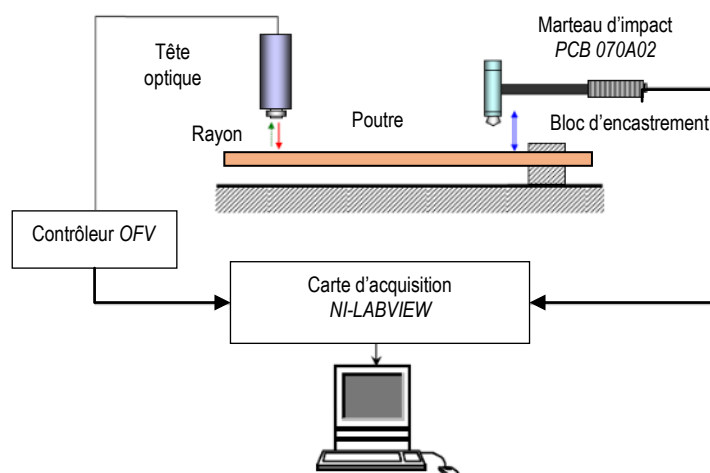


Figure 1. Dispositif expérimental dans le cas d'une excitation par impact

Les signaux d'excitation de la poutre et de sortie du vibromètre laser sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux développé sous LABVIEW. Cet analyseur est constitué d'une carte d'acquisition et de traitement associée à un logiciel de contrôle et traitement des signaux. Ce système effectue l'acquisition des signaux, contrôle les conditions d'acquisition (sensibilité, bande passante, conditions de déclenchement, etc), effectue le traitement des signaux (transformée de Fourier, réponse en fréquence, etc). Les signaux et les traitements associés sont ensuite sauvegardés pour des post-traitements.

La figure 2 donne un exemple de la transformée de Fourier de la réponse à une excitation impulsionnelle. Cette réponse fait apparaître les pics correspondant aux fréquences propres de vibration. Il existe différentes méthodes pour mesurer les propriétés modales à partir de la FRF obtenue. La méthode couramment employée est celle de la bande passante à -3 dB (HPB method), illustrée sur la figure 3. Cette méthode est utilisée par El Mahi *et al.* [11], elle consiste à analyser chaque pic de résonance de la Fonction Réponse en Fréquence (FRF) dans une représentation amplitude/fréquence. La fréquence de résonance f_i du mode i correspond à la fréquence pour laquelle l'amplitude de la réponse est maximale. Par la suite, le coefficient d'amortissement modal η_i associé à ce mode i peut être calculé par l'équation suivante :

$$\eta_i = \frac{\Delta f_i}{f_i} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (1)$$

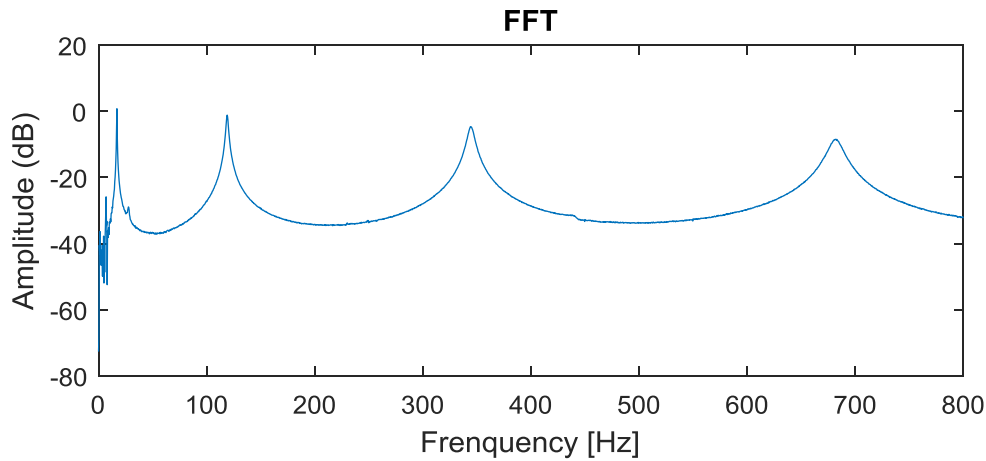


Figure 2. Exemple de fonction de réponse en fréquence

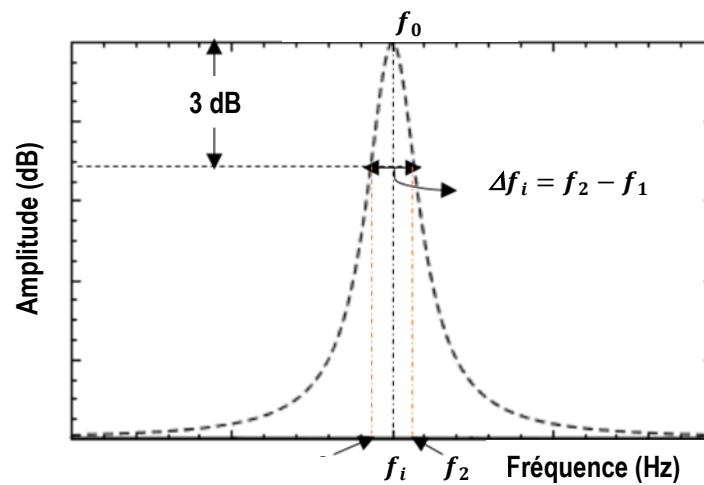


Figure 3. Illustration de la méthode de bande passante à -3dB

En outre, la mesure des fréquences propres conduit à l'estimation du module de flexion E_{fx} de poutres selon l'équation suivante :

$$E_{fx} = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{h^2 C_n^2} \quad (2)$$

Avec E_{fx} : module de flexion de la poutre (GPa), ρ : densité du composite (kg/m^3), l : longueur de la poutre (m), f_n : fréquence de résonance du mode n (Hz), h : l'épaisseur du composite (m) et C_n : constantes données en fonction des conditions aux limites (encasturé/libre) pour le mode de flexion n , avec $C_1 = 0.55959$, $C_2 = 3.5069$, $C_3 = 9.8194$ and $C_n = (\pi/2)(n-0.5)^2$, pour $n > 3$.

3. Résultats et discussion

1. Caractérisation du comportement vibratoire des composites renforcés par des fibres de lin et de carbone

Les propriétés mécaniques et les facteurs d'amortissement sont déterminés à partir des essais de vibration en flexion libre des poutres à fibres. Les modules de flexions (E_L , E_{45} et E_T) sont déterminés en fonction de la fréquence de résonance obtenue par l'analyse modale expérimentale des poutres orientées à 0° , 45° et 90° . La figure 4 montre les résultats obtenus des modules de flexion en fonction de la fréquence. Ce résultat met en

évidence l'importance des propriétés mécaniques des composites à fibres de carbone par rapport aux composites à fibres de lin.

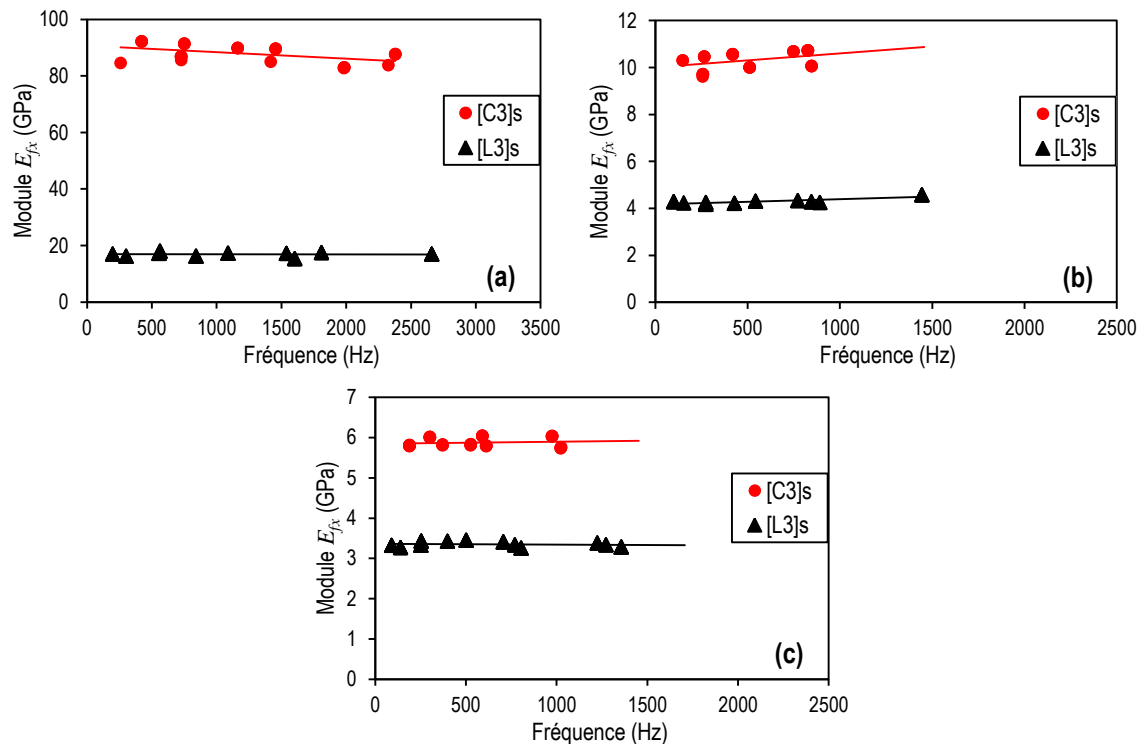


Figure 4. Evolution des modules élastiques des composites à fibres de lin et de carbone en fonction de la fréquence : a) E_L , b) E_{45} et c) E_T

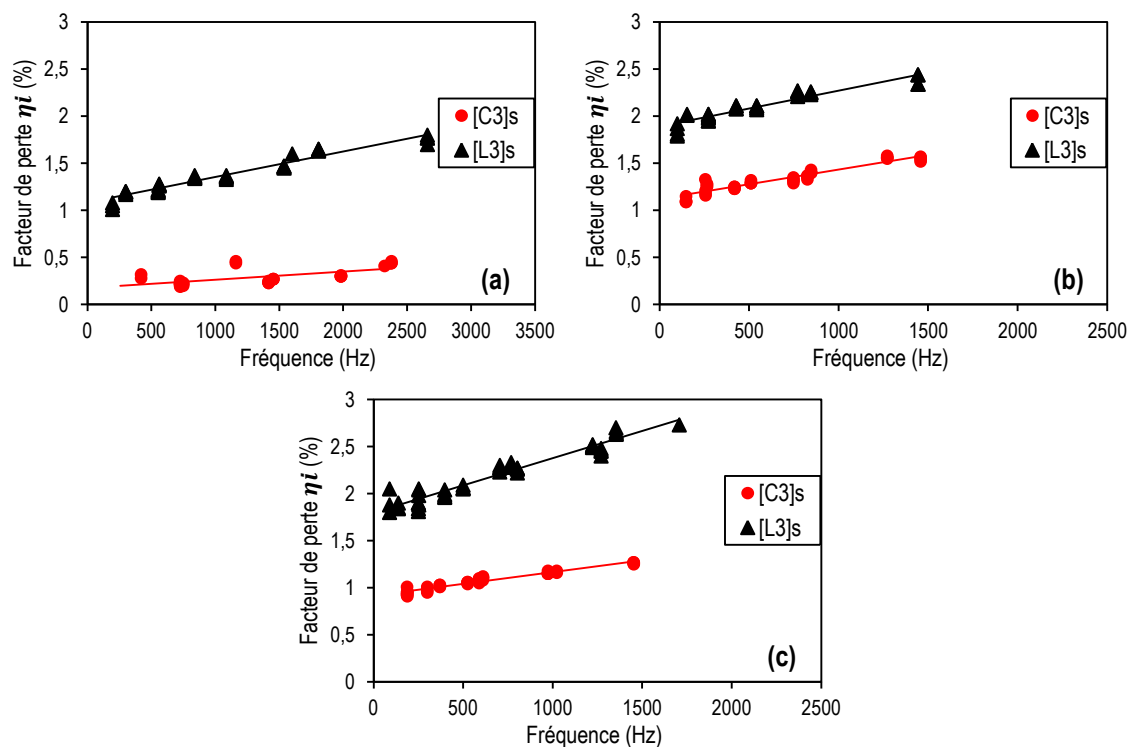


Figure 5. Variation de l'amortissement en fonction de la fréquence pour les composites à fibres de lin et de carbone pour l'orientation des fibres : a) 0° , b) 45° et c) 90° .

La figure 5 présente la variation du facteur de perte des composites en fonction de la fréquence pour les trois orientations des fibres (0° , 45° et 90°). Les résultats obtenus montrent que le facteur de perte augmente avec la fréquence. Pour les deux orientations 45° et 90° , les valeurs des facteurs de perte sont plus élevées que ceux pour une orientation des fibres 0° . En comparant les facteurs de pertes des deux composites, on constate que les facteurs de pertes des composites à fibres de lin sont plus élevés que ceux des composites à fibres de carbone. Malgré ses bonnes propriétés mécaniques, les composites à fibres de carbone présentent des facteurs de perte très faible pour les trois orientations. Cette différence pourrait être attribuée aux différents mécanismes de frottement intrinsèques des fibres de lin. De plus, elle peut être attribuée aux phénomènes d'adhésion fibre/matrice pour les deux matériaux.

2. Caractérisation du comportement vibratoire des composites renforcé par des fibres hybrides lin/carbone

La figure 6 compare les résultats déduits des essais expérimentaux menés sur différentes séquences d'empilement des stratifiés hybrides. Elle donne la variation du module de flexion en fonction de la fréquence pour les trois orientations des fibres (0° , 45° et 90°). Pour les trois orientations des fibres, le module de flexion augmente avec la teneur en fibres carbone plus particulièrement lorsque les couches de carbone sont placées en tant que couches externes des stratifiés hybrides. A titre d'exemple, les stratifiés $[L/C_2]_s$ et $[C_2/L]_s$ ont une teneur en fibres de carbone de l'ordre 37%, pour l'orientation des fibres à 0° , à 1000 Hz, le module du stratifié $[L/C_2]_s$ a augmenté de 160% par rapport au stratifié à fibres de lin $[L_3]_s$, alors que celui du stratifié $[C_2/L]_s$ a augmenté de 400%.

La figure 7 présente les résultats obtenus des facteurs de perte en fonction de la fréquence. Elle compare les valeurs des composites à fibres unidirectionnelles de lin, de carbone et les différentes séquences d'empilement des composites hybrides. Ces résultats montrent que l'amortissement des stratifiés $[L_2/C]_s$ et $[L/C_2]_s$ est légèrement inférieur à celui de $[L_3]_s$ pour les différentes orientations. En effet, l'énergie est dissipée essentiellement par les couches extérieures de lin et la diminution de l'amortissement est attribuée au remplacement des couches internes par des couches de carbone.

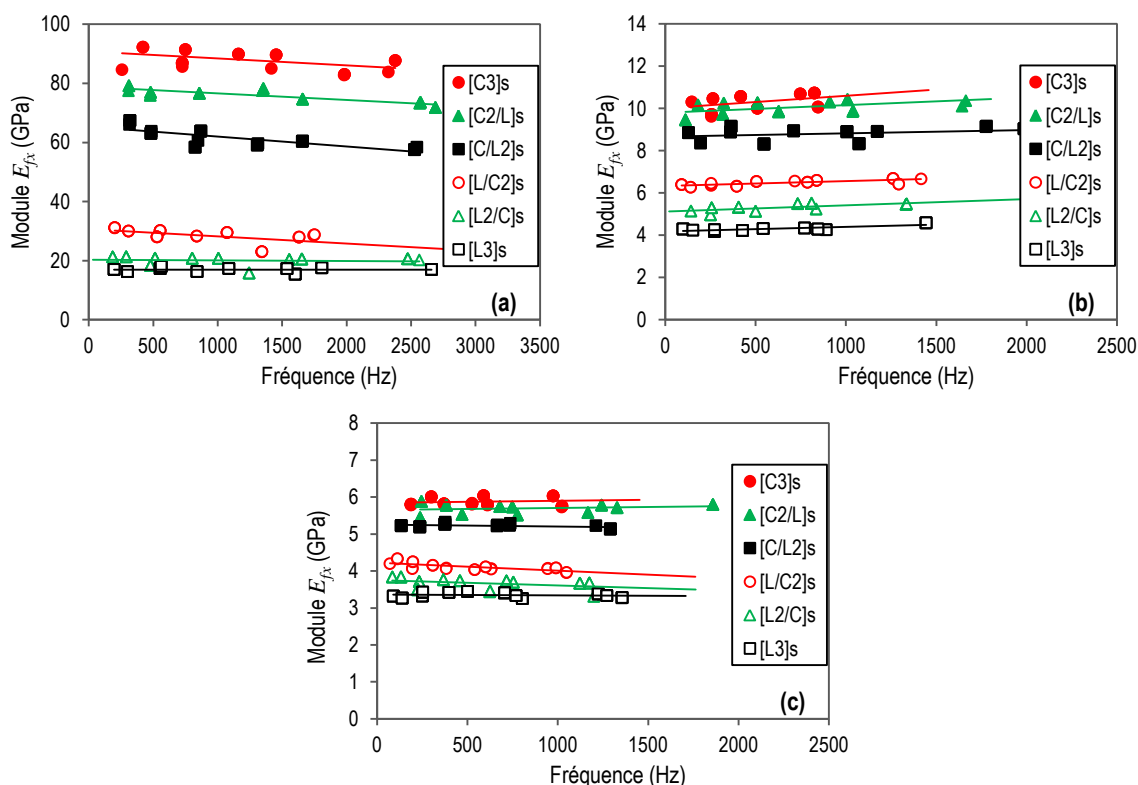


Figure 6. Evolution des modules élastiques des composites à fibres hybrides lin/carbone en fonction de la fréquence : a) E_x , b) E_{45} et c) E_T .

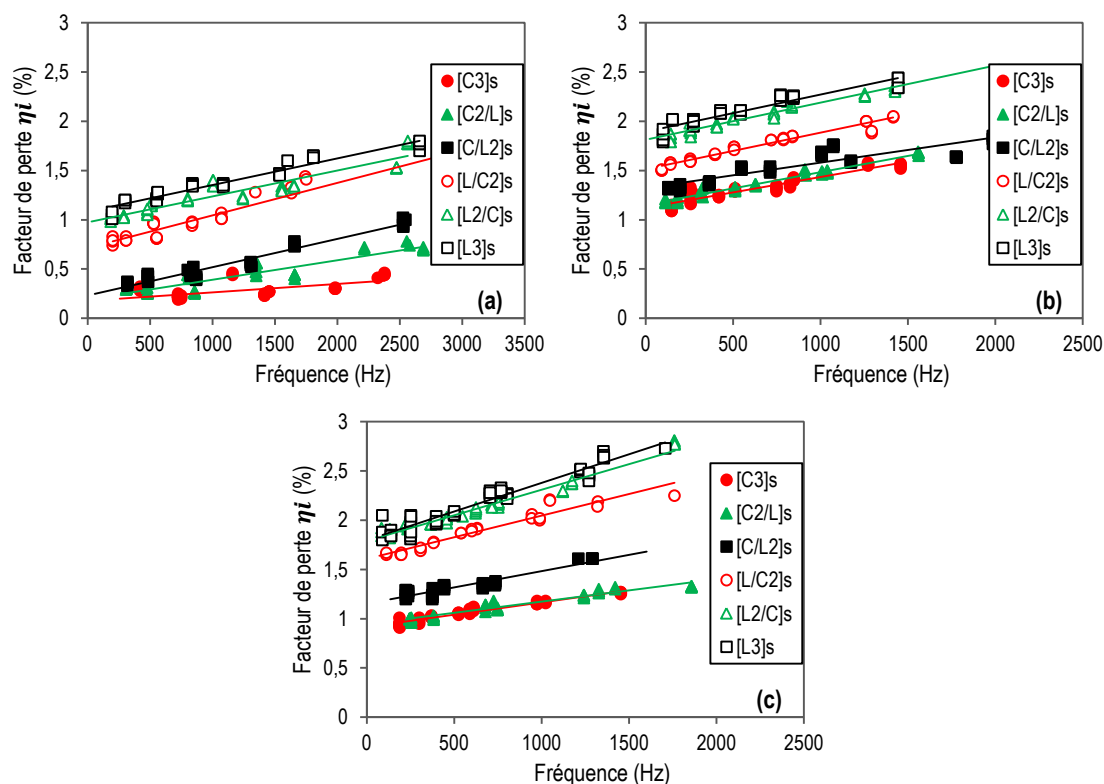


Figure 7. Variation de l'amortissement en fonction de la fréquence pour les composites à fibres hybrides lin/carbone pour l'orientation des fibres : a) 0°, b) 45° et c) 90°.

Néanmoins, l'amortissement des stratifiés $[C_2/L]_s$ et $[C/L_2]_s$ est légèrement supérieur à celui du stratifié $[C_3]_s$ pour les différentes orientations. Ce phénomène résulte essentiellement de la dissipation d'énergie par les couches de carbone extérieures et au remplacement des couches internes par des couches de lin.

4. Conclusion

Cette étude présente les résultats expérimentaux des propriétés dynamiques des stratifiés hybrides de lin et de carbone. Afin de mettre en évidence l'effet de la séquence d'empilement, l'hybridation et l'orientation des fibres sur la rigidité à la flexion et l'amortissement des stratifiés, différents stratifiés non-hybrides et hybrides ont été testés en vibration en flexion de poutres en configuration encastree/libre. Les propriétés dynamiques de ces stratifiés ont été évaluées en utilisant des poutres à fibres unidirectionnelles. Les facteurs de perte ont été identifiés en utilisant la méthode de la bande passante à -3dB.

Les résultats obtenus montrent que les coefficients d'amortissement des stratifiés à fibres de lin sont plus élevés que ceux des composites à fibres de carbone, alors que les propriétés mécaniques sont plus importantes pour les composites à fibres de carbone. Les propriétés dynamiques et mécaniques obtenues dépendent de la séquence d'empilement et la position des couches de lin et de carbone. Enfin, il a été démontré que le remplacement des couches de carbone par des couches de lin améliore considérablement son amortissement tout en diminuant son module de flexion.

5. Références

- [1] PERVAIZ Muhammad, SAIN Mohini M. *Carbon storage potential in natural fibre composites*. Resources, Conservation and Recycling 39, 325–40, 2003.
- [2] Baley C. *Renforcement des polymères par des fibres végétales*. Revue des composites et matériaux avancés. Vol. 16. N°1/2006.
- [3] YAN Libo, CHOUW Nawawi, JAYARAMAN Krishnan. *Flax fibre and its composites – a review*. Composite Part B 56, 296–317, 2014.
- [4] MONTI Arthur, EL MAHI Abderrahim, JENDLI Zouhaier, GUILLAUMAT Laurent. *Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission*. Composite Part A 90, 100–10, 2016.

- [5] MONTI Arthur, EL MAHI Abderrahim, JENDLI Zouhaier, GUILLAUMAT Laurent. *Experimental and finite elements analysis of the vibration behaviour of a bio-based composite sandwich beam*. Composite Part B 110, 466–475, 2017.
- [6] DAOUD Hajer, REBIÈRE Jean Luc, MAKNI Amine, TAKTAK Mohamed, EL MAHI Abderrahim, HADDAR Mohamed. *Numerical and Experimental Characterization of the Dynamic Properties of Flax Fiber Reinforced Composites*. International Journal of Applied Mechanics, doi: 10.1142/S175882511650068X, 2016.
- [7] DUC Fabien, BOURBAN Pierre Etienne, Manson Jan Anders E. *Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites*. Composite Part A 64, 115–23, 2014.
- [8] CHEOUR Khoulood, ASSARAR Mustapha, SCIDA Daniel, AYAD Rezak, GONG Xiao Lu. *Identification des coefficients d'amortissement de matériaux composites à fibres végétales*. 1ère Conférence Euro Maghrébine des Bio Composites, 28-31 mars 2016, Marrakech.
- [9] Dhakal H N, Zhang Z Y, Guthrie R, MacMullen J, Bennett N. *Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties*. Carbohydrate Polymers 96, 1–8, 2013.
- [10] ASSARAR Mustapha, ZOUARI Wajdi, SABHI Hamid, AYAD Rezak, BERTHELOT Jean Marie. *Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites*. Composite Structures 132, 148–154, 2015.
- [11] EL MAHI Abderrahim, ASSARAR Mustapha, SEFRANI Younes, BERTHELOT Jean Marie. *Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates*. Composites: Part B 39, 1069–1076, 2008.