

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



**Propriétés Dynamiques des Composites Stratifiés à Fibres Hybrides
Lin/Carbone**

M. Ben Ameer^a, J.-L. Rebiere^a, A. El Mahi^a, M. Beyaoui^b, M. Abdennadher^b et M.
Haddar^b

^aLe Mans Université, Laboratoire d'acoustique de l'UM, UMR CNRS 6613, Av. O. Messiaen, 72085 Le
Mans, France

^bEcole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, LA2MP, Route Soukra Km 4, 3038 Sfax, Tunisie
mariam.ben_ameur.etu@univ-lemans.fr

Les composites en fibres de lin ont fait leur preuve dans le domaine de la dynamique en présentant des performances élevées en amortissement des vibrations et l'amortissement des vibrations des composites en fibres de carbone est nettement moins important. De ce fait, l'objectif de cette étude consiste à améliorer le comportement dynamique en exploitant la technique de l'hybridation. Dans ce contexte, des essais expérimentaux sont réalisés sur des matériaux composites stratifiés en fibres hybrides lin/carbone avec une résine époxyde pour étudier l'effet de l'hybridation et de l'orientation des fibres. Des stratifiés non hybrides (lin seul et carbone seul) et hybrides avec différentes séquences d'empilement ont été fabriqués par moulage sous vide au LAUM. Des essais d'analyse modale ont été effectués dans le cas de vibration en flexion sur des poutres en configuration encastree/libre. Ces essais ont été menés sur des poutres unidirectionnelles découpées dans une plaque avec les orientations de fibres suivantes : 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° et 90°. Les poutres excitées à l'aide d'un marteau d'impact ont permis de mesurer la fréquence propre et l'amortissement modal des matériaux étudiés. Les résultats obtenus montrent que les propriétés d'amortissement sont plus intéressantes lorsque la fraction volumique en fibre de lin augmente.

1 Introduction

Les matériaux composites en fibres synthétiques sont largement utilisés dans plusieurs applications structurelles comme l'aéronautique, le sport et les loisirs. Au cours des dernières décennies, les chercheurs se sont de plus en plus intéressés à l'utilisation de composites biosourcés [1]. Les composites en fibres naturelles sont écologiques, biodégradables et leur disponibilité est illimitée. De plus, en raison de leur faible densité, ils présentent des propriétés spécifiques relativement intéressantes. Ainsi, les fibres végétales peuvent constituer une alternative aux fibres synthétiques [2]. Les composites en fibres de lin sont les composites biosourcés avec ressource locale les plus intéressants qui ont été étudiés. Yan et al. [3] et Monti et al. [4] ont étudié les caractéristiques mécaniques des composites en fibres de lin.

En plus des propriétés mécaniques, les propriétés dynamiques sont devenues un facteur important pour les applications de haute performance. En effet, l'amortissement qui est la dissipation d'énergie dans la structure représente une caractéristique importante du comportement dynamique. Cette dissipation d'énergie dépend de la constitution du matériau tel que le comportement viscoélastique de la fibre et de la matrice, l'orientation de la couche, la séquence d'empilement, etc [5].

Duc et al. [6] ont étudié les propriétés mécaniques et dynamiques des composites de fibre de verre, de lin et de carbone. Ils ont constaté que les composites de fibre de carbone présentent une performance plus élevée pour les propriétés mécaniques, mais un comportement d'amortissement insuffisant par rapport aux composites de fibres de lin.

Dans le but d'améliorer les propriétés dynamiques des composites en fibres de carbone, certaines études récentes ont proposé d'élaborer des composites hybrides avec une combinaison de fibres de carbone et de lin dans la même matrice [7]. Flynn et al. [8] ont étudié le comportement mécanique des composites hybrides de lin et de carbone.

Dans ce contexte, le but de ce travail est d'évaluer l'effet de l'orientation et de l'hybridation des fibres sur les propriétés dynamiques des composites unidirectionnels en fibre de carbone et de lin. L'évolution du facteur d'amortissement en fonction de la fréquence sera donc déterminée à partir des essais expérimentaux d'analyse modale.

2 Matériau et mise en œuvre

Les matériaux étudiés sont des stratifiés à en fibres de carbone, des stratifiés à en fibres de lin et des stratifiés à fibres hybrides lin/carbone, la matrice utilisée est époxy. Ces matériaux sont élaborés à partir d'un tissu de fibres de carbone unidirectionnel et d'un voile de fibres de lin unidirectionnel supporté dans une résine époxy SR 1500 qui est mélangée avec le durcisseur SD 2505. La masse surfacique des fibres unidirectionnelles de carbone et de lin étaient de 300 g/m² et 200 g/m², respectivement. Les différentes séquences d'empilement sont constituées de 6 couches orientées dans la direction des fibres. Elles sont présentées dans le tableau 1. Les plaques composites (300x300 mm²) ont été fabriquées en utilisant un procédé de moulage sous vide. Elles ont été durcies à température ambiante (20 °C) et à une dépression de 50 kPa en utilisant un procédé de moulage au contact sous vide pendant 7 heures.

Des éprouvettes rectangulaires ayant une longueur de 300 mm et une largeur de 25 mm ont été découpées des plaques stratifiées avec une scie à diamant à grande vitesse. Afin d'éviter l'absorption d'humidité, aucun fluide de lubrification n'a été utilisé lors de la découpe des pièces. Après la découpe, les bords ont été légèrement polis avec du papier de verre fin.

Tableau 1: Séquences d'empilement étudiées

Stratifiés	Séquence d'empilement	Épaisseur (mm)	Fraction volumique des fibres	
			Lin (%)	Carbone (%)
[C ₃] _s	[C/C/C/C/C/C]	2	0	56
[C ₂ /L] _s	[C/C/L/L/C/C]	2.4	12	37
[C/L ₂] _s	[C/L/L/L/L/C]	2.8	22	19
[L/C ₂] _s	[L/C/C/C/C/L]	2.4	12	37
[L ₂ /C] _s	[L/L/C/C/L/L]	2.7	22	19
[L ₃] _s	[L/L/L/L/L/L]	3.1	32	0

3 Protocole expérimental

Pour évaluer le comportement vibratoire des éprouvettes composites stratifiées, des essais de vibration en flexion libre ont été effectués sur des poutres. Les poutres ont été testées en une configuration encastree-libre conformément à la norme ASTM E 756-98. Pour prendre en compte les sources de variabilité (matériaux, élaboration, mesures, etc),

trois éprouvettes ont été testées pour chaque configuration. Les éprouvettes sont excitées avec un marteau d'impact (PCB 070A02) à côté de l'extrémité encastrée. Un vibromètre laser (OFV 303) a été utilisé pour mesurer le déplacement à l'extrémité libre de la poutre. Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans la Figure 1.

Un analyseur de signaux dynamique développé par LabVIEW numérise et traite les signaux d'excitation et les signaux de réponse. Cet analyseur est associé à un logiciel de contrôle et traitement des signaux. Ce système effectue l'acquisition des signaux, contrôle les conditions d'acquisition et l'analyse des signaux. Les facteurs d'amortissement ont été dérivés de la transformée de Fourier de la fonction de réponse en fréquence à une entrée impulsionnelle. Les fréquences naturelles et les coefficients d'amortissement modaux ont été déterminés par la méthode de la bande passante à -3 dB (HPB method), présentée dans la Figure 2. Cette méthode est utilisée avec MATLAB [5,9,10]. Pour chaque mode de flexion, le facteur d'amortissement a été calculé en utilisant l'équation suivante :

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

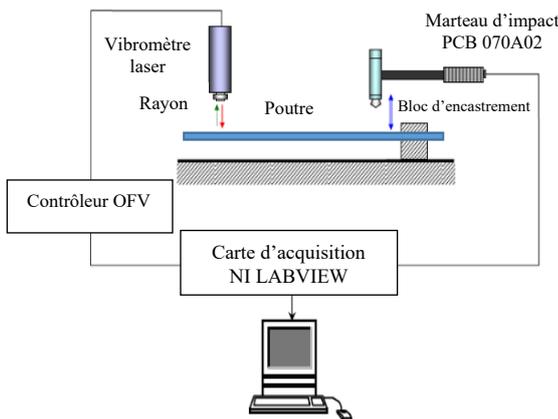


Figure 1 : Dispositif expérimental.

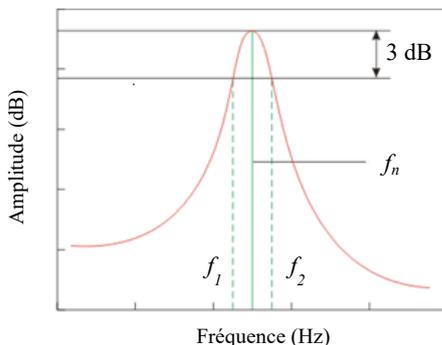


Figure 2 : Illustration de la méthode de la bande passante à -3 dB.

4 Résultats et discussion

Les essais expérimentaux de vibration libre ont été effectués sur des poutres à fibres unidirectionnelles (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° et 90°) et pour trois longueurs différentes: 150, 200 et 250 mm afin d'obtenir une variation dans les

valeurs de fréquences. Chaque poutre testée avait une largeur nominale de 25 mm et une épaisseur nominale donnée dans le tableau 1. Pour chaque poutre, les mesures sont reportées du deuxième au cinquième mode de flexion. Le premier mode n'a pas été retenu vu les difficultés des mesures d'amortissement pour ce mode. Ces difficultés pouvant être attribuées à l'imperfection et le frottement à l'extrémité serrée.

La figure 3 présente l'évolution de la fréquence en fonction de l'orientation des fibres pour les quatre modes de vibration étudiés des composites à fibres de lin $[L_3]_s$ et des composites à fibres de carbone $[C_3]_s$. Pour un mode donné, la fréquence diminue avec l'augmentation de l'angle caractérisant l'orientation des fibres. En effet, la fréquence propre est proportionnelle à la rigidité du matériau qui est plus élevée lorsque les fibres sont orientées à 0° . De plus, on observe que les fréquences propres pour le stratifié carbone sont supérieures à celles du stratifié lin pour les trois orientations (0° , 15° et 30°) alors qu'elles sont inférieures pour les quatre orientations (45° , 60° , 75° et 90°).

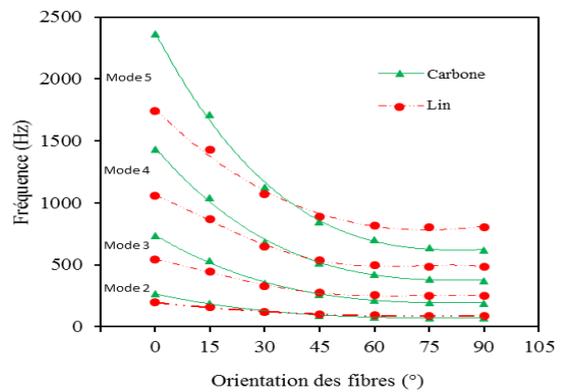


Figure 3 : Variation de la fréquence en fonction de l'orientation des fibres pour une poutre de longueur 250mm.

L'évolution des coefficients d'amortissement en fonction de la fréquence des stratifiés non-hybrides $[L_3]_s$, $[C_3]_s$ et hybrides (lin/carbone) pour trois directions de fibres (0° , 45° et 90°) est présenté sur la figure 4. Les résultats obtenus sont pour les différentes longueurs de poutres. Pour une direction de fibre donnée, les coefficients d'amortissement augmentent avec la fréquence pour les six Séquences d'empilement étudiées. De plus, les coefficients d'amortissement des stratifiés de fibres de lin sont significativement plus élevés que les coefficients d'amortissement des stratifiés de fibres de carbone. Ces différences de valeurs des facteurs de perte entre les composites de lin et de carbone peuvent être attribuées à la nature viscoélastique et architecturale des fibres de lin, l'interface entre les fibres et l'interface entre les fibres et la matrice.

D'après les travaux de Duc et al. [6], ces différences sont essentiellement dues à la structure architecturale de la fibre de lin. En effet, la structure de la fibre de lin favorise la dissipation de l'énergie par le frottement de la paroi intracellulaire entre la cellulose et l'hémicellulose dans chaque paroi cellulaire et le frottement de la paroi inter-cellulaire entre les parois cellulaires.

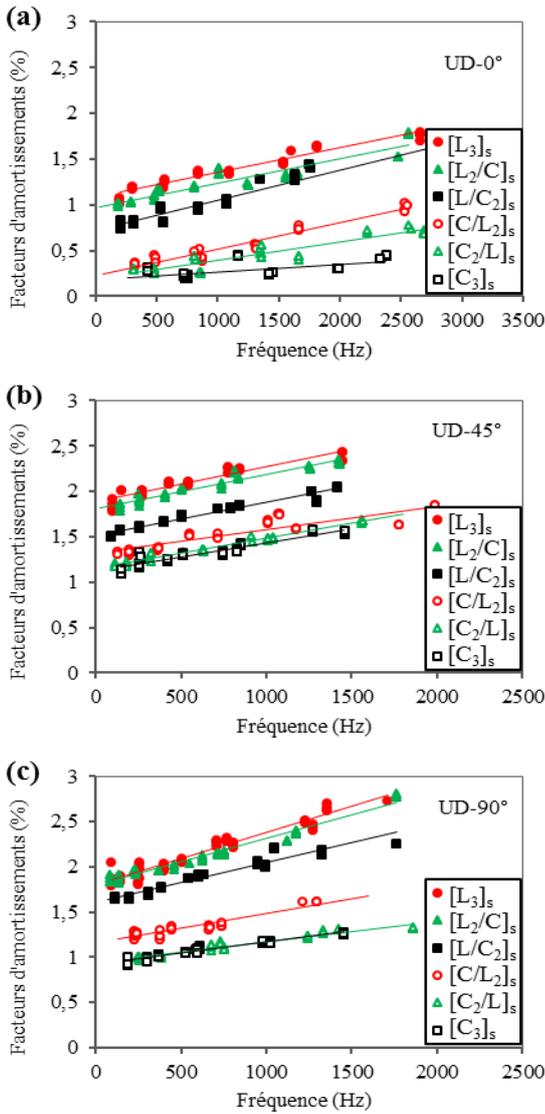


Figure 4 : Evolution de l'amortissement en fonction de la fréquence pour les composites à fibres non hybrides et hybrides (lin/carbone) orienté à : a)0°, b)45° et c)90°.

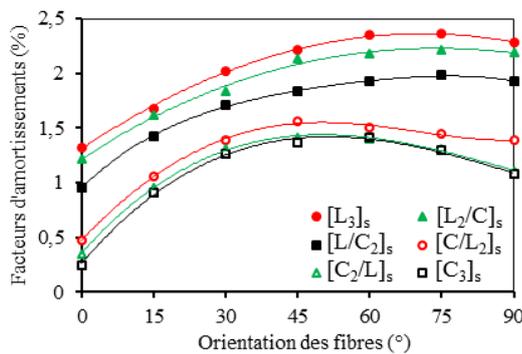


Figure 5 : Comparaison entre les facteurs d'amortissement des composites à fibres non-hybrides et hybrides (lin/carbone) en fonction de l'orientation des fibres à 800 Hz.

Pour une fréquence donnée, à 800 Hz, la figure 5 montre une comparaison entre les résultats obtenus pour le facteur d'amortissement en fonction de l'orientation des fibres pour les composites en fibres unidirectionnels de lin $[L_3]_s$, les

composites en fibres unidirectionnels de carbone $[C_3]_s$ et les composites en fibres hybrides (lin/carbone). A partir de l'orientation 30° des fibres, les résultats font apparaître un facteur d'amortissement élevé. Ce fait peut être justifié par l'effet viscoélastique de la matrice. D'autre part, l'amortissement pour les stratifiés $[L_2/C]_s$ et $[L/C_2]_s$ est légèrement inférieur à celui de $[L_3]_s$ pour les différentes directions. En effet, l'énergie est essentiellement dissipée par les couches externes de lin et la diminution de l'amortissement est attribuée au remplacement des couches internes par des couches de carbone.

En revanche, l'amortissement pour les stratifiés $[C_2/L]_s$ et $[C/L_2]_s$ est légèrement supérieur à celui de $[C_3]_s$ pour les différentes directions. Ce fait résulte essentiellement de la dissipation d'énergie par les couches externes de carbone et l'augmentation de l'amortissement est expliquée par le remplacement des couches internes par des couches de lin.

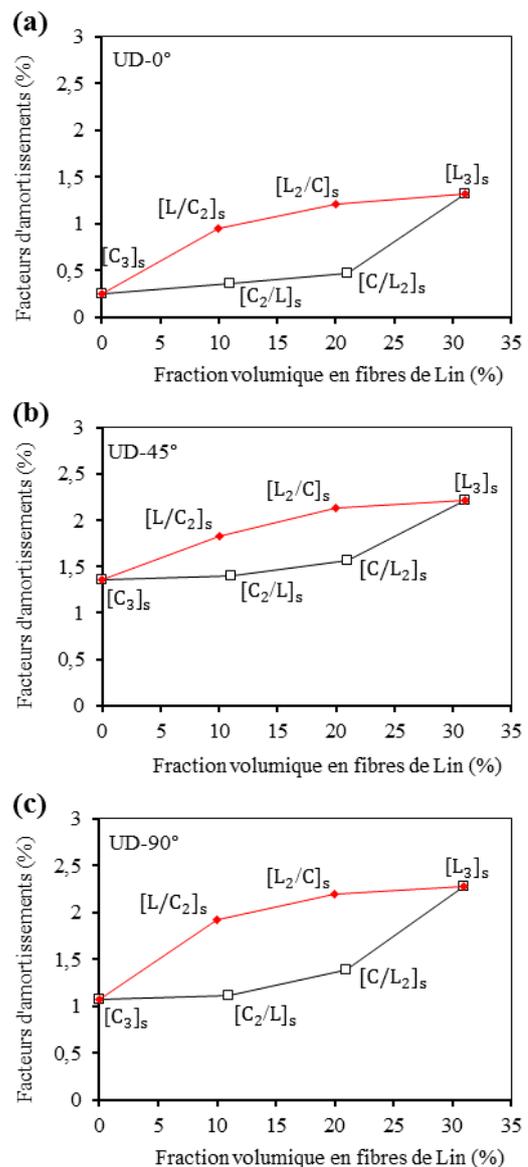


Figure 6 : Evolution du facteur d'amortissement en fonction de la fraction volumique en fibre de Lin pour les six séquences d'empilements à 800 Hz pour les différentes orientations de fibres : a) 0°, b) 45° et c) 90°.

Afin de mieux illustrer l'influence de l'hybridation, la figure 6 rapporte l'évolution des facteurs d'amortissement

en fonction de la fraction volumique en fibres de lin à 800 Hz pour les trois directions des fibres (0°, 45° et 90°). On observe que le facteur d'amortissement augmente lorsque la teneur en fibres de lin augmente.

De plus, pour la même teneur volumique en fibres de lin, on observe que l'amortissement dans les stratifiés hybrides avec des couches externes de lin est nettement plus élevé que l'amortissement dans les stratifiés hybrides avec des couches internes de lin.

5 Conclusion

Cette étude présente une caractérisation du comportement vibratoire des composites à fibres non-hybrides et hybrides lin-carbone. L'influence de l'hybridation, de la séquence d'empilement et de l'orientation des fibres sur l'amortissement des stratifiés a été étudiée. Une analyse expérimentale a été réalisée sur des poutres unidirectionnelles en utilisant la technique d'impulsion. Les fréquences modales ont été déduites de la réponse en fréquence de Fourier (FRF) et les facteurs de perte ont été mesurés à l'aide de la méthode de la bande passante à -3 dB.

Les résultats expérimentaux obtenus pour les facteurs d'amortissement présentent une augmentation significative de l'amortissement avec la fréquence. En outre, la direction des fibres a un effet considérable sur le facteur d'amortissement. Également, il a été démontré que les facteurs de perte des stratifiés de lin sont supérieurs aux facteurs de perte des stratifiés de carbone et ceci pour toutes les directions.

La comparaison entre les résultats obtenus des composites non hybrides et hybrides montrent que la séquence d'empilement des couches en fibres de carbone et de lin joue un rôle majeur sur le facteur d'amortissement. De plus, il a été observé que les propriétés dynamiques dépendent aussi de la direction et de la fraction volumique en fibres de lin et de carbone.

Références

- [1] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, M. Sain, Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, *Progress in Polymer Science*, doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003 (2012).
- [2] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, doi:10.1016/S0266-3538(03)00096-4 (2003).
- [3] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman, Flax fibre and its composites — A review, *Composites: Part B*, doi:10.1016/j.compositesb.2013.08.014 (2014)
- [4] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, L. Guillaumat, Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission, *Composite: Part A*, doi:10.1016/j.compositesa.2016.07.002 (2016).
- [5] A. El Mahi, M. Assarar, Y. Sefrani, J. M. Berthelot, Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates, *Composites: Part B*, doi:10.1177/0021998308105863 (2008).
- [6] F. Duc, P.E. Bourban, J.A.E. Manson, Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites, *Composites Part A*, doi:10.1177/0731684414539779 (2014).
- [7] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, R. Guthrie, J. Mac Mullen, N. Bennett, Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties, *Carbohydrate Polymers*, doi:10.1016/j.carbpol.2013.03.074 (2013).
- [8] J. Flynn, A. Amiri, C. Ulven, Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance, *Materials and Design*, doi:10.1016/j.matdes.2016.03.164 (2016).
- [9] M. Hammami, A. El Mahi, C. Karra, M. Haddar, Vibration behavior of composite material with two overlapping delaminations, *International Journal of Applied Mechanics*, doi:1758825115500544 (2015).
- [10] H. Daoud, J.L. Rebière, A. Makni, M. Taktak, A. El Mahi, M. Haddar, Numerical and Experimental Characterization of the Dynamic Properties of Flax Fiber Reinforced Composites, *International Journal of Applied Mechanics*, doi:10.1142/S175882511650068X (2016).