

## Effet de l'hybridation sur les propriétés mécaniques et vibratoires des composites à fibres lin-carbone

### *Hybridization effect on the mechanical and vibration properties of flax-carbon composites*

Mariem Ben ameur<sup>1,2</sup>, Abderrahim El Mahi<sup>1</sup>, Jean-Luc Rebiere<sup>1</sup>, Moez Beyaoui<sup>2</sup>, Moez Abdennadher<sup>2</sup> et Mohamed Haddar<sup>2</sup>

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  
e-mail : [mariem.ben\\_ameur.Etu@univ-lemans.fr](mailto:mariem.ben_ameur.Etu@univ-lemans.fr)  
e-mail : [abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr](mailto:abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr)  
e-mail : [jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr](mailto:jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr)

2 : Laboratoire de recherche de Mécanique, Modélisation et Production (LA2MP)  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Département Génie Mécanique,  
Route Soukra, 3038 Sfax, Tunisie  
e-mail : [moez.beyaoui@yahoo.fr](mailto:moez.beyaoui@yahoo.fr)  
e-mail : [moezabd@yahoo.fr](mailto:moezabd@yahoo.fr)  
e-mail : [mohamed.haddar@enis.rnu.tn](mailto:mohamed.haddar@enis.rnu.tn)

### Résumé

Ces derniers jours, plusieurs industries se sont concentrées sur les matériaux légers et écologiques, dotés de bonnes propriétés mécaniques et amortissantes. Les composites renforcés de fibres de lin ont fait leur preuve dans le domaine de la dynamique en présentant des performances élevées en amortissement des vibrations. Néanmoins, leurs caractéristiques mécaniques statiques et de fatigue sont nettement moins importantes que celles des composites constitués de fibres de carbone. Pour surmonter ces problèmes, la technique d'hybridation de fibres de lin et de fibres de carbone est utilisée pour fabriquer les composites afin d'améliorer leurs propriétés. De ce fait, l'objectif de la présente étude consiste à investiguer l'effet de l'hybridation sur le comportement mécanique et vibratoire des composites. Deux types de stratifiés non-hybride (lin/époxy et carbone/époxy) et différents stratifiés hybrides (lin/carbone/époxy) ont été caractérisés expérimentalement. Dans un premier temps, les différents stratifiés composites ont été étudiés à l'aide des essais de traction uni-axiaux. Dans un deuxième temps, une analyse modale expérimentale a été menée afin d'identifier expérimentalement les coefficients d'amortissement.

### Abstract

In recent days, several industries are focus on the light weight and environmentally friendly materials with good mechanical and damping properties. Flax fiber reinforced composites have been proven in the field of dynamics with high vibration damping performance. Nevertheless, their static mechanical and fatigue characteristics are much less important than composites made of carbon fibers. To overcome these problems, hybridization technique of flax fibers and carbon fibers is used to manufacture composites to enhance their properties. Therefore, the objective of this study is to investigate the effect of hybridization on the mechanical and vibratory behavior of composites. Two types of non-hybrid laminates (flax / epoxy and carbon / epoxy) and different hybrid laminates (flax / carbon / epoxy) have been experimentally characterized. At first, the different composite laminates were studied using uni-axial tensile tests. In a second step, an experimental modal analysis was conducted to identify the damping coefficients experimentally.

**Mots Clés :** Fibres de lin ; Composites hybrides ; Propriétés mécaniques ; amortissement des vibrations.

**Keywords :** Flax fibres ; Hybrid composites ; Mechanical properties ; vibration damping.

## 1. Introduction

Les matériaux composites à base de fibres naturelles deviennent de plus en plus un choix attractif dans diverses applications industrielles en raison de leurs rapports rigidité-poids et résistance-poids élevés. Elles sont écologiques et leurs ressources sont renouvelables [1]. En s'appuyant sur l'étude de Duc et al. [2], le pouvoir intrinsèque des fibres naturelles à dissiper l'énergie vibratoire est très important. En outre, les résines therm durcissables renforcées en fibres de lin présentent un comportement non linéaire lorsqu'elles sont soumises à un chargement [3]. Cette réponse non linéaire entraîne aussi une perte d'énergie. Ceci est bénéfique dans la conception des structures tel que les équipements de sport où un amortissement de vibration est demandé.

Cependant, ils ont généralement des propriétés mécaniques inférieures en les comparant à leurs homologues synthétiques. Ces faibles propriétés mécaniques présentent un inhibiteur majeur pour développer des produits de hautes performances à base des fibres naturelles. La méthode qui consiste à hybrider les fibres naturelles avec des fibres synthétiques pour augmenter leurs performances mécaniques à été proposée par diverses études [4-6]. En effet ce travail s'intéresse à l'hybridation des fibres de carbone avec les fibres de lin. Ce processus offre un bon potentiel pour le développement des composites à haute rigidité pour diverses applications structurelles et sportives tout en incorporant des matériaux biosourcés. En cherchant le rapport optimal entre les fibres de lin et de carbone, on peut cibler certaines propriétés afin d'atteindre les performances souhaitées.

Dans ce cadre, cette étude porte sur la caractérisation en statique et en vibration des composites non hybrides et hybrides constitués de fibres de lin et de carbone avec une résine époxy. Des essais de traction en statique permettront de déterminer les caractéristiques élastiques des différents stratifiés. Enfin, les caractéristiques dynamiques en vibration seront déterminées et comparées entre eux afin d'investiguer l'effet de l'hybridation sur l'amortissement.

## 2. Matériaux et mise en œuvre

Différentes séquences d'empilements (non hybrides :  $[L_3]_s$  et  $[C_3]_s$  et hybrides :  $[L/C_2]_s$  et  $[L_2/C]_s$ ) ont été étudiés. Ces matériaux ont été 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/m<sup>2</sup> et 200 g/m<sup>2</sup>, respectivement. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté au procédé de moulage au contact sous vide par la technique dite « du sac » pour la fabrication des matériaux composites. La mise en œuvre de tous les échantillons a été réalisée au sein du LAUM. Tout d'abord, les fibres ont été découpées du rouleau sous forme de couches rectangulaire. Les fibres de lin ont été séchées dans une étuve pendant une heure à 110°C, pour éliminer au maximum la quantité d'eau existant au sein des fibres et améliorer leurs propriétés mécaniques [7]. Ensuite, les couches de carbone et de lin ont été imprégnées dans la séquence d'empilement souhaitée avec la résine à température ambiante de 20°C. Les différentes séquences d'empilement ont été constituées de 6 couches orientées dans la direction des fibres. Par la suite, on met les plaques stratifiées unidirectionnelles obtenues sous vide dans un sac bien étanche avec une dépression de 50 kPa pendant 7 heures. Les structures étudiées sont présentées dans le Tab. 1.

Stratifié	Séquence d'empilement	Epaisseur (mm)	Fraction volumique des fibres (lin/carbone)
$[L_3]_s$	L / L / L / L / L / L	3.1	0.32/0.00
$[L_2/C]_s$	L / L / C / C / L / L	2.7	0.22/0.17
$[L/C_2]_s$	L / C / C / C / C / L	2.4	0.12/0.37
$[C_3]_s$	C / C / C / C / C / C	2	0.00/0.56

Tab. 1. Désignation des composites stratifiés non-hybrides et hybrides.

### 3. Caractérisation Mécanique

Dans le but de caractériser et de comparer les propriétés mécaniques des composites, des essais de traction monotone ont été réalisés sur les différentes configurations d'éprouvettes. Ces essais quasi-statiques ont été effectués sur des éprouvettes en matériaux à renfort non hybride en fibres de lin et de carbone et en matériaux à renfort hybride lin/carbone afin de situer les performances de l'hybridation. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes à fibres unidirectionnelles sollicitées dans le sens des fibres ( $\theta=0^\circ$ ). Les éprouvettes sont de longueur de 200 mm, de largeur 15 mm et d'épaisseur présentée dans le Tab. 1. Ils ont été réalisés sur une machine servo-hydraulique INSTRON-8516 équipée d'un capteur de force 100 kN. La machine d'essai de traction a été interfacée avec un système d'acquisition. Les échantillons ont été testés selon la méthode standard ASTM D3039/D3039M. La déformation longitudinale a été mesurée avec un extensomètre axial. Trois à cinq échantillons ont été testés pour chaque configuration. Pour tous les essais de traction réalisés, la vitesse de déplacement utilisée est de 1 mm/min.

La Fig. 1 présente l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte maximale en fonction des différents matériaux à renfort non hybrides et hybrides avec différentes fractions volumiques des fibres de lin et de carbone. Les résultats représentés montrent que le module d'élasticité et la contrainte maximale les plus faibles sont associés au matériau composite en fibre de lin. D'autre part, le matériau composite non hybride en fibres de carbone présente des valeurs du module d'élasticité et de contrainte maximale les plus élevées, c'est-à-dire, la rigidité la plus élevée par rapport aux autres matériaux composites.

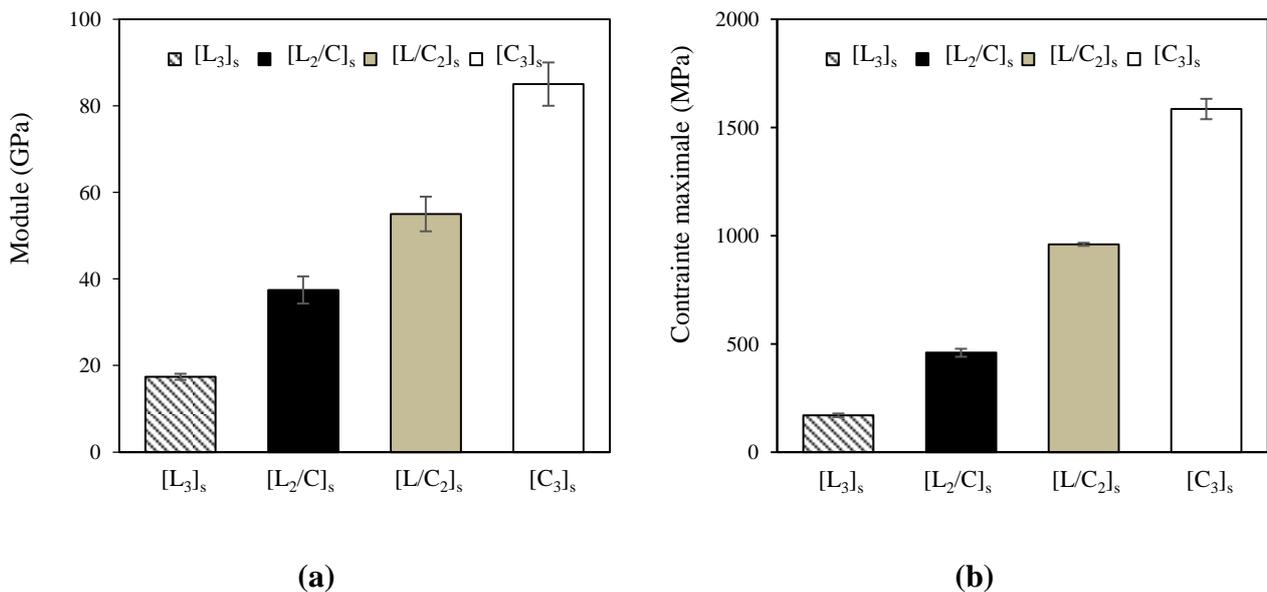


Fig. 1. Evolution des propriétés mécaniques des composites hybrides lin/carbone : a) le module d'Young et b) la résistance à la traction.

Ces résultats sont étudiés afin d'évaluer l'effet de l'hybridation sur les propriétés mécaniques des matériaux composites à fibre de lin et de carbone. Les résultats montrent que l'augmentation de la fraction volumique en fibre de carbone améliore les propriétés mécaniques des composites hybrides. A titre d'exemple, l'addition de 19% de fibres de carbone ([L<sub>2</sub>/C]<sub>s</sub>) à la structure entraîne une augmentation d'environ 22% du module d'élasticité et d'environ 18% de la contrainte maximale. Cette augmentation est attribuée essentiellement aux caractéristiques des fibres de carbone qui sont plus rigides que celles du lin. En effet, dans le cas des composites à renforts hybrides, les propriétés dépendent des caractéristiques mécaniques de chaque renfort utilisé.

Par la suite, on vise à évaluer l'effet de l'hybridation à l'aide des propriétés spécifiques définies par le rapport entre les propriétés mesurées et la densité du composite hybride. On peut noter que les composites renforcés en fibres de lin, présente une densité faible de  $1140 \text{ kg/m}^3$  et qui est nettement inférieure à celle des composites en fibres de carbone d'environ  $1340 \text{ kg/m}^3$ . Afin d'évaluer un effet positif ou négatif de l'hybridation, les propriétés d'un composite hybride composé de deux composants 1 et 2 peuvent être comparées à celles prédites par la loi de mélange des hybrides [5] :

$$P_{Hybride} = P_1\varphi_{v_1} + P_2\varphi_{v_2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où  $P_{Hybride}$  est la propriété à étudier du composite hybride,  $P_1$  et  $P_2$  sont les propriétés correspondantes aux composites non hybrides 1 et 2,  $\varphi_{v_1}$  et  $\varphi_{v_2}$  sont les fractions volumiques des renforts dans les composites hybrides, tout en respectant la relation  $\varphi_{v_1} + \varphi_{v_2} = 1$ .

La Fig. 2 illustre l'évolution du module d'élasticité spécifique et la contrainte maximale spécifique qui sont obtenues à partir des données expérimentales ainsi que du calcul théorique en fonction du rapport carbone/lin. L'examen de cette figure révèle que les modules d'élasticité spécifiques trouvés sont proches des valeurs de loi de mélange, avec des variances inférieures à 10%, pour les deux composites hybrides. Cependant, ceci n'est pas disponible pour l'évolution de la contrainte maximale car un effet d'hybridation un peu négatif a été obtenu. En effet, un écart négatif a été observé pour la contrainte maximale par rapport à la droite de régression linéaire (Fig. 2).

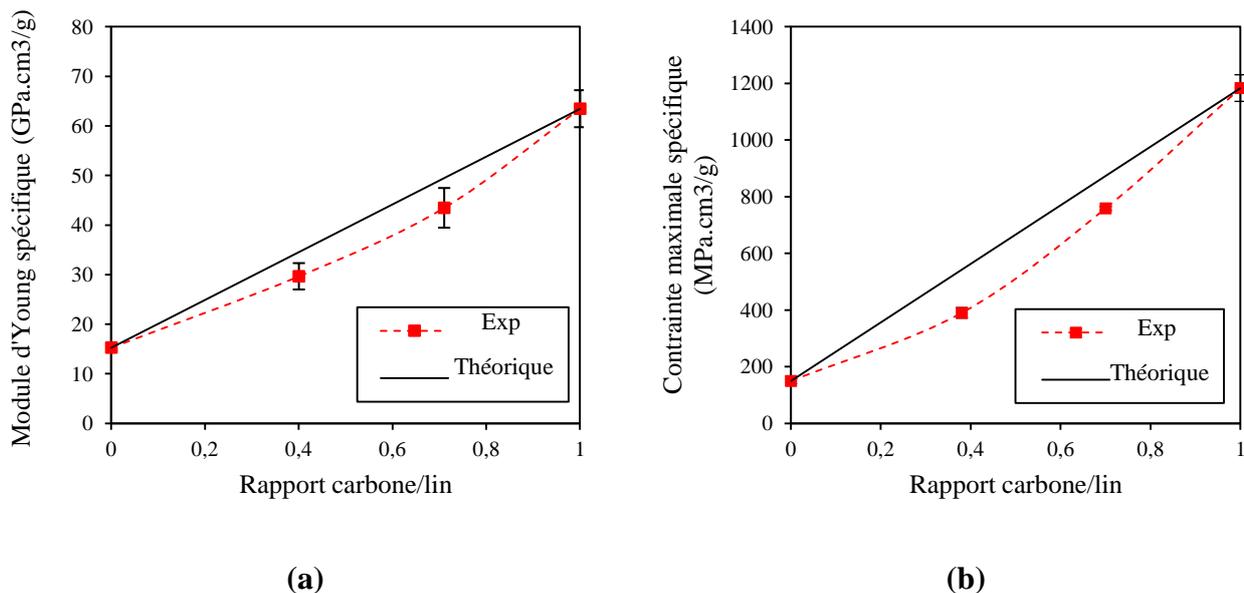


Fig. 2. Effet de l'hybridation sur les propriétés mécaniques en fonction du rapport carbone/lin : a) le module d'Young spécifique et b) la résistance à la traction spécifique.

#### 4. Comportement vibratoire

Une analyse modale expérimentale a été menée afin d'identifier expérimentalement les fréquences propres et les coefficients d'amortissement. Elle a été réalisée sur des éprouvettes unidirectionnelles avec différentes orientations des fibres ( $0$ ,  $45$  et  $90^\circ$ ) à l'aide d'un marteau d'impact. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de largeur  $25 \text{ mm}$  et pour trois longueurs ( $150$ ,  $200$  et  $250 \text{ mm}$ ). Les éprouvettes ont été dans le cas d'une configuration encastree/libre. La vitesse de déplacement a été mesurée à partir d'un point de l'extrémité libre à l'aide d'un vibromètre laser (Fig. 3).

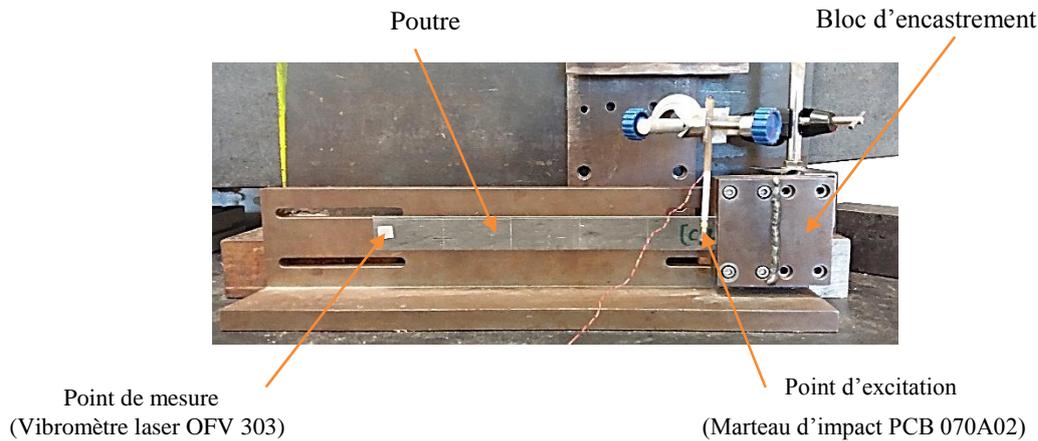


Fig. 3. Dispositif expérimental dans le cas d'une excitation par impact (Eprouvette en configuration encastrée-libre).

Les résultats de l'amplitude de la vitesse de déplacement en fonction de la fréquence des matériaux composites non hybrides et hybrides ont été comparés. La Fig. 4 présente une comparaison de l'amplitude en fonction de la fréquence des stratifiés  $[L_3]_s$ ,  $[C_3]_s$  et des composites avec des couches externes en fibre de lin dans l'orientation des fibres  $\theta=0^\circ$  et une longueur libre de 250 mm. Cette figure est présentée pour une bande de fréquence de  $[0-1.5\text{kHz}]$  avec les quatre premiers modes. Pour chaque mode, on remarque que la valeur de l'amplitude des pics diminue avec l'augmentation du pourcentage en fibre de lin dans le composite.

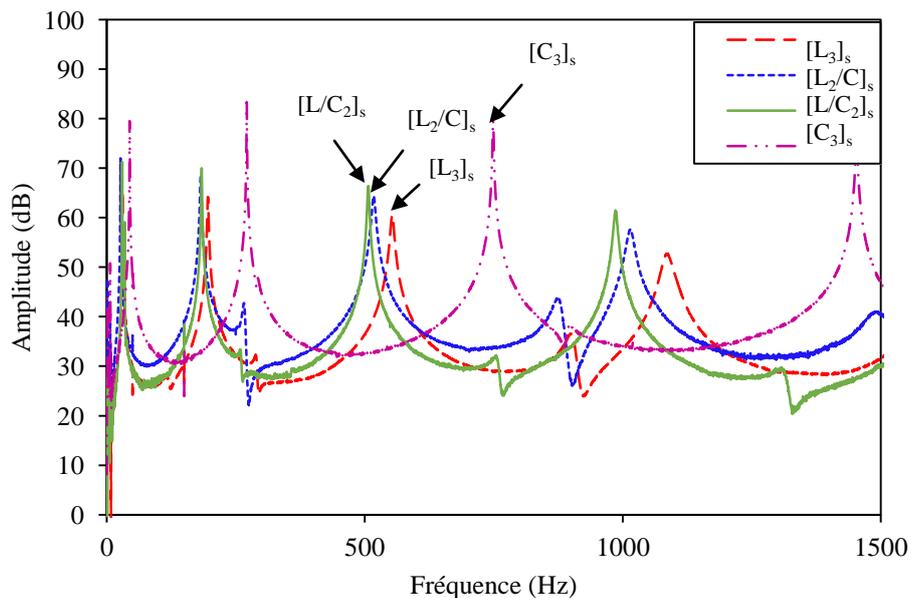


Fig. 4. Comparaison de la réponse dynamique des composites avec des couches externes en fibre de carbone.

On peut noter aussi que les fréquences des pics du composite  $[C_3]_s$  sont plus élevées que celles du composite  $[L_3]_s$ . Cette différence peut être justifiée par l'importance de la rigidité des fibres de carbone par rapport aux fibres de lin. Pour les fréquences des pics des composites hybrides sont légèrement faibles de celles du composite  $[L_3]_s$ . Ce résultat peut être expliqué par la dominance des couches externes en fibres de lin. En plus par la diminution de l'épaisseur de ces éprouvettes en remplaçant les couches de fibres de lin par des couches en fibres de carbone.

La méthode d'analyse modale a permis de mesurer la fréquence et l'amortissement des matériaux étudiés par la méthode de la bande passante à  $-3$  dB. Elle consiste à étudier chaque pic de résonance

de la FRF dans une représentation amplitude-fréquence. Par la suite, le facteur de perte  $\eta_i$  associé au mode  $i$  a été calculé en utilisant l'équation suivante (Eq. 2) :

$$\eta_i = \frac{\Delta f_i}{f_i} = \frac{f_2 - f_1}{f_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

La Fig. 5 présente l'évolution du facteur de perte en fonction de la fréquence des différents stratifiés composites pour les trois orientations des fibres ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ). Les résultats obtenus montrent que le facteur de perte augmente avec la fréquence. Pour les deux orientations de fibres  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , les valeurs des facteurs de perte sont plus élevées que celles pour une orientation de fibres  $0^\circ$ .

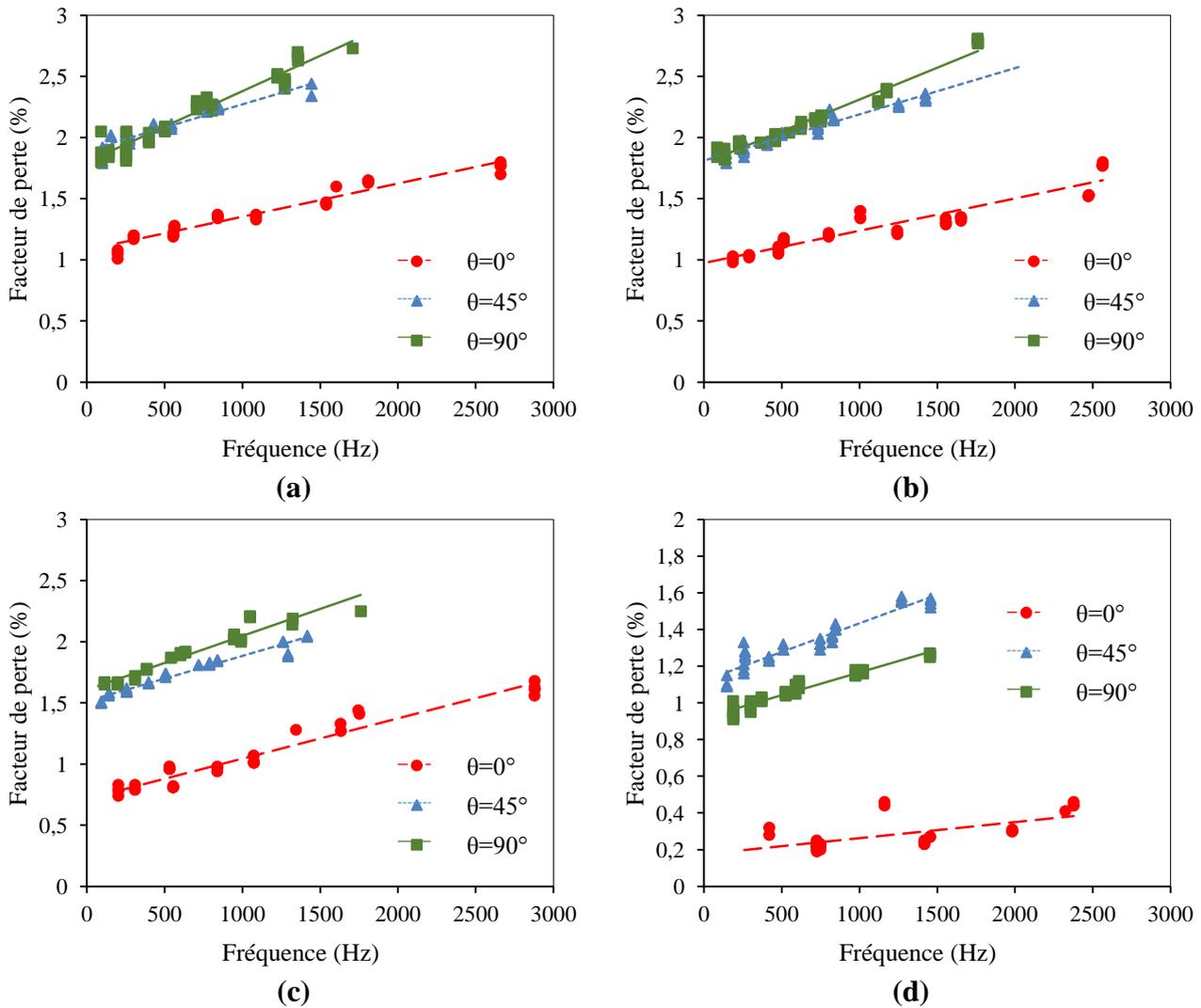


Fig. 5. Evolution du facteur de perte en fonction de la fréquence à différentes orientation des fibres pour les composites à fibres non-hybrides et hybrides : a)  $[L_3]_s$ , b)  $[L_2/C]_s$ , c)  $[L/C_2]_s$  et d)  $[C_3]_s$ .

La Fig. 6 présente une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement, des facteurs de perte en fonction de l'orientation des fibres à 1000 Hz pour les composites constitués de fibre de lin, de fibres de carbone et de fibres hybrides lin/carbone ( $[L_2/C]$  et  $[L/C_2]$ ). Ce résultat montre que la valeur de l'amortissement des composites carbone/époxy est très faible par rapport à celle des composites lin/époxy pour les différentes orientations étudiées ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ). De plus, il s'est révélé que pour les trois orientations de fibres, l'amortissement augmente avec l'augmentation du teneur en fibres de lin. Ce résultat est justifié par le remplacement des couches externes de fibres de carbone par des couches en fibres de lin. En plus, l'énergie est principalement dissipée par les couches extérieures en fibres de lin.

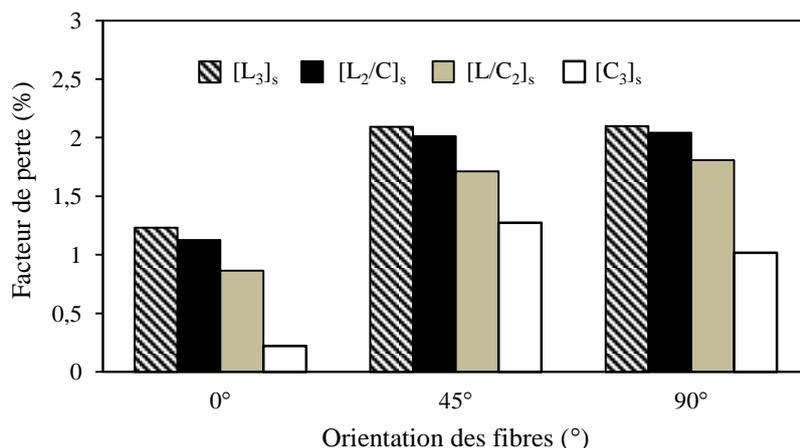


Fig. 6. Comparaison des facteurs de perte des composites à fibres non-hybrides et hybrides en fonction de l'orientation des fibres à 1000 Hz.

## 5. Conclusion

Cette étude présente l'évaluation du comportement mécanique et vibratoire des matériaux composites à mono-renfort et à renfort hybrides, en fibres de lin et de carbone. Dans un premier temps, le comportement mécanique en traction a été étudié. Les résultats expérimentaux montrent que l'ajout par hybridation des couches de fibres de carbone dans les structures à base de fibres de lin entraîne une amélioration remarquable des propriétés mécaniques. Dans un second temps, une étude vibratoire expérimentale a été menée sur les différents stratifiés en flexion libre en utilisant la technique d'impulsion. Cette étude a été réalisée afin de mettre en évidence l'effet de l'hybridation et l'orientation des fibres sur les propriétés dynamiques (la fréquence et l'amortissement modaux) des composites. Les fréquences modales ont été déduites de la fonction de réponse de Fourier. Par la suite, les facteurs de perte ont été déterminés à l'aide de la méthode de la bande passante à -3dB. La comparaison entre les amortissements des composites étudiés montre que le comportement vibratoire dépend essentiellement de la séquence d'empilement et de la teneur des couches en fibres de lin et de carbone. En effet, il a été démontré que le remplacement des couches de carbone par des couches de lin de part et d'autre de la structures améliore considérablement son amortissement tout en diminuant son module. En plus, il a été observé que les propriétés dynamiques obtenues dépendent de la direction des fibres.

## Références

- [1] M. PERVAIZ, SAIN Mohini M. Carbon storage potential in natural fibre composites. Resources, Conservation and Recycling 39, 325–40, 2003.
- [2] F. Duc, P. E. Bourban, J. A. E. Manson, « Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites », *Composites Part A*, vol. 64, pp. 115–123, 2014.
- [3] Newman R.H., Battley M.A., Carpenter J.E., Le Guen M.J., « Energy loss in a unidirectional flax–polyester composite subjected to multiple tensile load–unload cycles », *Journal of Materials Science*, vol. 47, n° 3, 2012, p. 1164-1170.
- [4] Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Guthrie R., MacMullen J., Bennett N., « Development of flaxcarbon fibre hybrid composites for enhanced properties », *Carbohydrate Polymers*, vol. 96, 2013, p. 1–8.
- [5] Flynn J., Amiri A., Ulven C., « Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance », *Materials and Design*, vol. 102, 2016, p. 21–29.
- [6] Ben Ameer M, El Mahi A, Rebiere JL, Abdennadher M, Haddar M. Damping Analysis of Unidirectional Carbon/Flax Fiber Hybrid Composites. *Int J Appl Mech* 2018;10(5):1850050.
- [7] Baley C., Le Duigou A., Bourmaud A., Davies P., « Influence of drying on the mechanical behavior of flax fibres and their unidirectional composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, n° 8, 2012, p. 1226–1233.