

Amélioration de l'amortissement des composites carbone-époxyde à travers leur hybridation avec des fibres de lin

Mustapha Assarar ^a, Wajdi Zouari ^a, Rezak Ayad ^b, Hamid Sabhi ^c, Jean-Marie Berthelot

mustapha.assarar@univ-reims.fr

^a Université de Reims Champagne-Ardenne, LISM EA 4695 IUT de Troyes, 9 rue de Québec 10026 Troyes cedex

^b Université de Reims Champagne-Ardenne, LISM EA 4695 ESI Reims, 3 Esplanade Roland Garos 51000 Reims cedex,

^c Université de Reims Champagne-Ardenne, LISM EA 4695 IFTS, 7 Bd Jean Delautre 08005 Charleville-Mézières cedex

Résumé :

L'objectif du présent travail est d'analyser l'effet de remplacement de couches de carbone par celles de lin sur les propriétés mécaniques et dynamiques des composites hybrides lin-carbone. Pour ce faire, des plaques composites avec différentes séquences d'empilement ont été élaborées par la technique de la thermo-compression. Ensuite, des essais de vibrations en configuration libre-libre ont été menés sur des éprouvettes, sous forme de poutres découpées à partir de ces plaques, afin d'identifier les propriétés mécaniques et dynamiques des composites de l'étude. Ces propriétés ont été identifiées à partir des réponses en fréquences des poutres testées à l'aide d'une démarche d'optimisation développée sous le logiciel Matlab. D'autre part, une modélisation par éléments finis, basée sur la théorie des stratifiés, a été également développée pour identifier l'amortissement des composites hybrides lin-carbone. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec un bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques. Ces derniers montrent que la position des couches de lin dans le composite hybride influe d'une manière significative sur son module de flexion et ses coefficients d'amortissement. Par ailleurs, nous montrons à travers une analyse paramétrique qu'il est possible, grâce à l'hybridation lin-carbone, d'améliorer l'amortissement d'un stratifié carbone sans pour autant modifier son comportement dynamique.

Mots clés : composites hybrides ; amortissement ; fibre de lin ; fibre de carbone

1. Introduction

Le problème de vibrations des structures constitue aujourd'hui une des préoccupations des industriels dans plusieurs secteurs tels que l'aéronautique, l'aérospatial, la construction navale, l'automobile, le sport, etc. L'amortissement de ces vibrations est un facteur essentiel pour réduire de nombreux effets indésirables tels que la fatigue structurale, la transmission des vibrations à d'autres systèmes ainsi que le bruit dû au rayonnement acoustique. Comparés aux matériaux métalliques, les composites associent généralement de bonnes performances mécaniques à de bonnes propriétés dissipatives, ce qui leur permettent de répondre aux exigences du cahier des charges de divers domaines. De plus, grâce à leur aptitude à être façonnés à la carte, les matériaux composites offrent aux concepteurs la possibilité d'élaborer des structures avec des propriétés dynamiques pouvant être optimisées en fonction des constituants du matériau (renfort, matrice, architecture du renfort, orientation des fibres, etc.). Cette optimisation des propriétés dynamiques permet ainsi d'élaborer des structures avec un design novateur tout en garantissant un meilleur contrôle des vibrations structurales. En l'occurrence, de nombreux chercheurs ont mené des travaux afin d'étudier les propriétés dynamiques des composites à fibres usuelles [1-5]. Les premiers travaux ont été initiés par Adams et al. [1] et par Gibson et Wilson [5]. Ensuite, plusieurs concepts ont été développés pour déterminer l'amortissement de différents matériaux composites traditionnels [5-10].

S'agissant des composites à fibres naturelles, certains travaux de recherche ont déjà mis en avant, via des essais expérimentaux, leur performance en terme d'amortissement, en utilisant notamment l'analyse mécanique dynamique ou des poutres en vibrations libres [11-19]. A titre d'exemple, Duc et al. [14] ont comparé les propriétés d'amortissement de différents matériaux composites. Ils ont constaté que les composites à fibres de lin ont un amortissement supérieur à ceux des composites à fibres de verre et de carbone. Ils ont attribué cette différence à la dissipation d'énergie par frottement au niveau des différents constituants de la fibre de lin [14, 19].

Ces travaux montrent clairement que l'amortissement des fibres naturelles est un atout pour leur utilisation comme renfort des matériaux composites. Par ailleurs, pour des applications de hautes performances où l'amortissement des vibrations est un facteur essentiel, il est nécessaire d'allier performances mécaniques et propriétés dissipatives. Les composites hybrides "fibres naturelles– fibres usuelles" peuvent constituer une voie prometteuse pour l'utilisation des fibres naturelles dans des composites à hautes performances. Il s'agit d'une solution multi-matériaux pour tirer profit des atouts de chaque constituant. C'est dans ce contexte que le présent travail se situe. L'objectif est d'analyser l'effet de l'hybridation sur les propriétés mécaniques et dissipatives des stratifiés lin-carbone. Ce choix est motivé par les hautes performances mécaniques de la fibre de carbone et les propriétés d'amortissement observées dans le cas de la fibre de lin. Pour ce faire, nous avons élaborés des composites non-hybrides et hybrides lin-carbone afin d'analyser l'influence de l'hybridation sur leurs propriétés mécaniques et dynamiques. Ensuite, nous montrons comment la théorie des stratifiés associée à une analyse par éléments finis permet de modéliser l'amortissement structural de ces différents matériaux composites. Enfin, nous verrons à travers une analyse paramétrique comment est-il possible d'améliorer l'amortissement d'un composite à fibres de carbone sans pour autant en modifier son comportement dynamique.

2. Matériaux et procédé de mise en oeuvre

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des stratifiés à renfort sergé 2/2 constitués d'une résine époxyde SR1500 associée au durcisseur SD2505. Les renforts utilisés pour l'élaboration de ces composites sont des tissus à fibres de carbone ou de lin (la masse surfacique des deux tissus est d'environ 300 g/m²).

La mise en œuvre des composites de l'étude a été effectuée à l'Institut de Formation Technique Supérieur (IFTS) de Charleville-Mézières, à l'aide de la technique de thermocompression. Les couches de chaque stratifié ont été imprégnées manuellement par le mélange résine-durcisseur, puis moulées entre le moule et le contre-moule. Ensuite, les couches stratifiées ont été placées entre les deux plateaux chauffants de la presse de thermocompression. Enfin, un cycle de compression, à une pression de 6 bars et une température de 35°C, leur a été appliqué afin de contrôler l'épaisseur et avoir une bonne imprégnation des fibres. Après durcissement, les plaques ont été laissées à température ambiante pendant 14 jours afin d'assurer une polymérisation complète. Le tableau 1 résume les caractéristiques principales des stratifiés non-hybrides et hybrides ainsi que leurs désignations.

Les modules de l'ingénieur E_L , E_T , et G_{LT} ainsi que le coefficient de Poisson ν_{LT} des stratifiés non-hybrides, rapportés aux axes des matériaux (L,T,T') ont été déterminés à partir d'essais de traction conformément à la désignation D3039 préconisée par la norme ASTM. Les résultats déduits des divers essais effectués sont reportés dans le tableau 2.

Tableau 1. Désignation des stratifiés hybrides lin-carbone.

Désignation	Nombre de plis Carbone/Lin	Séquence d'empilement	Épaisseur Carbone/Lin (mm)	Fraction volumique Carbone/Lin (%)
Carbone	8/0	C C C C C C C C	2,6/0	52/0
[C ₃ /L] _s	6/2	C C C L L C C C	1,4/1,1	40/12
[C ₂ /L ₂] _s	4/4	C C L L L L C C	0,6/1	25/22
[C/L ₃] _s	2/6	C L L L L L L C	0,4/2,5	15/35
Lin	0/8	L L L L L L L L	0/3,8	0/39
[L ₃ /C] _s	2/6	L L L C C L L L	0,4/2,7	14/35
[L ₂ /C ₂] _s	4/4	L L C C C C L L	0,8/2,1	24/22
[L/C ₃] _s	6/2	L C C C C C C L	1,3/1,1	41/12

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des stratifiés non-hybrides.

Stratifié	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	ν_{LT}
Carbone-Epoxyde	54,1 ± 0,4	54,1 ± 0,5	3,6 ± 0,3	0,05±0,02
Lin-Epoxyde	11,5 ± 0,7	11,5 ± 0,5	2,1 ± 0,3	0,10±0,03

3. Analyse expérimentale

Les essais de vibrations ont été effectués sur des éprouvettes, sous forme de poutres, découpées à partir des plaques présentées au paragraphe précédent. Chaque poutre composite testée est suspendue verticalement à des fils élastiques afin de réaliser la configuration libre-libre. La poutre est ensuite excitée en un point à l'aide d'un marteau d'impact (PCB 086C03) et la réponse est détectée en un autre point de la structure à l'aide d'un accéléromètre (PCB 352C23). Les signaux d'excitation de la poutre et de sortie de l'accéléromètre sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux (commercialisé par la société LMS). Cet analyseur est constitué d'une carte d'acquisition et de traitement, associée à un logiciel de contrôle et de traitement des signaux.

L'analyse modale expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion, sur des poutres en configuration libre-libre. Les essais ont été réalisés sur des poutres ayant la même largeur 26 mm et trois longueurs différentes : 230, 250 et 270 mm. Ces dimensions ont été choisies pour limiter l'effet de la rigidité du fil élastique et la masse de l'accéléromètre sur les fréquences propres et les coefficients d'amortissement. Le choix de trois longueurs a pour but de varier les fréquences des pics de résonance, ce qui permet ensuite de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques et d'amortissement en fonction de la fréquence. L'analyse des résultats expérimentaux a été ensuite effectuée en ajustant les courbes de réponse expérimentale avec la réponse analytique d'une poutre en configuration libre-libre [20]. Cet ajustement a été réalisé à l'aide de la méthode des moindres carrés en utilisant le module d'optimisation du logiciel Matlab. Cette démarche permet d'obtenir les valeurs des fréquences propres et les coefficients d'amortissement modaux (cas du modèle avec amortissement visqueux) ou les facteurs de perte (cas du modèle avec rigidité complexe). Cette démarche d'identification est bien détaillée dans la référence [21].

4. Modélisation de l'amortissement

Dans cette partie, nous mettons en place une démarche de modélisation de l'amortissement combinée à une analyse par éléments finis. Cette démarche est basée sur l'approche énergétique développée par Ungar and Kewin [31, 32]. Pour ce faire, Les poutres étudiées ont été modélisées par éléments finis en utilisant le code de calcul ABAQUS. L'élément utilisé est l'élément de coque multicouche S4 à quatre nœuds, basé sur la théorie des stratifiés. Étant donné que l'épaisseur des poutres étudiées est très inférieure à leur longueur ($L/h \in [65, 135]$), les contraintes de cisaillement transverse ont été négligées.

L'analyse par éléments finis permet ensuite de déterminer, pour chaque mode de vibration, les valeurs des contraintes et des déformations sur les faces inférieure (l) et supérieure (u) de chaque couche k pour chaque élément e de la structure :

$$\begin{aligned} &\sigma_{lxxk}, \sigma_{lyyk}, \sigma_{lxyk}, \quad \varepsilon_{lxxk}, \varepsilon_{lyyk}, \varepsilon_{lxyk}, \\ &\sigma_{uxxk}, \sigma_{uyyk}, \sigma_{uxyk}, \quad \varepsilon_{uxxk}, \varepsilon_{uyyk}, \varepsilon_{uxyk}. \end{aligned} \quad (1)$$

L'énergie de déformation de membrane U_{mk}^e emmagasinée dans la couche k d'un élément e est explicitée en fonction des énergies de déformation dans les axes du matériau (L, T, T') sous la forme :

$$U_{mk}^e = U_{1k}^e + U_{2k}^e + U_{6k}^e, \quad (2)$$

$$U_{ik}^e = \frac{1}{2} \iiint_k \sigma_{ik}^e \varepsilon_{ik}^e dv = \frac{S_e}{2} \int_k \sigma_{ik}^e \varepsilon_{ik}^e dz, \quad i = 1, 2, 6. \quad (3)$$

où S_e est la surface moyenne de l'élément e .

Ensuite, les énergies d'une couche k de l'élément fini e sont calculées en considérant un champ de déplacement de membrane qui varie linéairement suivant l'épaisseur de la structure multicouche, ce qui permet de déterminer les énergies totales de membrane emmagasinées dans la structure composite multicouche comme suit :

$$U_i = \sum_{\text{éléments}, e} \sum_{\text{couches}, k} U_{ik}^e, \quad i = 1, 2, 6 \quad (4)$$

D'autre part, l'énergie dissipée par amortissement dans la couche k de l'élément fini e est exprimée en introduisant ses facteurs de perte $\eta_{11k}, \eta_{22k}, \eta_{66k}$:

$$\Delta U_k^e = \eta_{11k}^e U_{1k}^e + \eta_{22k}^e U_{2k}^e + \eta_{66k}^e U_{6k}^e \quad (5)$$

Les facteurs de perte sont évalués dans les axes (L, T, T') du matériau de chaque couche. η_{11k}^e et η_{22k}^e sont, respectivement, les coefficients d'amortissement dans les directions L et T , η_{66k}^e est celui dans le plan (L, T) , respectivement.

L'énergie totale dissipée par amortissement dans la structure est ensuite donnée par :

$$\Delta U = \sum_{\text{éléments}, e} \sum_{\text{couches}, k} \eta_{11k}^e U_{1k}^e + \eta_{22k}^e U_{2k}^e + \eta_{66k}^e U_{6k}^e \quad (6)$$

Finalement, l'amortissement de la structure composite multicouche peut être obtenu par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\Delta U}{U_d}. \quad (7)$$

5. Résultat et discussion

La procédure développée au paragraphe précédent a été appliquée aux différents stratifiés hybrides lin-carbone. L'analyse par éléments finis a été effectuée en introduisant pour chaque couche ses coefficients élastiques (tableau 2) et ses propriétés d'amortissement déterminées (tableau 3). Les résultats obtenus à partir de cette démarche ont été comparés aux résultats expérimentaux déduits de l'analyse modale.

Tableau 3. Coefficients d'amortissement des stratifiés non-hybrides.

Stratifié	f (Hz)	$\eta_{11}(\%)$	$\eta_{22}(\%)$	$\eta_{66}(\%)$
Carbone-Epoxyde	200	0,74	0,74	1,60
	1000	0,81	0,81	1,75
Lin-Epoxyde	200	2,94	2,94	3,46
	1000	2,70	2,70	3,20

5.1. Module de flexion

Dans le cas d'une poutre orthotrope en configuration libre-libre, les trois premières fréquences propres analytiques de flexion transversale sont données par l'expression suivante [20] :

$$\begin{aligned} m=1 \quad \omega_1 &= 22,373\omega_0, \\ m=2 \quad \omega_2 &= 61,673\omega_0, \\ m=3 \quad \omega_3 &= 120,90\omega_0, \end{aligned} \quad (8)$$

avec

$$\omega_0 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E_{fx} h^3}{12 \rho_s}}, \quad (9)$$

où E_{fx} , ρ_s , L et h sont respectivement le module de flexion, la masse surfacique, la longueur et l'épaisseur de la poutre.

La relation (9) montre qu'il est possible de déterminer le module de flexion des poutres étudiées à partir de leurs fréquences propres de flexion. La figure 2a confronte les résultats expérimentaux à ceux déduits de l'analyse par éléments finis, pour différentes séquences d'empilement des stratifiés hybrides lin-carbone. Il apparaît que le module de flexion des différents composites augmente de 2 à 10 % avec la fréquence. Ceci est essentiellement lié à l'augmentation des propriétés élastiques des stratifiés à fibres de lin et de carbone avec de la fréquence. Pour mieux illustrer l'influence de la séquence d'empilement sur le module de flexion des stratifiés hybrides, nous avons reporté sur la figure 3 son évolution en fonction de la fraction volumique des fibres de carbone pour une fréquence de 500 Hz. Le module de flexion augmente avec la fraction volumique des fibres de carbone particulièrement lorsque les couches de carbone se situent à l'extérieur des composites hybrides. À titre d'exemple, pour une fraction volumique d'environ 15 % de fibres de carbone, l'augmentation du module de flexion est d'environ 10 % pour le stratifié $[L_3/C]_s$ comparé au composite à fibres de lin, alors que cette augmentation est plus de 148 % pour le stratifié $[C/L_3]_s$. Ce résultat est lié au fait que les couches ayant le plus haut module longitudinal sont plus éloignées du plan moyen (carbone-Epoxyde : $E_L \approx 54$ GPa contre lin-Epoxyde $E_L \approx 11$ GPa).

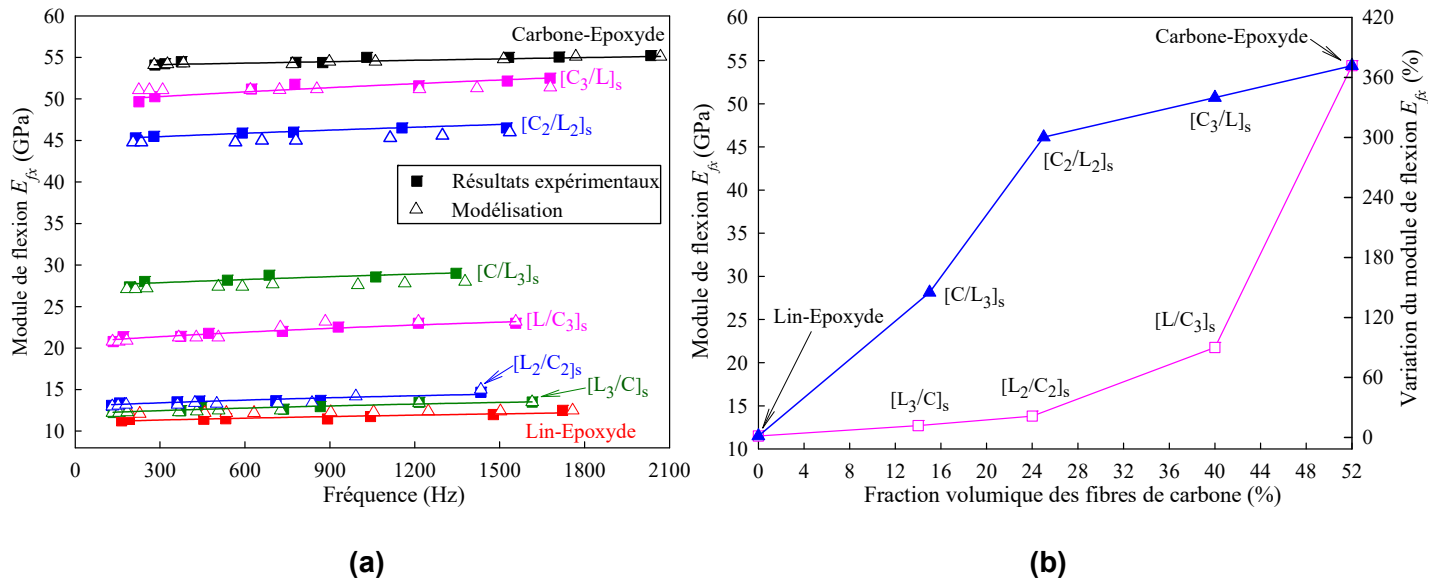


Figure 2. Module de flexion des composites hybrides : (a) Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux déduits de la modélisation et (b) évolution du module de flexion en fonction de la fraction volumique des fibres de carbone pour différentes séquences d'empilement et pour une fréquence de 500 Hz.

5.2. Amortissement

La figure 3 compare les résultats expérimentaux avec ceux déduits de la modélisation de l'amortissement structural, pour différents composites hybrides lin-carbone. Un bon accord entre les deux types de résultats est obtenu, montrant ainsi que l'analyse par éléments finis considérée permet de prédire correctement l'amortissement des stratifiés hybrides lin-carbone. La figure 3 montre aussi que la variation de l'amortissement en fonction de la fréquence des stratifiés hybrides présente deux comportements. Cette différence est associée à l'évolution de la distribution des énergies dissipées dans les couches de lin et de carbone [22].

Pour les stratifiés $[C_3/L]_s$ et $[C_2/L_2]_s$ où les couches de carbone sont situées à l'extérieur, le coefficient d'amortissement augmente légèrement avec la fréquence. En effet, l'énergie emmagasinée dans ces deux stratifiés est essentiellement dissipée par les couches de carbone et par conséquent, l'évolution de l'amortissement en fonction de la fréquence est gouvernée par celle du composite à fibres de carbone. Pour les stratifiés $[L/C_3]_s$, $[L_2/C_2]_s$ et $[L_3/C]_s$, l'effet de l'énergie dissipée par les couches de lin est prédominant. Ainsi, la diminution des facteurs de perte en fonction de la fréquence du composite à fibres de lin conduit à la diminution de l'amortissement des stratifiés $[L/C_3]_s$, $[L_2/C_2]_s$ et $[L_3/C]_s$.

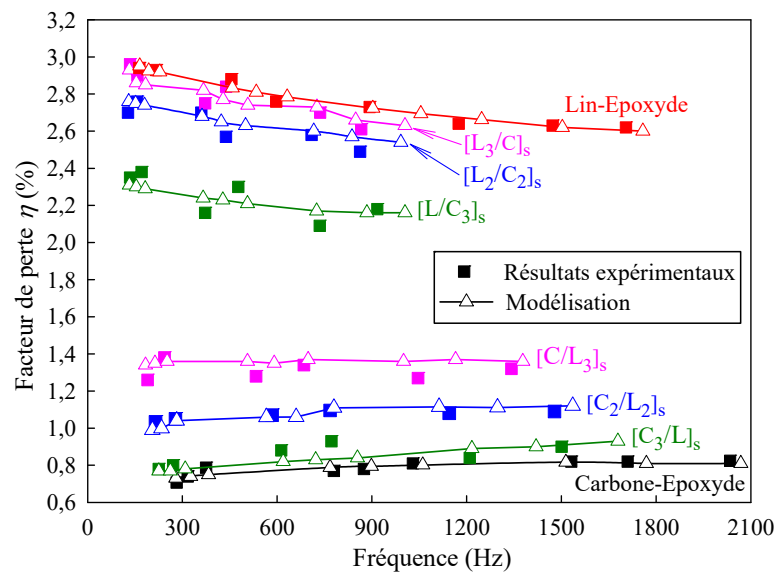


Figure 3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux déduits de la modélisation de l'amortissement pour différents stratifiés hybrides lin-carbone.

Pour mieux illustrer la répartition des énergies dissipées dans les couches de lin et de carbone, nous présentons sur la figure 4 leur évolution en fonction de la séquence d'empilement dans les stratifiés hybrides lin-carbone, pour une fréquence de 500 Hz. Les résultats montrent que 66 % à 94 % de l'énergie emmagasinée dans les stratifiés $[C_3/L]_s$ et $[C_2/L_2]_s$ est dissipée par les couches de carbone. Pour les composites $[L/C_3]_s$ et $[L_2/C_2]_s$, la dissipation de l'énergie est essentiellement gouvernée par les couches de lin qui représente environ 90 % à 97 % de l'énergie totale.

Afin de comparer l'amortissement des différents stratifiés hybrides, nous avons reporté sur la figure 5 l'évolution du facteur de perte en fonction de la fraction volumique des fibres de lin pour une fréquence de 500 Hz. Une augmentation significative de l'amortissement est observée lorsque les couches de lin se situent à l'extérieur du stratifié hybride. Par exemple, les propriétés d'amortissement des stratifiés $[C_3/L]_s$ et $[L/C_3]_s$ sont supérieures de 6 % et 196 % par rapport au composite à fibres de carbone, respectivement. Cette augmentation de l'amortissement est attribuée essentiellement à la présence des couches de lin qui ont des propriétés d'amortissement supérieures à celles des couches de carbone (tableau 3). D'autre part, la différence d'amortissement entre les séquences d'empilement $[C_n/L_m]_s$ et $[L_m/C_n]_s$ est principalement liée à la répartition des énergies de déformation emmagasinées dans les couches de lin et de carbone (figure 4). Nous observons que l'amortissement induit par les couches de lin dans le cas du stratifié $[C_3/L]_s$ représente seulement 1,5 % de l'amortissement total alors qu'il totalise plus de 70 % pour le composite $[L/C_3]_s$ (figure 2.11).

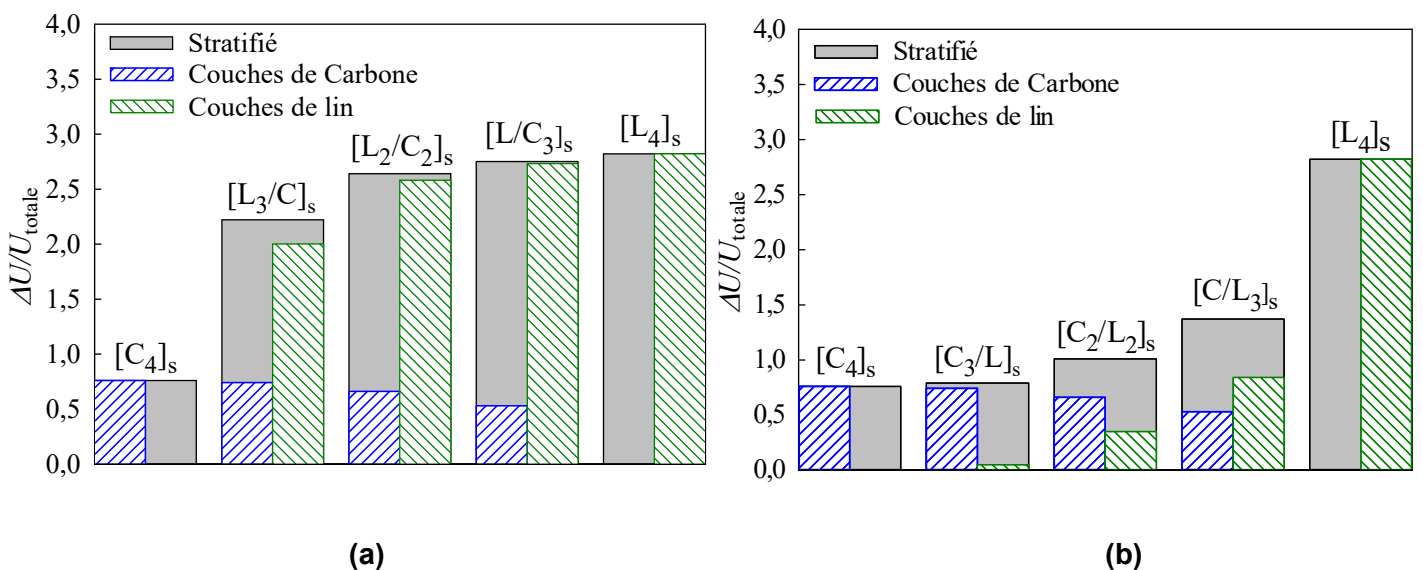


Figure 4. Évolution de la répartition des énergies dissipées dans les couches de carbone et de lin pour une fréquence de 500 Hz : (a) couches de lin placées à l'extérieur du stratifié carbone, (b) couches de lin placées à l'intérieur du stratifié carbone

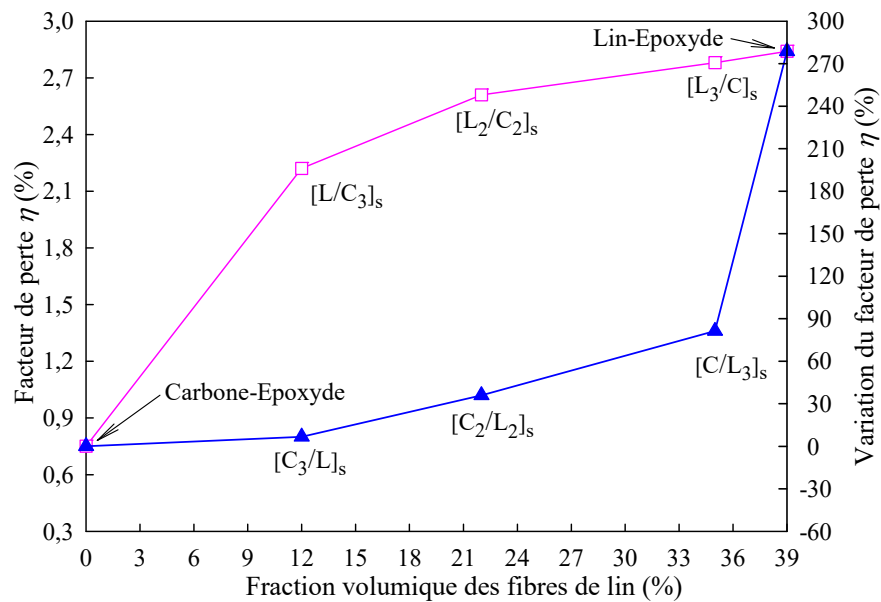


Figure 5. Évolution de l'amortissement en fonction de la fraction volumique des fibres de lin pour différentes séquences d'empilement pour une fréquence de 500 Hz.

5.3. Analyse paramétrique

L'analyse effectuée au paragraphe précédent sur les stratifiés hybrides lin-carbone a montré que la modélisation par éléments finis permet de décrire correctement leur amortissement. De plus, cette analyse a démontré que l'amortissement structural de ces stratifiés est fortement corrélé à leur rigidité de flexion et aux énergies dissipées dans les couches de lin et de carbone. Dans cette partie, nous proposons une étude paramétrique pour montrer comment il est possible d'améliorer les propriétés dissipatives des stratifiés à fibres de carbone, grâce à l'hybridation lin-carbone, sans affecter considérablement leurs performances mécaniques. De ce fait, les séquences d'empilement $[L/C/C/C/C/L]$, $[C/C/L/L/C/C]$ et $[C/L/C/C/L/C]$ ont été analysées en adoptant la démarche de modélisation développée au paragraphe 4. Pour chaque séquence d'empilement, les épaisseurs totales des couches de carbone et de lin sont, respectivement, de l'ordre de 5 et 1 mm.

La figure 6 montre l'évolution de l'amortissement et du module spécifique en fonction de ces séquences d'empilement. Il apparaît clairement que le remplacement de deux couches de carbone par deux couches de lin dans le stratifié de référence $[C/C/C/C/C/C]$ augmente son amortissement de 15 % ($[C/L/C/C/L/C]$) à 30 % ($[L/C/L/C/C/L]$). Nous soulignons aussi que le stratifié $[C/L/C/C/L/C]$ est très intéressant en terme d'amortissement, comparé au stratifié $[C/C/L/L/C/C]$. En effet, ces deux composites ont quasiment le même module spécifique de flexion que le stratifié 100 % carbone $[C/C/C/C/C/C]$. En revanche, l'amortissement de la configuration $[C/L/C/C/L/C]$ est 15 % supérieur à celui du composite $[C/C/C/C/C/C]$ contre seulement 2 % pour le stratifié $[C/C/L/L/C/C]$.

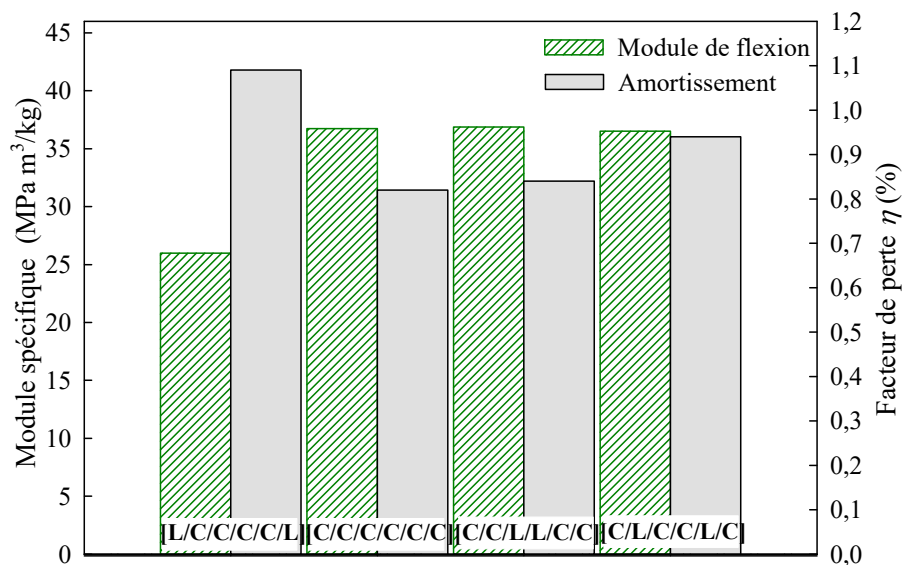


Figure 6. Evolution de l'amortissement et du module spécifique de flexion en fonction des séquences d'empilement pour une fréquence de 500 Hz.

6. Conclusion

Ce travail a été consacré à l'évaluation des propriétés dissipatives des composites hybrides lin-carbone à l'aide d'analyses expérimentale et numérique par éléments finis. En particulier, nous avons analysé l'effet de la position des couches de lin dans le composite hybride sur ses propriétés mécaniques et dynamiques. Ainsi, il a été démontré que l'ajout de deux couches de lin à l'intérieur du stratifié carbone-époxyde affecte de seulement 6% son module de flexion et ses propriétés dissipatives. En revanche, l'ajout de ces deux couches à l'extérieur du stratifié carbone-époxyde engendre une augmentation d'environ 196 % de son coefficient d'amortissement et une diminution d'environ 60 de son module de flexion. D'autre part, nous avons montré à travers l'analyse paramétrique que certaines configurations lin-carbone peuvent présenter une rigidité de flexion comparable à celle du composite carbone-époxyde tout en améliorant l'amortissement de ce dernier.

7. Bibliographie

- [1] Adams R. D., Fox M. A. O., Flood R. J. L., Friend R. J., Hewitt R. L. The dynamic properties of unidirectional carbon and glass fiber reinforced plastics in torsion and flexure. *Journal of Composite Materials* 1969; 3: 594 – 603.
- [2] Schultz A. B. and S. W. Tsai. Measurements of Complex Dynamic Moduli for Laminated Fiber-Reinforced Composites. *Journal of Composite Materials* 1969; 3: 434 – 443.
- [3] Adams R. D., and Bacon D. G. C. Effects of Fibre Orientation and Laminate Geometry on the Dynamic Properties of CFRP. *Journal of Composite Materials* 1973; 7: 402 – 428.
- [4] Paxson E. B. Real and Imaginary Parts of the Complex Viscoelastic Modulus for Boron Fiber Reinforced Plastics. *Journal Acoustical Society of America* 1975; 57: 891 – 899
- [5] Gibson R.F, Plunkett R.A. Dynamic stiffness and damping of fiber-reinforced composite materials. *The Shock and Vibration Digest* 1977; 9: 9 – 17.
- [6] Chandra R., Singh S.P., Gupta K. Damping studies in fiber-reinforced composites - a review. *Composite Structures* 1999; 46(1): 41– 51.
- [7] Yim J.H, Jang B.Z. An analytical method for prediction of the damping in symmetric balanced laminates composites. *Polymer Composites* 1999; 20(2): 192 – 199.
- [8] Berthelot J-M. Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method. *Composite Structures* 2006; 74:186 – 201.
- [9] Berthelot J.-M., Assarar M., Sefrani Y., El Mahi A. Damping Analysis of Composite Materials and Structures. *Composite Structures* 2008; 85(3): 189 – 204.
- [10] El Mahi A., Assarar M., Sefrani Y., Berthelot J.-M. Damping Analysis of Orthotropic Composite Materials and Laminates. *Composites Part B* 2008; 39(7): 1069 – 1076.
- [11] Assarar M., El Mahi A., Berthelot J.-M. Damping Analysis of Sandwich Composite Materials, *Journal of Composite Materials* 2009; 43(13): 1461 – 1485.
- [12] Maheri M. R. et Adams R. D. 1995. Finite element prediction of modal response of damped layered composite panels. *Composites Science and Technology*; 55: 13 – 23.
- [13] Saba N., Jawaid M., Alothman O.Y., Paridah M.T. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials* 2016; 106:149 – 159.
- [14] Duc F, Bourban P.E, Manson JAE. Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composites Part A* 2014; 64:115 – 23.
- [15] Pothan L.A., Oommen Z., Thomas S., Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology* 2003; 63: 283 – 293.
- [16] Wielage B, Lampke T, Utschick H, Soergel F. Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* 2003; 139(1–3):140 – 6
- [17] Duc F, Bourban PE, Manson JAE. The role of twist and crimp on the vibration behaviour of flax fibre composites. *Composites Science and Technology* 2014; 102: 94 – 96.
- [18] Duc F, Bourban PE, Manson JAE. Dynamic mechanical properties of epoxy/flax fibre composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2014; 33(17): 1625 – 1633.
- [19] Le Guen M-J., Newmana R.H., Fernyhough A, Staiger M. P. Tailoring the vibration damping behaviour of flax fibre-reinforced epoxy composite laminates via polyol additions. *Composites Part A* (2014; 67: 37 – 43.
- [20] Berthelot J-M. (2012). *Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures*. Tec & Doc, Paris, 5th edition.
- [21] Assarar M., El Mahi A., Berthelot J.-M. Evaluation of the dynamic properties of PVC foams under flexural vibrations, *Composite Structures* 2012; 94: 1919 – 1931.
- [22] Assarar M., Zouari W., Sabhi H., Ayad R., Berthelot J.-M. Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites. *Composite Structures* 2015; 132: 148–54.