



HAL
open science

Effet du vieillissement sur le comportement en vibration de matériaux composites quasi-unidirectionnels à fibres de lin

Khouloud Cheour, Mustapha Assarar, Daniel Scida, Rezak Ayad, Xiao-Lu Gong

► **To cite this version:**

Khouloud Cheour, Mustapha Assarar, Daniel Scida, Rezak Ayad, Xiao-Lu Gong. Effet du vieillissement sur le comportement en vibration de matériaux composites quasi-unidirectionnels à fibres de lin. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623247

HAL Id: hal-01623247

<https://hal.science/hal-01623247v1>

Submitted on 25 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effet du vieillissement sur le comportement vibratoire de matériaux composites quasi-unidirectionnels à fibres de lin

Water ageing effect on the vibration behaviour of flax fibre reinforced composites

Khouloud Cheour¹, Mustapha Assarar¹, Daniel Scida¹, Rezak Ayad¹ et Xiao-Lu Gong²

1 : Laboratoire d'Ingénierie et Sciences des Matériaux (LISM EA 4695)
Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) – IUT de Troyes
9 rue de Québec CS 90396 10026 Troyes Cedex
e-mail : khouloud.cheour@univ-reims.fr
khouloud.cheour@gmail.com

2 : Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée
Institut Charles Delaunay, Université de Technologie de Troyes
12 rue Marie Curie, CS 4206 - 10004 Troyes Cedex

Résumé

La présente contribution vise à analyser l'influence du vieillissement sur les propriétés mécaniques et dissipatives de composites quasi-unidirectionnels lin-époxyde. La mise en œuvre de ces matériaux a été effectuée à l'aide de la technique de thermocompression. Ces composites ont ensuite été exposés à un vieillissement en immersion totale dans l'eau à température ambiante. Soumis à des vibrations libres, leurs propriétés mécaniques et coefficients d'amortissement ont été déterminés, dans deux configurations (non-vieillis et vieillis), via une analyse modale expérimentale. Pour apprécier l'influence de l'absorption d'eau sur ces propriétés, les essais de vibrations ont été effectués après 4, 11 et 180 jours d'immersion. Les résultats obtenus ont montré que l'absorption d'eau engendre des variations significatives des propriétés élastiques et des coefficients d'amortissement des composites lin-époxyde. Nous avons également montré que ces variations sont quasiment réversibles pour les coefficients d'amortissement et partiellement réversibles pour les propriétés mécaniques.

Abstract

The aim of this work is to study the effect of water ageing of quasi-unidirectional flax fibre reinforced epoxy composites on their mechanical and damping properties. The studied composites were manufactured by press platen process and subjected to water immersion at room temperature. Mechanical and damping properties of unaged and aged materials were investigated using free vibrations. Next, they were dried and tested to study the reversibility of the variation of those properties caused by water ageing. The results showed that water uptake induces a decrease in the bending moduli and an increase in loss factors compared in term of ageing time. It was also proven that those variations are practically reversible in the case of loss factors but irreversible in the case of bending moduli.

Mots Clés : fibres naturelles, vieillissement, vibrations libres, propriétés mécaniques, amortissement

Keywords : natural fibres, water ageing, free vibrations, mechanical properties, damping

1. Introduction

Les matériaux composites renforcés de fibres synthétiques sont largement utilisés par les industriels pour les différents avantages qu'ils offrent, comme la légèreté, la résistance et la souplesse de conception. Cependant, l'utilisation des fibres synthétiques soulève un certain nombre de problèmes environnementaux en termes de recyclabilité en fin de cycle de vie. En l'occurrence, plusieurs chercheurs se sont intéressés à leur substitution en étudiant des composites renforcés en fibres naturelles et des biopolymères [1-3]. En effet, les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes et de nombreux atouts si l'on s'intéresse aux impacts environnementaux [4-6]. Il s'agit de ressources renouvelables, biodégradables, neutres quant aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère et requérant peu d'énergie pour être produites [6]. De plus, leur faible masse volumique permet de réduire les impacts environnementaux liés au transport et leur biodégradabilité offre des solutions avec peu d'impact sur l'environnement en fin de vie [5-6].

Toutefois, leur sensibilité à l'eau reste un inconvénient majeur pour leur développement au sein de structures exposées à l'humidité. En effet, plusieurs travaux de recherche ont montré que l'exposition prolongée à l'humidité et à la température des composites à fibres naturelles engendre des variations significatives de leurs propriétés mécaniques [7-14]. Par exemple, Dhakal et al [13] ont montré que dans le cas du polyester renforcé par des fibres de chanvre, l'absorption d'eau augmente avec la fraction volumique et que l'humidité associée à une haute température entraîne une dégradation importante des propriétés mécaniques. Dans une autre contribution, Le Duigou et al. [8] se sont intéressés au vieillissement à l'eau de mer d'un bio-composite PLLA (Poly(lactic acid)) renforcé par des fibres de lin. Selon ces auteurs, il apparaît que l'affaiblissement de l'interface fibre-matrice est l'un des principaux facteurs d'endommagement engendré par la diffusion d'eau. D'autres travaux ont associé l'endommagement induit par l'absorption d'eau à l'affaiblissement de certaines interfaces au sein de la fibre naturelle elle-même [9-12]. Malgré ces activités de recherche, peu d'auteurs se sont intéressés aux effets du vieillissement sur les propriétés dynamiques des composites à fibres naturelles notamment leur amortissement. C'est dans ce contexte que le présent travail se situe. Ainsi, des composites lin-époxyde à renfort quasi-unidirectionnel (UD) ont été vieillis jusqu'à saturation afin d'identifier leurs propriétés mécaniques et d'amortissement ainsi que leur évolution en fonction de la durée d'immersion dans l'eau.

2. Mise en œuvre des matériaux

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des stratifiés à renfort quasi-UD (masse surfacique 200 g/m² et rapport chaîne/trame de 91/9). Ils ont été élaborés par thermocompression à l'IFTS de Charleville-Mézières. Les 12 couches de tissus quasi-unidirectionnel sont imprégnées une par une par la résine époxyde SR1500 associée au durcisseur SD2503, tous les deux commercialisés par la société Sicomin. Une fois imprégnés, ces tissus sont mis dans une thermo-presse sous une pression de 6 bars et une température de 40°C durant 3h30. La fraction volumique des fibres de ces composites est de 0,35. Les plaques de matériaux ainsi élaborées sont ensuite découpées avec une tronçonneuse à disque diamanté pour obtenir des éprouvettes sous forme de poutre de différentes longueurs et orientations (0, 45 et 90°). Par la suite, les composites quasi-UD orientés à 0, 45 et 90° seront désignés respectivement par UD-0, UD-45 et UD-90.

3. Procédure expérimentale

L'analyse modale expérimentale a pour objectif de caractériser les propriétés dynamiques des matériaux étudiés. La figure 1 montre le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour analyser les vibrations des éprouvettes, sous forme de poutres, préalablement découpées à partir des plaques présentées au paragraphe 2. 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 (240, 260, 280 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 faire 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. Des relevés de mesures ont été effectués en différents points (préalablement définies sur l'éprouvette), afin de reconstituer les modes propres et les déformées modales des poutres étudiées (figure 1).

L'identification des fréquences propres et des coefficients d'amortissement a été également effectuée

en utilisant la méthode PolyMax (Polyreference Modal Analysis eXtended) développée par la société LMS [15]. Celle-ci considère la réponse d'une structure comme la somme des réponses de plusieurs systèmes à un seul degré de liberté. La réponse construite à partir de ces systèmes est ensuite ajustée avec celle obtenue expérimentalement à l'aide d'un algorithme d'optimisation.

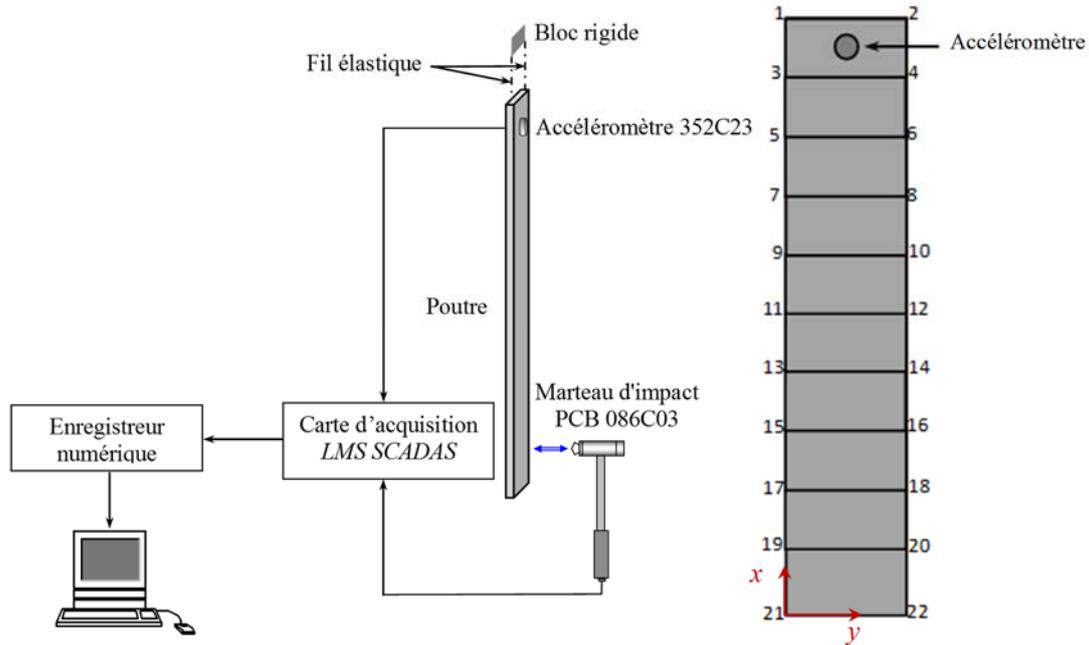


Fig. 1. Dispositif expérimental dans le cas d'une excitation à l'aide d'un marteau d'impact.

4. Absorption d'eau

Pour suivre la sorption de l'eau dans les composites, la gravimétrie est la méthode généralement utilisée. Elle consiste à suivre l'évolution de masse des échantillons au cours du temps, mesurée à intervalle régulier sur une période totale de 180 jours, durée nécessaire pour que les matériaux soient saturés en eau.

Après différentes durées d'immersion, les caractéristiques liées à l'absorption d'eau des composites sont déterminées par le pourcentage en masse d'eau absorbée M_t défini par l'équation :

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 (\%) \quad (\text{Eq. 1})$$

où W_0 est la masse de l'échantillon non vieilli à $t = 0$ et W_t est la masse de l'échantillon vieilli à l'instant t .

Différents modèles ont été développés dans le but de décrire le phénomène d'absorption d'eau des composites. Dans le cas d'une plaque plane d'épaisseur h et de dimensions importantes par rapport à celle-ci, la teneur en eau ne varie qu'en fonction de la direction suivant l'épaisseur et le problème devient unidimensionnel. Le modèle de diffusion de Fick, traduisant la prise de masse d'un échantillon due à l'absorption au temps t jusqu'à saturation, s'écrit :

$$\frac{M_t}{M_m} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{h^2}\right) \quad (\text{Eq. 2})$$

où M_t est la teneur en eau à l'instant t , M_m est la masse maximale en eau à l'équilibre et D est le coefficient de diffusion.

Le coefficient de diffusion D est déterminé par l'équation suivante, dans le cas où les valeurs M_t sont inférieures à 60% de la valeur à saturation M_m :

$$D = \pi \left(\frac{k}{4M_m} \right)^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

où k est la pente de la partie linéaire de la courbe $M_t = f(\sqrt{t}/h)$.

De plus, un facteur de correction est nécessaire pour tenir compte des dimensions fines des éprouvettes :

$$D_c = D \left(1 + \frac{h}{L} + \frac{h}{w} \right)^{-2} \quad (\text{Eq. 5})$$

Où D_c est le coefficient de diffusion transversal corrigé, L et w sont respectivement la longueur et la largeur de l'éprouvette.

5. Résultats et discussion

5.1 Absorption d'eau dans les composites

La figure 2 présente, pour les trois orientations des fibres, l'évolution de la quantité d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps. La masse à saturation et le coefficient de diffusion D déduits de ces courbes sont reportés dans le tableau 1. Les courbes d'absorption d'eau du composite lin-époxyde sont en adéquation avec un comportement de type fickien, avec une courbe initiale linéaire et la présence ensuite d'un plateau de saturation, comme le montre la figure 2. D'autre part, la masse à saturation et le coefficient de diffusion d'eau des composites orientés à 90° et à 45° sont d'environ 9 % à 116 % supérieurs à ceux de l'UD-0. Cette différence est liée principalement au fait que l'absorption d'eau dans le cas de l'UD-0 est gouvernée par la diffusion suivant l'épaisseur. En revanche, dans le cas l'UD-90, la diffusion d'eau est influencée par celle suivant la direction des fibres qui devient non négligeable (figure 3b). D'autre part, la différence observée entre les stratifiés orientés à 90° et 45° (tableau 1) est due essentiellement aux effets de bords qui s'accroissent lorsque les fibres sont orientées à 45° (figure 3c) [16].

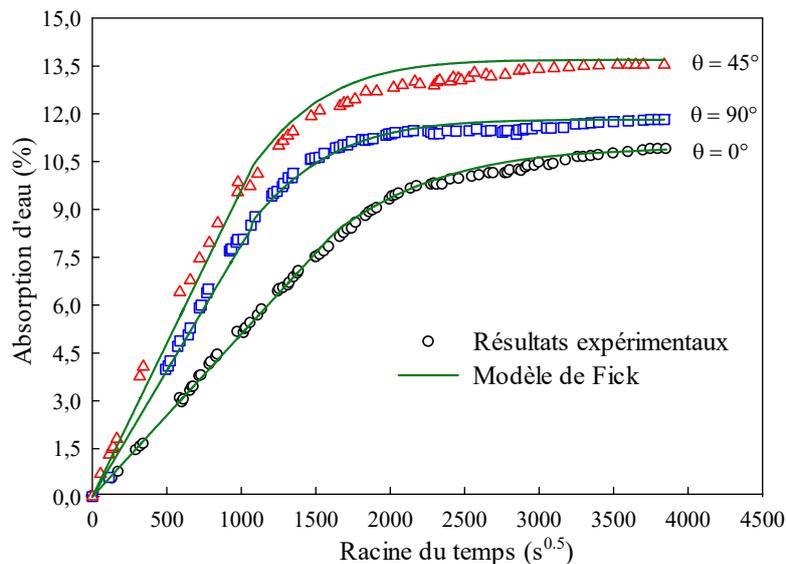


Fig. 2. Courbe d'absorption d'eau par les composites à fibres de lin dans les trois orientations.

Orientation des fibres	M_m (%)	$D \times 10^{-7}$ (mm ² /s)	$D_c \times 10^{-7}$ (mm ² /s)
0°	10,95	9,59	6,67
90°	11,52	17,33	12,45
45°	13,70	20,11	14,19

Tab. 1. Masses à saturation M_m , coefficients de diffusion D et coefficients de diffusion corrigés D_c des composites.

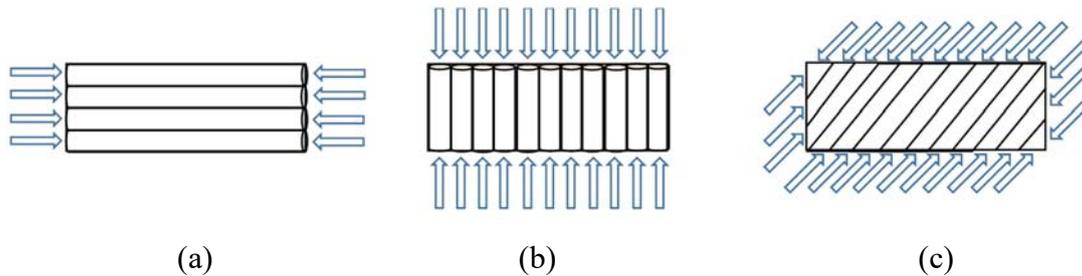


Fig. 3. Diffusion d'eau dans les composites lin-époxyde dans les trois orientations : a) 0°, b) 90° et c) 45°.

5.2 Effet du vieillissement sur le module de flexion des composites lin-époxyde

L'objectif de cette partie est d'analyser l'effet du vieillissement sur les fréquences propres et sur les coefficients d'amortissement des composites lin-époxyde. Ainsi, les vibrations libres ont été utilisées comme une méthode non-destructive permettant d'évaluer les propriétés mécaniques des composites ainsi que leur évolution en fonction de la durée du vieillissement.

Dans le cas d'une poutre orthotrope en configuration libre-libre, les quatre premières fréquences propres analytiques de flexion transversale sont données par l'expression suivante [17] :

$$\begin{aligned}
 m = 1 \quad \omega_1 &= 22,373\omega_0, \\
 m = 2 \quad \omega_2 &= 61,673\omega_0, \\
 m = 3 \quad \omega_3 &= 120,90\omega_0, \\
 m = 4 \quad \omega_4 &= 200,00\omega_0,
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 6}$$

avec

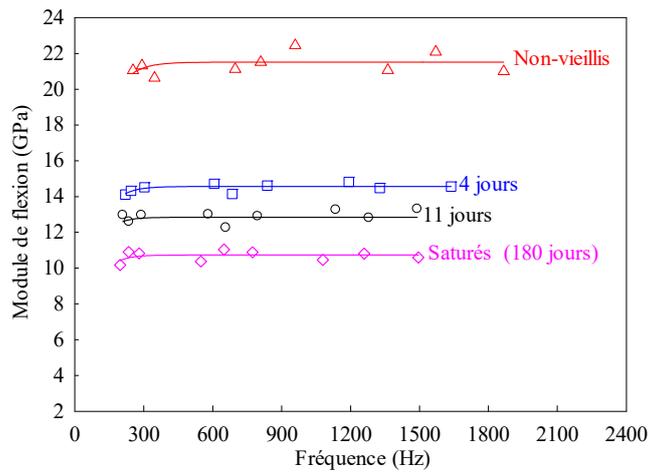
$$\omega_0 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E_{fx} h^3}{12\rho_s}},
 \tag{Eq.7}$$

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.

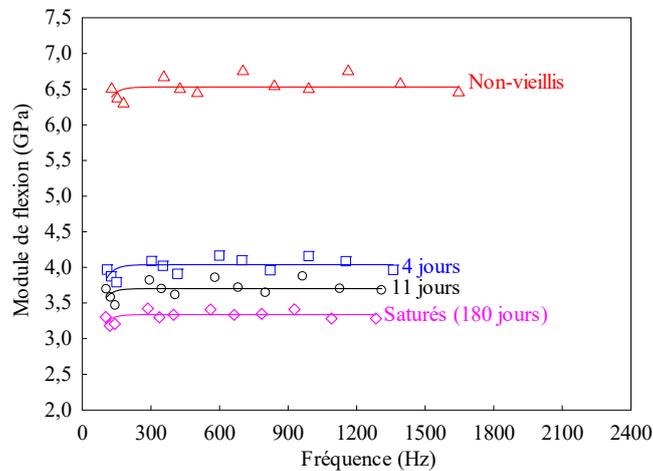
La relation (7) montre qu'il est possible de déterminer le module de flexion des poutres étudiées à partir de leurs fréquences propres de flexion hors-plan. La figure 4 montre les résultats obtenus à partir de cette démarche. Il apparaît une légère augmentation avec la fréquence du module de flexion des matériaux non-vieillis et vieillis (0,9 à 9,2%). D'autre part, les modules de flexion des composites vieillis sont considérablement affectés par le vieillissement en particulier durant les quatre premiers jours d'immersion dans l'eau. Pour mieux illustrer l'effet de l'immersion dans l'eau sur le module de flexion de ces composites, une comparaison entre le module de flexion normalisé par rapport aux non vieillis à 500 Hz est représentée sur la figure 5 (module de flexion/ module de flexion de l'échantillon non-vieilli). Le choix de cette fréquence est lié au fait que pour tous les matériaux, le facteur de perte et les valeurs des modules de flexion deviennent constants à partir de cette fréquence.

S'agissant du composite orienté à 0°, le module de flexion chute, respectivement, de 32%, 40% et 48% après 4, 11 et 180 jours d'immersion dans l'eau. Ces variations sont plus importantes pour les composites orientés à 90° et à 45° puisque celles-ci enregistrent plus de 50% de baisse au bout 180

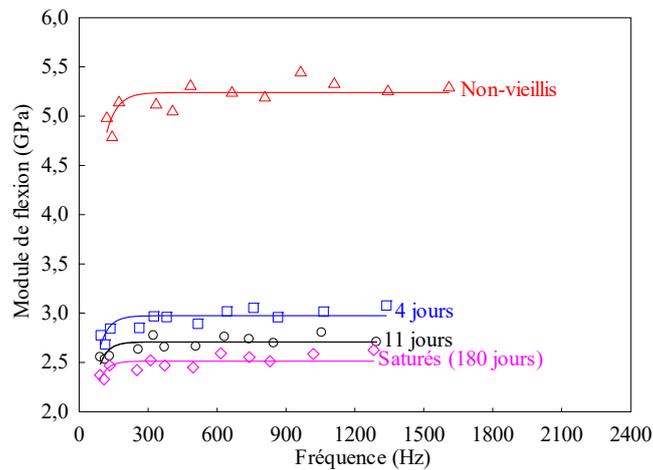
jours de vieillissement. Cela est dû principalement à la quantité d'eau absorbée par ces derniers composites comparés à l'UD-0 (figure 3).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Modules de flexion en fonction de la fréquence des matériaux vieillis et non-vieillis (a) 0°, (b) 90° et (c) 45°.

La diminution des modules de flexion des composites lin-époxyde en fonction de la durée du vieillissement est due d'une part, à la dégradation de la fibre de lin et d'autre part, à l'affaiblissement de l'interface à l'échelle de la fibre élémentaire et du composite (interface fibre-matrice). En effet, la

structure multicouche de la fibre de lin offre plusieurs interfaces et zones de transition entre ses constituants. Ainsi, l'eau peut affecter directement les composantes hydrophiles et affaiblir les différentes interfaces intra-fibres [9, 18-20]. L'absorption d'eau par la fibre de lin entraîne également des variations de son volume, induisant des concentrations de contraintes au niveau de l'interface fibre-matrice, à l'origine de l'apparition de microfissures et du délaminage entre les différents plis du composite.

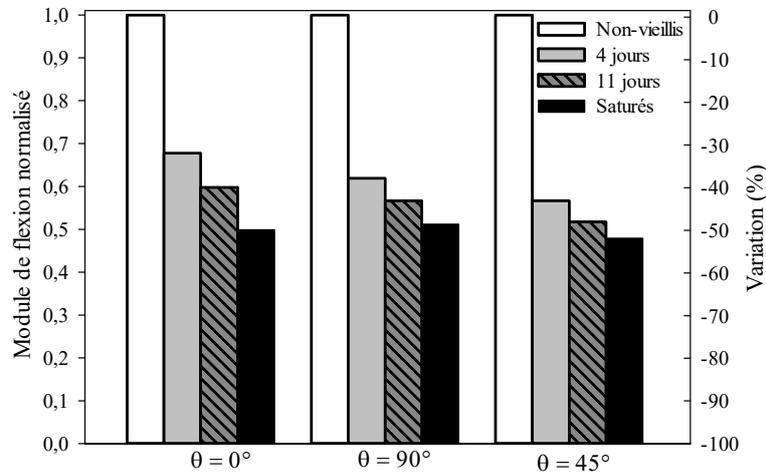


Fig. 5. Evolution des modules de flexion normalisés pour les différentes orientations des fibres des composites vieillis et non vieillis à 500Hz.

5.3 Influence du vieillissement sur les propriétés d'amortissement

La figure 6 donne les résultats déduits de l'analyse modale expérimentale pour les matériaux non-vieillis et vieillis. S'agissant des composites non-vieillis, il apparaît que l'amortissement du composite orienté 45° est d'environ 24 et 75% supérieur à celui des stratifiés orientés à 90° et 0° , respectivement. Ceci est attribué principalement à la répartition des différentes énergies dissipées et notamment celle liée au cisaillement dans le plan [21]. D'autre part, les résultats obtenus montrent que les coefficients d'amortissement du stratifié lin-époxyde sont nettement supérieurs à ceux des composites à fibres de verre et de carbone (tableau 2). Les bonnes propriétés dissipatives du composite à fibres de lin peuvent être dues à plusieurs mécanismes dissipatifs, à l'échelle du composite et au niveau de la fibre élémentaire [22, 23]. En effet, des frottements peuvent avoir lieu au niveau des microfissures présentes à l'interface entre la fibre et la matrice. Contrairement aux fibres de verre et de carbone, la morphologie de la fibre de lin favorise également différents mécanismes de dissipation d'énergie par friction entre ses parois primaire et secondaire d'une part, et entre les microfibrilles de cellulose, hémicellulose et lignine de chaque paroi, d'autre part [23].

η (%)	Lin-époxyde	Verre-époxyde	Carbone-époxyde
0°	1,87	0,72	0,52
90°	2,57	2,34	1,56
45°	3,4	2,90	1,82

Tab. 2. Comparaison des facteurs de perte de différents matériaux composite à matrice époxyde à 500Hz.

Pour les composites vieillis, la figure 6 montre que les coefficients d'amortissement augmentent lorsque la durée de vieillissement croît en particulier durant les premiers jours d'immersion. Afin de mieux illustrer cette augmentation, une comparaison entre le facteur de perte des composites non-vieillis et vieillis est représentée sur la figure 9. Après seulement quatre jours de vieillissement, le facteur de perte augmente d'environ 75%, 60% et 54% pour les composites orientés à 0° , 90° et 45° , respectivement. Contrairement aux résultats obtenus pour le module de flexion, la variation de

l'amortissement du composite orienté à 0° est plus importante que celle des deux autres stratifiés (UD-90 et UD-45).

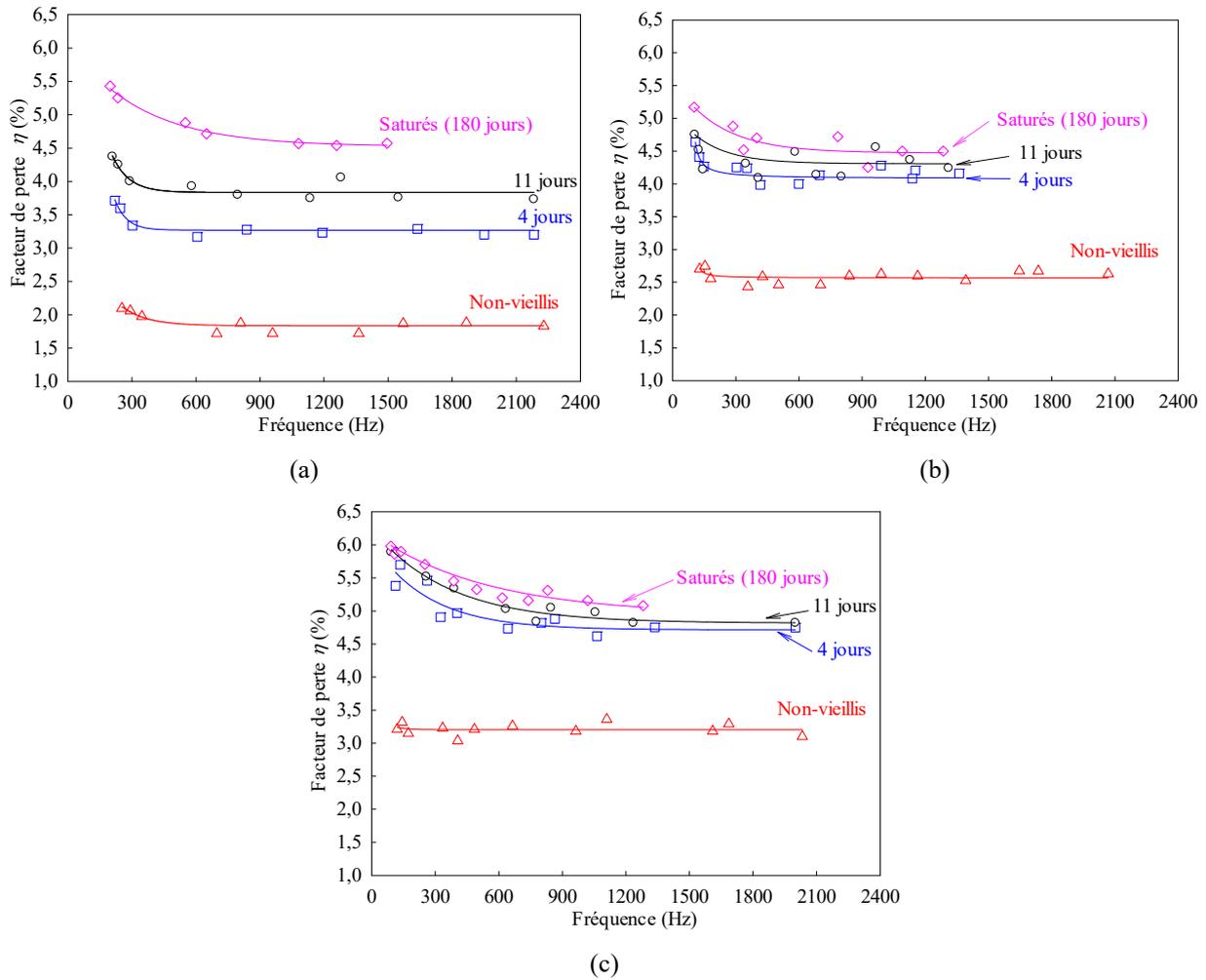


Fig. 6. Evolution de l'amortissement en fonction de la fréquence pour les matériaux non-vieillis et vieillis : (a) 0°, (b) 90° et (c) 45°.

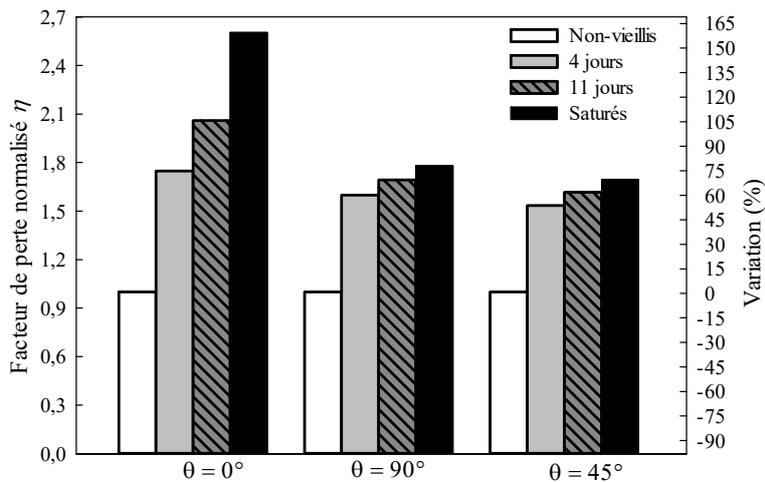


Fig. 7. Amortissement normalisé des composites non-vieillis et vieillis pour une fréquence de 500Hz.

A titre exemple, l'amortissement de l'UD-0 augmente de 160% à la saturation contre 70% pour l'UD-90 et l'UD-45. Ce constat montre que la diffusion d'eau affecte le composite lin-époxyde à différentes échelles et notamment au sein de la fibre élémentaire de lin. En effet, dans le cas de l'UD-0, les énergies dissipées sont

essentiellement dues à l'énergie de déformation emmagasinée par les fibres [21]. Ainsi, l'absorption de l'eau favorise différents mécanismes frottement entre les composantes des fibres de lin, en particulier au niveau sa couche S2, ce qui explique en grande partie l'augmentation prononcée de l'amortissement dans le cas de l'UD-0 vieilli.

5.4 Réversibilité des propriétés mécaniques et dynamiques

Afin d'étudier la réversibilité des propriétés mécaniques et dynamiques des composites vieillis, les éprouvettes composites lin-époxyde ont été vieillis jusqu'à saturation puis séchées et testées en vibrations libres. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8. Après le séchage, le composite lin-époxyde récupère une grande partie de ses propriétés initiales. En effet, le module de flexion des composites vieillis puis séchés est d'environ 15 à 17 % inférieurs à ceux des matériaux non vieillis. La réversibilité partielle du module de flexion montre qu'en plus des phénomènes de plastification, aspects dominants correspondant à la réversibilité, le vieillissement engendre également d'autres modes d'endommagement irréversibles. Ces modes sont liés essentiellement au gonflement des fibres, responsable de l'apparition des microfissures, notamment au niveau de la matrice, et des interfaces fibre-matrice et intra-fibre.

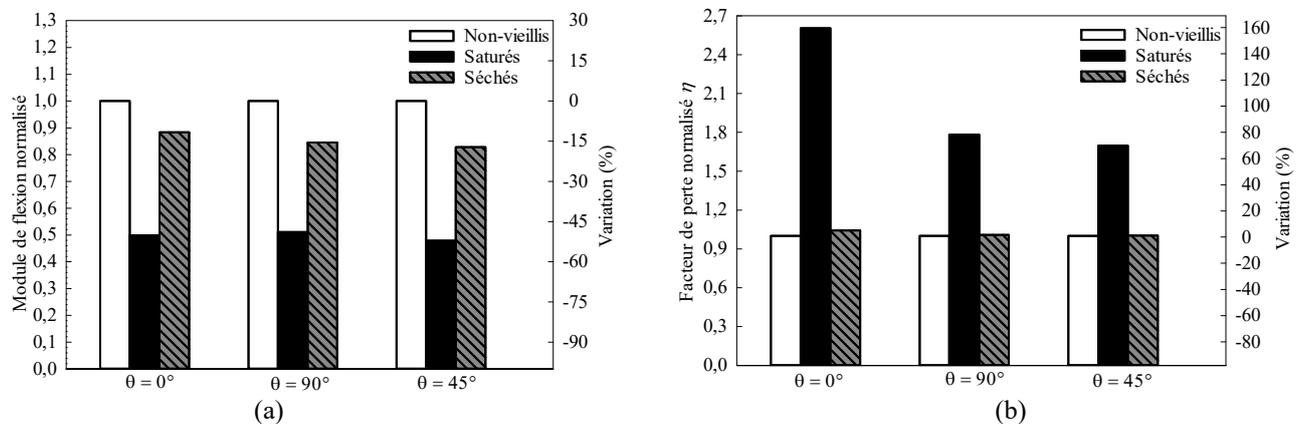


Fig. 8. Propriétés normalisées des matériaux non-vieillis, vieillis et séchés : (a) module de flexion et (b) amortissement

S'agissant de l'amortissement, les composites vieillis puis séchés récupèrent la quasi-totalité de leurs propriétés dissipatives. D'une manière générale, l'amortissement des matériaux composites est généralement attribué à plusieurs mécanismes de dissipation d'énergie, comme le comportement viscoélastique de la matrice, l'amortissement dû à l'interphase et l'amortissement dû à l'endommagement [24]. Par conséquent, la réversibilité observée peut être expliquée par le fait que l'amortissement dû à l'endommagement, comme les micro-fissures et le décollement fibre/matrice, peut être négligé devant l'amortissement engendré par l'absorption d'eau et par le frottement entre les fibres de lin.

6. Conclusion

Dans ce travail, l'influence du vieillissement hydrique sur les propriétés mécaniques et dynamiques des composites lin-époxyde a été étudiée. Ces propriétés ont été caractérisées sur la base d'une analyse modale expérimentale utilisant des poutres composites en configuration libre-libre. Les résultats obtenus à partir de cette démarche ont montré que les propriétés mécaniques et d'amortissement des composites lin-époxyde varient sensiblement avec la durée d'immersion dans l'eau. Ces variations sont liées à plusieurs paramètres tels que la quantité d'eau absorbée et l'orientation des fibres. La réversibilité partielle du module de flexion des composites lin-époxyde, après le séchage, montre que le vieillissement engendre des modes d'endommagement irréversibles tels que l'apparition des microfissures, notamment au niveau de la matrice et des interfaces fibre-matrice.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement la communauté d'agglomération « Le Grand Troyes » pour son soutien financier qui nous a permis de mener à bien ce travail.

Références

- [1] Poilâne, C., Cherif, Z.E., Richard, F., Vivet, A., Ben Doudou, B., Chen, J. Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material. *Composite Structures* 2014; 112 (1) : 100-112.
- [2] Caprino, G., Carrino, L., Durante, M., Langella, A., Lopresto, V. Low impact behaviour of hemp fibre reinforced epoxy composites. *Composite Structures* 2015; 133 : 892-901.
- [3] Rubio-López, A., Olmedo, A., Díaz-Álvarez, A., Santiuste, C. Manufacture of compression moulded PLA based biocomposites: A parametric study. *Composite Structures* 2015; 131 : 995-1000.
- [4] Pervaiz, M., Sain M.M. Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources, Conservation and Recycling* 2003, 39: 325-40.
- [5] Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Arora, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2004 ; 35: 371-6.
- [6] Karmaker, A.C., Hoffmann, A., Hinrichsen, G. Influence of water uptake on the mechanical properties of jute fiber-reinforced polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science* 1994 ; 54:803-807.
- [7] Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilâne, C., Ayad, R. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax–fibres and glass–fibres. *Materials and Design* 2011; 32: 788-795.
- [8] Le Duigou, A., Davies, P., Baley, C. Seawater ageing of flax/poly (lactic acid) biocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 2009; 94 : 1151-1162.
- [9] Le Duigou, A., Bourmaud, A., Davies, P., Baley, C. Long term immersion in natural sea water of Flax/PLA biocomposite. *Ocean Engineering* 2014; 90 : 140-148.
- [10] Le Duigou, A., Bourmaud, A., Baley, C. In-situ evaluation of flax fibre degradation during water ageing. *Industrial Crops and Products* 2015; 70 : 204-210.
- [11] Assarar, M., Scida, D., Zouari, W., Saidane, E.H., Ayad, R. Acoustic emission characterization of damage in short hemp-fiber reinforced polypropylene. *Polymer composites* 2016; 37 (4) : 1101-1112.
- [12] Scida, D., Assarar, M., Poilâne, C., Ayad, R. Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering* 2013; 48 : 51-58.
- [13] Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., Richardson M.O.W. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology* 2007; 67 : 1674-1683.
- [14] Panthapulakkal, S., Sain M. Injection-molded short hemp fiber/glass fiber reinforced polypropylene hybrid composites—mechanical, water absorption and thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science* 2007; 103(4): 2432-2441.
- [15] Peeters B., Van Der Auweraer H., Guillaume P. The PolyMAX frequency domain method: a new standard for modal parameter estimation. *Shock and Vibration* 2004; 11: 395 – 409.
- [16] Chilali A., Assarar M., Zouari W., Kebir H., Ayad R. Effect of geometric dimensions and fibre orientation on 3D moisture diffusion in flax fibre reinforced thermoplastic and thermosetting composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2017; 95: 75–68.
- [17] Berthelot, J.M. (2012). Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures. *Tec & Doc*, Paris, 5th edition.
- [18] Hu R.H., Sun M.Y., Lim J.K. Moisture absorption, tensile strength and microstructure evolution of short jute fiber/poly lactide composite in hygrothermal environment. *Materials and Design* 2010; 31: 3167 – 3173.
- [19] Morvana C., Andème-Onzighia C., Giraulta R., Himmelsbach D.S. Building flax fibres: more than one brick in the walls. *Plant Physiology and Biochemistry* 2003; 41: 935 – 944.
- [20] Shubhra Q.T.H., Alam A.K.M.M., Beg M.D.H. Mechanical and degradation characteristics of natural silk fiber reinforced gelatin composites. *Materials Letters* 2011; 65: 333 – 336.
- [21] Berthelot, J.M., Sefrani, Y. Damping analysis of unidirectional glass and Kevlar fibre composites. *Composites Science and Technology* 2004; 64: 1261-1278.
- [22] Duc F., Bourban P.E., Manson J.A.E. Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014; 64:115 – 23.
- [23] Le Guen M-J., Newman 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: Applied Science and Manufacturing* 2014; 67: 37 – 43.
- [24] Chandra, R., Singh, S.P., Gupta, K. Damping studies in fiber-reinforced composites—a review. *Composite Structures* 1999; 46 (1): 41-51.