



HAL
open science

Comparaison des performances techniques de composites hybrides carbone/lin en fonction de la séquence d'empilement

Alexandre Vivet, Etonam Tossou

► To cite this version:

Alexandre Vivet, Etonam Tossou. Comparaison des performances techniques de composites hybrides carbone/lin en fonction de la séquence d'empilement. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02423985

HAL Id: hal-02423985

<https://hal.science/hal-02423985>

Submitted on 26 Dec 2019

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.

Développement et caractérisation de nouveaux composites hybrides carbone/lin

Development and characterization of new carbon/flax hybrid composites

Etonam Tossou¹, Alexandre Vivet¹

¹ : Département, CIMAP
Université de Caen Basse Normandie / IUT d'Alençon
Pôle universitaire de Montfoulon, 61250 Damigny
e-mail : etonam.tossou@unicaen.fr et alexandre.vivet@unicaen.fr

Résumé

Face à un fort besoin d'allègement des structures, les matériaux composites sont de plus en plus recherchés dans le secteur industriel notamment dans le domaine des transports. Cependant, les matériaux composites comme tout autre matériau, en plus d'être mécaniquement performant, doivent remplir d'autres fonctions comme l'amortissement de chocs et de vibrations pour une bonne tenue en service. Pour remplir cette double exigence, une des solutions est d'utiliser la technique d'hybridation qui consiste à utiliser au sein d'un même composite des fibres naturelles et synthétiques à la fois afin d'exploiter leurs atouts respectifs. L'objectif de ce travail est donc le développement et la caractérisation de nouveaux composites stratifiés hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin choisies respectivement pour leur rigidité et leur pouvoir amortissant. La caractérisation des plaques stratifiées fabriquées en infusion de résine montre que le composite carbone a de meilleures propriétés mécaniques et microstructurales tandis que le composite lin propose des propriétés amortissantes très intéressantes. Les résultats montrent que l'hybridation du lin avec du carbone permet d'améliorer considérablement les faibles propriétés mécaniques du composite lin et les mauvaises propriétés amortissantes du composite carbone. Aussi faut-il noter que la séquence d'empilement des couches a une influence significative sur le comportement et les propriétés des stratifiés hybrides.

Abstract

Faced with a strong need for lightening structures, composite materials are increasingly sought in the industrial sector, particularly in the transport sector. However, composite materials like any other material, in addition to being mechanically efficient, must perform other functions such as damping shock and vibration for good performance in service. To meet this double requirement, one of the solutions is to use the hybridization technique which consists in using within the same composite natural and synthetic fibers at the same time in order to exploit their respective advantages. So, the objective of this work is the development and characterization of new hybrid laminate composites reinforced by carbon and flax fibers chosen respectively for their rigidity and their damping power. The characterization of the laminate composite plates manufactured with resin infusion process shows that the carbon composite has better mechanical and microstructural properties while the flax composite offers very interesting damping properties. The results show that hybridization of flax with carbon considerably improves the low mechanical properties of the flax composite and the poor damping properties of the carbon composite. It is worth mentioning that the stacking sequence of layers has a significant influence on the behavior and properties of the hybrid laminates.

Mots Clés : composite hybride, carbone, lin, propriétés mécaniques, propriétés d'amortissement.

Keywords : hybrid composite, carbon, flax, mechanical properties, damping properties.

1. Présentation des matériaux

Deux renforts tissus (l'un en lin et l'autre en carbone (figure 1)) ont été utilisés dans cette étude et ont été imprégnés avec une résine époxy. Le tissu lin est un toile de grammage 240 g/m² et fait de mèches de fils. Le tissu carbone est un sergé de grammage 189 g/m² et constitué de mèches de fibres. Les plaques composites ont été mises en œuvre grâce à la technique d'infusion de résine. Six séquences d'empilement de huit couches ont été étudiées (tableau 1). La symétrie miroir a été respectée afin d'éviter le gauchissement des plaques lors du refroidissement.

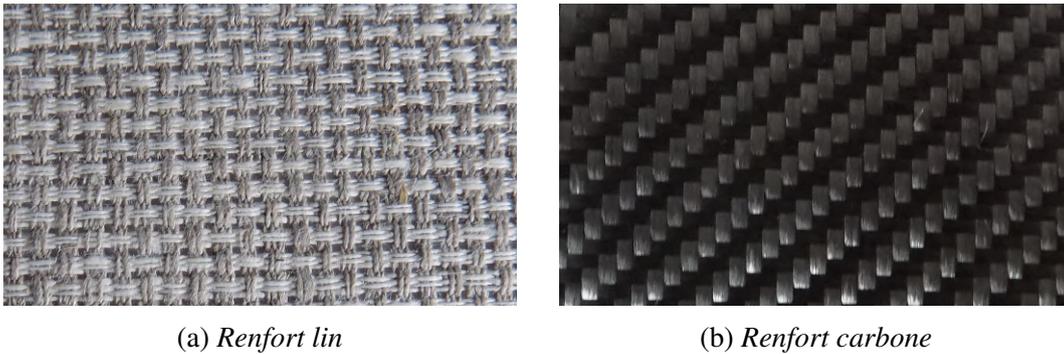


FIGURE 1 – Apparence des renforts

Désignation	Nombre de plis lin/carbone	Définition de la séquence
[LLLL]s	8/0	L-L-L-L-L-L-L-L
[LLCC]s	4/4	L-L-C-C-C-C-L-L
[LCLC]s	4/4	L-C-L-C-C-L-C-L
[CLCL]s	4/4	C-L-C-L-L-C-L-C
[CCLL]s	4/4	C-C-L-L-L-L-C-C
[CCCC]s	0/8	C-C-C-C-C-C-C-C

Tableau 1 – Définition des séquences d'empilement des stratifiés. *s* = symétrie, *C* = Carbone et *L* = Lin

2. Techniques expérimentales

La caractérisation des plaques stratifiées a été réalisée à travers plusieurs essais expérimentaux : flexion 3 points (norme ISO 14125), indentation instrumentée (norme ISO 14577), choc (norme ISO 179-1) et vibrations (norme ASTM E 756-98). Seuls les résultats de ces essais seront discutés dans cet article. En ce qui concerne leur principe et leur description, le lecteur pourra se référer à la littérature. Toutefois, nous souhaitons souligner que les essais d'indentation ont été analysés avec la méthode d'Oliver et Pharr [1] qui permet d'obtenir la dureté H et le module d'indentation E_{ind} des stratifiés à partir des courbes expérimentales de charge-décharge. Pour les tests de vibrations, les 4 premiers modes de flexion ont été retenus, et les coefficients d'amortissement ont été obtenus grâce à la méthode -3dB [2]. En flexion, les propriétés recherchées sont la résistance (contrainte à la rupture σ_f), la rigidité (module E_f) et la déformation à la rupture ϵ_f . Enfin pour les essais de choc, la résilience K et l'endommagement du composite sont les propriétés visées.

3. Microstructure des plaques stratifiées

En termes de microstructure, les calculs (calcul analytique connaissant les dimensions et la masse de plaque ainsi que les caractéristiques des renforts et de la matrice) ont montré que le composite carbone a de meilleures caractéristiques par rapport au composite lin (tableau 2). En effet, les taux de fibres et de porosités sont respectivement de 55,59% et de 1,16% pour le carbone contre 35,07% et 13,01% pour le lin. Plusieurs facteurs expliquent ce résultat. Les principaux sont la structure poreuse des fibres de lin (présence d'une cavité poreuse appelée *lumen*), la mauvaise compatibilité entre les fibres de lin et la matrice polymère, le caractère torsadé des fils de lin et la faible capacité de compaction du renfort tissu de lin (à l'état sec) en raison de la rigidité des fils limitant le taux de fibres maximum pouvant être obtenu (mais généralement les renforts naturels comparés aux renforts synthétiques sont moins compactables).

De plus, on remarque que l'hybridation des couches de carbone et de lin permet d'améliorer les propriétés microstructurales du composite lin. Les taux de fibres des composites hybrides sont plus élevés que celui du composite lin tandis que leurs taux de porosités sont inférieurs à celui du composite lin. De plus, la séquence d'empilement des couches a une influence majeure sur les résultats. On pourra constater que plus les couches de carbone sont placées à l'extérieur du stratifié plus ses propriétés s'améliorent; son taux de fibres augmente et son taux de porosités diminue. Inversement, pour les mêmes raisons qui expliquent la différence de microstructure entre le composite carbone et lin, la présence de couches de lin à l'extérieur entraîne une diminution du taux de fibres et une augmentation du taux de porosités. Plus ces couches de lin sont situées à l'extérieur du stratifié hybride moins ses propriétés sont bonnes.

Ainsi, la meilleure microstructure est donnée par la séquence $[CCLL]_s$ qui permet d'augmenter le taux de fibres du composite lin de 25% et de réduire son taux de porosités de 69%, parce que toutes les couches de carbone sont disposées à l'extérieur et, de part et d'autre des couches de lin.

Séquence		$[LLLL]_s$	$[LLCC]_s$	$[LCLC]_s$	$[CLCL]_s$	$[CCLL]_s$	$[CCCC]_s$
Fibres (V_f)	(%)	35,07	40,09	40,47	42,16	43,99	55,59
Matrice (V_m)		51,91	49,65	51,49	51,74	51,98	43,25
Porosité (V_p)		13,01	10,26	8,03	6,10	4,03	1,16

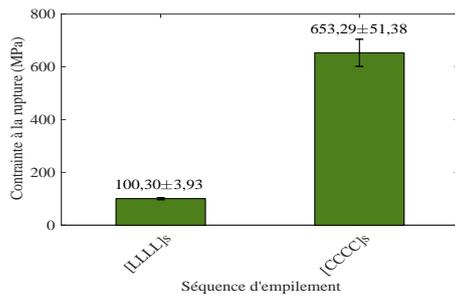
Tableau 2 – Quantification de la microstructure des composites stratifiés

4. Propriétés mécaniques

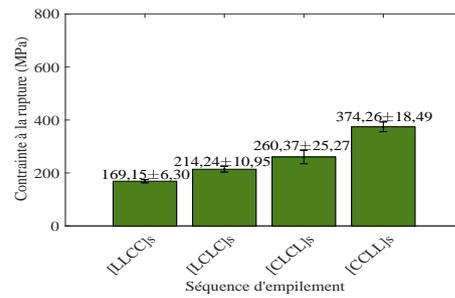
4.1. Propriétés de flexion

Les résultats de flexion montrent que le composite carbone possède de très bonnes propriétés comparativement au composite lin (figures 2a et 2c). Les propriétés mécaniques en flexion, à savoir les résistance (contrainte maximale) et rigidité (module) obtenues pour le composite carbone, sont respectivement de 653,29 MPa et de 49,61 GPa tandis que celles du composite lin sont de 100,30 MPa et de 7,08 GPa. On remarquera donc que la résistance en flexion du composite carbone est 6,5 fois supérieure à celle du composite lin et que son module est 7 fois plus grand que celui du composite lin. Ceci s'explique d'une part par les propriétés mécaniques des fibres de carbone qui sont plus élevées que celles des fibres de lin et d'autre part par le fait que le composite carbone possède un taux de fibres plus élevé que celui du composite lin. La technique d'hybridation permet d'améliorer progressivement et de façon significative les caractéristiques mécaniques du composite lin, quelle que soit la séquence d'empilement hybride (figures 2b et 2d). L'apport des couches de carbone renforce donc les propriétés du lin. De plus si l'on place les couches de carbone à l'extérieur, les propriétés sont encore meilleures. Par exemple, par rapport à la séquence lin $[LLLL]_s$, on obtient quasiment 4 fois plus de résistance et 6 fois plus de rigidité en plaçant toutes les couches de carbone à l'extérieur (séquence $[CCLL]_s$). Cette augmentation de propriétés n'est pas seulement due à la position extérieure des couches rigides (couches de carbone) mais elle est également due au fait que le taux de fibres du composite augmente avec la présence de ces couches à l'extérieur.

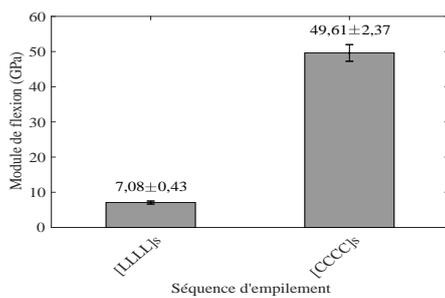
En outre, il a été trouvé que la déformation à rupture du composite carbone est, malgré sa résistance et sa rigidité, plus faible que celle du composite lin (figure 2e). La capacité d'élongation des fibres de lin explique cette différence. Avec l'hybridation, on a remarqué que cette faible déformation à rupture du composite carbone s'améliore lorsque les couches de lin sont placées à l'extérieur (figure 2f). La plus grande valeur de déformation à rupture est obtenue avec la séquence $[LLCC]_s$ et vaut 3,24% alors que celle du composite composé uniquement de carbone vaut 1,53%.



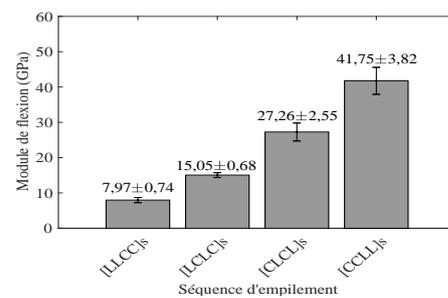
(a) Contrainte à la rupture des non-hybrides



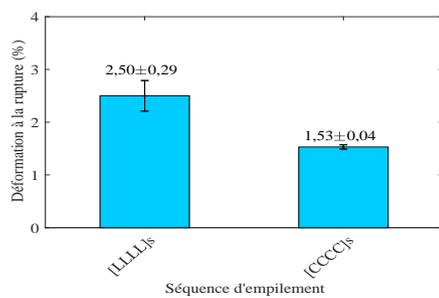
(b) Contrainte à la rupture des hybrides



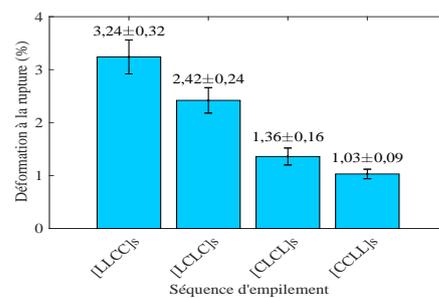
(c) Module en flexion des non-hybrides



(d) Module de flexion des hybrides



(e) Déf. à la rupture des non-hybrides



(f) Déf. à la rupture des hybrides

FIGURE 2 – Évolution des propriétés de flexion des stratifiés (déf. = déformation)

4.2. Propriétés d'indentation

En indentation, les propriétés (dureté et module) des stratifiés hybrides sont supérieures à celles du composite lin. Ceci démontre encore une fois l'intérêt de la technique d'hybridation. En effet, pour le composite lin, nous avons obtenu une dureté de 150 MPa et un module de 2,51 GPa (figures 3a et 3c). Alors que, suivant la séquence d'empilement, une dureté allant de 162 à 186 MPa et un module variant de 2,86 à 3,14 GPa ont été obtenus comme le montrent les figures 3b et 3d. Ces caractéristiques hybrides sont toutefois inférieures à celles du composite carbone qui possède les propriétés d'indentation les plus élevées (333,50 MPa de dureté et 4,21 GPa de rigidité). Les raisons qui expliquent ces propriétés intéressantes du composite carbone sont la nature rigide des fibres de carbone, la qualité de l'adhérence interfaciale [3] (aussi bien fibre/matrice que pli/pli) et la qualité de la microstructure. La séquence d'empilement des plis a une influence sur les propriétés du stratifié hybride. Il a été démontré que la meilleure résistance en indentation s'obtient en disposant les 4 couches de carbone à l'intérieur du composite. En fait, ce bloc composite interne en carbone permet, grâce à sa rigidité, de tenir les contraintes d'indentation induites par l'indenteur après que les deux plis de lin se trouvant à l'extérieur (précisément sur la face indentée) aient perdu leur résistance. Avec cette séquence ($[LLCC]_s$), la résistance (dureté) et la rigidité (module d'indentation) initiales du composite lin connaissent chacune une augmentation de 25%.

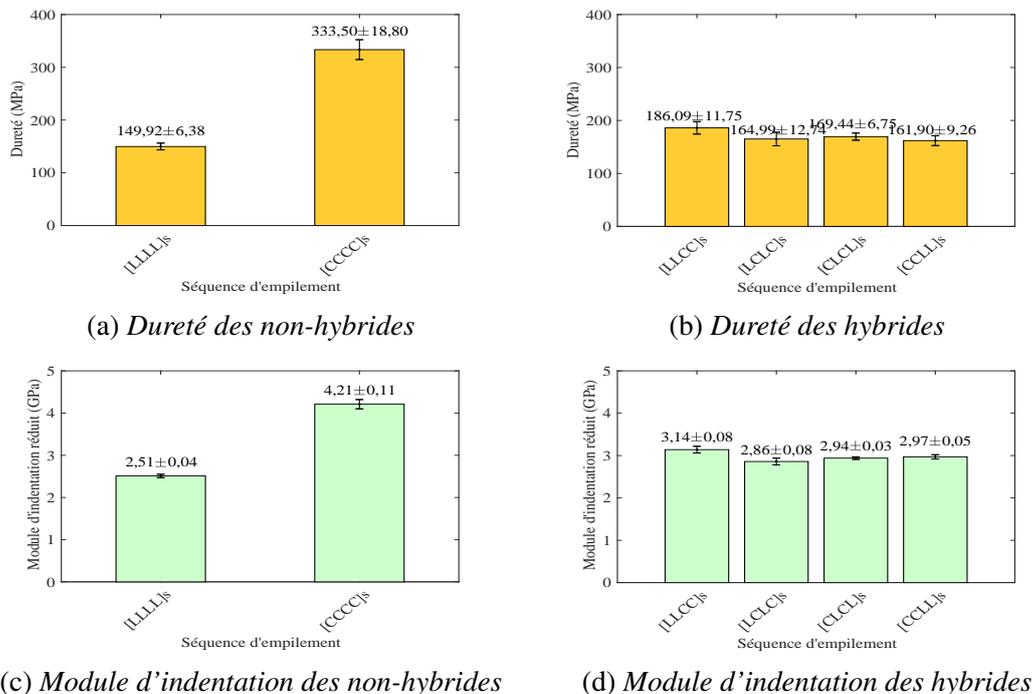


FIGURE 3 – Évolution des propriétés d'indentation des stratifiés

4.3. Propriétés d'impact

Durant leur vie en service, les matériaux composites sont souvent soumis à des sollicitations d'impact comme des chocs. Le comportement à l'impact de ces composites est caractérisé par sa capacité d'absorption d'énergie (ténacité) et sa tolérance aux dommages. Dans le cas de notre étude, les résultats des essais de résilience ont montré d'une part que le composite carbone a une bonne ténacité mais est très sensible à la rupture et, d'autre part, que le composite lin a une très faible capacité d'absorption d'énergie de choc mais possède une meilleure tolérance aux endommagements. La valeur de résilience trouvée pour le stratifié carbone est de $10,02 \text{ J/cm}^2$ qui est de 214% supérieur à celle du stratifié lin dont la valeur est de $3,19 \text{ J/cm}^2$ (figure 4a). Des résultats similaires ont été trouvés dans

la littérature [4, 5, 6, 7]. La différence de comportement observée entre les deux types de composite est essentiellement attribuée à la mauvaise résistance de l'adhésion entre les fibres naturelles (lin) et la matrice polymère, comparativement aux fibres synthétiques (carbone) qui ont une meilleure compatibilité avec la matrice. Ces zones de faible adhésion des fibres naturelles avec la matrice favorisent la propagation des fissures responsables de la dégradation de la résistance du composite.

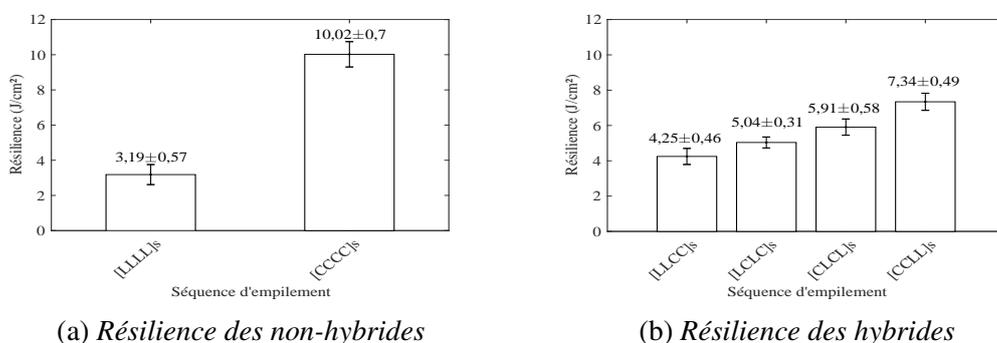


FIGURE 4 – Évolution de la résilience des stratifiés

L'observation des éprouvettes après essais nous a permis d'analyser les endommagements des deux composites. Toutes les éprouvettes composites, carbone comme lin, ont connu des ruptures partielles avec une déformation en V. Un mécanisme de rupture de fibres a été observé. Néanmoins, on a observé une rupture plus sévère des éprouvettes en carbone dont tous les plis ont été endommagés (figure 5a). Ceci est lié à une concentration de contrainte due au caractère fragile des fibres de carbone qui éliminent la distribution des contraintes dues à l'impact [8]. Cette sensibilité à la rupture du composite carbone paraît logique vu la valeur de sa résilience, car plus celle-ci est élevée plus les fissures ont besoin d'énergie pour se propager. D'autre part, une déformation plus prononcée avec une rupture modérée (tous les plis n'ont pas rompu) (figure 5d) a été remarquée au niveau des éprouvettes en lin. Ceci s'explique par flexibilité de pliage [9] des couches en raison de la déformabilité des fibres de lin.



FIGURE 5 – Mécanismes d'endommagement des éprouvettes composites carbone et lin

L'analyse des résultats des composites hybrides montre que les valeurs des énergies de choc sont comprises entre celles du composite carbone et du composite lin. La figure 4b montre que l'hybridation des couches de lin avec des couches de carbone permet d'améliorer les capacités d'absorption d'énergie du composite à fibres de lin d'une part, et que la séquence d'empilement a une influence sur cette capacité d'absorption d'énergie d'autre part. Le changement de position des couches de carbone dans

les configurations hybrides engendrent des variations dans le comportement au choc. L'énergie d'impact et la tolérance aux dommages dépendent strictement du comportement en impact des fibres de la face impactée (face en compression) [8] en raison de la différence entre les caractéristiques de déformation des fibres de carbone et de lin. On remarque que les séquences dont les couches de carbone sont situées à l'extérieur ont une capacité d'absorption d'énergie plus élevée que celle des séquences dont les fibres de lin sont disposées à l'extérieur (figure 4b). Le stratifié hybride qui offre la meilleure capacité d'absorption d'énergie est la séquence [CCLL]_s avec une résilience de 7,34 J/cm² qui est plus élevée de 130% à celle du stratifié lin. De plus, un écart de 24,20% est obtenu entre l'énergie absorbée par la séquence [CCLL]_s et celle absorbée par la séquence [CLCL]_s (d'une valeur de 5,91 J/cm²). Ce qui montre que le nombre de couches de carbone disposées à l'extérieur a une influence significative sur la ténacité du composite hybride. Plus il y a de couches de carbone à l'extérieur plus la capacité d'absorption d'énergie augmente. Inversement, la résilience du composite [LLCC]_s où deux couches de lin sont placées à l'extérieur est inférieure de 18,59% à celle du composite [LCLC]_s avec une seule couche de lin à l'extérieur. Plus il y a de couches de lin à l'extérieur plus l'énergie de choc absorbée est moindre. Ces analyses démontrent que la capacité d'absorption du composite stratifié hybride dépend de celle des couches extérieures c'est-à-dire les couches qui sont directement impactées par l'impacteur.

En ce qui concerne les modes de déformation, toutes les éprouvettes ont également déformé en V. L'observation des éprouvettes après essais a montré un mécanisme de rupture de fibres des éprouvettes (face opposée à la face d'impact) semblable à celui des séquences hybrides selon que la face des éprouvettes soit en carbone ou en lin. Ce constat est en accord avec les travaux de Bozkurt et al. [8] qui ont montré que la tolérance à l'endommagement d'un composite hybride est liée au comportement à l'impact des fibres de la surface sollicitée par le choc. La ductilité des fibres de lin permet au pli de lin sollicité lors du choc de se déformer sans casser.

5. Propriétés d'amortissement

La figure 6a présente l'évolution du coefficient d'amortissement des composites lin et carbone en fonction de la fréquence. Ce résultat montre une augmentation des coefficients d'amortissement avec la fréquence. De plus, on remarque que les coefficients d'amortissement pour le stratifié lin [LLLL]_s, sont nettement plus élevés que ceux du stratifié carbone [CCCC]_s. Le stratifié lin affiche alors le meilleur pouvoir amortissant. Les écarts observés entre les facteurs de perte entre composite lin et composite carbone sont liés à divers facteurs à différentes échelles. Ces facteurs sont le caractère viscoélastique des fibres de lin, l'architecture des fibres de lin, à l'interface entre les fibres ainsi qu'à l'interface fibres/matrice [10, 11, 12]. En effet, la structure de la fibre de lin favorise mieux la dissipation d'énergie que celle de la fibre de carbone. Cette dissipation d'énergie s'effectue d'une part par le frottement au sein de la paroi intra-cellulaire entre la cellulose et l'hémicellulose, et, d'autre part à travers le frottement entre les parois cellulaires. En outre, au sein du tissu de lin utilisé les fibres de lin ne sont pas parfaitement séparées. Ces fibres sont assemblées en fils torsadés au sein desquels la résine peut avoir du mal à s'infiltrer durant le processus de fabrication des plaques composites. Ces zones non ou mal imprégnées vont donc créer des mécanismes de friction entre les différentes fibres formant le fil. Par ailleurs, le problème d'adhésion entre les fibres de lin et la matrice peut favoriser la dissipation d'énergie dans le composite lin. En effet, des frottements peuvent avoir lieu au niveau des microfissures laissées par cette mauvaise adhésion interfaciale.

Lorsque nous avons hybridé les couches de carbone avec des couches de lin, nous avons observé une amélioration de la capacité d'amortissement du composite carbone. L'évolution du coefficient d'amortissement en fonction de la fréquence pour les séquences hybrides est représentée sur la figure 6b. On peut constater que les composites les plus amortissants sont ceux dont les couches de lin sont placées à l'extérieur, c'est-à-dire les séquences [LCLC]_s et [LLCC]_s. En plus, les meilleures propriétés sont obtenues pour la séquence [LLCC]_s dont les propriétés sont proches de celles du com-

posite lin, $[LLLL]_s$. En effet, nous avons obtenu, suivant les modes de vibration, une amélioration de 184% à 403% en remplaçant deux couches de carbone sur chaque face du composite carbone par deux couches de lin. Cela nous amène à conclure que plus nous avons de couches de lin à l'extérieur plus le composite a de meilleures propriétés amortissantes. La différence d'amortissement entre les séquences avec couches de carbone à l'extérieur ($[CCLL]_s$, $[CLCL]_s$) et celles avec couches de lin situées à l'extérieur ($[LLCC]_s$, $[LCLC]_s$) est attribuée à la distribution ou à la répartition des énergies dissipées dans les couches de carbone et de lin. En effet, pour les stratifiés $[LLCC]_s$ et $[LCLC]_s$, l'énergie de déformation emmagasinée est essentiellement dissipée par les couches de lin. Par conséquent le comportement de ces composites se rapproche de celui du composite lin. En revanche, pour les composites $[CCLL]_s$ et $[CLCL]_s$, l'influence des couches de carbone dans la dissipation des énergies de déformation est prédominante. L'amortissement est moindre car il est contrôlé par les couches de carbone dont les fibres n'ont pas de bonnes propriétés dissipatives.

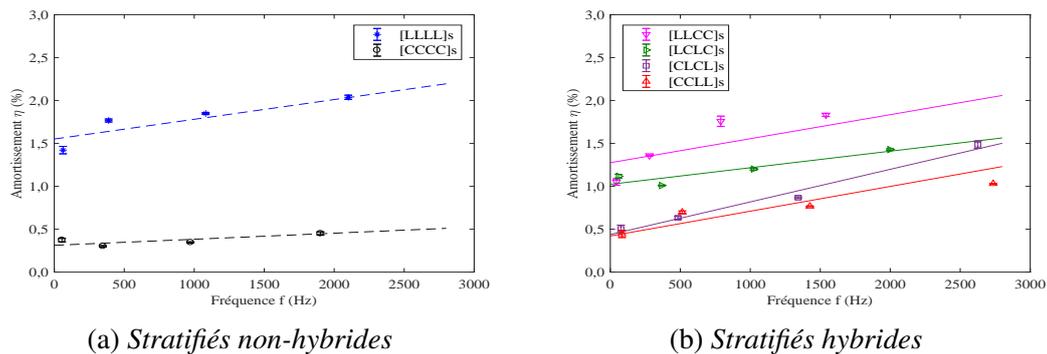


FIGURE 6 – Évolution de l'amortissement en fonction de la fréquence

6. Bilan

Le but de ce bilan est de comparer les deux séquences hybrides qui offrent les meilleures performances (suivant le besoin ou le type de sollicitation) avec les composites carbone et lin. Car l'objectif majeur de notre étude est non seulement d'étudier l'influence de l'hybridation de couches/lin et de carbone sur les propriétés des composites lin et carbone seuls mais aussi de dégager la séquence d'empilement hybride qui propose la meilleure réponse. Nous avons déjà démontré précédemment que les meilleures séquences hybrides sont les séquences $[CCLL]_s$ et $[LLCC]_s$ selon la sollicitation considérée. La figure 7 montre la position de ces deux matériaux hybrides par rapport au composite lin et au composite carbone. Attention à la lecture du graphique : les propriétés des différents matériaux sont normalisées par rapport à la plus grande valeur sur une échelle de 0 à 1 du centre vers l'extérieur. Normalement, plus on se rapproche de l'extérieur (donc de 1) plus le stratifié a une meilleure propriété. En revanche pour le taux de porosité plus on se rapproche du centre (donc de 0) plus on a un bon matériau. Ce diagramme indique clairement que le composite lin ($[LLLL]_s$), contrairement au composite carbone ($[CCCC]_s$), présente des lacunes dans les applications suivantes :

- microstructure : taux de fibres faible, taux de porosités élevé ;
- indentation : module et dureté faibles ;
- flexion : faibles résistance et rigidité ;
- choc : faible résilience.

Et donc l'hybridation des couches de lin avec des couches de carbone permet de compenser ces lacunes et d'améliorer ainsi la microstructure et les différentes propriétés mécaniques. La séquence d'empilement hybride qui permet de mieux renforcer les mauvaises propriétés énumérées ci-dessus (à

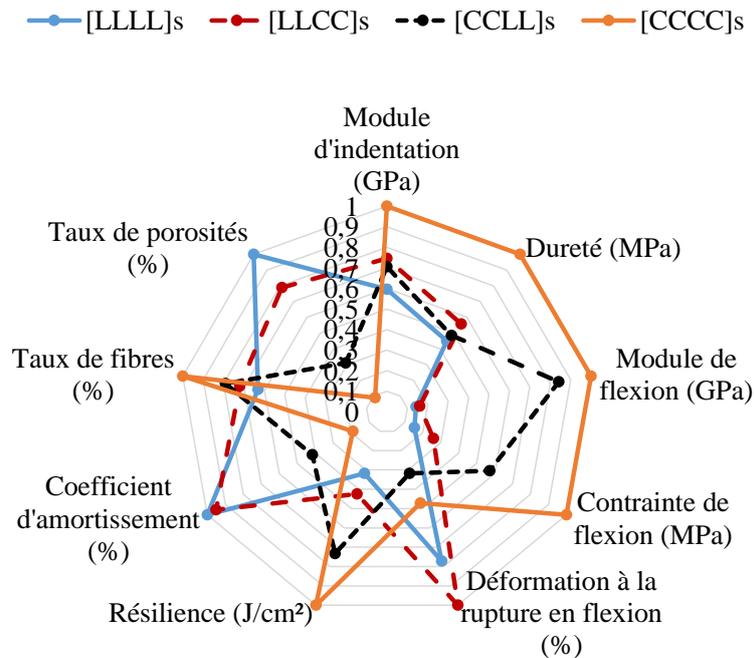


FIGURE 7 – Situation des séquences hybrides $[LLCC]_s$ et $[CCLL]_s$ par rapport aux composites carbone et lin

l'exception des propriétés en indentation) est la séquence $[CCLL]_s$ où les quatre couches de carbone sont également réparties de part et d'autre des quatre couches de lin, comme le montre la figure 7. La présence des couches de carbone à l'extérieur assure de meilleurs rendements. Par contre en indentation, c'est la séquence $[LLCC]_s$ qui apporte une meilleure résistance et une meilleure rigidité au composite lin dû essentiellement à la présence des quatre couches de carbone internes qui arrivent à supporter le chargement après la perte de résistance des deux plis de lin externes.

Par ailleurs, le diagramme indique également que le composite carbone malgré ses excellentes propriétés microstructurales et mécaniques a aussi des difficultés pour remplir certaines exigences :

- un mauvais amortissement : faible coefficient d'amortissement ;
- une faible déformation à la rupture en flexion et une tolérance aux endommagements à l'impact restreinte dues à son comportement fragile.

Dans ce cas, la séquence d'hybridation qui permet de rattraper ces difficultés est la séquence $[LLCC]_s$ grâce à l'empilement des couches de lin à l'extérieur du composite. Le lin apporte son pouvoir amortissant et sa ductilité au carbone pour le rendre meilleur d'un point de vue dynamique, déformation et endommagement.

7. Conclusion

Ce travail a montré que la technique d'hybridation permet de corriger les propriétés des matériaux composites telles que le taux de fibres, le taux de porosité, la résistance et la rigidité (en flexion, en indentation, en choc) et la capacité d'amortissement. Les résultats obtenus ont également montré que la séquence d'empilement a un grand impact sur les propriétés des composites hybrides. Afin d'optimiser la performance du composite, la séquence d'empilement à utiliser est soit celle dont les couches de carbone (couches rigides en général) sont disposées à l'extérieur soit celle dont les couches de lin (couches déformables et ayant un pouvoir amortissant) sont placées à l'extérieur. En revanche, le choix à faire parmi ces deux séquences dépend de l'objectif visé.

Références

- [1] W. Oliver and G. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus. *Journal of Materials Research*, 7 :1564–1583, 1992.
- [2] K. Cheour. Analyse du comportement en vibration des matériaux composites à fibres végétales. *Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France*, 2017.
- [3] H. Zhao, Y. Zhong, and Z. Ma. Effects of indentation depth on micro hardness and scratch behavior of thin composite laminate. *Journal of Alloys and Compounds*, 680 :105–108, 2016.
- [4] Z. Al-hajaj, B. Lawrence, H. Bougherara, and R. Zdero. Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix. *Composite Structures*, 208 :346–356, 2019.
- [5] M. Jawaid, S. Sapuan, and O. Aloth. Green Biocomposites : Manufacturing and Properties. *Springer*, page 409, 2016.
- [6] H. Dhakal, Z. Zhang, R. Guthrie, J. Macmullen, and N. Bennett. Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties. *Carbohydrate Polymers*, 96(1) :1–8, 2013.
- [7] A. Ismail, S. Khalid, and N. Nor. A Review on the Perforated Impact Energy Absorption of Kenaf Fibres Reinforced Composites. *Journal of Physics : Conference Series*, 914, 2017.
- [8] M. Bulut and Y. Bozkurt. Hybridization Effects on Charpy Impact Behavior of Basalt / Aramid Fiber Reinforced Hybrid Composite Laminates. *Polymer Composites*, 39 :467–475, 2018.
- [9] G. Oliveira, F. Muylaert, C. Gomes, and D. Ribeiro. Charpy Impact Tests of Epoxy Composites Reinforced with Giant Bamboo Fibers. *Materials Research*, 18(Suppl 2) :178–184, 2015.
- [10] M. Ben Ameer, J. Rebiere, A. El Mahi, M. Beyaoui, and M. Abdennadher. Propriétés dynamiques des composites stratifiés à fibres hybrides lin/carbone. *14 ème Congrès Français d’Acoustique, Avril 2018*, pages 997–1001.
- [11] F. Duc, P. Bourban, and J-A. Manson. The role of twist and crimp on the vibration behaviour of flax fibre composites. *Composites Science and Technology*, 102 :94–99, 2014.
- [12] J-M. Berthelot. *Mécanique des Matériaux et Structures Composites*. 2013.