



**HAL**  
open science

## Caractérisation Mécanique d'un Meta-Matériau de Forme Anti- Trichirale Fabriqué par la Technique d'Impression 3D avec un Composite Biosourcé et Biodégradable

Anis Hamrouni, Jean-Luc Rebiere, Abderrahim El Mahi, Moez Beyaoui,  
Mohamed Haddar

### ► To cite this version:

Anis Hamrouni, Jean-Luc Rebiere, Abderrahim El Mahi, Moez Beyaoui, Mohamed Haddar. Caractérisation Mécanique d'un Meta-Matériau de Forme Anti- Trichirale Fabriqué par la Technique d'Impression 3D avec un Composite Biosourcé et Biodégradable. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848312

**HAL Id: hal-03848312**

**<https://hal.science/hal-03848312>**

Submitted on 10 Nov 2022

**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.



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

## Caractérisation Mécanique d'un Meta-Matériau de Forme Anti-Trichirale Fabriqué par la Technique d'Impression 3D avec un Composite Biosourcé et Biodégradable

A. Hamrouni<sup>a,b</sup>, J-L. Rebiere<sup>a</sup>, A. El-Mahi<sup>a</sup>, M. Beyaoui<sup>b</sup> et M. Haddar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> LAUM UMR CNRS 6613, Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen - Cedex 09, 72085 Le Mans, France

<sup>b</sup> LA2MP, Université de sfax, Route de l'Aéroport Km 0.5, 3029 Sfax, Tunisie



Les méta-matériaux nids d'abeilles auxétiques ont été étudiés et évalués pour être utilisés dans de nombreuses applications. Ces structures présentent un apport au comportement mécanique par rapport aux nids d'abeilles conventionnels. Dans ce papier, une étude expérimentale du comportement mécanique d'une structure anti-trichirale est proposée. Les éprouvettes sont constituées d'un bio-composite qui est l'acide polylactique renforcé par les fibres de lin (PLA/Lin). Grâce à son comportement viscoélastique, ce composite biosourcé et biodégradable présente des caractéristiques de vibration plus efficaces par rapport à celui réalisé avec des fibres synthétiques. La technologie d'impression 3D a été utilisée dans ce travail. Les éprouvettes ont été conçues à partir d'une cellule unitaire de dimension géométrique variable. Les caractéristiques statiques et dynamiques de ce matériau ont été évaluées en fonction de leurs paramètres géométriques. Plusieurs essais de traction uni-axiale et de vibration avec une configuration encastrement-libre ont été réalisés sur ces architectures. Les résultats montrent que le coefficient de Poisson structurel de l'âme anti-trichirale varie de -0,25 à -1 en fonction du rayon ( $r$ ) des composants cylindriques de la cellule unitaire. La comparaison des performances en dynamique montre aussi que la structure avec le rayon ( $r$ ) le plus élevé présente un excellent comportement d'amortissement.

## 1 Introduction

Les structures en nid d'abeilles trouvées dans la nature ont été une source d'inspiration pour créer des structures de faible densité et de haute rigidité qui peuvent être utilisées pour diverses applications industrielles dans les domaines de l'architecture, des transports, du génie mécanique, de l'aérospatiale, du génie chimique, de la biomédecine et bien d'autres [1] [2]. Une structure en nid d'abeille permet d'offrir une résistance élevée en flexion par rapport à sa faible densité et aussi une bonne capacité à absorber de l'énergie pour les structures composites sandwich [3] [4]. Des études ont été réalisées pour améliorer les propriétés mécaniques des structures en nid d'abeilles en explorant des conceptions optimales de la structure cellulaire. Les paramètres géométriques de la cellule unitaire, peuvent être adaptés pour avoir des propriétés mécaniques bien ciblées [5]. Des études ont été menées sur les propriétés mécaniques et le comportement des structures en nids d'abeilles architecturées. Davood et al. [6] ont étudié le comportement des nids d'abeilles avec des dimensions variables. L'étude a fourni une nouvelle perspective pour développer des structures cellulaires de faible poids avec des propriétés personnalisables. Par exemple les études sur les structures en nid d'abeilles de formes chirales ont suscité de nombreux intérêts. En particulier les structures auxétiques qui ont un coefficient de Poisson négatif ce qui leur confère un bon comportement mécanique et une meilleure capacité d'absorption d'énergie [7]. Le coefficient de Poisson des architectures chirales et anti-chirales, notamment les nids d'abeilles anti-trichiraux rentrants, ont été évalués expérimentalement et par éléments finis par Alderson et al. [8] [9]. Les propriétés mécaniques des structures auxétiques tétrachirales et hexachirales ont été déterminées expérimentalement par un test de traction simple [10]. Les résultats montrent que les deux structures ont la même rigidité initiale. L'évolution de module de Young en fonction de la densité relative des nids d'abeilles anti-trichirale a fait l'objet des recherches ultérieures [11]. D'autres structures anti-chirales ont déjà été suggérées [9] [12].

Le comportement vibro-acoustique des sandwichs avec une âme anti-tétrachirale soumis à différentes excitations a été étudié par Hosseinkhani et al [13]. Certains auteurs [14] [8] ont publié les résultats d'essais expérimentaux de plusieurs structures chirales soumises à des forces de flexion et de traction. Lorato et al [15], ont déterminé

analytiquement les caractéristiques élastiques des structures chirales dans la direction transversale. Abramovitch et al. [12] ont testé expérimentalement l'impact dynamique des structures sandwichs avec des âmes tétrachirales et hexachirales.

Spadoni et al. [16] ont comparé les résultats analytiques et numériques des structures chirales lors d'essais de compression. Ces caractéristiques ont été comparées aux structures ré-entrantes et conventionnelles : il a été découvert que les configurations chirales offrent une rigidité au flambement beaucoup plus élevée. De plus, les caractéristiques mécaniques quasi-statiques des architectures anti-trichirales ré-entrantes ont été étudiées par Hu et al. [17] avec une méthode théorique et expérimentale. Leurs résultats montrent que la déformation des structures est dominée par la flexion, la déformation des ligaments et la rotation rigide des cylindres. Dans une étude récente, des configurations anti-trichirales ré-entrantes avec des ligaments en forme d'arc ont été proposées par Zhang et al. [18] pour étudier expérimentalement et numériquement la rigidité et la capacité d'absorption d'énergie.

L'étude proposée ici présente les résultats des analyses expérimentales des propriétés mécaniques d'une structure en nid d'abeille de forme anti-trichirale. Les éprouvettes sont constituées d'un bio-composite qui est l'acide polylactique renforcé par les fibres de lin. Une imprimante de type RAISE3D Pro2 Plus a été utilisée pour fabriquer les structures architecturées. Les éprouvettes ont été conçues à partir d'une cellule unitaire de dimension géométrique variable. Des essais expérimentaux ont été réalisés sur les éprouvettes pour évaluer leurs comportements mécaniques. Les propriétés ont été déterminées en statique à partir des essais de traction uni-axiale et en dynamique à partir des essais de vibration avec une configuration encastrement-libre. Enfin, l'effet des paramètres géométriques de la cellule unitaire est déterminé afin d'évaluer leur impact global sur le comportement mécanique de ce matériau.

## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Structure et mise en œuvre

Le matériau utilisé dans cette étude est fabriqué à partir d'acide polylactique (PLA) renforcé de fibres de lin avec une densité de  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  et d'un module d'Young de 3400

MPa. La fraction volumique de fibres est inférieure à 20 %. Les filaments PLA/Lin sont fournis par NANOVIA et ont un diamètre de 1,75 mm.

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{t}{L} \left( 1 + \frac{2\pi r}{3 L} \right) \quad (1)$$

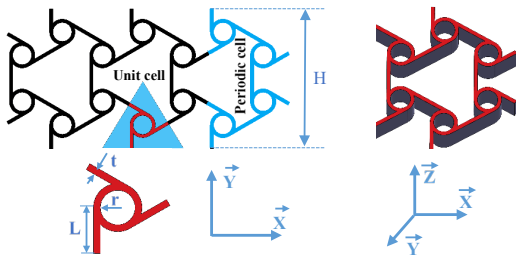


Figure 1 – Géométrie de l'architecture nid d'abeille anti-trichirale.



Figure 2 – L'imprimante RAISE3D Pro2 Plus.

La figure 1 montre la géométrie de la structure en nid d'abeille anti-trichirale avec ses différents paramètres géométriques. Les éprouvettes sont conçues avec différentes tailles de la cellule unitaire (tableau 1). La densité relative du noyau est déterminée à l'aide de l'expression (1). Toutes les cellules unitaires sont insérées dans un triangle équilatéral. L est la longueur du ligament, r est le rayon des composants cylindriques et t est l'épaisseur de la paroi cellulaire. Le plan de la cellule est porté par les axes (X, Y) et l'épaisseur selon l'axe (Z). H et e sont respectivement la largeur de l'éprouvette dans la direction Y et l'épaisseur. La figure 2 montre l'imprimante RAISE3D Pro2 Plus utilisée dans ce travail. Cette imprimante appartient à une nouvelle génération d'imprimantes 3D professionnelles et durables. Elle possède un certain nombre de capacités qui lui permettent de produire des composants précis et de haute qualité.

TABLEAU 1 – Paramètres géométrique de matériaux

r(mm)	$\rho/\rho_s$ (%)	t (mm)	L (mm)	e (mm)	H (mm)
1.2	13.31	0.6	4.17	5	25
1.7	15.40	0.6	4.17	5	25
2.2	17.48	0.6	4.17	5	25
2.7	19.56	0.6	4.17	5	25

## 2.2 Essai de traction

Les propriétés statiques du présent matériau sont étudiées avec des essais de traction uniaxial selon la norme standard

ASTM D638 [19]. La machine hydraulique standard INSTRON est utilisée avec une cellule de charge égale à 1 kN et une vitesse de 1 mm/min. La figure 3 (a) présente la configuration de l'essai de traction. Un extensomètre transversal est utilisé pour mesurer le déplacement des éprouvettes durant l'essai. Ce matériau architecturé de différentes dimensions géométriques a été testé afin de définir son coefficient de Poisson structural et son module de Young. Les structures ont été imprimées avec une longueur de 100 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur de 5 mm, comme le montre la figure 3 (b). Un bloc de 25 mm de long est imprimé avec les spécimens afin d'éviter d'endommager les cellules lors du serrage. Cinq échantillons sont testés pour chaque configuration afin de tenir compte de la variabilité des résultats expérimentaux.

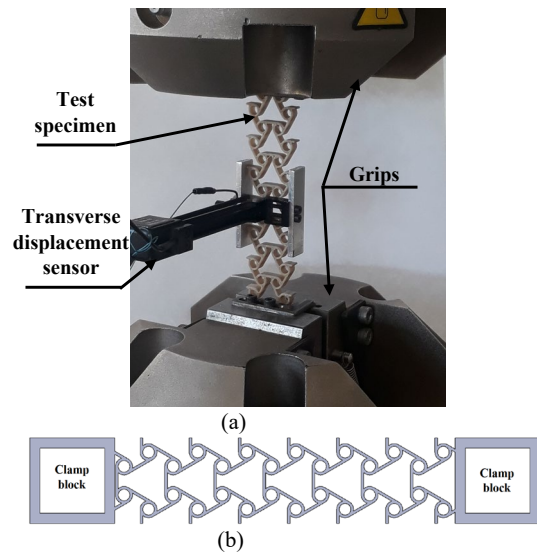


Figure 3 – (a) Équipement expérimental d'essai de traction (b) Éprouvette de traction.

## 2.3 Essai de vibration

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour caractériser les propriétés dynamiques du matériau, telles que la méthode d'analyse mécanique dynamique [20] et la fonction de réponse en fréquence expérimentale (FRF) [21] [22]. Pour étudier le comportement vibratoire de ces matériaux composites, des essais de vibration ont été effectués avec le dispositif illustré dans la Figure 4 (a). Les éprouvettes vibrations ont été évaluées à l'aide d'une configuration encastrement-libre conformément à la norme ASTM E-756 [23]. Ces éprouvettes qui font 25 mm de largeur et 5 mm d'épaisseur (Figure 4 (b)), sont imprimés avec trois longueurs libres différentes : 140, 170, 200 mm afin d'avoir une variation dans les valeurs de fréquence de crête. Pour éviter d'endommager les cellules lors du serrage et assurer un serrage de qualité constant des poutres, un bloc de 40 mm de longueur est imprimé à l'extrémité de chaque éprouvette. Expérimentalement, l'analyse modale des vibrations avec excitation par impact, présente l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre. La structure est excitée en un point proche de l'extrémité fixe avec un marteau d'impact spécial et la réponse est détectée près de l'extrémité libre à l'aide d'un vibromètre laser. Les signaux d'excitation

de la structure et ceux de la sortie du vibromètre sont alors détectés et traités par un dispositif développé par SigLab dont la fonction est d'analyser les signaux dynamiques. Cet analyseur est essentiellement composé d'une carte d'acquisition et de traitement, couplée à un logiciel de contrôle et de traitement des signaux. L'amplitude et la fréquence ont été mesurées pendant la vibration en flexion pour chaque pic de résonance de la réponse fréquentielle comme illustre la figure 4 (c). Les facteurs d'amortissements modaux peuvent être calculés à l'aide de l'approche FRF (Fonction Réponse en Fréquence), comme le montre la Figure 4 (d). L'expression (2) est utilisée pour calculer le facteur de perte ( $\eta_n$ ). Ce facteur est calculé en divisant la fréquence de la bande passante à laquelle la résonance d'amplitude diminue de 3 dB, par la fréquence de résonance ( $f_n$ ).

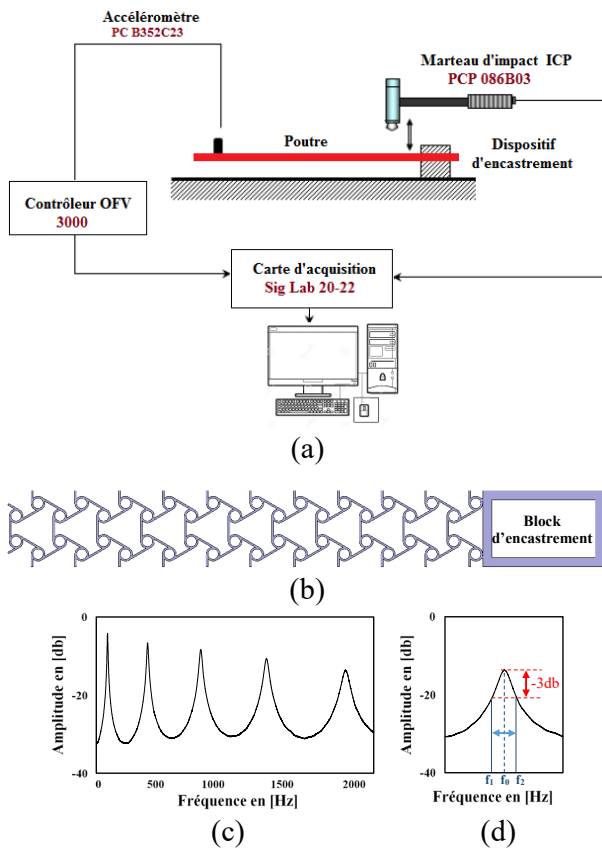


Figure 4 – (a) Dispositif expérimental (b) Eprouvette de vibration (c) Réponse fréquentielle typique et (d) Méthode FRF.

$$\eta_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{f_2 - f_1}{f_n} \tag{2}$$

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{e^2 C_n^2} \tag{3}$$

Le module de Young  $E$  des poutres a été déterminé pour chaque mode de flexion à l'aide de l'équation (3) [24], avec  $f_n$  la fréquence de résonance pour le  $n$ ème mode de flexion, " $l$ " la longueur effective de l'échantillon (longueur libre), " $e$ " l'épaisseur de la poutre dans la direction de vibration,  $\rho$  la

densité structurelle du matériau composite et  $C_n$  un coefficient pour le  $n$ ème mode d'une poutre libre encastrée, décrit dans le tableau 2.

TABLEAU 2 – Coefficients pour calculer le module de Young

$n$ ème mode	1	2	3	$n > 3$
Coefficient ( $C_n$ ) pour le $n$ ème mode	$C_1 = 0,55959$	$C_2 = 3,5069$	$C_3 = 9,8194$	$C_n = (\pi/2)(n-0,5)^2$

### 3 Résultats et discussion

Des essais de traction sont effectués sur les structures anti-trichirax avec différents rayons de composant cylindrique de la cellule unitaire. Le module de Young en fonction du rayon ( $r$ ) est déterminé à partir des courbes expérimentales contrainte-déformation longitudinale, puis normalisé par le module d'Young de celle avec  $r = 1,2$  mm.

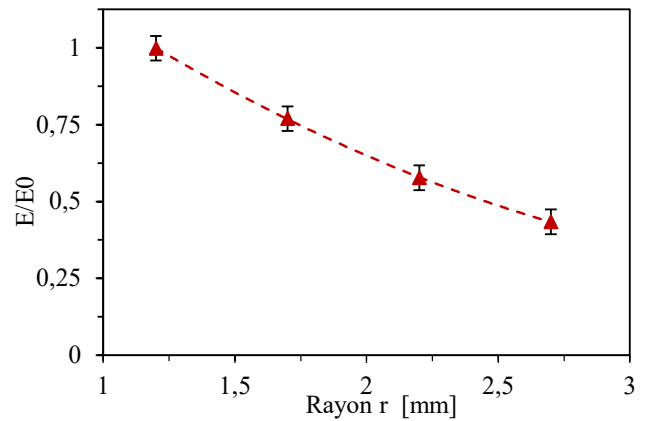


Figure 5 – Module de Young normalisé de la structure anti-trichirale en fonction du rayon ( $r$ ).

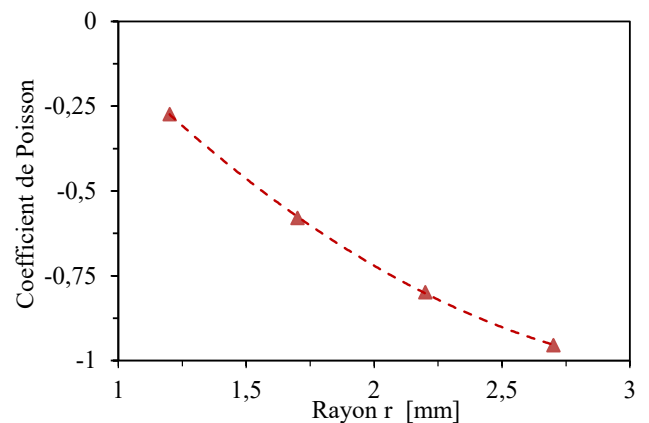


Figure 6 – Coefficient de Poisson de la structure anti-trichirale en fonction du rayon ( $r$ ).

La figure 5 montre l'évolution de module de la rigidité structurelle en fonction du rayon ( $r$ ). Lorsque  $r$  augmente, le module de Young diminue progressivement jusqu'à une

réduction d'environ 50 % pour la structure avec r égal à 2.7 mm.

De plus, le coefficient de Poisson structural peut être déterminé à l'aide des courbes de déformation transversale/longitudinale dans le domaine de déformation linéaire-élastique. Des extensomètres sont utilisés pour mesurer les déformations. Le coefficient de Poisson structural est calculé en divisant (-) la déformation transversale par la déformation longitudinale correspondante. La figure 6 présente l'évolution de coefficient de poisson structural des nids d'abeilles anti-trichiraux en fonction de rayon. Les résultats montrent que le coefficient est négatif pour ce matériau ce qui montre son comportement auxétique. Lorsque le rayon r augmente, le coefficient de Poisson négatif augmente. En effet, ce méta-matériau a une déformation transverse positive lorsqu'il est étiré sous l'effet d'un effort de traction grâce à la rotation des composants cylindriques des cellules autour de leurs axes. Lorsque r augmente, dans la cellule anti-trichirale, les composants cylindriques deviennent la source majeure qui construit la structure, tandis que les ligaments droits deviennent de plus en plus négligeables. En effet, Le rigidité et le coefficient de Poisson de ce type d'architecture résulte en grande partie du comportement mécanique des composants cylindriques dans le réseau chirale. Par conséquent, chaque variation des dimensions géométriques de la cellule de base influe sur les propriétés mécaniques de matériau.

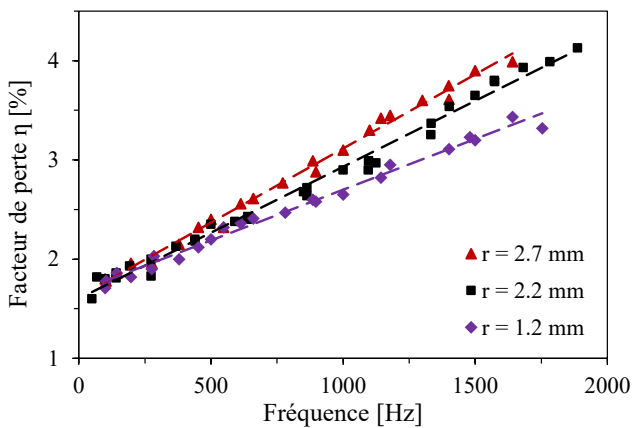


Figure 7 – Evolution du facteur de perte de l'architecture anti-trichirale en fonction de la fréquence pour différents rayons (r).

Des essais de vibration ont été réalisés pour étudier les propriétés dynamiques de la structure anti-trichirale. La figure 7 montre les résultats des essais de vibration effectués sur ces nids d'abeille avec trois rayons (r) de composante cylindrique de la cellule unitaire. Lorsque la fréquence augmente le facteur d'amortissement structural augmente. Aux basses fréquences, le facteur de perte est compris entre 1,65% et 1,80% quel que soit le rayon (r). Ensuite les résultats divergent au fur et à mesure avec l'augmentation de la fréquence. En effet, une augmentation de fréquence maximise la relaxation du matériau composite (PLA/Lin) architecturé après sa déformation, ce qui implique une augmentation du facteur de perte. Pour les hautes fréquences, l'écart entre les facteurs d'amortissement est d'environ 12%

pour une fréquence égale à 1000 Hz. Cependant, les résultats montrent que les propriétés d'amortissement s'améliorent lorsque le rayon (r) augmente.

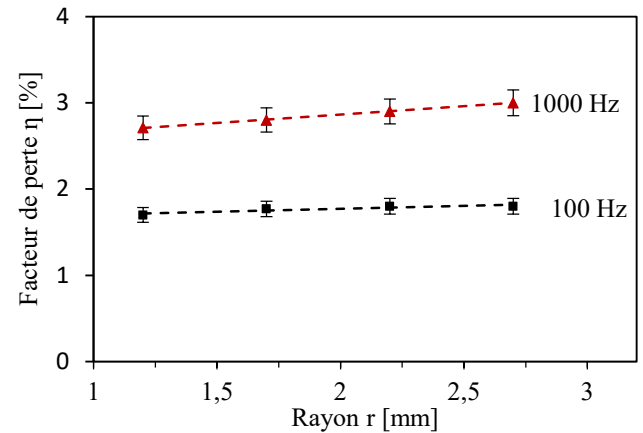


Figure 8 – Evolution du facteur de perte en fonction de la fréquence pour différents rayons (r)

La Figure 8, représente les résultats expérimentaux des propriétés d'amortissement des âmes anti-trichirales en fonction de rayon (r) pour deux niveaux de fréquence. Lorsque r augmente, le facteur de perte commence à augmenter progressivement jusqu'à r = 2,7 mm. Ce comportement est observable pour tous les niveaux de fréquence à l'exception des basses fréquences. Par exemple lorsque F = 100 Hz, le facteur d'amortissement est presque constant entre 1,65 % et 1,8 %, ce qui représente le comportement d'amortissement de matériau de base (PLA/Lin).

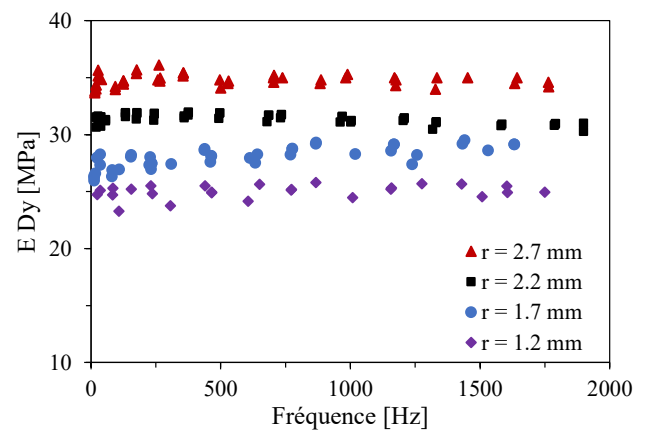


Figure 9 – Evolution de la rigidité dynamique en fonction de la fréquence pour différents rayons (r).

La rigidité dynamique de la structure en nid d'abeille anti-trichirale a été déterminée pour les différents rayons proposés à l'aide de l'expression (3). La densité ρ a été obtenue en divisant la masse mesurée de chaque structure par son volume. Les résultats présentés sur la figure 9 en fonction de la fréquence montrent que la rigidité dynamique augmente lorsque la densité relative de la cellule de base augmente. Avec quatre densités relatives de la structure, les valeurs de la rigidité sont comprises entre 25 et 35 MPa.

Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer les propriétés d'amortissement de cette architecture. Le matériau composite et la géométrie architecturale sont les principaux facteurs influençant le comportement vibratoire des poutres. Le matériau PLA/Lin est composé d'un renfort visco-élastique et de fibres naturelles présentant un bon comportement d'amortissement. De plus, l'architecture de la cellule unitaire et ses paramètres géométriques influent sur les propriétés d'amortissement de l'éprouvette. En effet, comme il est montré dans la section précédente, la variation de rayon ( $r$ ) provoque le comportement auxétique de la structure. Par conséquent, le niveau d'auxétisme de matériau a un impact significatif sur l'absorption d'énergie et donc sur le facteur de perte du matériau architecturé. De plus, il est clair que les composants cylindriques de la structure ont une bonne capacité d'absorption d'énergie, contrairement aux composants linéaire. Pour résumer, on peut dire que les propriétés d'amortissement du matériau architecturé dépendent en grande partie du coefficient de Poisson structurel de la structure.

## 4 Conclusion

Des nids d'abeilles anti-trichirals produits à l'aide d'une imprimante 3D ont été étudiés. Les éprouvettes sont toutes fabriquées à partir d'un matériau biosourcé qui est de l'acide Polylactique renforcé de fibres de lin. Quatre rayons de composants cylindriques de la cellule anti-trichirale unitaire étaient choisis pour étudier l'effet de ce paramètre géométrique sur les propriétés mécaniques du matériau. La structure montre un comportement auxétique suite aux essais de traction. D'un autre côté, la présente architecture a été étudiée en vibration avec un rayon de composants cylindrique variable. Les essais sont menés avec la configuration encastrement-libre. Les résultats obtenus montrent que les nids d'abeilles anti-trichiraux construits par une cellule de base, à haut rayon de composants cylindriques ( $r$ ), présentent un meilleur comportement dynamique comparé à ceux avec un faible rayon.

Certaines conclusions intéressantes fournies par ce travail peuvent être tirées en examinant les limites du coefficient de Poisson (-0.25 à -1) par rapport aux rayons des composants cylindriques. Le niveau d'auxétisme augmente et le module de Young diminue lorsque le rayon ( $r$ ) des composants cylindriques augmente. Le facteur de perte des nids d'abeilles anti-trichiraux est sensible aux paramètres géométriques de la cellule unitaire. Il est également constaté que les propriétés d'amortissement de la structure s'améliorent lorsque le coefficient de Poisson négatif augmente. De plus le matériau de mise en œuvre (PLA/Lin), améliore le comportement dynamique des matériaux grâce à son comportement viscoélastique. En conclusion, la combinaison d'un matériau composite viscoélastique avec une structure auxétique anti-trichirale de géométrie et dimensions bien déterminées peut aboutir à un matériau avec un meilleur comportement dynamique et qui peut être gérée en fonction de ( $r$ ).

## Références

- [1] A. Hönig, and W. J. Stronge, In-plane dynamic crushing of honeycomb. Part I: crush band initiation and wave trapping, *International journal of mechanical sciences* 44.8, 1665-1696 (2002).
- [2] J. Cutler, *Understanding aircraft structures*. Ed. Jeremy Liber. Blackwell Publishing, (2005).
- [3] J. Jaehyung, and J. D. Summers, Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain, *Materials & Design* 32.2, 512-524 (2011).
- [4] L. Ying, and X. C. Zhang, The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs, *International Journal of Impact Engineering* 36.1, 98-109 (2009).
- [5] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Progress in Materials Science* 94, 114-173 (2018).
- [6] D. Mousanezhad, B. Haghpanah, R. Ghosh, et al. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 6: 81–96 (2016).
- [7] M. Bianchi and F. Scarpa, Vibration transmissibility and damping behaviour for auxetic and conventional foams under linear and nonlinear regimes *Smart Materials and Structures* 22(8), 084010 (2013).
- [8] A. Alderson, K. L. Alderson, G. Chirima, et al. The in-plane linear elastic constants and out-of-plane bending of 3-coordinated ligament and cylinder-ligament honeycombs. *Composites Science & Technology*, 70, 1034-1041 (2010).
- [9] A. Alderson, K. L. Alderson, D. Attard, et al. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1042-1048 (2010).
- [10] N. Novak, L. Biasetto, P. Rebesan, et al. Experimental and computational evaluation of tensile properties of additively manufactured hexa- and tetrachiral auxetic cellular structures, *Addit. Manuf* 45, 102022 (2021).
- [11] A. Alderson, K. L. Alderson, G. Chirima, et al. Novel tri-coordinated chiral honeycombs, *17th International Conference on Composite Materials*, (2009).
- [12] H. Abramovitch, M. Burgard, L. Edery-Azulay, et al. Smart tetrachiral and hexachiral honeycomb: Sensing and impact detection, *Compos. Sci. Technol* 70, 1072–1079 (2010).
- [13] A. Hosseinkhani, D. Younesian and M. Ranjbar, Vibro-acoustic Analysis and Topology Optimization of Anti-tetra Chiral Auxetic Lattices Driven by Different Colored Noises, *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 20, 2050113 (2020).
- [14] Y. j. Chen, F. Scarpa, Y. J. Liu, et al. Elasticity of anti-tetrachiral anisotropic lattices, *Int. J. Solids Struct.* 50, 996–1004 (2013).
- [15] A. Lorato, P. Innocent, F. Scarpa, et al. The transverse elastic properties of chiral honeycombs, *Compos. Sci. Technol.* 7, 1057–1063 (2010).
- [16] A. Spadoni, M. Ruzzene and F. Scarpa, Global and local linear buckling behavior of a chiral cellular structure, *Phys. Status Solidi* 242, 695–709 (2005).

- [17] L. L. Hu, Z.R. Luo, Z. Y. Zhang, et al. Mechanical property of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation, *Composites Part B* 163, 107-120 (2019).
- [18] E. Teng-Zhang, H. Liu and B. Feng-Ng, Novel arc-shaped ligaments to enhance energy absorption capabilities of re-entrant anti-trichiral structures, *Composites, Part B* 227, 109366 (2021).
- [19] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).
- [20] X. Xu, C. Koomson, M. Doddamani, et al. Extracting elastic modulus at different strain rates and temperatures from dynamic mechanical analysis data: a study on nanocomposites, *Compos B Eng* 159, 346–354 (2019).
- [21] A. Hamrouni, J. L. Rebiere, A. ElMahi, et al. Experimental Analysis of the Dynamic Behavior of a Sandwich with a Bio-Based Auxetic Core, *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing II*, A3M 2021, Springer pp, 73-82 (2022).
- [22] H. Daoud, A. ElMahi, J. L. Rebiere, et al. Experimental analysis of the linear and nonlinear vibration behavior of flax fibre reinforced composites with an inter-leaved natural viscoelastic layer, *Compos B Eng* 151, 201–214 (2018).
- [23] ASTM E 756-98 Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials.
- [24] D. Gay, *Composite materials: design and applications*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press (2014).