



HAL
open science

Analyse par émission acoustique de l'effet de l'humidité sur les mécanismes d'endommagement d'un sandwich à constituants naturels et à âme auxétique imprimé en 3D

Zeineb Kesentini, Abderrahim El Mahi, Jean-Luc Rebiere, Rachid El Guerjouma, Moez Beyaoui, Mohamed Haddar

► To cite this version:

Zeineb Kesentini, Abderrahim El Mahi, Jean-Luc Rebiere, Rachid El Guerjouma, Moez Beyaoui, et al.. Analyse par émission acoustique de l'effet de l'humidité sur les mécanismes d'endommagement d'un sandwich à constituants naturels et à âme auxétique imprimé en 3D. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848532

HAL Id: hal-03848532

<https://hal.science/hal-03848532>

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.



Analyse par émission acoustique de l'effet de l'humidité sur les mécanismes d'endommagement d'un sandwich à constituants naturels et à âme auxétique imprimé en 3D

Z. Kesentini ^{a,b}, A. El Mahi ^a, J-L. Rebiere ^a, R. El Guerjouma ^a, M. Beyaoui ^b, M. Haddar ^b

^a Acoustic Laboratory of Le Mans University (LAUM) UMR CNRS 6613, Av. O. Messiaen, 72085, Le Mans cedex 9, France

^b Laboratory of Mechanics Modeling and Production (LA2MP), National School of Engineers of Sfax, University of Sfax, BP N° 1173 - 3038, Sfax, Tunisia



De nos jours, les défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés imposent l'utilisation de matériaux bio-sourcés pour palier les carences environnementales des matériaux synthétiques. Ces matériaux bio-sourcés présentent plusieurs avantages, tels que la biodégradabilité, la faible masse volumique, la résistance spécifique élevée et la recyclabilité. De plus, les matériaux auxétiques, dont le coefficient de Poisson est négatif, sont de plus en plus étudiés en raison de leur capacité à améliorer l'absorption d'énergie. L'étude proposée ici concerne l'analyse du comportement des composites sandwichs à âme auxétique constitués de fibres de lin et une matrice en acide polylactique (PLA). Les fibres de lin sont très utilisées en raison de leur capacité à améliorer la résistance mécanique, la rigidité ainsi que l'amortissement. La difficulté de l'évaluation des performances d'un tel matériau à constituants naturels dans un milieu agressif reste un obstacle, susceptible de gêner considérablement leur utilisation et constitue un verrou majeur qui freine encore le développement de ces matériaux. L'idée principale de ce travail est d'étudier l'effet de l'humidité sur le matériau sandwich fabriqué par impression 3D. Ce matériau combine des performances améliorées en flexion et constituants 100% bio-sourcés. Dans ce cadre, le composite sandwich est analysé à différentes durées d'immersion. Les essais mécaniques sont menés en flexion 3-points et associés à la technique d'émission acoustique. Ces essais permettent de suivre l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux, d'identifier et de surveiller les mécanismes d'endommagement. Les résultats de cette analyse ont permis de constater une diminution des propriétés mécaniques et une augmentation des événements acoustiques avec l'augmentation du taux d'absorption du matériau.

1 Introduction

Les recherches dans le domaine des matériaux composites se sont orientées vers les matériaux bio-sourcés motivées par le contexte environnemental et économique [1-2] et pour les multiples avantages qu'ils offrent tel que l'amélioration des propriétés mécaniques tout en allégeant la structure. Ces matériaux présentent une capacité élevée à absorber l'énergie et une bonne alternative aux matériaux synthétiques en raison de leurs disponibilité et recyclabilité. En effet, les propriétés des composites à fibres de lin sont comparables aux composites à fibres de verre [3]. Toutes ces caractéristiques sont encore améliorées par les structures sandwichs à âme en nid d'abeille auxétique. Cette architecture d'âme possède un coefficient de poisson négatif et une grande capacité à absorber l'énergie [4]. La difficulté de l'évaluation des performances de ces matériaux avec dans un milieu humide reste un obstacle qui freine encore leur développement [5]. Cette étude se concentre spécifiquement sur le vieillissement hydrique d'un composite sandwich bio-sourcé à âme auxétique réentrante. La technique d'impression 3D est utilisée pour la fabrication des éprouvettes. L'effet de l'humidité sur le comportement des sandwichs en statique et sur les événements acoustique est étudié.

2 Protocoles expérimentaux

2.1 Matériau et mise en œuvre

Dans cette étude, la structure sandwich est fabriqué en utilisant l'acide polylactique (PLA) renforcé par des fibres de lin avec une densité de 1000 kg.m^{-3} et une fraction volumique de fibre de lin inférieure à 20%. Ce matériau fourni par NANOVIA est un matériau biosourcé, biodégradable et recyclable. Il est spécialement conçu pour la technologie de fabrication additive. La géométrie d'une cellule élémentaire réentrante est présentée dans la figure 1(a).

La longueur des parois inclinées est présenté par « l » et celle des parois verticales par « h ». L'angle entre les parois inclinées et la direction X est « θ ». L'épaisseur de l'éprouvette suivant l'axe Z et l'épaisseur de la paroi

cellulaire sont présentées respectivement par « b » et « t ». « L » et « H » sont les longueurs de la cellule suivant les axes X et Y. Les éprouvettes ont une largeur de 25 mm. Cette largeur est divisée par 3 cellules élémentaires (3C).

La valeur limite de l'angle θ est fixée à -20° afin de ne pas perdre le caractère auxétique lors de la fabrication

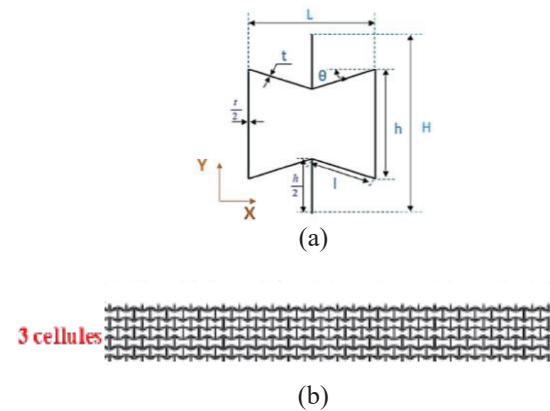


Figure 1 – (a) Exemple d'une cellule auxétique réentrante, (b) Configuration à 3 cellules.

Les dimensions des paramètres de la cellule élémentaire imprimée sont présentées dans le tableau 1.

TABLEAU 1 – Paramètres d'une structure auxétique à 3 cellules

l (mm)	h (mm)	θ (mm)	t (mm)
4.43	5.68	-20	0.6

Le procédé utilisé pour fabriquer les éprouvettes est l'imprimante 3D «MakerBot Replicator2». L'imprimante 3D dépose le filament fondu pour créer des couches qui traduisent la forme souhaitée (figure 2 (a)). En suivant les paramètres d'impression proposés par le fournisseur du matériau, la température de la buse d'extrusion doit être réglée à $210 \text{ }^\circ\text{C}$. Avant de commencer l'impression, les éprouvettes ont été conçues avec solidworks puis traduits en instructions compatibles avec le logiciel de MakerBot Replicator2 afin d'être imprimés.

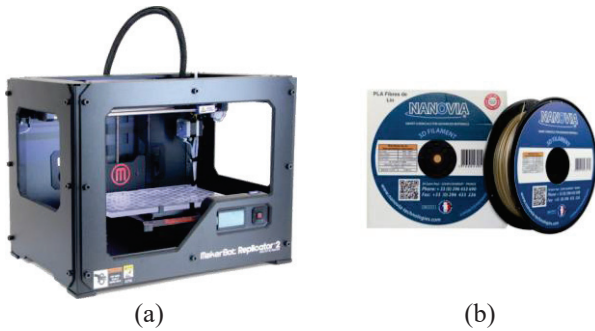


Figure 2 – (a) Imprimante 3D, (b) Bobine en PLA/lin.

Les éprouvettes obtenues sont immergées dans l'eau du robinet à température ambiante. Ensuite, elles sont prélevées pour les caractérisées après 20 jours et 60 jours d'immersion.

2.2 Essai de flexion 3-points

L'effet de l'humidité sur les sandwichs a été démontré suite à des essais de flexion 3-points en statique sur des éprouvettes avec différents pourcentage d'absorption d'eau.

Ces essais ont été effectués sur une machine hydraulique standard INSTRON selon la norme ASTM C393 [6] (figure 3). L'essai consiste à appliquer une charge P au centre d'une poutre supportée par deux appuis distants de d égale à 110 mm. La charge quasi-statique a été appliquée à une vitesse de déplacement de 5 mm/min. Les essais ont été réalisés en utilisant un capteur de charge de 1 kN. Les essais sont menés jusqu'à la rupture des éprouvettes. L'éprouvette testée possède une longueur totale de 130 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur de 7 mm (2 mm pour les deux peaux et 5 mm pour l'âme).

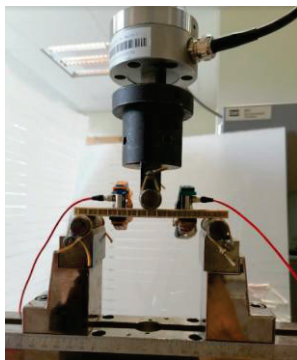


Figure 3 – Dispositif expérimental de flexion 3-points associé à l'émission acoustique.

2.3 Technique d'émission acoustique

Afin d'identifier les mécanismes d'endommagement dans les structures sandwichs suite aux essais de flexion 3-points, la technique d'émission acoustique (figure 4) a été associée aux essais mécaniques. Pour se faire, deux capteurs piézoélectriques avec une bande passante entre 100 kHz et 1 MHz ont été fixés de part et d'autre sur les éprouvettes afin de détecter les ondes créés suites aux endommagements. L'acquisition des évènements

acoustiques a été réalisée par le logiciel AEWIN avec une fréquence de 5MHz. Afin d'éviter les bruits et de ne pas masquer certains phénomène, un seuil d'acquisition de 38 dB a été fixé.

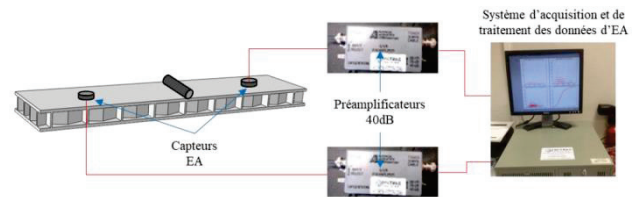


Figure 4 – Dispositif d'émission acoustique.

D'autres réglages sont nécessaires avant de commencer les essais. En plus, pour s'assurer que tous les paramètres sont bien régler et que les capteurs fonctionnent bien, des essais de « casse mine » ont été effectué avant les essais.

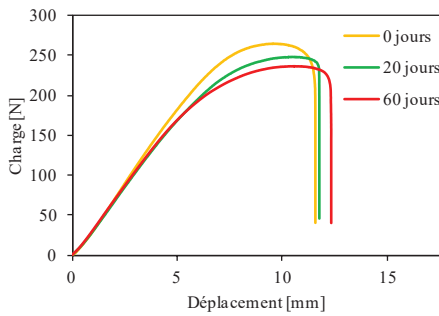
A la fin de l'essai, les données acoustiques acquis ont été analysé à l'aide du logiciel NOESIS [7]. Cinq paramètres temporels optimaux ont été choisis pour la classification et qui sont l'amplitude, le temps de montée, la durée, l'énergie absolue et le nombre de coups. Ensuite, la méthode de classification non supervisé est utilisée en adoptant l'algorithme des k-moyens [8,9]. Elle consiste à séparer les évènements acoustiques en un nombre optimal de classe. Ensuite, chaque classe est attribuée à un mécanisme d'endommagement.

3 Résultats

3.1 Effet du vieillissement sur le comportement statique des sandwichs

L'effet du vieillissement sur le comportement des sandwichs est déterminé suite à la caractérisation des propriétés mécaniques des éprouvettes vieillis à différentes durées par l'essai de flexion. Les sandwichs testés possèdent 3 cellules auxétiques dans l'âme.

La figure 5 présente les courbes charge/déplacement pour les sandwichs pour différentes durées d'immersion. Le même comportement est observé pour les différents sandwichs. Cependant, ceux qui sont non immergé sont plus résistants et plus rigides. De plus, les domaines élastiques linéaires de ces structures semblent être plus grands que les sandwichs humides. Cette diminution au niveau de charge est strictement liée à la pénétration de l'eau dans les sandwichs. Ceci provoque la coupure des chaînes macromoléculaires de la structure du PLA/lin avec création d'autre liaison avec les molécules d'eau. Ce phénomène provoque l'affaiblissement de la structure et la création des mécanismes d'endommagements.

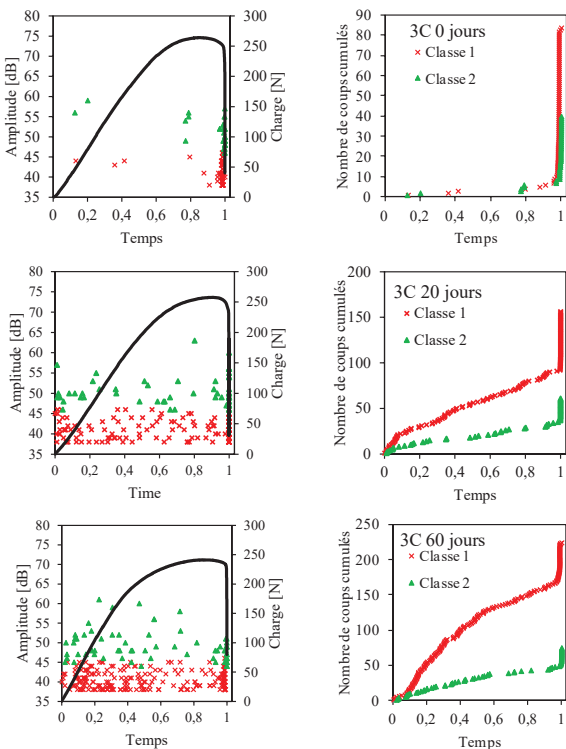


(a)

Figure 5 – (a) Courbes charge/déplacement pour différentes durées d'immersion.

3.2 Résultats de la classification par émission acoustique

Suivant la méthode décrite en 2.3 les données acoustiques ont été classifiées en deux classes (figure 6). Les résultats sont présentés dans le plan amplitude/temps. De plus, en suivant le nombre de coups cumulés propre à chaque classe en fonction du temps, on a étudié la chronologie et l'évolution des différentes classes. Pour bien visualiser l'effet de l'humidité, les durées de 20 et 60 jours d'immersion ont été choisies ainsi que le sandwich non vieilli.



(a)

(b)

Figure 6 – Résultats acoustiques: (a) représentation des évènements en Amplitude/Temps, (b) chronologie d'apparition et évolution des classes.

D'après les résultats, on remarque l'activité acoustique commence pratiquement qu'à la fin de l'essai de flexion statique pour les sandwichs non immergés contrairement à

ceux immergés. En effet, dès le début de l'essai on observe des évènements acoustiques ce qui est du à l'infiltration de l'eau au sein de la structure.

Il existe deux classes acoustiques d'amplitude entre 38 dB et 65 dB pour les trois durées. Le nombre de coups cumulés augmente en augmentant la durée d'immersion. La première classe avec des amplitudes de 38 dB à 50 dB est plus importante et prépondérante par rapport à la deuxième classe pour tous les sandwichs caractérisés. De ce fait, l'endommagement des sandwichs vieillis et non vieillis est principalement engendré par la fissuration matricielle. La deuxième classe avec des amplitudes entre 45dB et 65dB caractérise le deuxième mécanisme d'endommagement qui est la décohésion fibre/matrice jusqu'à rupture totale.

4 Conclusion

Cet article a étudié l'effet du vieillissement hydrique sur des composites sandwichs constitués de PLA/lin et fabriqués par impression 3D. Les essais de flexion 3-points en statique associés à la technique d'émission acoustique sont utilisés afin de caractériser le comportement mécanique et d'identifier et suivre les mécanismes d'endommagement pour différentes durées d'immersion.

Les résultats mécaniques montrent que l'immersion dans l'eau engendre une diminution des propriétés mécaniques des structures sandwichs. De plus, l'analyse des évènements acoustiques et leur classification a mis en évidence deux classes qui ont été associées à la fissuration de la matrice et la décohésion fibre/matrice. L'ensemble des matériaux étudiés ont présenté les mêmes caractéristiques des évènements acoustiques avec des chronologies d'apparition différentes. Ces résultats ont montrés aussi que les évènements sont de plus en plus importants avec la durée d'immersion. Le vieillissement hydrique accélère l'apparition de l'endommagement et sa propagation dans le matériau composite bio-sourcé.

Références

[1] Allagui S, El Mahi A, Rebiere JL, et al. Effect of Recycling Cycles on the Mechanical and Damping Properties of Flax Fibre Reinforced Elium Composite: Experimental and Numerical Studies. *J Renew Mater* 2021; 9(4), 695-721.

[2] Chilali A, Assarar M, Zouari W, et al. Mechanical characterization and damage events of flax fabric-reinforced biopolymer composites. *Polym Polym Compos* 2020; 28(8-9), 631-644.

[3] Monti A, El Mahi A, Jendli Z, et al. Experimental and finite elements analysis of the vibration behaviour of a bio-based composite sandwich beam. *Compos B Eng* 2017; 110, 466-475.

[4] Essassi K, Rebiere JL, El Mahi A, et al. Experimental and analytical investigation of the bending behaviour of 3D-printed bio-based sandwich structures composites with auxetic core under cyclic fatigue tests. *Compos A Appl Sci Manuf* 2020; 131, 105775.

[5] Malloum A, El Mahi A and Idriss M. The effects of water ageing on the tensile static and fatigue behaviors of greenpoxy-flax fiber composites. *J Compos Mater* 2019; 53(21), 2927-2939.

[6] ASTM C393/C393M –16. Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure, West Conshohocken: PA: ASTM, 2016.

[7] A. Likas, N. Vlassis et J. J. Verbeek, «The global k-mean clustering algorithm,» *Pattern recognition*, vol. 36 (2), pp. 451-461, 2003.

[8] NOESIS software, advanced acoustic emission data analysis pattern recognition and neural networks, 2004.

[9] G. W. Milligan et M. C. Cooper, «An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set,» *Psychometrika*, vol. 50 (2), pp. 159-179, 1985.