

Influence de la trajectoire d'impression 3D des structures bio-composites bioinspirées sur le comportement en compression

Influence of 3D printing trajectory of bio-inspired biocomposite structures on the compression behavior

CAILLAULT Thomas¹, GUILLAUMAT Laurent¹ et TEREKHINA Svetlana¹

1 : Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et innovAtion (LAMPA)
Arts et Métiers - ENSAM

2 boulevard du Ronceray, 49035 Angers, Cedex 01

e-mail : thomas.caillault@ensam.eu, laurent.guillaumat@ensam.eu et svetlana.terekhina@ensam.eu

Résumé

Cette étude s'intéresse à l'optimisation d'une structure bioinspirée, l'éponge Euplectella Aspergillum, pour l'absorption spécifique d'énergie lors d'essais de compression uniaxiale. Son architecture hiérarchique est reconnue pour son rapport résistance-masse volumique élevé.

La fabrication des structures est assurée par un procédé de fabrication additive composite, permettant l'imprégnation in-situ de fibres continues par le polymère thermoplastique fondu. Une matrice biosourcée (PLA) et une fibre naturelle continue (lin) sont sélectionnées pour la réalisation du composite. Trois parcours d'impression différents ont été mis en lumière lors de l'impression des structures bio-inspirées. La trajectoire d'impression en 2,5D montre les meilleures propriétés d'absorption par rapport à l'impression en mode stratifié. En plus, la structure bio-inspirée met en évidence l'énergie spécifique absorbée maximale vis-à-vis des structures imprimées en treillis ce qui ouvre des voies prometteuses pour de nombreuses applications.

Abstract

This study focuses on the optimization of a bioinspired structure, the Euplectella Aspergillum sponge, for energy absorption under uniaxial compressive tests. Its hierarchical architecture is recognized for its high strength-density ration. The structures are manufactured using a composite additive manufacturing process, involving in-nozzle impregnation of continuous fiber by melted thermoplastic polymer. A biobased matrix (PLA) and a continuous natural fiber (flax) were selected for the composite. Three different trajectories were highlighted during the printing of bio-inspired structures. The 2.5D one shows the best absorption properties compared to laminated mode printing. In addition, the bio-inspired structure demonstrates the maximum specific energy absorption compared to lattice-printed ones, which opens promising ways for numerous applications.

Mots Clés : Structure lattice, bio-inspiration, impression 3D composite, absorption d'énergie, composite biosourcé

Keywords : Lattice structure, bio-inspiration, 3D printing composite, energy absorption, biobased composite

1. Introduction

Les structures légères avec une excellente capacité d'absorption d'énergie sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que l'emballage, l'automobile ou l'aéronautique pour résister à des chargements de compression et/ou des impacts. Traditionnellement, les structures en treillis sont utilisées car elles présentent de très bonnes performances mécaniques spécifiques. Cependant, la nature offre un large choix de structures, optimisées via les processus d'évolution. Malheureusement, peu d'intérêt est porté à ces structures : en 2020, seulement 4% des publications à propos des structures étaient liées à des matériaux d'origine naturelle [1]. La bioinspiration combinée aux technologies de fabrication additive représente une opportunité majeure pour concevoir des structures innovantes, légères et performantes pour de nombreuses problématiques actuelles.

Parmi les structures naturelles les plus prometteuses, il existe l'Euplectella Aspergillum, une éponge à la structure architecturée sur plusieurs échelles. L'éponge possède une forme cylindrique, organisée en un réseau carré très régulier, qui confère des propriétés élevées en flexion, glissement et torsion, tout en maintenant une résistance spécifique supérieure à celle des treillis conventionnels [2].

Une étude a permis de démontrer qu'il est possible de reproduire cette structure via l'impression 3D composite par dépôt de filament (FFF) et l'imprégnation in-situ d'un renfort continu naturel [3]. L'intérêt d'intégrer des fibres continues dans la fabrication des parois cellulaires est de maximiser la dissipation d'énergie par divers modes d'endommagement.

Le placement des fibres continues lors de l'impression peut être réalisé selon plusieurs techniques. Parmi celles-ci, trois techniques seront étudiées dans cet article : l'empilement de plis UD localisés (Fig. 1(a)), l'empilement de trajectoires géométriques dans le plan consistant à organiser la trajectoire du motif complet en une seule couche (Fig. 1(b)) et le dépôt 2,5D permettant une meilleure adhésion entre les couches grâce à une variation de la hauteur d'impression sur une unique couche (Fig. 1(c)).

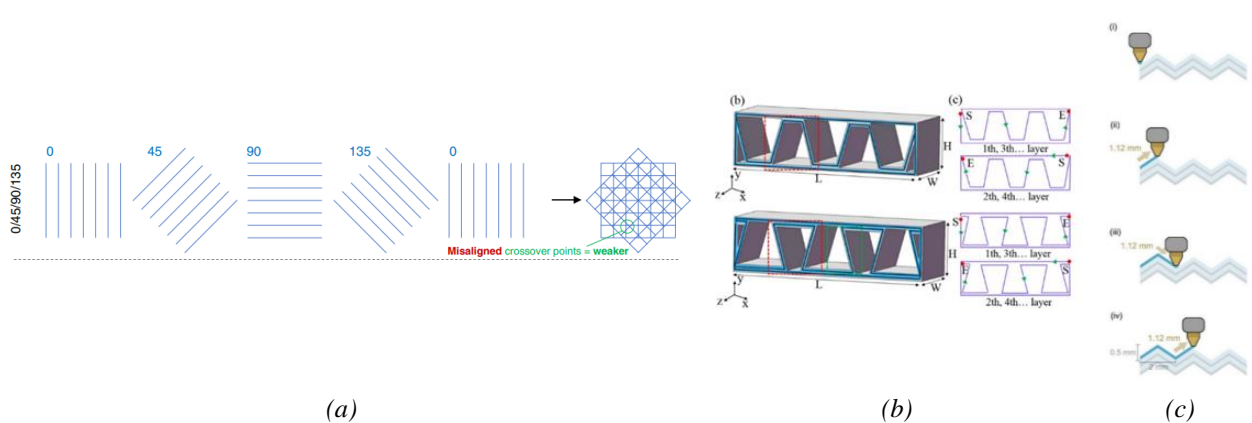


Figure 1 : Parcours d'impressions : (a) Empilement de couches (stacking) [4], (b) Empilement de trajectoires géométriques [5], (c) Trajectoire en 2,5D [6].

L'étude est axée sur deux objectifs étroitement liés avec : a) la technologie d'impression 3D des structures bio-inspirées en bio-composites à renfort continu et b) l'influence de cette dernière sur la capacité d'absorber l'énergie lors des essais de compression uniaxiale.

Afin de répondre aux objectifs de cette étude, une démarche scientifique est fixée suivant : 1) en s'inspirant de l'architecture de l'Euplectella Aspergillum, trois designs sont développés par CAO et script Python personnalisé, à savoir : (i) **Design Simple** : poutres verticales et horizontales ; (ii) **Design Diagonales** : Design Simple + diagonales croix réparties en damier ; (iii) **Design Bio-inspiré** : Design Simple + doubles diagonales réparties en damier. Le design Simple permet d'évaluer le rôle de la structure principale bio-inspirée tandis que les designs Diagonales et Bio-inspirés celui

de l'ajout d'un motif de renfort à 45° pour une meilleure résistance en cisaillement, 2) puis, l'impression de ces designs est réalisée par le procédé FFF, en adaptant et optimisant la trajectoire de l'impression et 3) des essais de compression uniaxiale couplés avec la corrélation d'image sont réalisés pour montrer l'influence de ces trajectoires sur l'énergie spécifique absorbée par les designs considérés.

2. Méthode expérimentale

2.1. Matériaux et technique d'impression

Les structures sont fabriquées par impression 3D par dépôt de filament fondu (FFF) combiné à une imprégnation in-situ de fibres continues. Les matériaux utilisés sont un filament de PLA de diamètre 1,75 mm, fourni par 3DFil et un fil de lin continu torsadé de 105 tex, non blanchi, fourni par SAFILIN. Dans ce travail, le fil de lin continu ainsi que le filament PLA ont été introduits dans une buse conique à tête plate de diamètre 1,00 mm via deux canaux séparés (Fig. 2(a)).

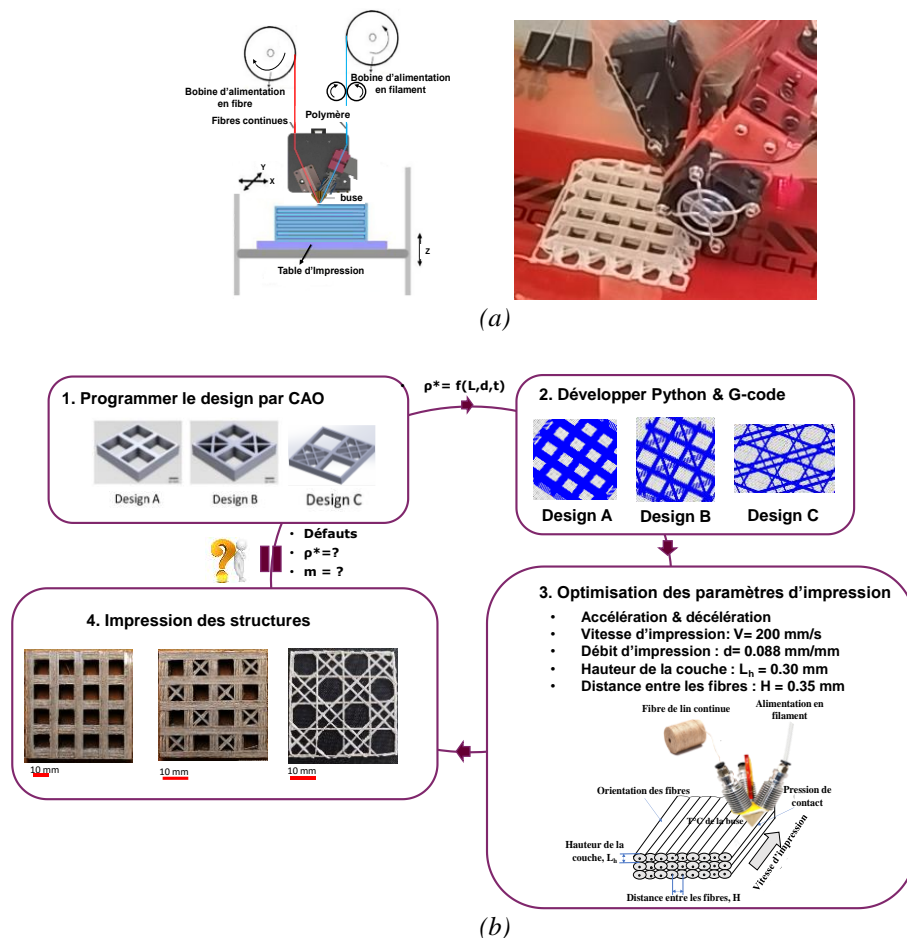


Figure 2 : (a) Technique d'impression FFF composite avec imprégnation in-situ, (b) méthode de travail du dessin à l'impression.

Le mélange matrice-renfort se fait dans une petite zone (~ 2 mm) chauffée avant extrusion. Après avoir conçu les modèles CAO, un fichier G-Code est généré par un script Python pour les différentes trajectoires d'impression (Fig. 2(b)). Après avoir optimisé les paramètres d'impression, les trois designs considérés ont été imprimés et analysés morphologiquement pour détecter les défauts et mécaniquement pour évaluer l'énergie absorbée. Le taux volumique de fibres de ces structures correspond à 25%.

2.2. Compression uniaxiale

Les structures imprimées de dimensions (largeur × hauteur × épaisseur) $60 \times 60 \times 20 \text{ mm}^3$ sont soumises à des essais de compression, avec un déplacement de 1 mm/min , sur une machine Zwick Z100 équipée d'une cellule de charge de 100 kN . Un dispositif de suivi par corrélation d'images permet de cartographier les déformations localisées sur les structures (Fig. 3(a)). Ces informations permettent d'analyser les propriétés globales mais aussi les modes de déformation et d'effondrement.

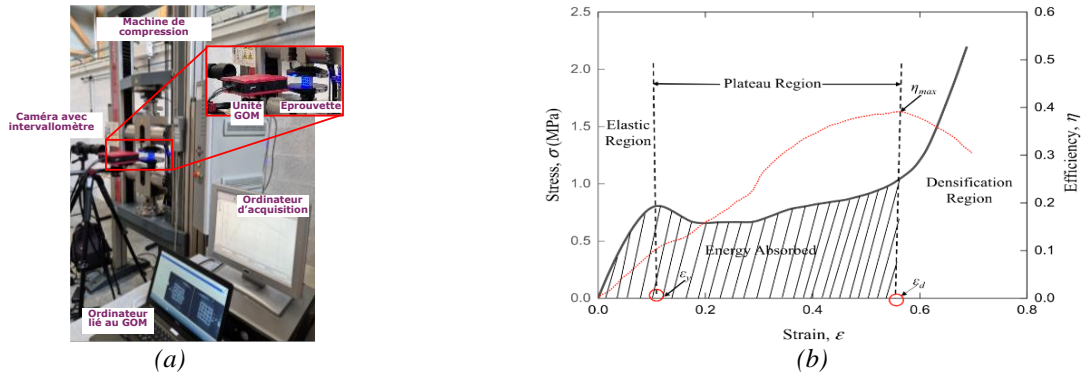


Figure 3 : (a) montage de compression uniaxiale et dispositif de corrélation d'images, (b) courbe contrainte-déformation et efficacité de la structure pour le calcul de l'énergie absorbée lors d'un essai de compression [7].

L'énergie absorbée est calculée grâce à l'intégration de la courbe contrainte-déformation, du début de l'essai jusqu'au début du seuil de densification (Fig. 3(b)). Ce dernier est déterminé par la valeur maximale du coefficient d'énergie absorbée (Eq. 1). L'énergie spécifique absorbée correspond à l'énergie absorbée par la structure divisée par sa masse (Eq. 2).

$$\eta(\epsilon) = \frac{1}{\sigma(\epsilon)} \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (\text{Eq. 1})$$

$$SEA = \frac{TEA}{M} = \frac{\int_0^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{M} \quad (\text{Eq. 2})$$

3. Résultats et analyse

3.1. Motif de l'éponge

Une observation à l'échelle mésoscopique de l'éponge *Euplectella Aspergillum* met en avant une grille carrée très régulière, renforcée par deux ensembles croisés de diagonales appariées (Fig. 4(a) et (b)). L'analyse au MEB permet de quantifier les dimensions L , d et t qui sont respectivement la largeur d'une cellule, l'épaisseur d'une paroi et largeur d'une diagonale (Fig. 4(c)) ainsi que la densité relative de la structure (Tab. 1).

Tab. 1. : Données relevées sur un spécimen d'éponge *Euplectella Aspergillum* via une observation au MEB

L	d	t	ρ_{relatif}
$2.35 \pm 0.50 \text{ mm}$	$0.35 \pm 0.06 \text{ mm}$	$0.15 \pm 0.05 \text{ mm}$	0.5 ± 0.1

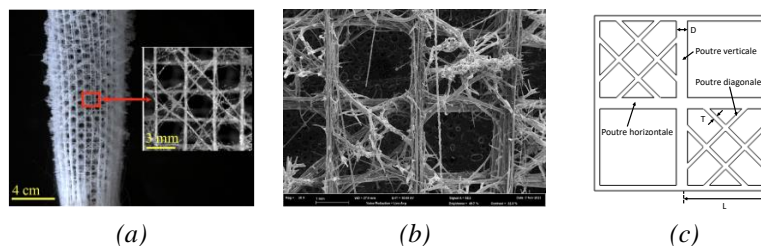


Figure 4 : (a) Structure de l'éponge *Euplectella Aspergillum* à l'échelle macroscopique, (b) organisation en treillis ordonné, (c) schéma du treillis faisant apparaître les longueurs L , d et t

3.2. Trajectoires et Défauts

La précision du procédé de mise en œuvre n'est pas assez élevée pour reproduire la structure bio-inspirée à l'échelle 1. La structure fabriquée est conçue pour obtenir une densité relative similaire avec des rapports entre les longueurs proches de ceux de l'éponge.

Les techniques de placement de fibres étudiées sont : l'empilement de plis UD localisés (Fig. 5(a)), l'empilement de trajectoires géométriques dans le plan (Fig. 5(b)) et de dépôt en 2,5D (Fig. 5(c)).

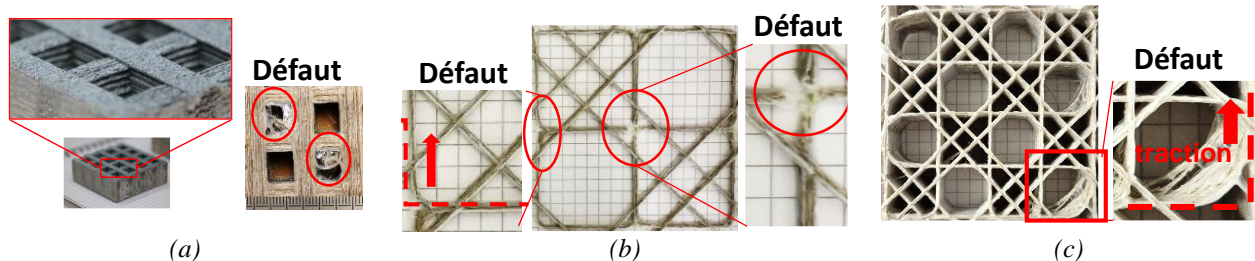


Figure 5 : Techniques de placement de fibres lors de l'impression : (a) par empilement stratifié ; (b) dans le plan ; (c) en 2,5 D. Défauts : non-respect de trajectoire de la fibre : (a) boucles ; (b) – (c) dans l'angle à 90° ; (b) dans le croisement.

À noter que la traction des fibres lors de sa dépose est un élément important à comprendre. Le phénomène consiste à ce que la fibre soit emportée par la buse lors de sa dépose au lieu de rester là où elle a été déposée (Fig. 5(a) et (c)). En 2023, N. Ichihara aborde cette problématique de l'impression 3D composite à fibres continues car cela affecte les performances mécaniques et la qualité de l'impression [8].

La première technique, qui consiste à agencer des plis UD selon des orientations spécifiques en stratifié, est simple à mettre en œuvre et s'adapte à des designs complexes avec une optimisation des propriétés selon les zones de sollicitation. Cependant, cette méthode présente des inconvénients comme l'espacement entre deux plis de même orientation dû à la présence d'autres plis entre eux (Fig.5(a)). Cela favorise le délaminage lors de la compression. Le phénomène de traction des fibres est également visible. Pour la seconde technique, le fil est déposé en formant le motif complet sur une seule couche avant d'être répété (Fig.5(b)). Comparée à la précédente méthode, celle-ci permet de réduire les zones d'espacement entre les fibres, optimisant la cohésion entre les couches. Néanmoins, des limitations sont notables, à savoir : 1) le parcours de dépôt doit être soigneusement réfléchi pour éviter (ou minimiser) les croisements, ce qui est particulièrement compliqué pour les motifs complexes, 2) la précision de la machine joue un rôle crucial pour la géométrie finale, 3) le phénomène de traction des fibres est accentué, augmentant significativement les défauts, comme le non-respect de trajectoire dans les angles (Fig.5(b) et (c)), 4) un changement de géométrie requiert une révision complète du parcours, et 5) le dépôt en 2,5D est une technique proche de l'empilement de trajectoires géométriques dans le plan, permettant toutefois le croisement d'une fibre grâce au déplacement de la buse sur l'axe Z (Fig.5(c)). Cela permet une meilleure cohésion entre les fibres et une simplification du parcours de dépôt. Le phénomène de traction des fibres est moins marqué qu'avec la seconde technique (Fig.5(c)). Des actions sont actuellement mises en place pour réduire ces défauts.

3.3. Essais de compression

Les résultats préliminaires ont permis de mettre en avant : 1) sur des éprouvettes en matrice seule (PLA), l'ajout en damier de diagonales dans les cellules permet une augmentation de 72,3% de l'énergie spécifique absorbée, 2) l'ajout de fibres continues sur une structure « Design Simple », imprimée par empilement de plis UD stratifiés, permet une augmentation de 30,4% de l'énergie spécifique absorbée, 3) une baisse de 37,2% de l'énergie spécifique absorbée entre les éprouvettes

composite (lin-PLA) Design Simple et Design Diagonales imprimées par la méthode 1. Après analyse, cette baisse de performance est liée à une déformation hors-plan lors de l'essai ne permettant pas à l'éprouvette de fournir une réponse totale à la compression uniaxiale. Cela est attribué à l'orientation des fibres à 0° provoquant un flambement de la structure (kink-band). Deux nouvelles méthodes de mise en œuvre ont été explorées afin de minimiser cette déformation et donc de maximiser l'énergie totale absorbée.

Ces résultats sont encourageants et montrent l'importance de la technologie d'impression en 2,5D face à la méthode d'empilement de plis UD stratifiés. Le choix du motif bio-inspiré associé à la technologie d'impression en 2,5D permet d'obtenir une structure légère à la trajectoire et l'empilement des couches optimisées.

4. Conclusion et perspectives

Cette étude met en avant l'impact de trois techniques de placement de fibres sur des designs sélectionnés, issus de la bio-inspiration. Les essais de compression ont montré une augmentation de l'énergie spécifique absorbée grâce à l'ajout d'un motif (diagonales) réparti en damier. Cette observation est également possible avec l'intégration de fibres continues pour le design Simple. Cependant, une baisse de l'énergie spécifique absorbée est relevée lors de l'ajout de diagonales réparties en damier sur les éprouvettes composite. Cela est dû à une déformation hors-plan, liée à la trajectoire de dépose du fil. Il est donc important de concevoir de nouvelles trajectoires d'impression pour limiter ce phénomène. Cet article propose l'utilisation de l'impression 2,5D permettant une meilleure cohésion entre les couches, associé à une optimisation de la dépose et de l'empilement des couches.

Pour de futurs travaux, il serait pertinent d'étudier la structure via les outils numériques et ainsi réaliser une validation des résultats obtenus expérimentalement et ajouter une analyse paramétrique des motifs d'impression.

Remerciements

Les remerciements vont tout naturellement aux collègues ayant permis les manipulations, Mme Gallegos Mayorga et M. Hatte, ainsi qu'à M. Khennache et à M. Rivaux de la société SAFILIN ayant fournis le fil de lin et également au MESR et à l'ENSAM pour le financement de ces travaux.

Références

- [1] Ha, N. S. « A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications », in: *Composites Part B: Engineering*, 2020, 10.1016/j.compositesb.2019.107496
- [2] Fernandes, M. « Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges », in: *Nature*, 2021, 10.1038/s41563-020-0798-1
- [3] Terekhina, S. « In-nozzle impregnation of continuous textile flax fiber/polyamide 6 composite during FFF process », in: *Composite Part A Applied Science and Manufacturing*, 2021, 10.1016/j.compositesa.2021.106725
- [4] Gleadall, A. « Review of additive manufactured tissue engineering scaffolds: relationship between geometry and performance », in: *Burns & Trauma*, 2018, 10.1186/s41038-018-0121-4
- [5] Cheng, P. « Compressive property and shape memory effect of 3D printed continuous ramie fiber reinforced biocomposite corrugated structures », in: *Smart Materials and Structures*, 2022, 10.1088/1361-665X/ac95e4
- [6] Allum, J. « ZigZagZ: Improving mechanical performance in extrusion additive manufacturing by nonplanar toolpaths », in: *Additive Manufacturing*, 2020, 10.1016/j.addma.2020.101715
- [7] Li, Q. M. « Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids », in: *Journal of Cellular Plastics*, 2006
- [8] Ichihara, N. « 3D printing with tension and compaction: prevention of fiber waviness in 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastics », in: *Advanced Composite Materials*, 2023, 10.1080/09243046.2023.2260233.