



HAL
open science

Caractérisation mécanique d'un demi-anneau circulaire thermoplastique imprimé par impression 3D et renforcé par des fibres de carbone continues

M. Chimienti, G. Machado, A. Maurel-Pantel, C. Hochard

► **To cite this version:**

M. Chimienti, G. Machado, A. Maurel-Pantel, C. Hochard. Caractérisation mécanique d'un demi-anneau circulaire thermoplastique imprimé par impression 3D et renforcé par des fibres de carbone continues. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606775

HAL Id: hal-04606775

<https://hal.science/hal-04606775>

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Caractérisation mécanique d'un demi-anneau circulaire thermoplastique imprimé par impression 3D et renforcé par des fibres de carbone continues

Mechanical characterisation of a thermoplastic circular half-ring printed by 3D printing and reinforced with continuous carbon fibres

M. Chimienti , G.Machado, A.Maurel-Pantel , C. Hochard

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
LMA - UMR 7031 AMU - CNRS , Centrale Marseille
4 impasse Nikola Tesla, CS 4000613453 Marseille Cedex 13
e-mail : chimienti@lma.cnrs-mrs.fr, machado@lma.cnrs-mrs.fr

Abstract

Dans cette étude, l'influence d'un renfort en fibres de carbone continue, obtenu par fabrication additive de composites, sur la résistance mécanique d'un demi-anneau circulaire a été analysée. La corrélation d'images numériques (DIC) a été effectuée à l'aide d'un code Matlab open source. Les résultats obtenus sont comparés avec la même structure intégralement réalisée en plastique non renforcé obtenue par fabrication additive. Les images obtenues à l'aide d'un microtomographe à rayon X des structures sont également analysées afin de comprendre les mécanismes de ruine des structures.

Mots Clés : fibres de carbone continues, impression 3D, rupture, essais mécaniques

1. Introduction

Parmi les différentes techniques d'impression 3D connues, la fabrication par filament fondu (FFF), également connue sous le nom de dépôt fondu, est l'une des méthodes de fabrication additive les plus utilisées, basée sur l'extrusion d'un matériau solide [1]. Le plastique est introduit dans une buse chauffée à la température de fusion pour faciliter son écoulement vers la sortie, déposant ainsi la première couche de matériau [2]. Les objets en 3D sont générés par le dépôt successif de couches de matériau. Cette technique présente l'avantage de créer des pièces en polymère géométriquement complexes et personnalisables, tout en réduisant le gaspillage de matériaux [3], [4]. L'évolution de la technologie a permis le développement de nouvelles imprimantes 3D capables de produire des pièces en plastique renforcé de fibres de carbone continues (CFRCP). Contrairement à la méthode de fabrication par filament fusionné pour les plastiques seuls, le renforcement par fibre ne peut pas être utilisé directement pour l'impression, car il n'est pas fusible et manque d'intégrité structurelle[5]. Par conséquent, le renforcement est pré-imprégné d'une résine thermoplastique avant d'être utilisé. Comme il s'agit d'une technologie innovante, on ne sait pas grand-chose des caractéristiques du matériau et de son comportement dans les structures. Des études récentes ont proposé une caractérisation du matériau par traction [6]. L'étude propose plusieurs essais de traction sur des échantillons traditionnels, montrant comment l'ajout d'un renfort en fibres apporte des avantages intéressants sur la rigidité du matériau. Autres études [7]–[9] réalisés avec une imprimante 3D Markforged, montrent une augmentation de la rigidité des pièces renforcées par rapport aux pièces non renforcées. La particularité de ce procédé est que les couches de fibres sont imprimées avec une hauteur de couche de 0,125 mm et que le pourcentage volumétrique de fibres à l'intérieur de chaque couche peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 34 %, ce qui confère au matériau homogénéisé une rigidité accrue[9]–[11]. Cependant, on ne sait pas encore grand-chose sur le comportement du

matériau dans des structures plus complexes, ainsi que sur sa résistance hors plan et sur les éventuels phénomènes de délamination qui pourraient se produire suite à l'échec de la consolidation de la pièce. En effet, les structures obtenues par fabrication additive pourraient présenter divers défauts structurels dus à la variabilité des paramètres, tels que la température et l'adhésion entre les couches, au cours du processus d'impression.

Cette étude vise à étudier le comportement en compression de structures en demi-anneau obtenues par fabrication additive et caractérisées par une matrice plastique renforcée par des fibres de carbone continues. Plusieurs études ont déjà été menées sur des structures caractérisées par la même forme mais dans des matériaux différents [12]–[15]. L'objectif est de comprendre les avantages de l'utilisation de la fabrication additive de composites et le comportement du matériau dans des pièces structurelles plus complexes. Les résultats des essais de compression ont été traités par corrélation d'images DIC [16]–[18] et les structures testées ont été soumises à la microtomographie pour comprendre les mécanismes de rupture déclenchés.

2. Matériaux et méthodologies

Tous les échantillons ont été imprimés avec une imprimante composite à fibres continues Anisoprint Composer-A3 (Anisoprint LCC). Les matériaux et les méthodes utilisés dans le cadre de cette étude sont décrits en détail dans l'article présenté aux JNC23 [19]. Les résultats obtenus lors des essais de compression ont été traités à l'aide d'une extension du code open source ncorr sur Matlab, permettant de corréler en 3D les images enregistrées à l'aide de deux caméra [20], afin d'obtenir des informations sur le comportement de la structure dans le plan et hors plan. Les résultats ont été comparés aux simulations éléments finis réalisées à l'aide du logiciel de calcul de 3DXperience.

3. Caractérisation du matériau

Le comportement en traction et en compression du matériau imprimé en 3D a été analysé et les résultats sont rapportés [19]. Les auteurs montrent que les échantillons renforcés par des fibres de carbone sont plus rigides que les échantillons en plastique lorsqu'ils sont soumis à une charge de traction. A l'inverse, le comportement en compression, bien que tendant à rigidifier l'éprouvette, réduit drastiquement sa déformation et la fibre du renfort subit des phénomènes d'instabilité locale au sein du matériau pour des valeurs de déformation de 0,1%, ce qui permet de conclure qu'il est préférable de ne pas renforcer les pièces structurelles soumises à la compression avec de la fibre de carbone (Fig.1).

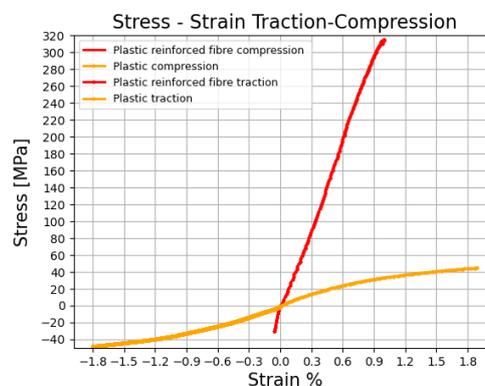


Figure 1 - Stress- Strain compression et traction

4. Conception de la structure

La polyvalence du procédé permet de gérer les coûts de production. En effet, il faut savoir qu'une bobine de fibre de carbone coûte environ 4500 €/kg, contre 162 €/kg pour la matière plastique. Sur la base des résultats obtenus lors de la caractérisation des matériaux et des coûts, une conception de la structure a été élaborée en imprimant les fibre de renforcement uniquement à traction . Elle a été rendue possible par le logiciel 3D Experience sur lequel le fichier .stl a été généré. Le fichier généré a été introduit dans le logiciel de l'imprimante Aura Anisoprint 2. L'innovation particulière du logiciel permet de créer des zones préférentielles appelées masques [20] à l'intérieur de la pièce, qui fonctionnent de manière indépendante et sur lesquelles il est possible d'attribuer différentes propriétés lors de l'impression, de réduire ou d'augmenter la quantité de matériau et de choisir de générer des zones de renforcement. Ces structures ont été réalisées et seront testées prochainement. Cependant, dans le cadre d'un stage de master 2, des structures en plastique renforcées sur le périmètre par des fibres de carbone ont été générées et les résultats ont été comparés à des structures imprimées en plastique non renforcé. Les échantillons en matière plastique non renforcée ont une âme en polyamide-12 d'une épaisseur de 15 mm (Fig.2). Le polyamide a été imprimé avec un angle de 0° par rapport à l'axe y de l'imprimante. Pour toutes les structures créées, deux couches initiales et deux couches finales en Polyamide-12 ont été imprimées avec une orientation de 45 degrés et une épaisseur de 0,3mm. Ceci permet de favoriser le collage des couches lors de la phase d'impression, notamment dans la phase initiale.

Les propriétés utilisées dans la phase d'impression sont résumées dans le tableau 2 :

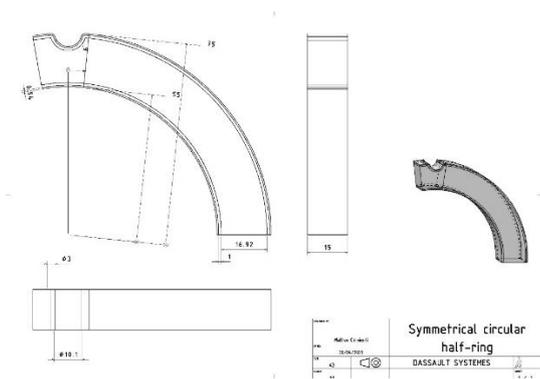


Figure 2 - Dimensions de la structure

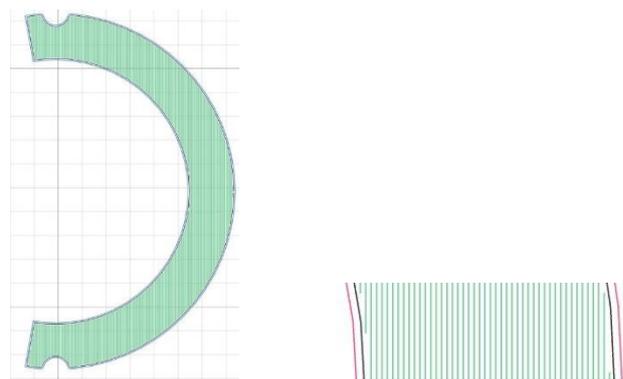


Figure 3 - Structure en plastique renforcée sur le périmètre

4.1 Paramètres d'impression

Un spray de colle a été appliqué sur la plaque d'impression avant de démarrer l'impression. La température d'impression de la buse en plastique a été réglée à 265°C. Le matériau sera imprimé à une vitesse de 35 mm/s. La température d'extrusion de la buse composite a été réglée à 270°C et une vitesse d'impression de 7 mm/s avec un débit de 0,75 a été choisie [20]. La température du lit d'impression a été fixée à 50°C. On a également veillé à ce que les bobines de matériau n'absorbent pas d'humidité, afin d'éviter les problèmes d'adhésion entre les couches.

Type	Couche inf. (TP)		Couche composite		Couche sup. (TP)		
	Orientation	Ep.	Orientation	Ep.	Orientation	Ep.	Ep. Tot.
	-	mm	-	mm	-	mm	mm
Plastique solide	$[\pm 45^\circ]_2$	0.6	-	-	$[\pm 45^\circ]_2$	0.6	15
Plastique solide renforcé	$[\pm 45^\circ]_2$	0.6	[périmètre] ₃₄	13.6	$[\pm 45^\circ]_2$	0.6	15

Tableau 1 - Propriétés utilisées en impression 3D

4.2 Procédure des essais de compression

Les essais mécaniques ont été réalisés suivant la procédure définie dans la littérature [21]–[23]. En particulier, les auteurs font référence à des essais de compression sur des structures semi-circulaires constituées de matériaux au comportement fragile tels que le plexiglas [23], [24]. Les tests de compression ont été effectués sur une machine de traction Shimadzu ASTM D69. Des cylindres de compression en acier d'un diamètre de 10 mm (Fig.5) ont été utilisés pour effectuer le test, et un capteur de force compatible Shimadzu de 10KN a été utilisé. Pour faciliter la corrélation des images DIC et tracer le champ de déplacement de la structure, une peinture blanche a été appliquée sous forme de spray sur les pièces analysées. L'utilisation d'une double caméra a été choisie pour acquérir les images et obtenir une vue globale en 3D du comportement de la structure, en capturant tout phénomène hors plan. Chaque caméra a été préalablement calibrée grâce à une mire de dimensions connues et grâce à l'utilisation d'une extension du code ncorr sur Matlab [20]. L'association de chaque image capturée avec les forces générées par la machine a été rendue possible grâce à un code Python développé et adapté aux besoins des essais mécaniques. Il a été décidé de capturer une image toutes les secondes et de régler la vitesse de chargement du test à 1 mm/s.



Figure 5 - Montage cylindres de compression

4.3 Résultats des tests et discussion

Les résultats des tests en termes de Force Déplacements sont présentés (Fig.6). Les structures en plastique renforcées sont plus rigides que les structures non renforcées. En particulier, en analysant les instants avant la rupture de la structure, pour un déplacement de 6mm, on trouve une force maximale à la rupture de 1089N pour les structures renforcées et d'environ 550N pour les structures non renforcées. Nous notons que la structure est soumise non seulement à une charge de compression pure, mais aussi à une charge de flexion. La contribution de la flexion génère inévitablement des zones sur l'extrados qui sont soumises à des charges de traction, qui sollicitent la

fibre et expliquent la meilleure tenue. En outre, l'étude mictotomographique (Fig.7) permet de constater que la zone de rupture des fibres est dans la zone soumise à la traction.

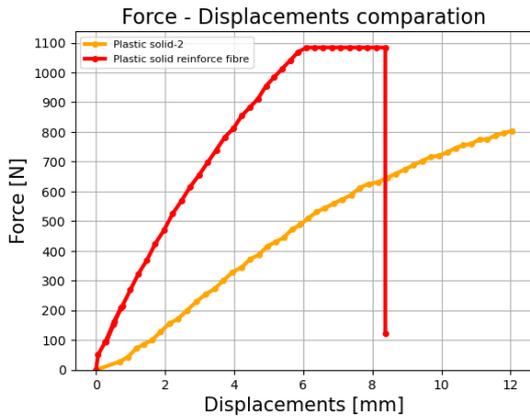


Figure 6 - Comparaison Force - Déplacements

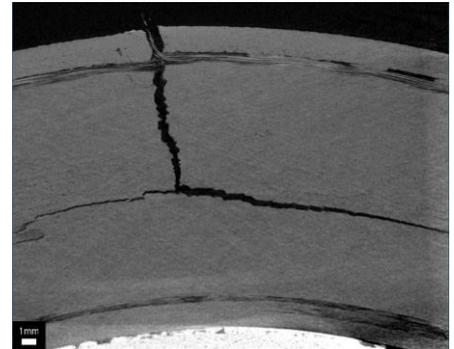


Figure 7 - Rupture en traction de la structure

5. Conclusions et perspectives

Afin de confirmer les résultats, il a été décidé d'analyser de nouvelles structures avec uniquement de la fibre de renforcement sur l'extrados : zone soumise à la traction (Fig.8). Comme expliqué précédemment, des essais sur des structures avec uniquement des fibres dans la zone de traction vont être réalisés. En parallèle, des simulations par éléments finis seront réalisées afin de caractériser la rupture et d'améliorer la procédure de conception.

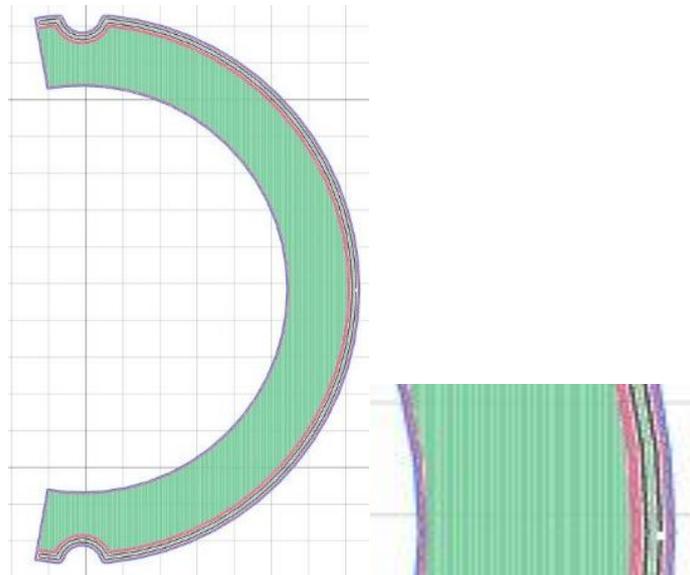


Figure 8 - Structure avec fibre de carbone en traction

Références

- [1] Y. Ma, M. Ueda, T. Yokozeki, T. Sugahara, Y. Yang, and H. Hamada, “A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites,” *Compos Struct*, vol. 160, pp. 89–99, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.10.037.
- [2] G. D. Goh, W. Toh, Y. L. Yap, T. Y. Ng, and W. Y. Yeong, “Additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic for topology optimized unmanned aerial vehicle structures,” *Compos B Eng*, vol. 216, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108840.
- [3] X. Tian *et al.*, “3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: Development, Application, and Prospective,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, vol. 1, no. 1, p. 100016, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.cjmeam.2022.100016.
- [4] Y. Wang, G. Zhang, H. Ren, G. Liu, and Y. Xiong, “Fabrication strategy for joints in 3D printed continuous fiber reinforced composite lattice structures,” *Composites Communications*, vol. 30, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.coco.2022.101080.
- [5] P. Zhuo, S. Li, I. A. Ashcroft, and A. I. Jones, “Continuous fibre composite 3D printing with pultruded carbon/PA6 commingled fibres: Processing and mechanical properties,” *Compos Sci Technol*, vol. 221, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.compscitech.2022.109341.
- [6] G. Machado, A. Maurel-pantel, and C. Hochard, “MECHANICAL CHARACTERIZATION OF 3D - PRINTED COEXTRUDED CONTINUOUS CARBON-FIBER THERMOPLASTIC,” pp. 1–6, 2022.
- [7] F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, and R. Matsuzaki, “3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens,” *Open Journal of Composite Materials*, vol. 06, no. 01, pp. 18–27, 2016, doi: 10.4236/ojcm.2016.61003.
- [8] M. Mohammadizadeh, A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, “3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis,” *Compos B Eng*, vol. 175, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107112.
- [9] M. Ueda *et al.*, “3D compaction printing of a continuous carbon fiber reinforced thermoplastic,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 137, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105985.
- [10] N. Li *et al.*, “Path-designed 3D printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures,” *Compos B Eng*, vol. 182, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107612.
- [11] J. M. Chacón, M. A. Caminero, P. J. Núñez, E. García-Plaza, I. García-Moreno, and J. M. Reverte, “Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties,” *Compos Sci Technol*, vol. 181, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107688.

- [12] W. C. Cui and M. R. Wisnom, “Contact finite element analysis of three- and four-point short-beam bending of unidirectional composites,” *Compos Sci Technol*, vol. 45, no. 4, pp. 323–334, Jan. 1992, doi: 10.1016/0266-3538(92)90047-7.
- [13] S. C. Tan, “Stress analysis and the testing of Celanese and IITRI compression specimens,” *Compos Sci Technol*, vol. 44, no. 1, pp. 57–70, Jan. 1992, doi: 10.1016/0266-3538(92)90025-X.
- [14] T. A. Bogetti, J. W. Gillespie, and R. Byron Pipes, “Evaluation of the IITRI compression test method for stiffness and strength determination,” *Compos Sci Technol*, vol. 32, no. 1, pp. 57–76, Jan. 1988, doi: 10.1016/0266-3538(88)90029-2.
- [15] K. Schneider, “Determination of compressive properties of fibre composites in the in-plane direction according to ISO 14126. Part 1: A round Robin test,” *Applied Composite Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2007, doi: 10.1007/s10443-006-9027-6.
- [16] J. M. Kolinski, “2D Digital Image Correlation with open-source NCORR.”
- [17] A. Fuad Ab Ghani, M. B. Ali, S. Dhar Malingam, and J. Mahmud, “Digital Image Correlation (DIC) Technique in Measuring Strain Using Opensource Platform Ncorr,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309463775>
- [18] D. Atkinson and T. Becker, “A 117 line 2D Digital Image Correlation code written in MATLAB,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/RS12182906.
- [19] M. Chimienti, O. Montagnier, G. Machado, A. Maurel-Pantel, and C. Hochard, “Design de voilures architecturées fabriquées par impression 3D composite à fibres continues-Application au cas des drones. Design of architectural airfoils made by continuous fiber composite 3D printing-Application to the case of the drones.”
- [20] D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese, and H. M. Herr, “MultiDIC: An open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30520–30535, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843725.
- [21] C. C. Hiel, M. Sumich, and D. P. Chappell, “A Curved Beam Test Specimen for Determining the Interlaminar Tensile Strength of a Laminated Composite,” *J Compos Mater*, vol. 25, no. 7, pp. 854–868, 1991, doi: 10.1177/002199839102500705.
- [22] A. Fereidoon, M. Andalib, and H. Hemmatian, “Bending analysis of curved sandwich beams with functionally graded core,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 22, no. 7, pp. 564–577, 2015, doi: 10.1080/15376494.2013.828815.
- [23] S. K. Kourkoulis, E. D. Pasiou, and C. F. Markides, “Analytical and numerical study of the stress field in a circular semi-ring under combined diametral compression and bending,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 13, no. 47, pp. 247–265, 2019, doi: 10.3221/IGF-ESIS.47.19.
- [24] K. T. Kedward, R. S. Wilson, and S. K. McLean, “Flexure of simply curved composite shapes,” *Composites*, vol. 20, no. 6, pp. 527–536, 1989, doi: 10.1016/0010-4361(89)90911-7.