

Design de poutres sandwich courbes réalisés par fabrication additive fibre de carbone continue sollicités en traction-flexion

Design of curved sandwich beams made by additive manufacturing of continuous carbon fiber under tension and bending

D. Novais¹, G. Machado¹ et C. Hochard¹

¹ : Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
LMA - UMR 7031 AMU – CNRS, Centrale Marseille
4 impasse Nikola Tesla, CS 4000613453 Marseille Cedex 13
e-mail : novais@lma.cnrs-mrs.fr, machado@lma.cnrs-mrs.fr et hochard@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé

Les poutres sandwich sont largement utilisées en raison de leur faible masse et de leur résistance mécanique élevée à la flexion. Dans le cas des poutres courbes, aux contraintes de traction et de compression circonférentielles s'ajoutent des contraintes radiales qui favorisent le délaminage entre les couches. Ce travail portera sur le design de poutres sandwich courbes réalisés par fabrication additive fibre de carbone continue et soumises à un chargement combiné de traction-flexion. L'objectif est de trouver des moyens de reprendre les contraintes circonférentielles et radiales qui se présentent lorsqu'il y a des efforts de flexion-tension dans les poutres courbes. Une étude antérieure a montré que la résistance en compression est plus faible qu'en traction, une technique proposée pour reprendre les contraintes circonférentielles consiste à placer plus de fibres du côté de la compression que du côté de la traction. À l'aide de la corrélation d'images (DIC), ce travail propose d'étudier expérimentalement les champs de déformation radiale et circonférentielle d'une poutre courbe imprimée en sandwich et d'essayer de trouver un moyen de palier les contraintes radiales.

Abstract

Sandwich beams are widely used because of their low mass and high bending strength. In the case of curved beams, circumferential tensile and compressive stresses are augmented by radial stresses that promote delamination between the layers. This work will focus on the design of curved sandwich beams produced by additive manufacturing of continuous carbon fiber and subjected to combined tensile and bending loading. The aim is to find ways of taking up the circumferential and radial stresses that come up when bending-tension forces are applied to curved beams. A previous study has shown that compressive strength is lower than tensile strength, and a proposed technique for taking up circumferential stresses is to place more fibers on the compressive side than on the tensile side. Using image correlation (DIC), this work proposes to experimentally study the radial and circumferential deformation fields of a curved sandwich printed beam, and to try to find a way of relieving the radial stresses.

Mots Clés : Composite à fibres de carbone continues ; fabrication additive ; poutres sandwich courbes.

Keywords : Continuous carbon fiber composite; additive manufacturing; curved sandwich beams.

1 Introduction

La fabrication additive, plus connue sous le nom d'impression 3D, gagne du terrain dans l'industrie car elle apporte un large éventail d'avantages par rapport à la fabrication soustractive, tels que : elle ne nécessite pas d'outils complexes, ce qui réduit les coûts ; elle est adaptée aux petites productions ; elle permet la production de pièces et d'assemblages complexes ; elle ne produit quasiment aucun déchet de matière ; et elle nécessite moins de connaissances techniques pour être exécuté [1]. Depuis plusieurs décennies, les matériaux polymères occupent une place centrale dans la recherche et les applications industrielles. Plus récemment, l'attention s'est intensifiée autour des matériaux composites produits par impression 3D. Ces matériaux suscitent un intérêt croissant, en particulier dans des secteurs exigeants tels que l'aérospatiale et l'automobile, en raison de ne pas nécessiter l'utilisation de moules et la possibilité de fabriquer des pièces avec des géométries complexes, par exemple. Parmi ces matériaux, les composites renforcés de fibres se distinguent par des propriétés

exceptionnelles, notamment des rapports résistance/poids et rigidité/poids particulièrement élevés [2].

Les poutres sandwich sont encore très utilisées dans l'industrie pour des structures à haute performance [3]. Parmi les poutres sandwich, l'un des modèles les plus utilisés est celui des poutres à géométrie courbe, utilisé dans les cas où il y a des coins et des courbes. [4]. Contrairement aux poutres droites, les poutres courbes présentent des contraintes radiales lorsqu'elles sont soumises à la traction et la flexion, ce qui peut provoquer une rupture par délaminage [5-6]. Cette étude porte sur le design des poutres sandwich courbes réalisés par fabrication additive fibre de carbone continue soumises à un chargement combiné de traction-flexion. Seront étudiés des poutres sandwich dont l'âme est constituée uniquement de matériau thermoplastique. Un problème suivant trouvé dans le cas des poutres sandwich est la résistance mécanique plus faible de la fibre en compression par rapport à la fibre en tension, comme montré [7]. Des essais ont été réalisés sur des poutres sandwich courbes, qui ont aussi des contraintes radiales, avec différentes quantités de couches de fibres, symétriques et asymétriques. Pour quantifier la déformation au cours des essais, la méthode de corrélation d'images 3D a été utilisée.

2 Méthodologie

2.1 Fabrication des poutres sandwich courbes

Les épreuves technologiques ont été imprimés à l'aide d'une imprimante composite à fibres continues Anisoprint Composer-A3. Elle offre un concept bi-matrice, basé sur l'imprégnation préliminaire de la fibre de carbone sous forme de mèche dans un liant thermodurcissable à base d'époxy [1]. Quatre types de structures ont été fabriqués : (i) entièrement en thermoplastique (PA12), appelé TP par la suite ; (ii) l'âme en PA12 avec peau côté traction uniquement (deux couches de fibre de carbone), appelé CF-1S ; (iii) l'âme en PA12 avec deux peaux, côté traction et côté compression (deux couches de fibre de carbone chaque côté), appelé CF-2S 2x2 ; (iv) et âme en PA 12 mais avec trois couches de fibre de carbone sur côté compression et une couche sur côté traction, appelé CF-2S 3x1. Chaque couche de fibre mesure environ 0,9 mm, ce qui correspond à 6 % de la largeur totale des poutres (15 mm). La Fig. 1 présente les dimensions des éprouvettes et les différentes configurations des sandwichs.

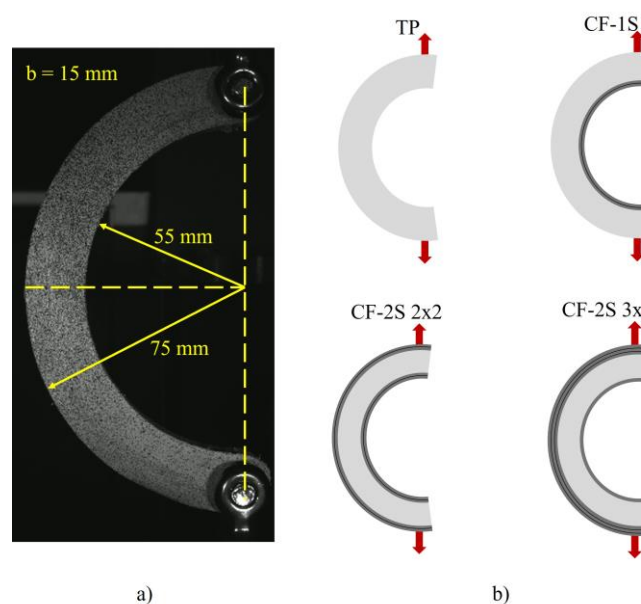


Fig. 1. Poutres sandwich courbes. Dimensions des poutres (a) et représentation des différents éprouvettes testées (b).

2.2 Procédure d'essai

Les essais ont été réalisés sur une machine d'essai universelle MTS1000 équipée d'une cellule de charge de ± 10 kN à une vitesse de déplacement constante de 0,03 mm/s. La Fig. 2a montre un schéma de l'essai avec les contraintes également représentées. Elle montre également la zone de la section transversale (c'est-à-dire du point 0 au point 1) qui définit la zone d'intérêt, où les déformations sont maximales. La corrélation d'images 3D a été utilisée uniquement autour de la région d'intérêt afin de maximiser la résolution spatiale. La Fig. 2b montre un plan général des essais.

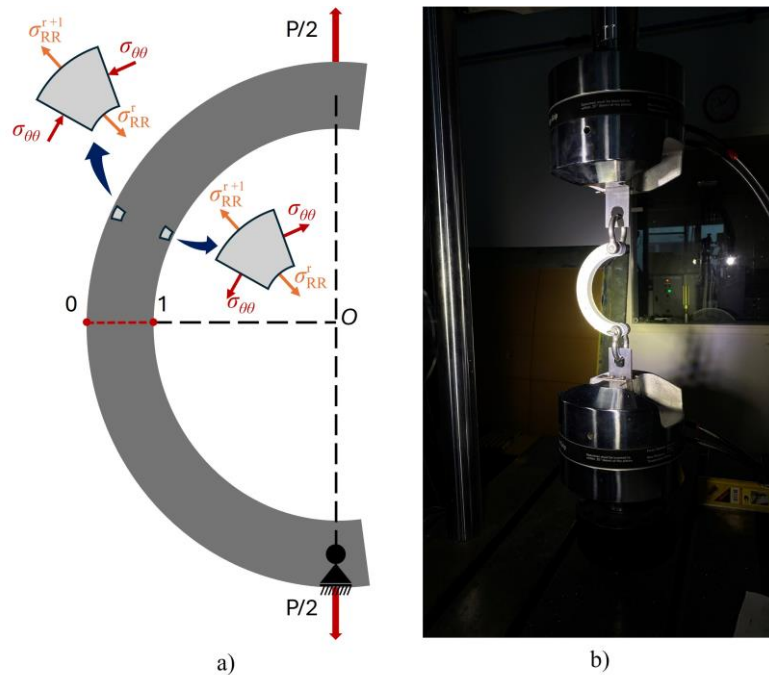


Fig. 2. (a) Représentation des essais réalisés et (b) photographie de l'un des essais

3 Résultats

Les courbes représentant la force en fonction du déplacement radial du point situé au centre des poutres sont présentées dans la Fig. 3.

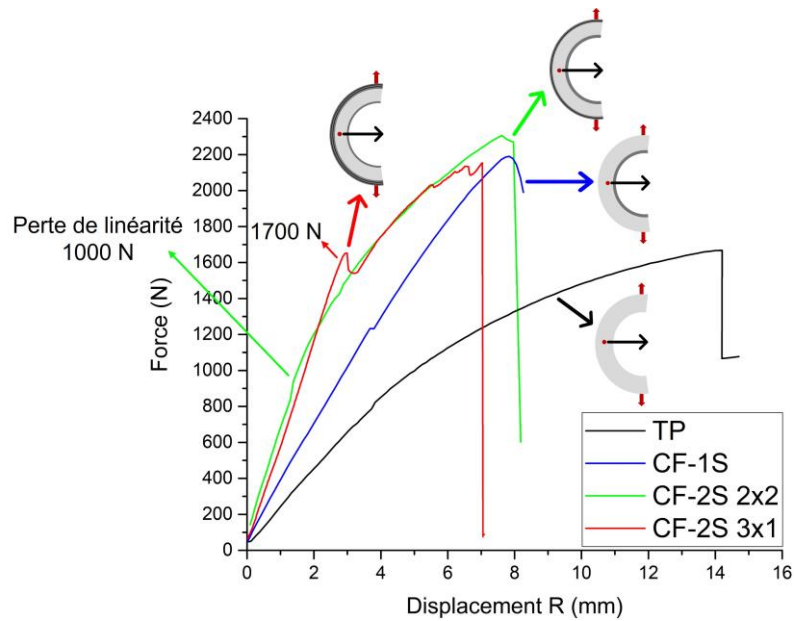


Fig. 3. Réponse de la force appliquée en fonction du déplacement radial du point central de chaque poutre courbe.

En général, l'ajout de peaux en fibres a considérablement augmenté en 31% la résistance mécanique par rapport à la poutre fabriquée uniquement en thermoplastiques (courbe TP). Les éprouvettes avec fibre de carbone ont montré une charge de rupture étant supérieure à 2100 N. Cependant, la poutre CF-2S 2x2 a perdu sa linéarité à 1000 N, ce qui est inférieur aux 1700 N de la poutre CF-2S 3x1. Les moments de perte de linéarité de ces poutres sont indiqués dans la Fig. 3. Cela indique que, malgré une légère baisse de la charge de rupture, la poutre CF-2S 3x1 présente une zone linéaire plus longue. Dans le cas de la poutre CF-2S 2x2, la perte précoce de linéarité est due au délaminage entre la peau de fibre et l'âme. Ce phénomène de défaillance est mieux visualisé à la Fig. 4, où il y a l'image du côté en compression juste après la perte de linéarité de la poutre CF-2S 2x2 avec les régions délaminées indiquées par des flèches (a) et avec le champ de déformation radiale obtenu par corrélation d'images 3D (b).

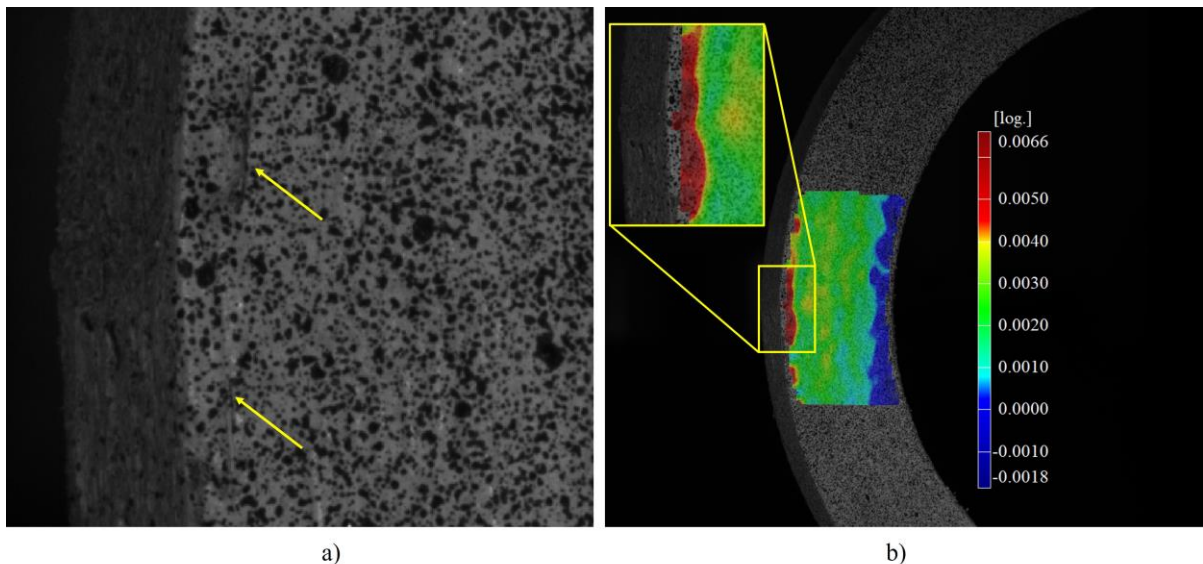


Fig. 4. Détail du côté compression de la poutre CF-2S 2x2 après perte de linéarité (1000 N) avec les régions délaminées indiquées par des flèches (a) et avec le champ de déformation radiale obtenu par corrélation d'images 3D (b).

La Fig. 4 montre le délaminage entre l'âme et les couches de fibres pour l'éprouvette CF-2S 2x2. Ce phénomène peut également être à l'origine de la perte de linéarité de la poutre CF-2S 3x1. Une alternative pour l'éviter serait de renforcer l'âme et l'interface âme-fibre. Il est supposé qu'avec un renforcement radial, la propension à le délaminage peut être réduite. Certaines études portent sur la disposition des matériaux au centre des poutres sandwich, comme l'utilisation de mousse entre des treillis triangulaires ; utilisation de structures cellulaires telles que nid d'abeille, diamant, rectangulaire et circulaire ; et des nids d'abeilles tridimensionnels, par exemple [7-10]. Un autre moyen d'éviter la délamination consiste en modifier l'épaisseur, qui a une légère influence sur les contraintes radiales lorsque le rayon de courbure est très élevé ou modéré par rapport à l'épaisseur de la poutre sandwich [4]. Dans cette perspective, des techniques visant reprendre les contraintes radiales seront développées. La Fig. 5 illustre un exemple où des renforts radiaux en fibre de carbone ont été ajoutés.

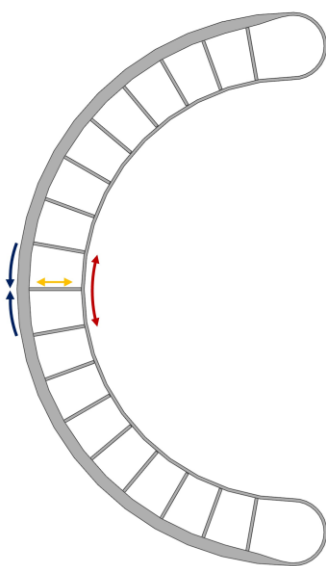


Fig. 5. Disposition des fibres dans la direction radiale et circumférentielles d'une poutre sandwich courbe.

4 Conclusions et perspectives

Différentes configurations de disposition des fibres ont été testées dans des poutres sandwich courbes. La présence de fibres de carbone a augmenté la résistance mécanique par rapport à la poutre fabriquée uniquement en thermoplastique en 31%. Parmi les configurations testées, celle qui présentait la plus longue région linéaire était celle qui avait trois couches de fibres du côté en compression et une couche du côté en traction. Dans cette configuration, les couches de fibres représentent 24% du volume de la poutre. Cependant, la région linéaire peut être encore plus allongée en utilisant différentes techniques d'arrangement des fibres ou changements géométriques, par exemple. Afin de reprendre les contraintes radiales et d'éviter le délaminage, une nouvelle stratégie sera développée.

Références

- [1] A. Adumitroaie *et al.*, « Novel Continuous Fiber Bi-Matrix Composite 3-D Printing Technology », *Materials*, vol. 12, n° 18, p. 3011, sept. 2019, doi: 10.3390/ma12183011.
- [2] G. D. Goh, W. Toh, Y. L. Yap, T. Y. Ng, et W. Y. Yeong, « Additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic for topology optimized unmanned aerial vehicle structures », *Composites Part B-engineering*, vol. 216, p. 108840, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108840.
- [3] E. Bozhevolnaya et Y. Frostig, « Nonlinear closed-form high-order analysis of curved sandwich panels », *Composite Structures*, vol. 38, n° 1-4, p. 383-394, mai 1997, doi: 10.1016/S0263-8223(97)00073-1.
- [4] S. Smidt, « Bending of curved sandwich beams », *Composite Structures*, vol. 33, n° 4, p. 211-225, janv. 1995, doi: 10.1016/0263-8223(95)00119-0.

- [5] W. Ko, « Delamination Stresses in Semicircular Laminated Composite Bars », *NASA Technical Memorandum*, vol. 4026, p. 28, 1988.
- [6] K. T. Kedward, R. S. Wilson, et S. K. McLean, « Flexure of simply curved composite shapes », *Composites*, vol. 20, n° 6, p. 527-536, nov. 1989, doi: 10.1016/0010-4361(89)90911-7.
- [7] M. Chimienti, G. Machado, A. Maurel-Pantel, et 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*, juill. 2023.
- [8] T. George, V. S. Deshpande, K. Sharp, et H. N. G. Wadley, « Hybrid core carbon fiber composite sandwich panels: Fabrication and mechanical response », *Composite Structures*, vol. 108, p. 696-710, févr. 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.10.002.
- [9] K. Sugiyama, R. Matsuzaki, M. Ueda, A. Todoroki, et Y. Hirano, « 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 113, p. 114-121, oct. 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.07.029.
- [10] J. Xiong, L. Ma, A. Stocchi, J. Yang, L. Wu, et S. Pan, « Bending response of carbon fiber composite sandwich beams with three dimensional honeycomb cores », *Composite Structures*, vol. 108, p. 234-242, févr. 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.09.035.
- [11] R. Aoki, R. Higuchi, et T. Yokozeki, « Fatigue simulation for progressive damage in CFRP laminates using intra-laminar and inter-laminar fatigue damage models », *International Journal of Fatigue*, vol. 143, p. 106015, févr. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106015.