

Fonctionnalisation passive de pièces composites fabriquées par procédé TFP

Passive functionalization composite parts manufactured by the TFP process

Peng YU¹, Nahiene HAMILA¹, Jessy SIMON², Sébastien COMAS-CARDONA² et Christophe BINETRUY²

1 : UMR CNRS 6027, IRDL
Bretagne INP

Brest, F-29200, France

e-mail : peng.yu@enib.fr et nahiene.hamila@enib.fr

2 : CNRS, GeM, UMR 6183
Nantes Université, Ecole Centrale Nantes
Nantes, F-44000, France

e-mail : jessy.simon@ec-nantes.fr, sebastien.comas@ec-nantes.fr et christophe.binetruy@ec-nantes.fr

Résumé

Si l'utilisation de matériaux composites augmente la raideur spécifique des pièces structurelles, leur fabrication via des procédés de placement de fibre automatisé comme le Tailored Fibre Placement (TFP) permet d'ajouter de la fonctionnalisation. Un exemple de pièce est l'hydrofoil qui peut gagner en performance hydrodynamique si sa forme s'adapte aux différents chargements rencontrés dans les trois modes de navigation. Une des méthodes qui peuvent satisfaire ces exigences est la fonctionnalisation passive permettant à l'hydrofoil de se déformer en fonction de la pression sans nécessiter l'assemblage de plusieurs pièces et une motorisation des liaisons. Dans ce contexte, le développement d'outils numériques d'aide à la conception est indispensable. Parmi eux, l'optimisation topologique est une méthode bien établie. Ce travail s'intéresse au développement d'une stratégie d'optimisation de la topologie de la pièce et de l'orientation des fibres pour les matériaux composites avec une fonction objective permettant la fonctionnalisation passive. Une méthode de génération des trajectoires de fibre pour le procédé TFP est également présentée. Les résultats d'optimisation de la topologie d'un cas test de type cantilever et un inverseur de force sont montrés.

Abstract

If the use of composite materials increases the specific stiffness of structural parts, their manufacturing via automated fiber placement processes such as Tailored Fiber Placement (TFP) makes it possible to add functionalization. An example of a part is the hydrofoil which can gain in hydrodynamic performance if its shape adapts to the different loads encountered in the three navigation modes. One of the methods that can meet these requirements is passive functionalization allowing the hydrofoil to deform depending on the pressure without requiring the assembly of several parts and motorization of the connections. In this context, the development of digital design support tools is essential. Among them, topology optimization is a well-established method. This work focuses on the development of a strategy for optimizing the topology of the part and the orientation of the fibers for composite materials with an objective function allowing passive functionalization. A method for generating fiber trajectories for the TFP process is also presented. The topology optimization results of a cantilever type test case and a force inverter are shown.

Mots Clés : Optimisation topologique, Fonctionnalisation passive, Procédé TFP, Fibres curvilignes

Keywords : Topology optimization, Passive functionalization, TFP process, Curvilinear fibres

1. Introduction

1.1. Optimisation topologique

L'optimisation de la topologie est l'une des méthodes de conception structurelle les plus avancées, visant à trouver automatiquement la structure optimale dans un domaine de conception en fonction des chargements, de contraintes données et d'une fonction objective à satisfaire. Dans un problème d'optimisation topologique d'une pièce mécanique, la satisfaction de l'objectif implique la détermination de

la disposition de la matière dans l'espace de conception. Il peut être défini comme un problème binaire consistant à trouver la répartition des zones vides ou remplies de matière permettant de minimiser le travail effectué par les forces externes ou la compliance soumises à une contrainte de volume [1].

Les méthodes numériques d'optimisation topologique ont été largement étudiées notamment par Bendsøe [2] qui a introduit une approche d'homogénéisation [3] mais aussi la méthode basée sur la densité avec le schéma SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) [1, 4] et l'optimisation topologique basée sur les lignes de niveau [5, 6].

1.2. Procédé TFP

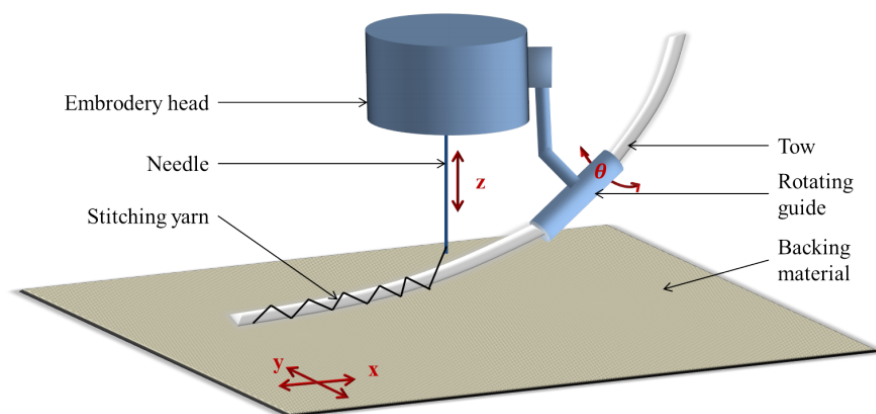


Fig. 1. – Représentation schématique du principe de TFP [7]

Le procédé TFP (*Tailored Fiber Placement*) permet la fabrication automatisée de préformes sur mesure pour les matériaux composites, développé dans les années 1990 à l'Institut Leibniz de Recherche sur les Polymères de Dresde. C'est un procédé textile automatisé relativement nouveau pour les composites pour la production de renforts avec des trajectoires de fibre curvilignes [8]. Allié au procédé de formage de matériaux composites renforcés de fibres continues, le procédé TFP offre un degré de liberté élevé de conception par rapport aux technologies textiles courantes en permettant de disposer les fibres de manière optimale. Le principe du TFP est illustré dans la Fig. 1. La tête de broderie fixe une fibre continue sur un matériau support plat en réalisant un point en zigzag. Le TFP a démontré un important potentiel d'application dans la fabrication de structures composites légères de petite et moyenne taille dans les industries aéronautique, automobile et énergétique [9, 10, 11].

1.3. Hydrofoil et fonctionnalisation passive

L'hydrofoil est une structure en forme d'aile installée sur des bateaux ou des véhicules marins, qui génère une portance lorsqu'elle se déplace à grande vitesse, soulevant ainsi la coque hors de l'eau et permettant de réduire la résistance de l'eau, augmentant ainsi la vitesse et améliorant l'efficacité énergétique. Dans les trois modes de navigation de l'hydrofoil, autoriser l'adaptation passive de sa géométrie pourrait permettre de maximiser la portance et/ou minimiser la traînée.

Pour répondre à ces exigences, actuellement, dans le domaine maritime, des concepts de technologies de morphing ont commencé à apparaître à la fin des années 2010 [12, 13]. Ces technologies modifient efficacement la section 2D de l'hydrofoil. Par contre, ils ajoutent du poids au véhicule nautique et ont souvent besoin d'entretien. Par conséquent, une solution appropriée serait d'utiliser des hydrofoils qui changent passivement de forme en fonction des variations de chargements lié à la pression de l'écoulement de l'eau [14], c'est ce qu'on appelle la fonctionnalisation passive.

2. Méthodes

2.1. Optimisation de la topologie : Méthode basée sur la densité

La méthode basée sur la densité est une méthode classique d'optimisation topologique [1]. Selon le type de matériau, le schéma de méthode peut être différent, par exemple SIMP pour les matériaux isotropes. Dans cette méthode, on affecte une densité entre 0 et 1 à chaque élément pour représenter l'état de cet élément : la densité 0 correspondant à du vide et la densité 1 correspondant au matériau. Les densités intermédiaires sont obtenues par interpolation. Ainsi, on convertit un problème binaire discrétisé en un problème continu.

Le problème d'optimisation est formulé dans Eq. 1 :

$$\begin{aligned}
 & \text{find} && \rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n]^T \\
 & \text{minimize} && c(\rho_{phys}) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(\rho_{phys}) - \mathbf{u}_{BC}^T \mathbf{r} \\
 & \text{subjected to} && v(\rho_{phys}) = \rho_{phys}^T \mathbf{v} - v_{lim} \leq 0 \\
 & && \rho \in \chi, \chi = [\rho \in \mathbb{R}^n : 0 \leq \rho \leq 1]
 \end{aligned} \tag{Eq. 1}$$

où ρ est la densité de l'élément, c est la compliance, \mathbf{f} est le vecteur des forces nodales, \mathbf{u} est le vecteur des déplacements non connus, \mathbf{u}_{BC} est le vecteur des déplacements imposés, \mathbf{r} est le vecteur des réactions nodales sur les noeuds où les conditions aux limites sur les déplacements sont imposés, n est le nombre d'éléments du maillage, $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$ est le vecteur des volumes de l'élément et v_{lim} est la limite de volume prescrite du domaine de conception.

Dans cette équation, la définition de la compliance est dérivée de l'énergie potentielle totale [15]. Pour les cas numériques dans cet article, il n'y a que les conditions aux limites de Dirichlet et elles sont toutes nulles, donc la définition de la compliance peut être simplifiée à :

$$c(\rho_{phys}) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(\rho_{phys}) \tag{Eq. 2}$$

La densité physique ρ_{phys} d'un élément est calculée comme une moyenne pondérée avec les éléments voisins en considérant leur distance à l'élément actuellement considérée s'ils sont dans un certain rayon autour de lui, fonctionnant ainsi comme un filtre de sensibilité. Elle permet de donner des résultats toujours stables quand le maillage est raffiné, évitant la formation de microstructures [1].

Pour l'optimisation topologique des matériaux orthotropes, le schéma SOMP (*Solid Orthotropic Material with Penalization*) a été implémenté. Dans cette méthode, l'orientation des fibres paramétrée par un angle θ est ajoutée dans les variables de conception [16]. La fonction objective, qui est la compliance c , est donc fonction de la densité ρ_{phys} et de l'orientation θ . L'effet du changement de l'angle de fibre est considéré dans la loi de comportement du matériau orthotrope.

L'un des objectifs de ce travail est de trouver une fonction objective pour réaliser la conception de mécanisme conforme, correspondant à de la fonctionnalisation passive. La fonction objective peut être le déplacement d'un ou plusieurs points en réponse à l'application d'une ou plusieurs forces. L'amplitude et la direction du déplacement peuvent être contrôlés.

2.2. Méthode des lignes de courant pour déterminer les chemins de fibres

Le champs d'orientation θ solution du problème d'optimisation étant discret, des chemins de fibres continues réalisables avec le procédé TFP doivent être déterminés. Pour cela, la méthode des lignes de courant est utilisée. Cette dernière calcule une fonction ψ dont le gradient est orthogonal aux orientations θ des fibres. Ainsi, si on calcule ψ sur un maillage, on obtient un champ scalaire de Ψ permettant de générer les trajectoires continues en traçant les lignes de niveau à partir des valeurs de Ψ . Ces lignes de niveau représentent les chemins de fibres. Une méthode de lissage sur le changement d'orientation entre les éléments voisins est aussi appliquée afin d'obtenir une trajectoire plus continue et lisse.

Les lignes de courant sont donc calculées par le schéma de minimisation suivant :

$$\min_{\psi} : I(\psi) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \alpha_1(x) \cdot |\nabla\psi - \mathbf{v}_{\theta}|^2 d\Omega, \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{where : } \begin{cases} \alpha_1(x) = 0, & \text{if } x \in \Omega_{\text{void}} \\ \alpha_1(x) = 1, & \text{if } x \in \Omega_{\text{solid}} \end{cases}$$

Où le vecteur d'orientation \mathbf{v}_{θ} est défini par l'angle de fibre θ :

$$\mathbf{v}_{\theta} = (\cos \theta, \sin \theta) \quad (\text{Eq. 4})$$

3. Résultats

3.1. Cas 1 : cantilever

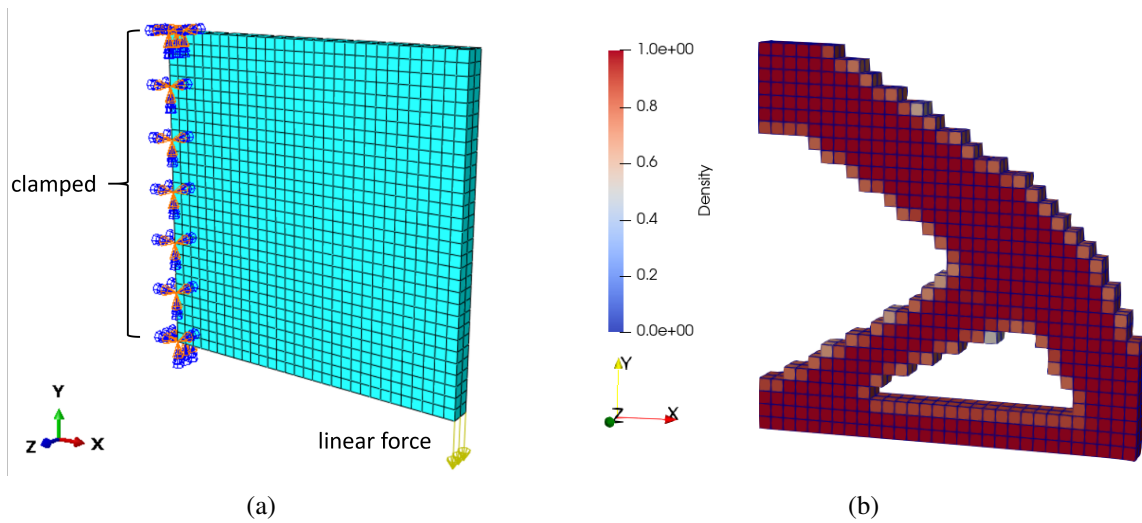


FIG. 2. – (a) Les conditions aux limites et les charges du cas 1 : cantilever, (b) Le résultat de l'optimisation topologique par schéma SIMP du cas 1 : cantilever

L'optimisation topologique par schéma SIMP a été réalisée sur un modèle de cantilever. Le domaine de conception est de $30 \times 30 \times 2$. Le type d'élément est l'hexaèdre et chaque élément est de $1 \times 1 \times 1$. La surface gauche du domaine est encastée et une force linéique (1 N/1) est appliquée en bas à droite du domaine. Le module d'Young a une valeur de 10^5 MPa et le coefficient de Poisson vaut 0.3.

Dans la topologie finale, on peut choisir un seuil de densité, les éléments avant une densité inférieure à ce seuil sont alors enlevés (Fig. 2). Ensuite, les lignes de courant peuvent être calculées et tracées en utilisant la méthode expliquée précédemment.

3.2. Cas 2 : cantilever2D

L'optimisation topologique par schéma SOMP a été réalisée sur un modèle de cantilever 2D (Fig. 3(a)). Le domaine de conception est rectangle de 200×100 . Le type d'élément est le quadrangle avec une taille de 2×2 . Le bord gauche du domaine est encasté et une force ponctuelle (10^5 N) est appliquée au milieu à droite du domaine. Pour les propriétés du matériau, E_1 vaut 80 GPa, E_2 35 GPa, G_{12} vaut 30.1 GPa et ν_{12} 0.33. L'axe 1 est déterminé par θ et les axes 2 et 3 sont pris orthogonaux à l'axe 1.

Fig. 3(b) montre le chemin de fibres obtenu en se basant sur la topologie finale. Les flèches rouges indiquent l'orientation de fibre et les lignes de couleurs sont le chemin de fibre déterminés.

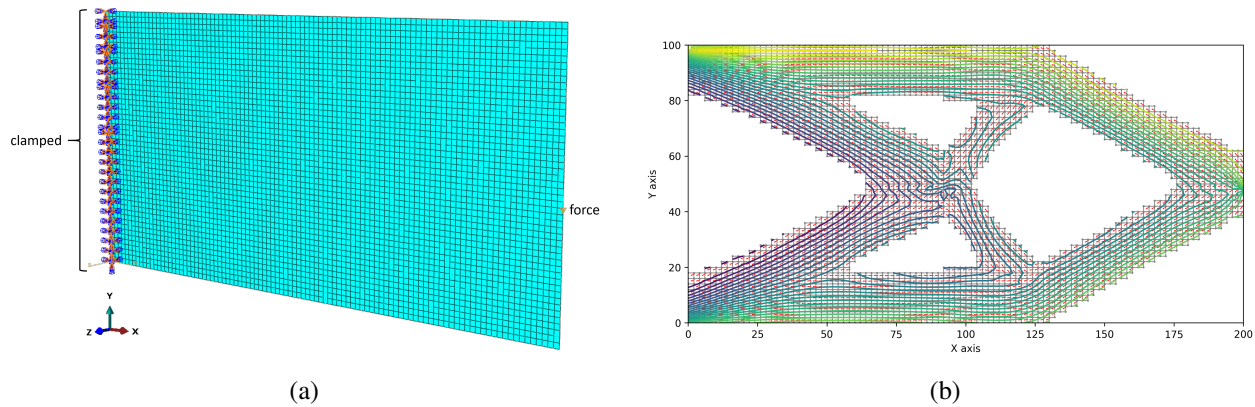


FIG. 3. – (a) Les conditions aux limites et les charges du cas 2 : cantilever2D, (b) Les résultats d'optimisation de la topologie et de l'orientation du cas 2 : cantilever2D

3.3. Cas 3 : inverseur de force

L'exemple de l'inverseur illustre le principe d'une fonction objective visant à obtenir un déplacement donné en un point par application d'une force en un autre. (Fig. 4).

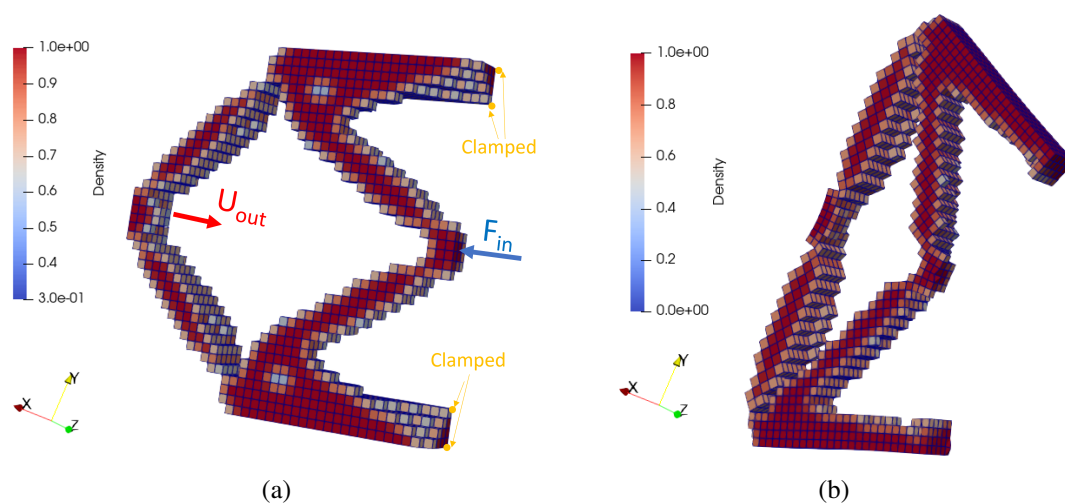


FIG. 4. – (a) Les conditions aux limites, les charges et le résultat optimisation de la topologie du cas 3 : inverseur de force, (b) Affichage de la déformation du cas 3 : inverseur de force

4. Conclusion

Ce travail porte sur la conception de mécanisme conforme en composites via l'optimisation topologique afin de réaliser une fonctionnalisation passive de la pièce. La méthode présentée de génération de chemins de fibre redcontinué à partir d'un champ discret de vecteurs issue de l'optimisation de la topologie et de l'orientation matériel permettra de fournir les trajectoires des fibres à réaliser par le procédé TFP. Il convient de noter que des travaux similaires se basent sur le schéma SIMP. Par exemple, la stratégie d'optimisation utilisant des fonctions d'interpolation type NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*) résout simultanément la conception de la topologie et de l'anisotropie du composite à rigidité variable [17]. Également, la méthode DMO (Discrete Material Optimisation) permet de sélectionner à la fois la séquence d'empilement, l'orientation de fibre et le choix du matériau [18]. Cependant, cette dernière se limite à un nombre fini d'orientations alors que la méthode proposée ici n'impose aucune restriction sur les angles possibles.

Références

- [1] M. P. Bendsoe, O. Sigmund, *Topology optimization : theory, methods, and applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] M. P. Bendsøe, N. Kikuchi « Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method », *Computer methods in applied mechanics and engineering* Vol. 71 n° 2, pp. 197–224, 1988.
- [3] Y. Wang, X. Li, K. Long, P. Wei « Open-source codes of topology optimization : A summary for beginners to start their research », *Comput Model Eng Sci* Vol. 137, pp. 1–34, 2023.
- [4] M. P. Bendsøe « Optimal shape design as a material distribution problem », *Structural optimization* Vol. 1, pp. 193–202, 1989.
- [5] M. Y. Wang, X. Wang, D. Guo « A level set method for structural topology optimization », *Computer methods in applied mechanics and engineering* Vol. 192 n° 1-2, pp. 227–246, 2003.
- [6] G. Allaire, F. Jouve, A.-M. Toader « Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method », *Journal of computational physics* Vol. 194 n° 1, pp. 363–393, 2004.
- [7] J. Simon « Numerical simulation and experimental investigation of the forming of tailored fibre placement preforms : a mixed embedded-ALE finite element formulation », Ph.D. thesis, École centrale de Nantes, 2022.
- [8] P. Mattheij, K. Gliesche, D. Feltn « Tailored fiber placement-mechanical properties and applications », *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 17 n° 9, pp. 774–786, 1998.
- [9] A. Spickenheuer, M. Schulz, K. Gliesche, G. Heinrich « Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures », *Plastics, rubber and composites* Vol. 37 n° 5, pp. 227–232, 2008.
- [10] K. Uhlig, A. Spickenheuer, L. Bittrich, G. Heinrich « Development of a highly stressed bladed rotor made of a cfrp using the tailored fiber placement technology », *Mechanics of Composite Materials* Vol. 49, pp. 201–210, 2013.
- [11] J. H. S. Almeida Jr, L. Bittrich, T. Nomura, A. Spickenheuer « Cross-section optimization of topologically-optimized variable-axial anisotropic composite structures », *Composite Structures* Vol. 225, pp. 111150, 2019.
- [12] M. A. Fatiha, B. Augier, F. Deniset, P. Casari, J. A. Astolfi « Morphing hydrofoil model driven by compliant composite structure and internal pressure », *Journal of Marine Science and Engineering* Vol. 7 n° 12, pp. 423, 2019.
- [13] M. Sacher, M. Durand, E. Berrini, F. Hauville, R. Duvigneau, O. Le Maitre, J.-A. Astolfi « Flexible hydrofoil optimization for the 35th America’s Cup with constrained EGO method », *Ocean Engineering* Vol. 157, pp. 62–72, 2018.
- [14] M. Spahic « Parametric optimisation of 3D printed architected materials : application to the morphing of boat’s appendages », Ph.D. thesis, Université de Bretagne Sud, 2022.
- [15] M. Montemurro « On the structural stiffness maximisation of anisotropic continua under inhomogeneous Neumann–Dirichlet boundary conditions », *Composite Structures* Vol. 287, pp. 115289, 2022.
- [16] V. S. Papapetrou, C. Patel, A. Y. Tamijani « Stiffness-based optimization framework for the topology and fiber paths of continuous fiber composites », *Composites Part B : Engineering* Vol. 183, pp. 107681, 2020.
- [17] M. Montemurro, A. Mas, S.-e. Zerrouq « Topology and anisotropy optimisation of continua using non-uniform rational basis spline entities », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 420, pp. 116714, 2024.
- [18] B. Niu, N. Feng, E. Lund, Y. Leng « Discrete material optimization of composite structures subjected to initial excitation for minimum residual vibration », *Thin-Walled Structures* Vol. 173, pp. 108901, 2022.