

Développement et validation d'une stratégie de maillage pour des structures fabriqués par placement automatisé de fibres

Development and validation of a mesh geometric generative approach for structures manufactured by automated fiber placement

W. L. Dos Santos Pinto^{1,2}, A. Rassineux², C. Huchette¹, J. M. Garcia¹, C. Fagiano¹

1 : DMAS, ONERA, Université Paris Saclay
F-92322 Châtillon France

e-mail : willian_leandro.dos_santos_pinto@onera.fr, cedric.huchette@onera.fr, juan-manuel.garcia@onera.fr et christian.fagiano@onera.fr

2 : Laboratoire Roberval, UTC
Rue du docteur Schweitzer, CS 6039, 60203, Compiègne Cedex
e-mail : alain.rassineux@utc.fr

Résumé

Le procédé de placement automatisé de fibres (AFP) est connu par sa flexibilité de design, ce qui permet la conception et la fabrication de pièces avec une dépose non conventionnelle. Les structures composites contenant des fibres curvilignes pour la réalisation de panneaux à rigidité variable (VSP en anglais) suscitent un intérêt croissant dans l'industrie aéronautique par leur potentiel de performance. Cependant, la fabrication de structures par AFP peut engendrer des singularités au sein des plis. L'impact de ces discontinuités sur le comportement mécanique et le design de ces structures reste peu connu. Ce travail présente une stratégie de maillage fondée sur une description géométrique-analytique des chemins de dépose de bandes. Cette approche génère un maillage idéalisé de la géométrie après la dépose du robot puisque les effets thermomécaniques du procédé ne sont pas pris en compte. Enfin, la validation de la méthode est réalisée à partir d'une comparaison fine entre la géométrie générée par celle dernière et celle générée d'une segmentation de données issues d'observations microtomographiques.

Abstract

The Automated Fiber Placement (AFP) process is known for its design flexibility, enabling the design and manufacture of parts with non-conventional lay-ups. Composite structures featuring variable fiber angle is one of the structural cases of interest in the aerospace industry, given their performance potential. Nevertheless, manufacturing structures with AFP generates singularities within the layers. The impact of these discontinuities on the mechanical behavior and design of such structures remains poorly understood. This work presents a meshing strategy based on geometry and tape deposition path. This approach generates an idealized mesh of the geometry post-robot deposition, as thermomechanical effects of the process are not accounted for at this stage. Finally, the validation of the method is performed through comparison with a high fidelity mesh generated from micro-tomography scan segmentation.

Mots Clés : AFP, génération de maillage, *gaps / overlaps*, stratifiés non-conventionnels, VSP

Keywords: AFP, mesh generation, *gaps/overlaps*, non-conventional laminates, VSP

1. Introduction

Le placement automatisé des fibres (AFP) est de plus en plus utilisé dans le secteur aéronautique pour la fabrication des structures de grandes envergures telles que l'aile et le fuselage d'aéronef. Ce procédé repose sur le placement de bandes pré-imprégnées de quelques millimètres de largeur, à l'aide d'une tête de dépose. Cette automatisation assure une dépose du matériau à des cadences élevées tout en offrant une grande flexibilité de design. Parmi ces designs possibles, l'industrie s'intéresse également à des designs non-conventionnel de composites stratifiés, comme la conception de panneau possédant des angles de fibres variables ou Variable Stiffness Panels (VSP). Il offre ainsi des propriétés mécaniques optimisées pour le cas de chargement auquel la structure sera soumise. Néanmoins des questions demeurent sur le comportement local des microstructures

induites par le design de ces VSP puisque la fabrication de ces panneaux engendre des discontinuités inhérentes au procédé AFP. Ces discontinuités sont la conséquence d'absence de bande (dit *gaps*) dans certaines zones, ou de chevauchements de bandes (dits *overlaps*) dans d'autres (Fig. 1). De plus, des erreurs de fabrication, dues à la précision de la machine ou à des tolérances géométriques de fibres, peuvent également générer des singularités au sein du pli. Ces dernières sont difficiles à décrire en raison de leurs incertitudes intrinsèques. Ainsi dans ce travail, nous nous focaliserons dans un premier temps sur les singularités issues de la conception puisqu'une description géométrique-analytique est possible et permet de prévoir *a priori* la localisation et la taille de ces discontinuités dans les plis. Toutefois, leurs impacts sur les propriétés mécaniques de la structure restent peu documentés dans la littérature et fait l'objet de cette étude.

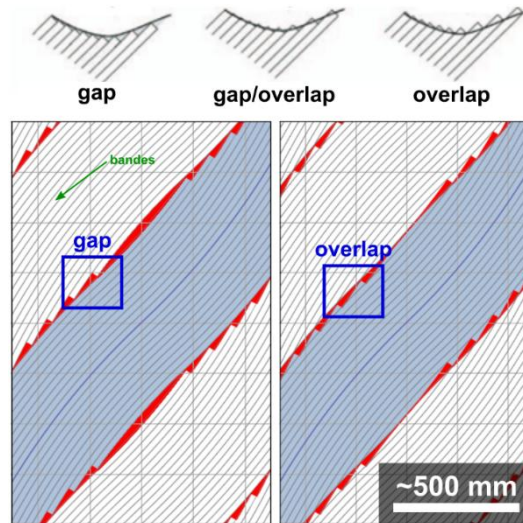


Fig. 1. Singularités induites par le procédé de placement automatisé de fibres. Adapté de [1,4]

Blom *et al.* [1] constatent que l'amorçage des dommages se manifeste principalement dans les zones autour des *gaps*. La prévision de ces phénomènes d'endommagement par un modèle éléments finis (EF) nécessite un maillage intégrant la géométrie de ces singularités. Dès les années 90, Gurdal et Olmedo [2] ont réalisé une description analytique de la cinématique et la réponse mécanique des VSP en intégrant la théorie classique des composites stratifiés aux équations d'équilibre et de compatibilité. Cependant, ce type d'étude ne prenait pas en compte les singularités induites par le procédé AFP et ne permettait pas de remonter aux champs de contraintes locales au niveau des singularités. Blom *et al.* [1] ont étudié, à l'aide d'un modèle EF et d'un modèle analytique, l'influence de la géométrie des VSP et des singularités du type *gaps* sur leur rigidité locale et sur leur résistance mécanique. Fayazbakhsh *et al.* [3] ont développé une méthode calculant précisément le pourcentage d'aire des singularités indépendamment du nombre d'éléments d'un maillage. A l'aide de cette méthode, les propriétés mécaniques locales du stratifié sont définies tout comme l'épaisseur de ses plis afin de représenter l'effet des singularités. Malgré les travaux de recherches sur les VSP, il n'existe actuellement pas de stratégie de modélisation assurant une estimation précise des champs de contraintes locales lors du dimensionnement de structures AFP.

Dans ce travail, une approche pour la génération de maillage de structures AFP incluant des singularités est proposée et repose sur la description géométrique-analytique de ces panneaux pour définir une géométrie *a priori*. La validation de cette méthode est assurée par la confrontation des résultats mécaniques obtenus par ce modèle avec ceux obtenus d'un modèle de référence. Dans ce dernier, le maillage se base sur une segmentation d'images micro-tomographiques d'éprouvettes extraites d'un panneau fabriqué, et donc fidèle à la microstructure réelle. Dans ce travail, nous nous focaliserons tout d'abord sur la fidélité géométrique obtenue par la première méthode en la comparant avec le modèle de référence.

2. Méthodologie

Le chemin de dépose des bandes sur une structures VSP peut être représenté analytiquement. Blom *et al.* [1] ont réalisé la mise en équation des panneaux VSP à courbure constante avec le paramétrage de la Figure 2. La ligne de référence est alors fonction de son angle par rapport à la verticale, noté φ , tel que :

$$\sin \varphi = \sin T_0 + \frac{1}{\rho} \cdot |x| \quad (1)$$

Au DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), un code python a été développée qui permet de fournir un nuage de point de la position des bandes et des singularités dans chaque plan de dépose telles que celles présentées en Figure 1 pour des VSP à courbure constante [4].

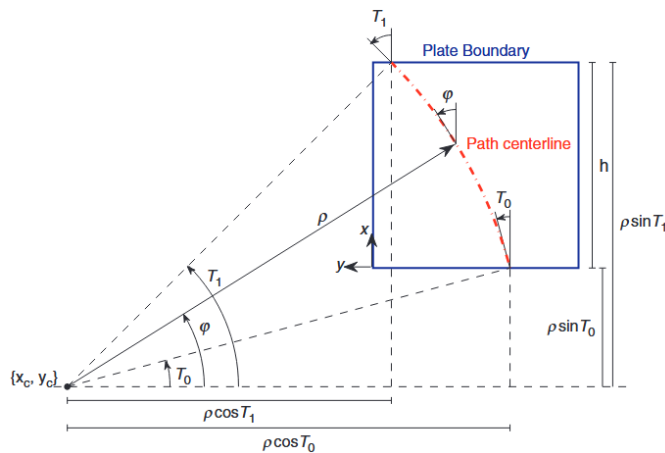


Fig. 2. Paramétrage des VSP [1]

Afin de générer un maillage conforme pour des structures fabriquées par AFP, deux méthodes sont proposées dans ce travail. La méthode A du Tableau 1, s'appuie uniquement sur les descriptions géométriques analytiques fournis par l'outil développé au DLR et permet d'avoir un maillage *a priori* de la structure n'incluant pas l'influence du cycle de consolidation mais uniquement les trajectoires de dépose du robot.

	Géométrie	Avantages	Inconvénients
Méthode A	Modèle Géométrique-Analytique	<ul style="list-style-type: none"> - Applicable aux structures - Pas besoin de la fabrication préalable 	<ul style="list-style-type: none"> - Géométrie du maillage idéalisée
Méthode B	Segmentation et labélisation de μ CT	<ul style="list-style-type: none"> - Basée sur des observations expérimentales 	<ul style="list-style-type: none"> - Non applicable aux structures

Tab. 1. Comparaison de méthodes étudiées.

Cette méthode, dont le principe est présenté sur la Figure 3, consiste dans un premier temps à projeter toutes les bandes sur une grille. De cette projection, une carte d'élévation est déduite à partir du nombre de bandes passant au travers de chaque élément de la grille. La carte d'élévation et l'ordre de dépose de bandes génèrent un premier maillage structuré dans lequel un élément de transition est ajouté entre chaque différence d'élévation. Ce maillage structuré est dans les faits comparable à la représentation voxelisée du domaine. Afin de limiter les phénomènes de contraintes artificielles induits par cette description géométrique, une technique de lissage,

s'appuyant sur l'algorithme de Catmull-Clark, est appliquée afin de supprimer les voxels et d'accorder la géométrie du maillage à la géométrie originale du modèle.

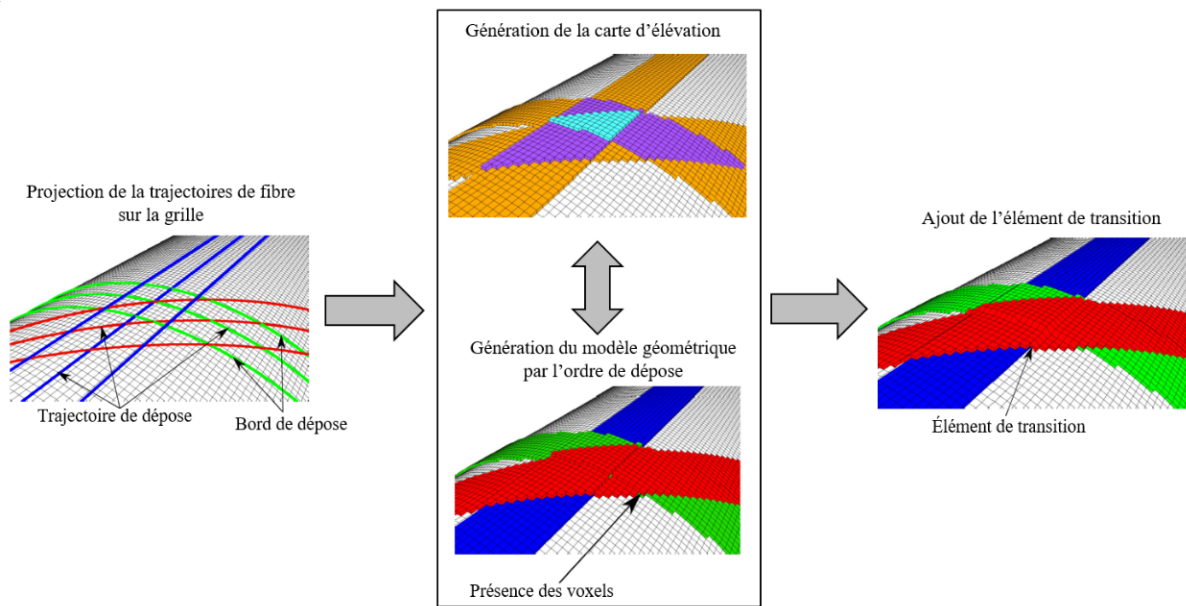


Fig. 3. Schéma de la méthode A de maillage. Adapté de [5]

La méthode B du Tableau 1, est quant à elle basée sur des observations expérimentales volumiques et génère un maillage fidèle à la géométrie réelle de la structure obtenue après consolidation et de sa microstructure dans les zones singulières [6]. Pour cela, elle s'appuie sur une segmentation des images de μ CT (micro-tomographe RX) et de la labélisation de chaque pli du composite. De cette représentation voxélisée du domaine, une approche similaire à celle mise en œuvre pour la méthode A permet d'obtenir après un remaillage et l'application d'un filtre Catmull-Clark, un maillage conforme de la géométrie de la microstructure (Fig. 4).

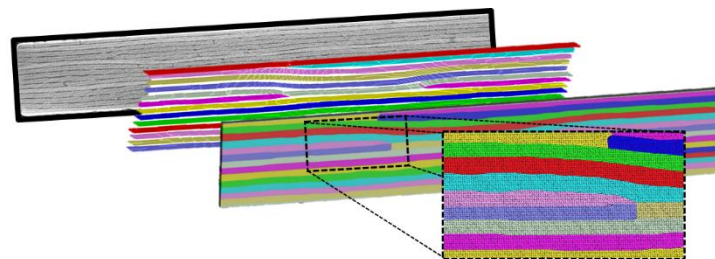


Fig. 4. Génération d'un maillage à partir de la segmentation d'images tomographiques [6]

Les inconvénients de cette méthode sont multiples. La réalisation de tomographies avec une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de micron pour l'observation de la microstructure est impérative pour l'application de cette méthode et rend cette approche (i) difficilement industrialisable pour un bureau d'étude, et (ii) non applicable sur des structures de grandes dimensions contrairement à la méthode A. Ainsi, la méthode B n'est ici mise en place que comme méthode de validation de la méthode A notamment pour ce qui concerne la description de la microstructure.

3. Perspectives

L'ambition de ce travail étant de contribuer au développement d'outils pour la conception des structures composites obtenues par AFP, la validation géométrique du modèle à mettre en œuvre pour représenter ces singularités AFP n'est qu'une première étape. En effet, l'objectif principal de ce travail est de mettre en place des méthodes d'estimation des effets de ces singularités sur les propriétés mécaniques apparentes de ces structures. Pour cela, la mise en place d'un jumeau numérique d'essais réalisés sur des VSP et s'appuyant sur des lois de comportement avancées, associées à des conditions aux limites mesurées par mesure de champ, devraient permettre d'évaluer l'influence de la géométrie sur le comportement mécanique du modèle et ainsi déterminer le degré de fidélité nécessaire pour un bon accord entre le comportement des modèles et celui observé expérimentalement sur ces cas tests.

References

- [1] A. W. Blom, C. S. Lopes, P. J. Kromwijk, Z. Gurdal, et P. P. Camanho, « A Theoretical Model to Study the Influence of Tow-drop Areas on the Stiffness and Strength of Variable-stiffness Laminates », *Journal of Composite Materials*, vol. 43, n° 5, p. 403- 425, mars 2009, doi: 10.1177/0021998308097675.
- [2] Z. Gurdal et R. Olmedo, « In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations - Variable stiffness concept », *AIAA Journal*, vol. 31, n° 4, p. 751- 758, avr. 1993, doi: 10.2514/3.11613.
- [3] K. Fayazbakhsh, M. A. Nik, D. Pasini, et L. Lessard, « Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by Automated Fiber Placement », *Composite Structures*, vol. 97, p. 245- 251, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.031>.
- [4] L. Raps, « In-situ Automated Fiber Placement Manufacturing of Complex Geometries », *PhD Thesis, DLR, 2025*.
- [5] G. Landron, A. Rassineux, C. Fagiano, M. Hirsekorn, C. Bovet, *et al.*. Modélisation à l'échelle de la bande d'un réservoir à hydrogène fabriqué par enroulement filamentaire. *16ème Colloque National en Calcul de Structures (CSMA 2024)*, CNRS; CSMA; ENS Paris-Saclay
- [6] L. Marquet, S. Garcia Rodriguez, C. Huchette, C. Fagiano, J. M. García, *et al.*. Influence de la géométrie des singularités AFP sur l'endommagement et la tenue mécanique. *JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023*, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023,