

Modélisation de l'effet des défauts d'ondulation hors-plan sur l'endommagement et la rupture des stratifiés thermodurcissables

Modeling the effect of out-of-plane waviness defects on damage and failure of thermoset laminates

Alexy Tailleur¹, Christian Fagiano¹, Anton Koenig^{1,2}, Martin Hirsekorn¹, Frederic Laurin¹, Myriam Kaminski¹ et Martin Desailoud²

1 : DMAS, ONERA, Université Paris Saclay
92320, Châtillon, France

e-mail : alexy.tailleur@onera.fr, christian.fagiano@onera.fr, anton.koenig@onera.fr, martin.hirsekorn@onera.fr, frederic.laurin@onera.fr et myriam.kaminski@onera.fr

2 : Airbus Operation SAS
316 route de Bayonne, F-31060 TOULOUSE cedex 09
e-mail : martin.desailoud@airbus.com

Résumé

Cette étude s'intéresse à la génération de jumeaux numériques pour étudier le comportement d'éprouvettes thermodurcissables lisses et trouées avec défauts d'ondulation hors-plan sollicitées en traction ainsi qu'en compression. La création des modèles éléments finis se base sur une paramétrisation des défauts d'ondulation à partir d'images sur tranche des éprouvettes. L'utilisation d'une modulation gaussienne de l'amplitude dans les trois directions de l'espace et la variation de la longueur d'onde dans l'épaisseur du stratifié permettent de décrire une plus grande variété de morphologies de défauts. L'ondulation est ensuite explicitement introduite dans le maillage pli à pli représentant fidèlement l'image originale, et le comportement des plis est modélisé en utilisant le modèle d'endommagement et rupture progressive (OPFM) de l'ONERA. Les simulations réalisées dans le logiciel commercial Abaqus/Standard sont finalement comparées avec une base de données industrielles.

Abstract

This study focuses on the creation of digital twins to investigate the behavior of unnotched and notched thermoset specimens with out-of-plane waviness defects subjected to tensile and compressive loads. The generation of the finite element models is based on a parametrization of the waviness defects from cross-sectional images of the specimens. Using a Gaussian modulation of amplitude in all three spatial directions and varying the wavelength through the thickness of the laminate allows for a broader variety of defect morphologies to be described. The waviness is then explicitly introduced into the ply-by-ply mesh, accurately representing the original image, and the behavior of the plies is modeled using the progressive damage and failure model (OPFM) developed by ONERA. Finally, simulations carried out in the commercial software Abaqus/Standard are compared with an industrial database.

Mots Clés : Composite à matrice thermodurcissable, Jumeau numérique, Modèle d'endommagement, Ondulation hors-plan, Plaque trouée

Keywords : Thermoset matrix composite, Digital twin, Damage model, Out-of-plane waviness, Open hole coupon

1. Introduction

Les défauts dans les matériaux composites sont généralement classés en deux catégories : les défauts de fabrication et les défauts apparaissant en service. Bien que les processus de fabrication évoluent, la présence de défauts initiaux ne peut être entièrement évitée. De plus, la réalisation de pièces complexes de grandes dimensions rendue possible par l'automatisation des méthodes de drapage a tendance à induire l'apparition de défauts lors de la fabrication : porosité, poches de résine, ondulation des fibres, lacune/chevauchement, ... [1, 2]. Il est alors indispensable de comprendre les effets des défauts,

notamment sur l'endommagement et la rupture. Parmi les différents défauts de fabrication, les défauts d'ondulation hors-plan sont connus pour leurs effets sur les performances mécaniques des stratifiés à matrice therm durcissable, en particulier sur la tenue en traction et en compression [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Dans le cas des plaques trouées, [9] proposent une étude expérimentale de la réponse mécanique en compression et du scénario d'endommagement d'éprouvettes intentionnellement ondulées avec des séquences d'empilement unidirectionnelle et multidirectionnelle. Les mêmes auteurs [10] s'intéressent au comportement en traction et en compression. Ils couplent l'aspect expérimental avec des générations de modèles numériques utilisant la théorie mécanique de l'endommagement progressif. Les travaux de recherche s'accordent sur une réduction significative des performances mécaniques de la structure en traction ainsi qu'en compression. Les modules d'Young longitudinaux en traction E_x^t et en compression E_x^c sont impactés, tout comme les contraintes à rupture.

Les travaux présentés ici concernent la caractérisation et la modélisation des effets des défauts d'ondulation hors-plan sur les performances mécaniques d'un composite stratifié de plis unidirectionnels de fibres continues de carbone et à matrice therm durcissable. Il s'agit notamment d'évaluer numériquement les effets des ondulations hors-plan sur le comportement en compression et en traction de plaques lisses ainsi que sur des plaques trouées. La base de données d'essais utilisée pour la validation de simulations numériques est fournie par AIRBUS Operations et se base sur des ondulations observées lors d'essais de développement de process.

2. Caractérisation de la géométrie des défauts d'ondulation hors-plan

Afin de pouvoir relier les effets des défauts qui pourront être observés expérimentalement à leurs caractéristiques géométriques, les paramètres géométriques des ondulations hors-plan sont identifiés à partir de micrographies ou tomographies X des éprouvettes. Dans le but de pouvoir, à terme, générer des analyses paramétriques des configurations des défauts, la description de la forme des ondulations est effectuée sur la base d'un modèle géométrique de complexité maîtrisée avec un nombre raisonnable de paramètres. La plupart des auteurs représentent les défauts d'ondulation hors-plan grâce à des fonctions cosinus [11, 12, 13] ou sinus [3]. Par exemple, [14] ont proposé une fonction gaussienne pour caractériser les ondulations de leur éprouvette présentant une surface plate et une surface concave. D'autres [15, 16] décrivent les ondulations en considérant une modulation gaussienne de l'amplitude dans les trois directions de l'espace (x,y,z) (Fig. 1). Les ondulations d'intérêt de cette étude présentant une forme sinusoïdale qui diminue dans la longueur de l'éprouvette, la méthode de caractérisation du profil des ondulations hors-plan présentée dans cette étude est basée sur les précédents travaux de [16] et est décrite par l'(Eq. 1).

$$z^{ondulation}(x, y, z) = A \cos \left(2\pi \frac{x - (x_0 - \Delta)}{\lambda(z)} \right) \exp \left(-0.5 \frac{(x - x_0)^2}{(L_x/6)^2} \right) \cdot \exp \left(-0.5 \frac{(y - y_0)^2}{(L_y/6)^2} \right) \cdot \exp \left(-0.5 \frac{(z - z_0)^2}{(L_z/6)^2} \right) + z \quad (\text{Eq. 1})$$

La formulation fait intervenir 9 paramètres géométriques : (x_0, y_0, z_0) est la position 3D du défaut, (L_x, L_y, L_z) sont les étendues de l'ondulation dans les trois directions de l'éprouvette, A est l'amplitude, λ la longueur d'onde, Δ le déphasage avec le centre de la gaussienne x_0 .

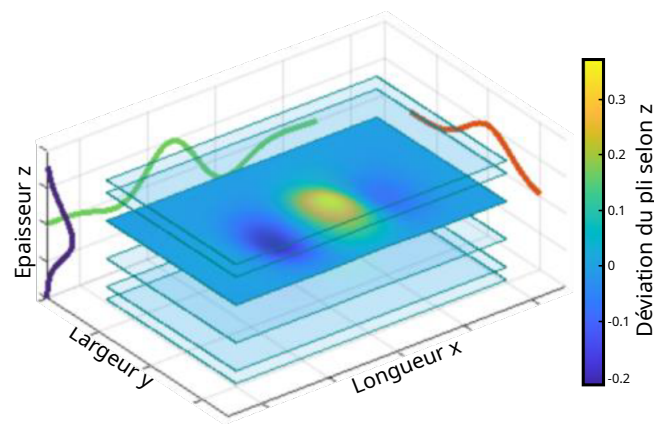


FIG. 1. – Illustration des modulations gaussiennes dans les trois directions [16]

Nous disposons pour ces travaux d'un spectre varié de défauts d'ondulation. Leur morphologie est différente de celles des défauts traités dans [16] qui présentaient surtout des ondulations centrées dans l'épaisseur du stratifié et n'ayant pas d'impact sur la surface supérieure et inférieure des éprouvettes. La (Fig. 2) illustre, par exemple, des configurations d'éprouvettes avec bosse, double ondulation ou encore ondulation proche de la surface. La formulation originale a donc été modifiée afin d'améliorer la représentativité des ondulations hors-plan. Notamment, les configurations présentant une évolution de la longueur d'onde λ dans l'épaisseur peuvent désormais être décrites par le modèle paramétrique au moyen de l'(Eq. 2). Une évolution selon une loi de puissance a été proposée, ajoutant alors deux paramètres supplémentaires au modèle.

$$\lambda(z) = a z^p + \lambda_0 \quad (\text{Eq. 2})$$

Comme illustré sur la (Fig. 2), le processus de paramétrisation proposé parvient à représenter les différentes morphologies de défauts disponibles et la robustesse de l'approche formulée dans ces travaux est ainsi démontrée.

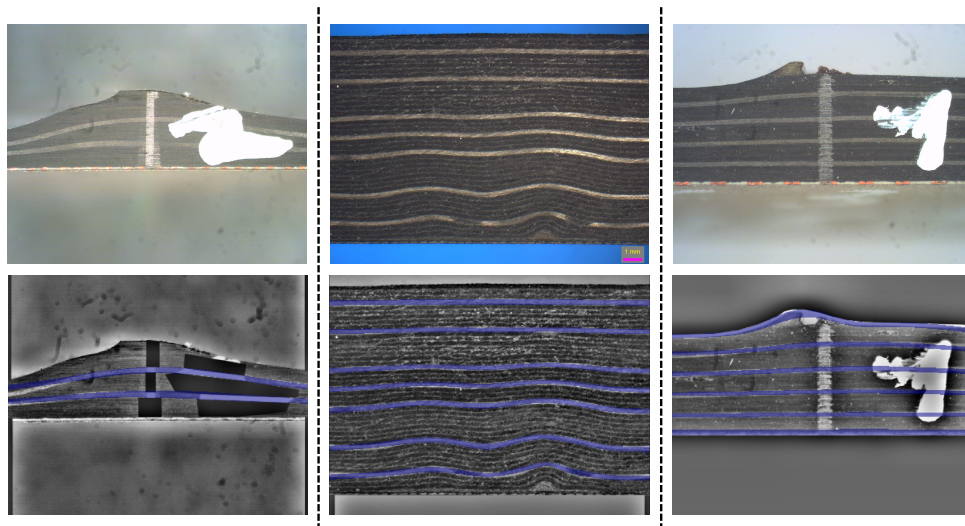


FIG. 2. – Photographie d'éprouvettes présentant des ondulations dans l'épaisseur étudiées dans ces travaux et résultats du processus de paramétrisation pour différentes morphologies de défauts d'ondulation hors-plan

3. Modélisation par éléments finis

Le processus de création du maillage de l'éprouvette avec ondulations hors-plan est décrit sur la (Fig. 3). La philosophie est commune pour les plaques lisses et les plaques trouées. Dans un premier

temps, un maillage à l'échelle du pli de l'éprouvette saine est réalisé de manière automatisée (Fig. 3a). Ce maillage est constitué d'éléments 3D solides linéaires représentant les plis. Pour limiter les coûts de calcul, le maillage est raffiné au niveau du défaut d'ondulation et utilise des éléments grossiers dans le reste du modèle. De plus, le nombre d'éléments dans l'épaisseur des plis a été fixé à trois dans la zone d'intérêt et à un dans le reste du modèle. Des éléments cohésifs d'une épaisseur égale à 0.01mm sont placés entre des plis d'orientations différentes pour modéliser le délaminage. La paramétrisation des défauts d'ondulation hors-plan se base sur la position des plis orientés à 0°. Des images sur tranches des éprouvettes présentant des ondulations sont récupérées (Fig. 3b) puis post-traitées (amélioration de la qualité par outils de traitement d'images). Ensuite, un algorithme d'optimisation de Simulated Annealing [17] est utilisé conjointement avec une méthode de Structural Similarity Index Measurement (SSIM) [18] afin d'obtenir les paramètres qui permettent le mieux de décrire la position des plis orientés à 0° en partant d'une image fictive sans ondulation (Fig. 3c, Fig. 3d et Fig. 3e). Finalement, les nœuds du maillage sain sont translatés selon l'axe z de sorte à ce que le maillage suive les chemins des plis à 0° puis la nouvelle orientation locale du matériau est mise à jour (Fig. 3f).

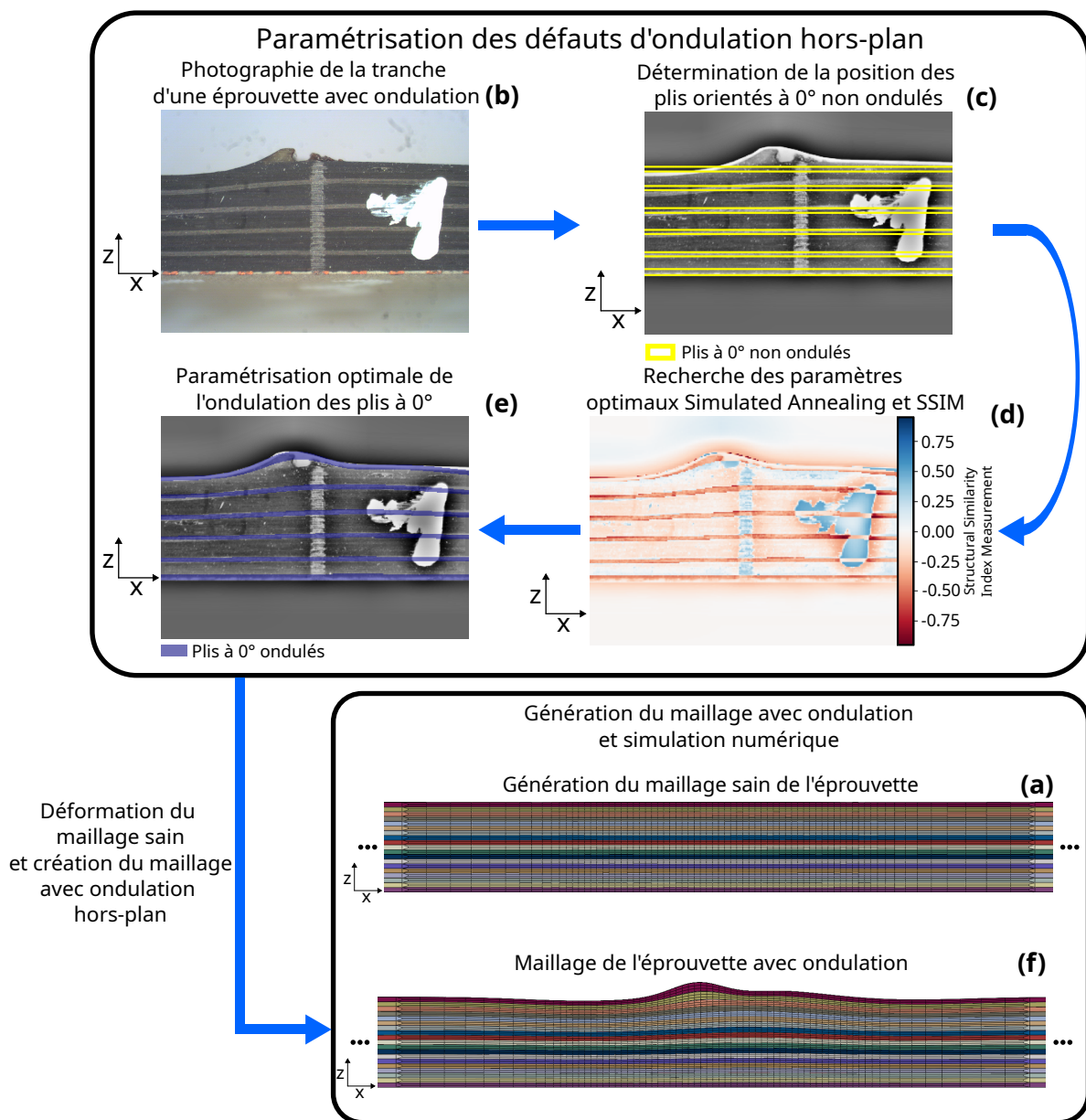


Fig. 3. – Méthode automatisée de création du maillage des éprouvettes avec ondulations hors-plan

Enfin, des simulations sont effectuées à l'aide du solveur implicite du logiciel commercial Abaqus. Le modèle d'endommagement et rupture progressive de l'ONERA (OPFM) est utilisé pour prévoir l'effet des défauts sur l'initiation et la propagation de l'endommagement ainsi que sur la rupture du coupon [19]. Le comportement constitutif est défini à l'échelle du pli. Le modèle prend en compte diverses non-linéarités matériaux telles que l'élasticité non linéaire dans le sens fibre, le comportement viscoélastique du pli, la dégradation due à l'endommagement de la matrice et la dégradation violente des propriétés mécaniques due à la rupture des fibres (traction et compression). Dans cette étude, le modèle est implémenté à travers une UMAT. Les résultats obtenus avec le modèle numérique seront comparés aux résultats expérimentaux des campagnes d'essais pour des sollicitations de traction et compression sur plaque lisse et trouée réalisées par AIRBUS Operations.

Conclusion

Ces travaux s'intéressent à la génération de jumeaux numériques pour la prise en compte de défauts d'ondulation hors-plan dans les stratifiés à matrice therm durcissable. Dans la formulation proposée, l'ondulation locale est décrite au moyen d'un modèle paramétrique comme une onde sinusoïdale modulée par trois gaussiennes avec une longueur d'onde variant en fonction de la position dans l'épaisseur du stratifié. La détermination des paramètres optimaux est réalisée par un post-traitement des images sur tranches des éprouvettes couplé à des algorithmes d'optimisation (Simulated Annealing et Structural Similarity Index Measurement). La robustesse de l'approche formulée dans ces travaux a pu être démontrée en la testant sur des configurations variées de défauts d'ondulation hors-plan. Des simulations de traction et compression faisant intervenir des éléments cohésifs et le modèle d'endommagement OPFM sont réalisées sur les jumeaux numériques des éprouvettes lisses et trouées avec ondulations. L'analyse comparative avec la base de données industrielle révèle que les modèles par éléments finis développés sont efficaces pour simuler précisément l'impact des ondulations hors-plan sur l'endommagement.

Références

- [1] K. Potter, B. Khan, M. Wisnom, T. Bell, J. Stevens « Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 39 n° 9, pp. 1343–1354, 2008.
- [2] K. Potter « Manufacturing defects as a cause of failure in polymer matrix composites », in : *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites*, Elsevier, ISBN 978-1-84569-750-1, , pp. 26–52, 2012.
- [3] H. Hsiao, I. Daniel « Effect of fiber waviness on stiffness and strength reduction of unidirectional composites under compressive loading », *Composites Science and Technology* Vol. 56 n° 5, pp. 581–593, 1996, ISSN 02663538.
- [4] H.-J. Chun, J.-Y. Shin, I. M. Daniel « Effects of material and geometric nonlinearities on the tensile and compressive behavior of composite materials with fiber waviness », *Composites Science and Technology* Vol. 61 n° 1, pp. 125–134, 2001, ISSN 02663538.
- [5] P. Davidson, A. Waas, C. S. Yerramalli, K. Chandraseker, W. Faidi « Effect of Fiber Waviness on the Compressive Strength of Unidirectional Carbon Composites », *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, ISBN 978-1-60086-937-2, , pp. , 2012.
- [6] C. Wu, Y. Gu, L. Luo, P. Xu, S. Wang, M. Li, Z. Zhang « Influences of in-plane and out-of-plane fiber waviness on mechanical properties of carbon fiber composite laminate », *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 37 n° 13, pp. 877–891, 2018, ISSN 0731-6844, 1530-7964.
- [7] P. Kulkarni, K. D. Mali, S. Singh « An overview of the formation of fibre waviness and its effect on the mechanical performance of fibre reinforced polymer composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 137, pp. 106013, 2020, ISSN 1359835X.
- [8] M. Alves, C. Cimini Junior, S. Ha « Fiber waviness and its effect on the mechanical performance of fiber reinforced polymer composites : An enhanced review », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 149, pp. 106526, 2021, ISSN 1359835X.
- [9] R. F. Elhajjar, S. S. Shams « Compression testing of continuous fiber reinforced polymer composites with out-of-plane fiber waviness and circular notches », *Polymer Testing* Vol. 35, pp. 45–55, 2014, ISSN 01429418.
- [10] S. S. Shams, R. F. Elhajjar « Investigation into the effects of fiber waviness in standard notched composite specimens », *CEAS Aeronautical Journal* Vol. 6 n° 4, pp. 541–555, 2015, ISSN 1869-5582, 1869-5590.

- [11] T. A. Bogetti, J. W. Gillespie, M. A. Lamontia « Influence of Ply Waviness on the Stiffness and Strength Reduction on Composite Laminates », *Journal of Thermoplastic Composite Materials* Vol. 5 n° 4, pp. 344–369, 1992, ISSN 0892-7057, 1530-7980.
- [12] W. Chan, J. Wang « Influence of Fiber Waviness on the Structural Response of Composite Laminates », *Journal of Thermoplastic Composite Materials* Vol. 7 n° 3, pp. 243–260, 1994, ISSN 0892-7057, 1530-7980.
- [13] M. R. Garnich, G. Karami « Localized Fiber Waviness and Implications for Failure in Unidirectional Composites », *Journal of Composite Materials* Vol. 39 n° 14, pp. 1225–1245, 2005, ISSN 0021-9983, 1530-793X.
- [14] R. F. Elhajar, D. R. Petersen « Gaussian function characterization of unnotched tension behavior in a carbon/epoxy composite containing localized fiber waviness », *Composite Structures* Vol. 93 n° 9, pp. 2400–2408, 2011, ISSN 02638223.
- [15] N. Xie, R. A. Smith, S. Mukhopadhyay, S. R. Hallett « A numerical study on the influence of composite wrinkle defect geometry on compressive strength », *Materials & Design* Vol. 140, pp. 7–20, 2018, ISSN 02641275.
- [16] C. Fougerouse « Understanding and modelling of the effects of out-of-plane waviness defects on the mechanical performance of a thermoplastic matrix laminate », Theses, Université Paris-Saclay, 2023.
- [17] Scipy « Dual annealing », 2024.
- [18] Scikit-image « Structural similarity index », 2024.
- [19] F. Laurin, N. Carrère, J.-F. Maire « A multiscale progressive failure approach for composite laminates based on thermodynamical viscoelastic and damage models », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 38 n° 1, pp. 198–209, 2007, ISSN 1359835X.