



**HAL**  
open science

## Etude de l'influence d'ondulations hors-plan sur la rupture d'une cornière sous sollicitation de flexion quatre points

Pierre Journoud, Bruno Castanié, Christophe Bouvet, Léon Ratsifandrihana

### ► To cite this version:

Pierre Journoud, Bruno Castanié, Christophe Bouvet, Léon Ratsifandrihana. Etude de l'influence d'ondulations hors-plan sur la rupture d'une cornière sous sollicitation de flexion quatre points. JNC 22 (22es Journées Nationales sur les Composites ), Jun 2021, Besançon ( Conférence virtuelle ), France. hal-03286691

**HAL Id: hal-03286691**

**<https://hal.science/hal-03286691>**

Submitted on 15 Jul 2021

**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.

## Etude de l'influence d'ondulations hors-plan sur la rupture d'une cornière sous sollicitation de flexion quatre points

### *Effect of wrinkles on the residual strength of L-shape specimen under four point bending test*

Pierre Journoud<sup>1,2</sup>, Bruno Castanié<sup>1</sup>, Christophe Bouvet<sup>1</sup>, Léon Ratsifandrihana<sup>2</sup>

1 : Institut Clément Ader (UMR CNRS 5312)  
Université de Toulouse, INSA – ISAE-SUPAERO – UPS – IMT Mines Albi  
3 rue Caroline Aigle, Toulouse, France

e-mail : [pierre.journoud@insa-toulouse.fr](mailto:pierre.journoud@insa-toulouse.fr), [bruno.castanie@insa-toulouse.fr](mailto:bruno.castanie@insa-toulouse.fr), [christophe.bouvet@isae.fr](mailto:christophe.bouvet@isae.fr)

2 : SEGULA AEROSPACE & DEFENCE,  
SEGULA TECHNOLOGIES  
Immeuble EQUINOX, Bat-1, 24 Boulevard Déodat de Séverac, 31770 Colomiers, France  
e-mail : [pierre.journoud@segula.fr](mailto:pierre.journoud@segula.fr), [leon.ratsifandrihana@segula.fr](mailto:leon.ratsifandrihana@segula.fr)

Les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans l'industrie et leurs utilisations ne se limitent plus uniquement aux pièces présentant une géométrie simple. De nombreuses structures avec une géométrie complexe, tel que les cornières, sont réalisées en composite. Leur géométrie complexe conduit à des problèmes de formation d'ondulations de fibre au niveau du rayon de courbure (Figure 1). Les causes de formation de ces ondulations ont largement été étudiées dans la littérature [1,2].

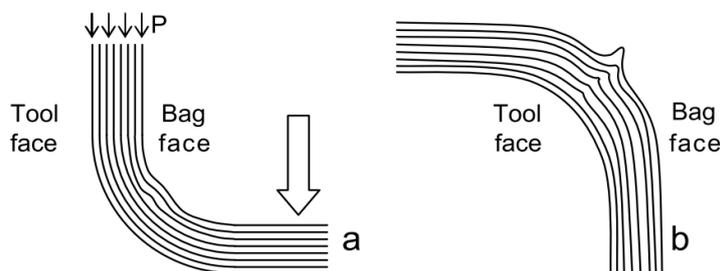


Figure 1: Formation d'ondulations au niveau du rayon de courbure [3]

La compréhension des mécanismes de formation d'ondulation est un levier permettant d'optimiser le procédé de mise en forme afin de limiter au maximum la formation de celles-ci. Cependant, cela ne permet pas s'assurer qu'il n'y aura pas d'ondulation. Les constructeurs aéronautiques doivent alors traiter de nombreuses non-conformités de pièces présentant des ondulations. Tout l'intérêt est de réussir à quantifier l'impact de ces ondulations sur la résistance à rupture des structures composites afin de conclure quant à leur viabilité et permettre une meilleure gestion des non-conformités.

On distingue dans la littérature deux types d'ondulations ; les ondulations comprises dans le plan du pli, appelées « waviness », et les ondulations hors-plan, appelées « wrinkle ». L'impact de la présence d'ondulations (waviness et wrinkle) sur la tenue mécanique de structures composites constitue ces dernières années un sujet majeur de recherche. Il a notamment été démontré que la présence d'ondulations hors-plan dans des structures planes sollicitées en compression causait une baisse de l'effort à rupture de 10 à 30% pour des ondulations ayant un angle de mésalignement compris entre 5° et 12° [4,5]. De nombreuses

études portent sur l'influence des défauts d'ondulation hors-plan sur la tenue mécanique de structures composites, cependant, à notre connaissance la quasi-totalité des travaux portent sur le cas de pièces planes et non de pièces à géométrie complexe tel que les cornières [6].

Ce travail porte sur l'étude de l'influence des défauts d'ondulations hors-plan, présents dans le rayon de courbure de la cornière, sur la tenue mécanique sous sollicitation de dépliage (Figure 1 (a)). Le Discrete Ply Model (DPM), développé à l'Institut Clément Ader depuis une décennie [7,8], et qui a déjà permis de procurer de bonnes concordances entre simulations numériques et résultats expérimentaux dans le cas d'essais de flexion quatre points sans ondulations [9], sera utilisé pour réaliser les simulations de flexion quatre points avec la prise en compte des ondulations.

Il a fallu dans un premier temps mettre au point un procédé de mise en forme permettant de réaliser des cornières avec des ondulations dans la zone du rayon de cornière. Des moules de forme concave ont été utilisés et deux stratégies de stratifications ont permis de réaliser des cornières avec différents niveaux d'ondulation de fibre dont un exemple est présenté Figure 2 (b).

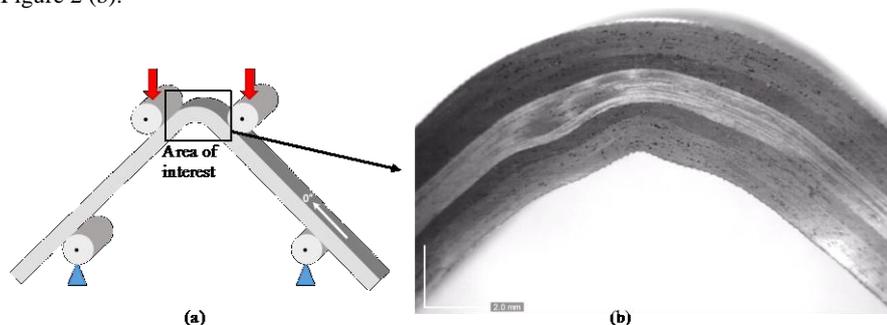


Figure 2: (a) schéma de l'essai de flexion quatre points et (b) faciès d'une cornière présentant des ondulations hors-plan d'un angle maxi de mésalignement d'environ 27°

La première stratégie consiste à déposer classiquement les plis un à un dans le moule concave en venant faire le vide tous les deux plis pour une durée de 10 minutes afin d'assurer une bonne compaction. La seconde consiste quant à elle à réaliser dans un premier temps la stratification à plat sur une table puis à venir l'introduire dans le moule concave créant ainsi des ondulations importantes dans la partie du rayon de courbure.

La combinaison de ces deux stratégies permet de réaliser des cornières avec des ondulations plus ou moins importantes. L'angle des ondulations créées est directement lié au nombre de pli drapé à plat avant d'être déposé dans le moule concave.

Il est à noter que lorsque trop de plis sont drapés à plat avant d'être introduits dans le moule les ondulations alors créées sont trop importantes et des porosités importantes apparaissent dues à l'ondulation de ces plis. Néanmoins, lorsque le nombre de pli drapé à plat reste relativement faible devant le nombre de pli déposé directement dans le moule, les ondulations créées sont significatives et ne semblent pas induire de porosités trop importantes.

Ainsi différents lots de pièces ont été réalisés avec des mésalignements allant de 13° à 64° par rapport à la référence (géométrie courbe sans ondulation).

Des essais de flexion quatre points ont ensuite été menés sur ces éprouvettes. La corrélation d'image 2D et la thermographie infrarouge ont été utilisées afin de suivre l'endommagement des cornières étudiées.

Pour finir, le DPM a été utilisé pour simuler numériquement les essais de flexion quatre points réalisés sur cornière avec présence d'ondulation (Figure 4). Nous avons pour cela dû réaliser un relevé de points correspondant aux interfaces entre chaque pli qui a ensuite été utilisé pour créer un maillage permettant de retranscrire fidèlement les ondulations expérimentales (Figure 4). Les simulations numériques réalisées avec le DPM permettent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

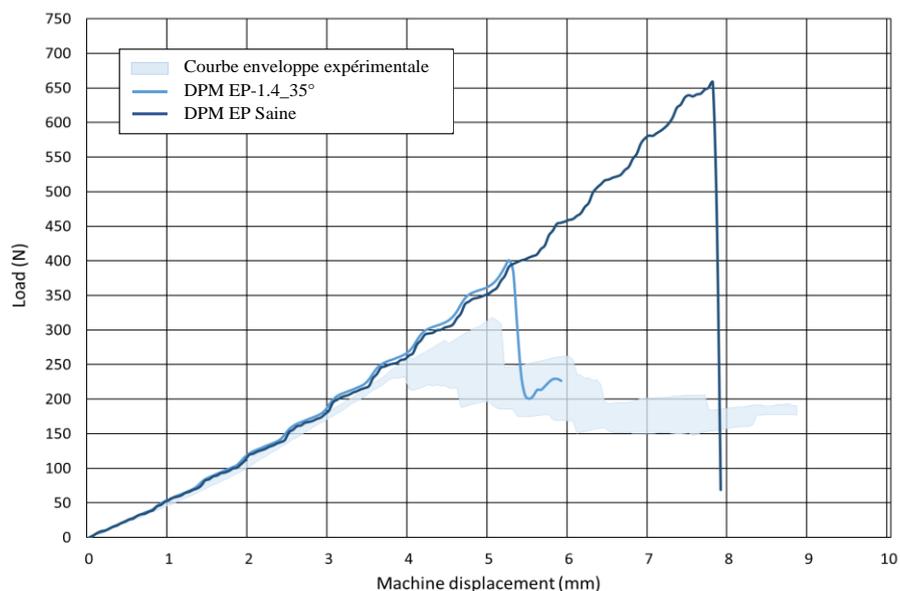


Figure 3: Courbes effort/déplacement machine : de l'éprouvette EP-1.4\_35°, de l'éprouvette saine sans ondulation et courbe enveloppe issue des essais expérimentaux

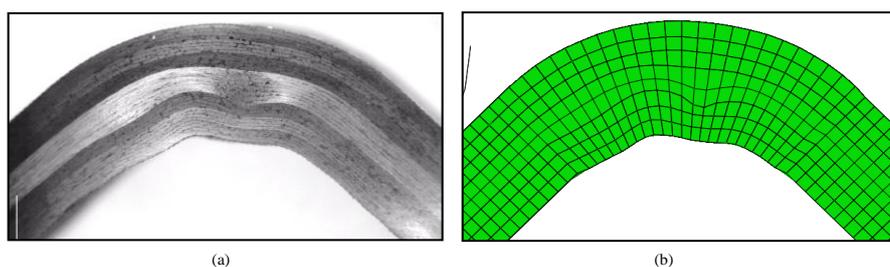


Figure 4: (a) facies de l'éprouvette EP-1.4\_35° et (b) maillage utilisé pour la simulation de l'éprouvette EP-1.4\_35°

**Références**

- [1] Lightfoot JS, Wisnom MR, Potter KD. A new mechanism for the formation of ply wrinkles due to shear between plies. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2013;49:139–47. doi:10.1016/j.compositesa.2013.03.002.
  - [2] Fernlund G, Rahman N, Courdji R, Bresslauer M, Poursartip A, Willden K, et al. Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2002;33:341–51. doi:10.1016/S1359-835X(01)00123-3.
  - [3] Potter KD, Khan B, Wisnom MR, Bell T, Stevens J. Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2008;39:1343–54. doi:10.1016/j.compositesa.2008.04.016.
  - [4] Mukhopadhyay S, Jones MI, Hallett SR. Compressive failure of laminates containing an embedded wrinkle; experimental and numerical study. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015;73:132–42. doi:10.1016/j.compositesa.2015.07.007.
  - [5] Lemanski SL, Sutcliffe MPF. Compressive failure of finite size unidirectional composite laminates with a region of fibre waviness. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2012;43:435–44. doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.007.
  - [6] Hu H, Cao D, Cao Z, Li S. Experimental and numerical investigations of wrinkle effect on failure behavior of curved composite laminates Abstract : *Compos Struct* 2021;113541. doi:10.1016/j.compstruct.2021.113541.
  - [7] Bouvet C, Castanié B, Bizeul M, Barrau JJ. Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements. *Int J Solids Struct* 2009;46:2809–21. doi:10.1016/J.IJSOLSTR.2009.03.010.
  - [8] Serra, J., Bouvet, C., Castanié, B., Petiot, C. Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach. *Compos Struct* 2016;148:127–143. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.062>.
  - [9] Journoud P, Bouvet C, Castanié B, Laurin F, Ratsifandrihana L. Experimental and numerical analysis of unfolding failure of L-shaped CFRP specimens. *Compos Struct* 2020;232:111563. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111563.
-