

Analyse des propriétés géométriques des défauts mésoscopiques de boucles

Analysis of geometrical properties of mesoscopic buckle defects.

Christopher Okechukwu Ndukwe¹, Samir Allaoui¹, Joseph Paux¹, Wajdi Zouari¹, Mustapha Assarar¹

1 : Université de Reims Champagne Ardenne,
ITheMM, UR 7548, Chaire MATUR

EiSINe, 9A Rue Claude Chrétien, 08000 Charleville Mézières

christopher.ndukwe@etudiant.univ-reims.fr; samir.allaoui@univ-reims.fr; joseph.paux@univ-paris13.fr; wajdi.zouari@univ-reims.fr;
mustapha.assarar@univ-reims.fr

Résumé

Cette étude investigate l'évolution des propriétés géométriques des défauts de flambage hors plan de mèches (boucles) qui se produisent lors du préformage de renfort textile. Un banc d'essai spécifique a été conçu et développé. Un protocole a été établi pour générer des défauts de flambage calibrés dans des conditions optimales. Plusieurs échantillons de taffetas ont été déformés pour produire différentes intensités de défauts de boucles. La géométrie des échantillons déformés à l'échelle mésoscopique a été largement caractérisée à l'aide de scan de surface 3D et de la tomographie à rayons X. Les résultats obtenus montrent tout d'abord qu'une augmentation de l'angle de cisaillement des zones latérales entraîne une augmentation de l'amplitude du flambage et une diminution de la section des mèches. Deuxièmement, la forme des mèches évolue différemment de chaque côté en fonction de la face du renfort qui frotte avec l'outillage.

Abstract

This study investigates the geometrical properties evolution of the yarn's out-of-plane buckling defects that occur during fabric preforming. We developed a specific laboratory device and established a protocol to create calibrated buckle defects under optimal conditions. We deformed several glass weave specimens to produce different defect intensities. The geometry of the deformed specimens at the mesoscopic scale was widely and thoroughly characterized using 3D surface scan and X-ray tomography. The obtained results firstly show that an increase in the shear angle of the lateral areas results in an increase in the buckle amplitude and a decrease in the yarn cross-section. Secondly, the yarn shape evolves differently on each side depending on the face of the fabric that is in contact with the tooling.

Mots Clés : Mise en forme, tissus, mèche, défauts, tomographie par rayon X

Keywords: Forming, fabrics, yarns, defects, Xray tomography.

1. Introduction

Ces dernières décennies ont été marquées par un fort engouement de l'intégration de composites hautes performances, renforcés par des fibres longues, pour des pièces structurales dans différents secteurs industriels. Les procédés de mise en forme LCM, sont parmi les plus pressentis pour répondre aux préoccupations d'industrialisation de ces pièces structurales car ils offrent un bon compromis en termes de reproductibilité, cadences et prix de reviens des pièces finales. Cependant, les performances et la maîtrise de ces procédés, et spécifiquement de la première étape de drapage, sont loin d'être atteints, ce qui freine le développement des composites à ce jour.

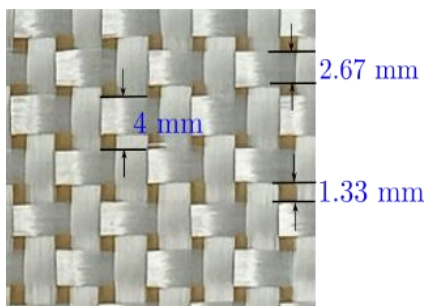
En effet, l'étape de préformage, menée sur un matériau très hétérogène, est une étape délicate mettant en jeu des mécanismes et déformations complexes, dont certains sont encore non maîtrisés, et pouvant mener à des défauts [1]. Ces défauts, pouvant être classés en fonction de leur échelle d'apparition (micro, méso et macro) peuvent être préjudiciables à l'étape d'injection mais aussi aux performances en service du composite final [2-4] d'où la nécessité de les étudier.

Le défaut le plus courant (pli) se produit au niveau macroscopique et a été largement étudié et documenté dans la littérature aussi bien concernant les mécanismes mis en jeu que sur son effet sur le comportement mécanique du composite [2, 5]. A l'échelle mésoscopique, on distingue différents défauts (glissement, ondulation dans le plan, rupture, boucles ...) [1,6]. Le défaut de boucles est un défaut qui se manifeste à la suite du flambage hors plan des mèches conduisant à des surépaisseurs locales importantes. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de ce défaut au cours de cette dernière décennie. Ces études ont permis de mettre en évidence la concomitance des boucles avec le défaut de glissement ainsi que les paramètres influençant son apparition et son amplitude tels que les singularités géométriques et des paramètres du procédé (orientation du renfort, pression des serre-flancs, ...) [7, 8]. Au niveau phénoménologique, des études ont proposé un scénario de la croissance du défaut basé sur une rotation locale des mèches induisant une élévation au-dessus de la surface de l'armature (appelée amplitude) [9]. Des modèles ont aussi été proposés sur la base de cette cinématique avec une hypothèse forte qui considère que les mèches gardent leur forme elliptique tout au long de l'évolution du défaut. Ainsi, malgré les avancées réalisées dans la compréhension du défaut de boucles, les phénomènes physiques ne sont toujours pas maîtrisés et l'évolution de la géométrie des mèches lors de la création et de la croissance du défaut reste encore peu documentée.

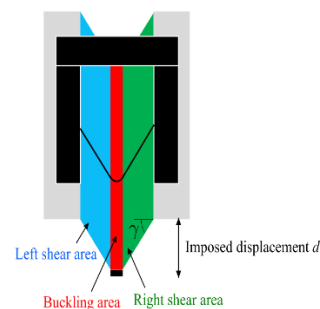
C'est l'objectif de ce travail expérimental qui vise à analyser les propriétés géométriques des mèches bouclées. Pour ce faire, un banc expérimental spécifique a été développé et calibré. Par la suite différents échantillons d'un taffetas de verre ont été utilisés pour générer des défauts de boucles calibrés avec des amplitudes différentes. Les surfaces et les volumes des différents échantillons ont été obtenus via des scans 3D et par tomographie RX afin d'extraire les différents paramètres géométriques et ainsi comparer les différentes configurations.

2. Matériaux et méthodes

Un taffetas de verre équilibré fourni par Chomarat a été utilisé pour réaliser cette étude. Ce matériau est composé de fils de 2,67 mm de largeur, avec un espace inter-fil d'environ 1,33 mm, a une masse surfacique de $600 \text{ g/m}^2 \pm 5\%$ et une épaisseur d'environ 0,55 mm (voire fig. 1)



(a) Renfort de étude



(b) Schéma du banc de génération de boucle

Fig. 1. Matériau et banc de l'étude.

Par ailleurs, un banc spécifique a été conçu et réalisé au sein du laboratoire pour générer des défauts de boucles calibrés avec des conditions maîtrisées. Ce banc a été développé de façon à reproduire la cinématique observée sur le renfort pendant la mise en forme lors de l'apparition des défauts de boucles. Le principe du banc repose sur l'essai de pull out test, où on tire sur une ou plusieurs mèches se trouvant au centre d'un des côtés de l'échantillon de renfort. En parallèle à cela, on applique une pression sur les trois autres côtés de l'échantillon, ce qui permet de reproduire les conditions générées

par les serre-flancs pendant la mise en forme. Ainsi, les mèches tirées entraînent avec elles les mèches du réseau transverse en leur appliquant une sollicitation de flexion qui, en fonction de la valeur de la déflexion, induit un flambage hors plan des mèches transverses. En appliquant ces conditions on génère des boucles dans la partie centrale de l'échantillon (bande rouge sur la fig.1) et des zones cisailées de part et d'autre (zones verte et bleue de la fig. 1).

Une étude préliminaire a été menée afin de déterminer le protocole et les conditions optimales pour générer des défauts de boucles sur le renfort étudié. Par la suite, des échantillons ont été déformés pour générer des boucles à différentes amplitudes dans des configurations correspondant à des angles de cisaillement des zones latérales de 12° et 24° . Les échantillons obtenus à ces conditions, ainsi que des échantillons du renfort non déformé qui sera utilisé comme référence, ont été scannés avec un scanner 3D pour reconstruire leurs surfaces et mesurer les élévations des mèches bouclées. En parallèle, des coupes de chacune des configurations ont été découpées et scannées sous tomographe aux rayons X. Les images et volumes obtenus ont été utilisés pour extraire les paramètres géométriques des mèches et leur évolution en fonction de l'amplitude des boucles.

3. Résultats et discussions

Une fois les mesures réalisées, les différentes surfaces 3D et volumes reconstruits par tomographie ont été analysés avec des logiciels de traitement d'images afin de suivre l'évolution de la géométrie des mèches en fonction des différentes configurations.

La fig.2 illustre un exemple des images tomographiques obtenues. On note bien que sur l'échantillon non déformé (à gauche de la fig. 2), les mèches ont une forme ellipsoïde assez homogène. Lorsqu'on génère le défaut de boucles, les mèches subissent une rotation qui provoque une surélévation d'une de leur extrémité. On observe que l'angle de cette rotation augmente avec l'amplitude des boucles (passage d'une configuration avec angle de cisaillement de 12° à celle avec 24°). Cette rotation équivaut à environ 13° , sur chacune des faces de l'échantillon avec la première amplitude (cisaillement à 12°) mais avec un écart type assez important (entre 24% et 33%) ce qui dénote de l'importance des effets locaux dus à l'hétérogénéité des matériaux fibreux.

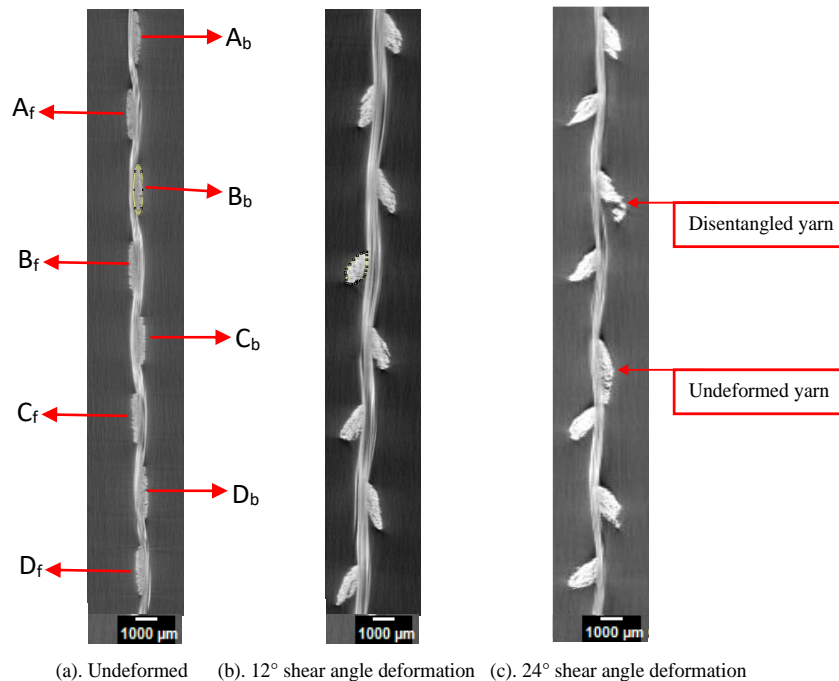


Fig. 2. Exemples de slices des volumes reconstruits par tomographie des échantillons non déformés et avec des boucles.

Lorsqu'on augmente l'amplitude des boucles (cisaillement à 24°), on note une disparité importante entre les valeurs sur les deux faces. Les mèches sur la face gauche de l'échantillon voient leur angle de rotation augmenter linéairement et atteindre 26° tandis que la moyenne des mèches du côté droit de l'image tombe à 10°. Cette faible valeur est due à la disparité dans le comportement des mèches (mèches endommagées ou séparées en plusieurs parties, mèches non ou peu déformées ...). Cette différence entre les deux faces est due au frottement renfort/métal qui se produit avec l'outil lors de la mise en forme.

Ainsi, les observations tomographiques ont permis de constater une disparité locale dans le comportement des mèches. On observe aussi sur la fig. 2 que les mèches des échantillons avec défaut ne gardent pas leur forme éclipique telle que décrit dans la littérature. Ainsi, les mesures et analyses ont permis de mettre en évidence une diminution de la surface des mèches, à cause de la compaction, qui augmente avec l'amplitude des boucles (jusqu'à -16%). Cette diminution s'accompagne d'une variation de la géométrie puisque la géométrie n'est plus éclipique (fig.2).

4. Conclusions

Cette étude s'intéresse à l'analyse des propriétés géométriques des mèches soumises à un flambage hors plan lors de la mise en forme de renforts textiles. Pour ce faire, un banc a été développé afin de produire des défauts calibrés. Une étude préliminaire a permis de mettre en place un protocole et les conditions expérimentales optimales pour générer les boucles.

L'analyse des mesures réalisées sur les échantillons avec des boucles calibrées a permis de mettre en évidence que la rotation des mèches, à cause du flambage hors plan, évolue de manière linéaire en fonction de l'amplitude des boucles. Les mèches soumises à un bouclage voient leur géométrie et sections évoluer, de façon hétérogène en fonction de leur localisation, due à la compaction du réseau fibreux. On note aussi que les surfaces de l'échantillons qui sont en contact avec le banc, reproduisant donc la configuration contact renfort/poinçon, sont sujettes à des mesures variables due au frottement renfort/métal qui s'y produit.

Remerciements :

Les auteurs remercient la chaire MATUR et le Fonds de développement des technologies pétrolières (PTDF, Nigéria) pour leur soutien financier.

Références

- [1] Azzouz R., Allaoui S., Moulart R. Composite preforming defects: a review and a classification. *Int. J. Mater. Form.* 2021; 14:1259–78. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01643-7>
- [2] L.D. Bloom, J. Wang, K.D. Potter, "Damage progression and defect sensitivity: An experimental study of representative wrinkles in tension", *Composites: Part B*, vol 45, pp. 449–458, 2013.
- [3] P. Hallander a, M. Akermo, C. Mattei, M. Petersson, T. Nyman, "An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates", *Composites: Part A*, vol 50, pp. 54–64, 2013.
- [4] D. Pradeep, N. Janardhana Reddy, C. Rahul Kumar, L. Srikanth and R.M.V.G.K. Rao, « Studies on Mechanical Behavior of Glass Epoxy Composites with Induced Defects and Correlations with NDT Characterization Parameters », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol 26, pp. 1539-1556, 2013.
- [5] Boisse P, Hamila N, Vidal-sallé E, Dumont F, Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear, and bending stiffnesses. *Compos Sci Technol*, 2021, 71:683–692. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.011>
- [6] Potter K., Khan B., Wisnom M., Bell T., Stevens J. Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures. *Compos Part Appl. Sci. Manuf.* 2008; 39:1343–54. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.04.016>.

- [7] S. Allaoui, G. Hivet, D. Soulat, A. Wendling, P. Ouagne, S. Chatel “Experimental preforming of highly double curved shapes with a case corner using an interlock reinforcement”, *International Journal of Material Forming*, vol 7(2), pp.155-165, 2014.
- [8] Shanwan A., Allaoui S., Gillibert J., Hivet G. Development and implementation of an experimental machine to study woven fabric preforming defects, *Experimental Techniques*, 2021, DOI: [10.1007/s40799-021-00483-z](https://doi.org/10.1007/s40799-021-00483-z).
- [9] Salem M.M., De Luycker E., Fazzini M., Ouagne P. Experimental, analytical and numerical investigation to prevent the tow buckling defect during fabric forming. *Compos Part, Appl. Sci. Manuf.* 2019; 125:105567. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105567>.