

Prédiction de l'apparition de défauts de boucles sur des mèches plates lors du préformage d'un renfort textile – approche couplée expérimentale, analytique et simulation Isogéométrique

Prediction of flat tows buckling defect in composite fabric preforming – experimental, analytical, and Isogeometric numerical framework

Mohamed Medhat SALEM¹, Emmanuel DE LUYCKER¹, Marina FAZZINI¹, et Pierre OUAGNE¹

1 : Laboratoire Génie de Production
INP-ENIT, Université de Toulouse
47, avenue d'Azereix - BP1629, 65016 Tarbes Cedex
e-mail : mohamed-medhat.salem@enit.fr, emmanuel.de-luycker@enit.fr marina.fazzini@enit.fr et pierre.ouagne@enit.fr

Résumé

Nous nous intéressons dans ce travail de recherche à la prédiction du défaut de boucle (flambement de flexion d'une mèche plate) lors d'une mise en forme de textile technique. Pour ce faire, une approche couplée a été mise en œuvre, basée sur des mesures expérimentales du rayon de courbure critique, rayon à partir duquel le défaut apparaît ; ce rayon a également été évalué analytiquement grâce à la méthode de RAYLEIGH-RITZ qui avait déjà été utilisée pour décrire le flambement observé lors de la dépose de bandes dans le cadre du procédé ATP (Automated Tape Placement). Enfin, le rayon critique, déterminé expérimentalement ou analytiquement, est exploité numériquement par comparaison avec le rayon de courbure simulé lors de la mise en forme d'une pièce composite complexe à renfort tissé. Pour ce faire, une approche Isogéométrique a été développée et permet d'accéder naturellement aux courbures locales dans chacun des réseaux.

Abstract

In this research work, we focus on the prediction of the buckling defect (flexion of flat tows) during technical fabric forming. The critical curvature radius has been determined experimentally and analytically using a RAYLEIGH-RITZ approach which had been previously used to describe the buckling observed in the ATP (Automated Tape Placement) process. Finally, the critical buckling radius, experimentally or analytically determined is exploited numerically. A comparison is done between the material critical buckling radius and the one simulated during the shape forming of a woven reinforced complex composite part. To do so, an Isogeometrical approach was developed which allows naturally accessing the local curvature of each fibrous network.

Mots Clés : Préformage, Défauts, Boucle, RAYLEIGH-RITZ, Analyse Isogéométrique

Keywords : Preforming, Defects, Buckling, RAYLEIGH-RITZ, Isogeometric Analysis

1. Introduction

Pendant la phase de préformage de pièces composites de formes complexes, différents types de défauts peuvent apparaître tels que des ruptures de mèches, des plissements du tissu [1] ou encore des boucles [2] au niveau des mèches plates telles qu'illustrées Fig. 1(b) et des glissements.

Le but de ce travail est de présenter une méthodologie permettant de prédire l'apparition du défaut de boucle lors du préformage complexe de renforts tissés constitués de mèches plates en fonction du comportement du tissu, de ses constituants, de la géométrie des outils et des paramètres du procédé.

2. Détermination expérimentale du rayon critique

Le comportement au bouclage du tissu est étudié expérimentalement pour détecter le début d'apparition du défaut (causé par la courbure dans le plan) grâce à un dispositif expérimental décrit dans [3] et utilisé depuis dans [4, 5].

2.1. Dispositif de boucle

Ce dispositif permet de générer des boucles dans la zone centrale d'une éprouvette en croix ou en T , en imposant une translation circulaire des extrémités d'un des réseaux (le réseau initialement horizontal Fig. 1(a)), l'autre étant maintenu fixe. Les tensions initiales dans le réseau chaîne et le réseau trame sont pilotées à l'aide du dispositif. Finalement, l'évolution de la géométrie des mèches et l'apparition des boucles sont déterminés par stéréo-corrélation d'images numériques. Cette méthode permet de suivre l'évolution de l'élévation de la mèche ainsi que sa rotation en fonction de la courbure locale dans la zone d'intérêt de notre éprouvette.

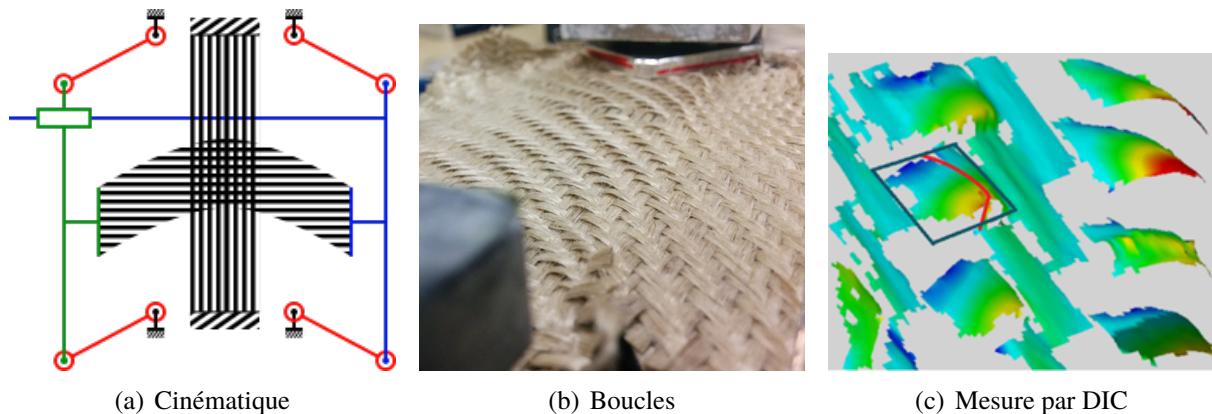


Fig. 1. Fonctionnement du dispositif de boucles et mesure du profil.

2.2. Résultats expérimentaux

Des mesures ont été réalisées pour différents matériaux, différentes textures et différentes tensions dans les réseaux. Il en résulte que, pour un matériau donné, l'apparition des boucles est pilotée par le rayon de courbure local de la mèche et que, plus le matériau est rigide et plus il aura tendance à générer des boucles rapidement. La mesure de courbure a été réalisée à l'aide du logiciel ImageJ. Concrètement, un suivi de la hauteur de boucle a été réalisé par stéréo-corrélation d'images; le rayon critique correspond à l'apparition de la boucle (augmentation significative de la hauteur de boucle). Les résultats expérimentaux obtenus après essai sur deux tissus sergés de lin, l'un encollé l'autre pas sont reportés Tab.1 dans la colonne R_{cr}^{ex} qui correspond au rayon critique expérimental exprimé en mm .

3. Détermination analytique du rayon critique

Cette courbure critique et également prédite pour un tissu donné constitué de mèches données, analytiquement utilisant une approche de RAYLEIGH-RITZ, adaptée des travaux [6, 7], après identification de certains paramètres géométriques du tissu et mécaniques des mèches. Les paramètres géométriques clés sont la longueur et largeur libre de la mèche au sein du tissu qui dépendent des dimensions des mèches ainsi que de la texture du tissu; le comportement mécanique de la mèche est évalué par des essais de traction, de flexion (cantilever) et de torsion. Le rayon de courbure critique peut donc être mesuré expérimentalement ou prédit analytiquement.

3.1. Modèle analytique

Le modèle analytique développé a été présenté dans [5]; il permet d'évaluer le rayon de courbure critique R_{cr}^{an} équation Eq. 1 en fonction du module de traction de la mèche E_1 , évalué par un essai de traction, du module de flexion D_{11} évalué par un essai de PEIRCE et de D_{66} , évalué par un essai de torsion réalisé sur un rhéomètre en imposant une tension constante dans la mèche. Ces données sont répertoriées dans le (Tab. 1).

Renfort	E_1 (MPa)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	D_{11} (N.mm)	D_{66} (N.mm)	R_{cr}^{ex} (mm)	R_{cr}^{an} (mm)
Sergé 2 × 2 Lin encollés	19800	6,1	2,5	0,4	1,18	0,44	2255	2083
Sergé 2 × 2 Lin désencollés	7800	5,7	2,4	0,4	0,72	0,17	1627	1482

Tab. 1. Propriétés des tissus et mèches testés ; rayons critiques déterminés expérimentalement et analytiquement.

$$R_{cr}^{an} = \frac{E_1 b^3 h L^2}{80 D_{66} L^2 + 12 D_{11} \pi^2 b^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Cette équation est obtenue sous l'hypothèse que D_{22} et D_{12} soient négligeables devant D_{11} ou D_{66} et aussi que la mèche suive une cinématique de flexion pure (pas de tension / compression globale de la mèche).

3.2. Résultats analytiques

Les résultats analytiques obtenus pour les deux tissus sergés 2 × 2 de lin, l'un encollé l'autre pas sont reportés (Tab. 1) dans la colonne R_{cr}^{an} qui correspond au rayon critique analytique exprimé en mm. Les résultats analytiques sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux précédemment obtenus avec un écart relatif maximal de 9%.

4. Simulation Isogéométrique

Une fois la courbure critique du matériau déterminée (inverse du rayon de courbure critique), celle-ci peut être comparée à la courbure locale issue d'une simulation de préformage. Nous adoptons une approche Isogéométrique [8, 9] car elle permet d'atteindre naturellement les courbures des réseaux dans le renfort grâce aux fonctions d'interpolation de haut degré disponibles (une évolution continue de la courbure est obtenue à partir de fonctions d'interpolation cubiques). Le vecteur position d'un point matériel de coordonnées ξ dans l'espace de référence est obtenu à partir des fonctions NURBS R_A et de la position des points de contrôle au cours du temps \mathbf{q}_A (Eq. 2).

$$\mathbf{x}(\xi, t) = \sum_{A \in N} R_A(\xi) \mathbf{q}_A(t) \quad (\text{Eq. 2})$$

Les vecteurs tangents aux réseaux chaîne (\mathbf{t}_1) et trame (\mathbf{t}_2) sont obtenus (pour des éléments alignés avec les fibres) par dérivation par rapport aux paramètres ξ_1 ou ξ_2 (Eq. 3).

$$\mathbf{t}_i(\xi, t) = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi_i}(\xi, t) = \sum_{A \in N} \frac{\partial R_A}{\partial \xi_i}(\xi) \mathbf{q}_A(t) \quad (\text{Eq. 3})$$

De même, les vecteurs normaux sont issus de la dérivée seconde de la position par rapport aux paramètres ξ_1 ou ξ_2 (Eq. 4).

$$\mathbf{n}_i(\xi, t) = \sum_{A \in N} \frac{\partial^2 R_A}{\partial \xi_i^2}(\xi) \mathbf{q}_A(t) \quad (\text{Eq. 4})$$

Connaissant le vecteur tangent et le vecteur normal relatif à l'un des deux réseaux, il est possible de déterminer sa courbure locale par l'équation (Eq. 5).

$$C_i = \frac{\|\mathbf{t}_i \wedge \mathbf{n}_i\|}{\|\mathbf{t}_i\|^3} \quad (\text{Eq. 5})$$

Il est également à noter que seule la composante plane de la courbure est responsable de l'apparition du défaut de boucle ; en effet, une mèche plate ne boucle pas lors d'une cinématique de flexion hors plan telle qu'observe lors d'un essai cantilever en revanche une flexion plane peut engendrer un défaut de boucle. Il est possible d'évaluer la courbure dans le plan C_i^{pl} (Eq. Eq. 6) en ne considérant que la partie plane \mathbf{n}_i^{pl} du vecteur normal \mathbf{n}_i . C'est cette courbure plane qui est représentée (Fig. 2(a)) et (Fig. 2(b)).

$$C_i^{pl} = \frac{|\mathbf{t}_i \wedge \mathbf{n}_i^{pl}|}{\|\mathbf{t}_i\|^3} \quad (\text{Eq. 6})$$

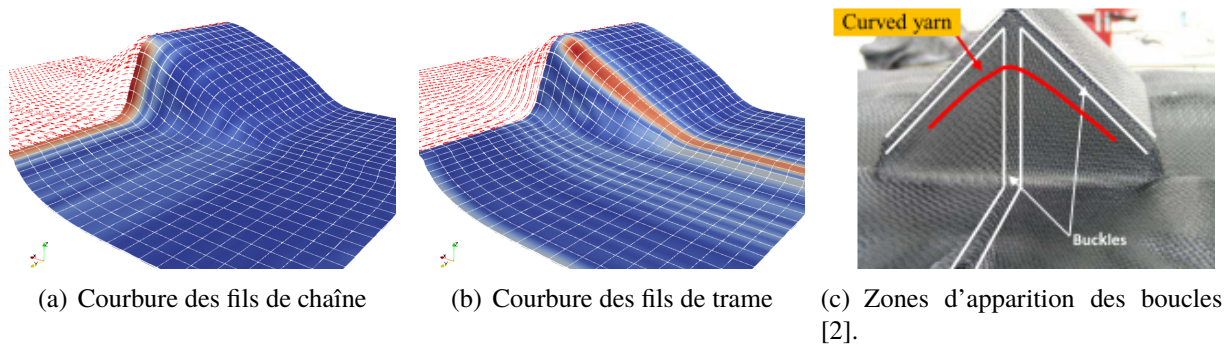


Fig. 2. Courbures dans le plan lors d'une simulation de drapage.

L'approche continue proposée est basée sur des éléments 3d avec des fonctions d'interpolation de degrés 3 dans chaque direction et un modèle constitutif hypoélastique permettant de prendre en compte les comportements en tension, compression et cisaillement du tissu. La description complète du modèle utilisé dépasse le cadre de ce travail, mais les méthodes de simulation de la mise en forme ont atteint un degré de maturité certain permettant de connaître avec précision les cisaillements locaux responsables du défaut de plissement ; ces cisaillements étant directement liés aux orientations des mèches, celles-ci sont donc déterminées précisément avec les méthodes numériques actuelles. Les courbures prédites numériquement Fig. 2(a) pour le réseau chaîne et Fig. 2(b) pour le réseau trame sont en bonne concordance avec les mesures expérimentales faites par [2] sur une forme prismatique similaire Fig. 2(c).

5. Conclusions

Dans le cadre de ces travaux, une feuille de route complète est proposée, permettant, en partant des tissus ou de leurs constituants, de prédire et localiser les zones susceptibles de voir un défaut de boucle apparaître. L'approche proposée fait l'hypothèse d'une cinématique LAGRANGIENNE au sein du renfort, qui est classiquement faite dans les approches à l'échelle de la pièce, dite aussi échelle macroscopique, ce qui permet une efficacité numérique certaine (pas de calcul des contacts internes entre les mèches) ; néanmoins, le défaut de boucle précède souvent celui de glissement macroscopique ou de dé-tissage qui, manifestement, met cruellement en défaut l'hypothèse LAGRANGIENNE. L'approche proposée permettra donc de prédire l'apparition des boucles dans les cas où celles-ci apparaissent avant les défauts de glissement, mais ces cas sont à notre connaissance les plus vraisemblables. Pour prédire l'évolution de la structure après glissement, des méthodes à l'échelle mésoscopiques ou multiéchelles [10, 11] sont nécessaires.

Références

- [1] N. Hamila, P. Boisse, F. Sabourin, M. Brunet « A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation », *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Vol. 79 n° 12, pp. 1443–1466, 2009, ISSN 1097-0207.
- [2] 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 n° 2, pp. 155–165, 2014, ISSN 19606214.
- [3] C. Tephany, J. Gillibert, P. Ouagne, G. Hivet, S. Allaoui, D. Soulat « Development of an experimental bench to reproduce the tow buckling defect appearing during the complex shape forming of structural flax based woven composite reinforcements », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 81, pp. 22–33, 2016, ISSN 1359835X.
- [4] M. M. Salem, E. De Luycker, M. Fazzini, P. Ouagne « Study of the tow buckling and tow sliding defects during the complex shape forming of synthetic and vegetal fibre reinforced structural composites. », in : 22nd International Conference STRUTEX, Liberec, , pp. 1–3, 2018.
- [5] M. M. Salem, E. De Luycker, M. Fazzini, P. Ouagne « Study of the tow buckling defect during the complex shape forming of synthetic and vegetal fibre reinforced structural composites », in : The 8th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials, Tarbes, , pp. 1–6, 2018.
- [6] A. Beakou, M. Cano, J.-B. B. Le Cam, V. Verney « Modelling slit tape buckling during automated prepreg manufacturing : A local approach », *Composite Structures* Vol. 93 n° 10, pp. 2628–2635, 2011, ISSN 02638223.
- [7] M. Matveev, P. Schubel, A. Long, I. Jones « Understanding the buckling behaviour of steered tows in Automated Dry Fibre Placement (ADFP) », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 90, pp. 451–456, 2016, ISSN 1359835X.
- [8] J. A. Cottrell, T. J. R. Hughes, Y. Bazilevs, *Isogeometric analysis : toward integration of CAD and FEA*, ISBN 978-0-470-74873-2, 2009.
- [9] T. J. R. Hughes, J. A. Cottrell, Y. Bazilevs « Isogeometric analysis : CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 194 n° 39-41, pp. 4135–4195, 2005, ISSN 0045-7825.
- [10] A. Iwata, T. Inoue, N. Naouar, P. Boisse, S. V. Lomov « Coupled meso-macro simulation of woven fabric local deformation during draping », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 118 n° January, pp. 267–280, 2019, ISSN 1359835X.
- [11] A. Iwata, T. Inoue, N. Naouar, P. Boisse, S. V. Lomov « Meso-macro simulation of the woven fabric local deformation in draping », in : Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming, vol. AIP Confer, AIP Publishing, ISBN 9780735416635, ISSN 15517616, , pp. 020012–1—020012–5, 2018.