

Utilisation de la corrélation d'images pour le suivi de la mise en forme de renfort textile dans le cadre de la fabrication de pièces composites pour l'aéronautique

R. BONNAIRE^a, J. PATOU^a, E. De LUYCKER^a, T. CUTARD^a et G. BERNHART^a

a. Institut Clément Ader UMR5312 (ICA) – Université Paul Sabatier – Toulouse III, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), Institut National des Sciences Appliquées (INSA) – Toulouse, Ecole des Mines Albi-Carmaux (France) - France

Résumé :

Depuis plusieurs années, les matériaux composites sont utilisés dans le domaine de l'aéronautique pour la mise en œuvre de pièces structurelles ou semi-structurelles. La complexité géométrique de ces pièces non développables nécessite l'utilisation de préformes textiles afin d'optimiser la déformabilité du tissu pour la mise en forme. Durant cette mise en forme, du fait du comportement non-linéaire en cisaillement des tissus, des rigidifications locales des préformes apparaissent. Ces modifications impactent les propriétés mécaniques et la santé matière de la pièce composite finale.

L'objectif de ces travaux est de déterminer les propriétés mécaniques finales d'une pièce composite à partir de la mise en forme du renfort textile, en utilisant un suivi du champ de déformation par des bancs de stéréocorrélation d'images.

L'étude se divise en trois parties : (1) la caractérisation du renfort textile en cisaillement plan à l'aide de l'essai Bias Test, (2) des essais de drapabilité afin d'établir les champs de déformation et les angles de cisaillement au cours du drapage et (3) des essais mécaniques sur les composites finaux afin de faire le lien entre les angles de cisaillement du renfort textile et les propriétés mécaniques du composite.

D'après la première partie de l'étude, l'angle de blocage en cisaillement du renfort textile d'étude, un carbone/PPS, est de $38,5^\circ \pm 2,3^\circ$. Les essais de drapage montrent que l'angle de blocage en cisaillement est atteint dans certaines zones pour une demi-sphère et une forme parallélépipédique. La dernière partie est en cours de finalisation.

Abstract :

For several years, structural or semi-structural aeronautics parts manufactured with composite materials have been developed. The geometrical complexity of these parts requires the use of textile preforms with the integration of polymeric yarns in order to optimize the deformability of the fabric during the forming process. Due to the non-linear in plane shear mechanical behavior, local stiffening of the preform appears during this forming. These discontinuities affect the mechanical properties and material health of the final composite part.

The objective of this work is to determine the final mechanical properties of a composite part from the forming of the textile reinforcement, using a tracking of the strain field by 3D digital image correlation.

The study is divided into three parts: (1) the mechanical characterization of the in plane shear behaviour of the textile reinforcement through Bias tests, (2) drapability tests to establish strain field and shear angles during draping and (3) mechanical tests on the final composite in order to make the link between the shear angles of the textile reinforcement and the mechanical properties of the final composite.

According to the firsts part of the study, the shear locking angle of the studied textile reinforcement, a carbon/PPS, is $38.5^\circ \pm 2.3^\circ$. The draping tests show that the shear-locking angle is reached in certain areas for a half-sphere and a parallelepiped shape. The last part of the study is being finalized.

Mots clefs : Renforts textiles, stéréocorrélation, angle de blocage, aéronautique, composite, mise en forme

1 Introduction

Depuis plusieurs années, les matériaux composites sont utilisés dans le domaine de l'aéronautique pour la mise en œuvre de pièces structurelles ou semi-structurelles. La complexité géométrique de ces pièces nécessite l'utilisation de préformes textiles avec intégration de fils polymère par voie de comelage ou de cotissage afin d'optimiser la déformabilité du tissu lors de la mise en forme. L'utilisation de résines thermoplastiques est de plus en plus courante pour des raisons de recyclabilité, de tenue en température et de rapidité de mise en œuvre. Durant la mise en forme d'un renfort textile, du fait du comportement non-linéaire en cisaillement plan des tissus, des rigidifications locales des préformes apparaissent [1]. Ces discontinuités impactent les propriétés mécaniques et la santé matière de la pièce composite finale.

Des essais de mise en forme de préformes textiles sur des géométries complexes permettent d'analyser le comportement en déformation du semi-produit. Ils permettent également d'établir des stratégies de préparation du tissu à mettre en forme en vue d'optimiser la qualité finale de la pièce composite. Des travaux de recherche se sont intéressés à l'optimisation de la mise en forme de renfort sec et à l'apparition de défauts au travers du choix et du dimensionnement de serre-flancs [2]. Bien que des études s'intéressent à la mesure de la déformation d'une préforme essentiellement par suivi de marqueurs sur le tissu ou la projection de franges [3], peu d'études utilisent la stéréocorrélation d'images.

L'objectif de ces travaux est de déterminer les propriétés mécaniques finales d'une pièce composite à partir de la mise en forme du renfort textile, en utilisant un suivi du champ de déformation par des bancs de stéréocorrélation d'images.

L'étude se divise en trois parties : la caractérisation du renfort textile en cisaillement plan à travers des essais de Bias Test [4], [5], des essais de drapabilité afin d'établir les champs de déformation et les angles de cisaillement au cours du drapage et des essais mécaniques sur les composites finaux afin de faire le lien entre les angles de cisaillement du renfort textile et les propriétés mécaniques du composite. Cette dernière partie ne sera pas abordée en détail dans cet article, car elle est en cours de finalisation.

2 BIAS test

Afin de faire le lien entre les propriétés mécaniques du composite finiet celles du renfort textile, il est nécessaire de caractériser mécaniquement ces renforts. Nous nous limiterons ici au comportement mécanique en cisaillement du tissu qui influe prioritairement sur le résultat d'une mise en forme. Pour cela, nous utilisons l'essai de Bias Test qui permet de mesurer le comportement du tissu en fonction de l'angle de cisaillement. Finalement, nous identifierons un angle de blocage en cisaillement : ange formé par les réseaux chaîne et trame au moment de la rigidification du tissu ; seule donnée nécessaire lors de la simulation du drapage par approche géométrique (algorithme du filet).

2.1 Description de l'essai

L'essai Bias test est utilisé afin de mesurer le comportement en cisaillement des tissus. Il permet d'évaluer l'angle de blocage en cisaillement. Il correspond à un test de traction sur un échantillon de tissu placé de façon à ce que la chaîne et la trame soit à 45° de la direction de traction.

D'après Harrison et al. 2012 [6], lors d'un essai Bias Test sur un tissu considéré comme inextensible et sans glissement, l'angle de cisaillement sera nul au niveau des mords et maximum au centre de l'échantillon. Les trois zones de cisaillement caractéristiques sont représentées sur la Figure 1. Dans les zones 1, il n'y a pas de cisaillement. Dans la zone 2, le cisaillement est maximum. Dans les zones 3, le cisaillement est la moitié du cisaillement de la zone 2. L'angle de blocage est déterminé par l'angle dans la zone centrale (zone 2, Figure 1) de l'échantillon au moment du changement de comportement mécanique en cisaillement du tissu, i.e. au moment de sa rigidification.

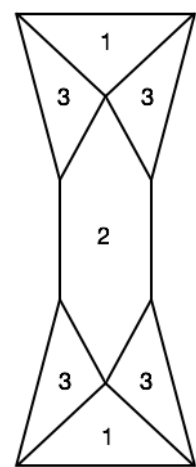


Figure 1 :
Echantillon au
cours d'un essai
Bias Test

2.2 Instrumentation de l'essai

Lors d'un test de Bias Test, il est possible de suivre l'angle de cisaillement dans la zone centrale de l'éprouvette au cours de l'essai par l'équation suivante, qui lie l'angle de cisaillement aux dimensions de l'éprouvette (rapport L_0 entre la longueur et la largeur de l'éprouvette) et à son élongation δ [7] :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{L_0 + \delta}{\sqrt{2}L_0} \right)$$

L'angle de blocage en cisaillement est déterminé par l'angle de cisaillement au moment du changement de comportement mécanique du tissu, i.e. au changement de pente de la courbe, représentant la force par rapport à l'angle de cisaillement.

La corrélation d'images permet de mesurer les déformations principales qui sont liées à l'angle de cisaillement par l'équation suivante [8] :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (1)$$

avec λ_1 , λ_2 les déformations principales. Cette méthode permet donc de suivre les angles de cisaillement sur l'ensemble de l'échantillon tout le long de l'essai de Bias test.

Cette méthode de corrélation d'images est acceptable si la mesure se fait uniquement sur un plan. L'objectif de ce projet étant de suivre l'angle de cisaillement au cours d'un essai de drapage sur une pièce réelle de forme non développable, une méthode de stéréocorrélation d'images a été développée. Cette méthode permet, à partir de deux caméras, de mesurer les déformations à la surface d'une forme

géométrique complexe par comparaison d'une paire d'image de référence avec une paire d'images déformées, permettant la mesure simultanée de la forme et des déformations. L'équation 1 a été utilisée et validée par la comparaison des résultats obtenus à l'aide d'une mesure 2D et 3D des déformations.

2.3 Tests réalisés et résultats

Le tissu d'étude est un tissu de carbone/PPS. Il est représenté sur la Figure 2. Il est composé de fibres de carbone craquées et de filaments de PPS. Les deux fils sont comelés. Sur chaque mèche il y a un fil de guipage en PPS.

Trois échantillons de tissu mesurant 50mm par 150mm ont été testés. La vitesse de l'essai était de 40mm/sec. Le test a été réalisé à la température de la pièce. Les échantillons ont été placés afin d'être correctement alignés dans les mors pour éviter tout effort dans des directions non souhaitées.

L'angle de blocage du tissu de carbone PPS est de $38,5^\circ \pm 2,3^\circ$.

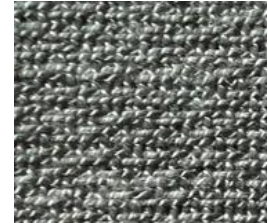


Figure 2 : Tissu de carbone/PPS

3 Essai de drapage

Cette étape consiste à la mesure du champ d'angle de cisaillement au cours d'un essai de drapage. Il est supposé que le cisaillement du renfort textile a une influence notable sur les propriétés mécaniques de la pièce composite consolidée.

3.1 Description de l'essai

L'essai de drapage de renforts textiles a été réalisé automatiquement sur un dispositif d'emboutissage, par l'adaptation d'un système de formage incrémental de plaque métallique. Le système est représenté sur la Figure 3. Un poinçon de forme choisi suivant la géométrie à réaliser avance sur le renfort qui prend alors la forme du poinçon. Ce drapage peut être libre ou contrôlé par un serre-flanc. Le drapage libre ne permet pas d'obtenir un drapage correct de la forme. Il a donc été décidé de travailler uniquement sur un drapage contrôlé.

Dans un premier temps, deux formes ont été étudiées : une demi-sphère et un parallélépipède arrondi sur sa surface supérieure. Ces deux formes sont représentées sur la Figure 4. Elles sont à double courbure, caractéristiques des pièces étudiées à réaliser en composite dans le domaine de l'aéronautique.

3.2 Instrumentation de l'essai

L'objectif de cette instrumentation est de suivre tout le long de l'essai de drapage, le champ d'angle de cisaillement. Cet angle est fonction des déformations principales. Pour obtenir les déformations principales, deux systèmes de stéréocorrélation sont utilisés. Ces deux systèmes sont visibles sur la Figure 3 du système de drapage. Il est nécessaire d'utiliser deux systèmes afin de suivre les déformations sur toute la surface. Les géométries obtenues par les deux systèmes sont reconstruites avec l'algorithme « Iterative Closest Point » afin d'obtenir une seule forme [9].

Cette instrumentation et l'essai de drapage a été évaluée par deux études : (1) la répétition six fois d'un même essai pour tester la répétabilité de la mesure et (2) la réalisation d'un plan d'essai afin de déterminer les paramètres environnementaux pouvant influencer sur la mesure et le drapage. Les paramètres testés ont été l'orientation du tissu lors du drapage (0° et 90° suivant la trame), le coefficient de frottement entre le serre-flanc et le tissu, la vitesse de drapage (2mm/s et 5mm/s), les masses ajoutées sur le serre-flanc (1,6Kg et 6,4Kg) et la répartition des masses.

La première étude d'évaluation montre que la mesure est répétable. La différence maximale entre deux mesures est inférieure à 2,7%. La deuxième étude montre qu'aucun paramètre environnemental n'a d'influence sur la mesure et le drapage.

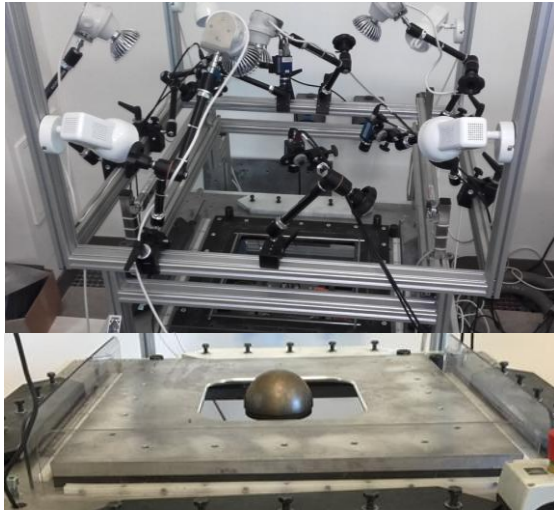


Figure 3 : Dispositif de drapage de renfort textile

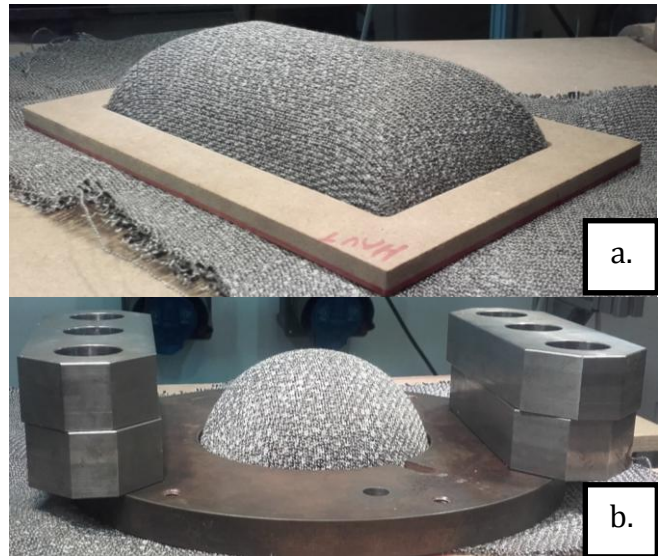


Figure 4 : Forme d'étude : a. parallélépipède arrondi sur sa surface supérieure et b. demi-sphère

3.3 Tests réalisés et résultats

Le renfort textile carbone/PPS a été drapé sur les deux formes d'étude. La mesure de champ de l'angle de cisaillement montre les zones pour lesquelles l'angle de blocage est atteint. D'après les premiers résultats, ces zones correspondent à la partie basse de la demi-sphère et à la base des quatre coins de la forme parallélépipédique. La Figure 5 donne un exemple de résultat du champ de cisaillement à la fin du drapage pour la demi-sphère.

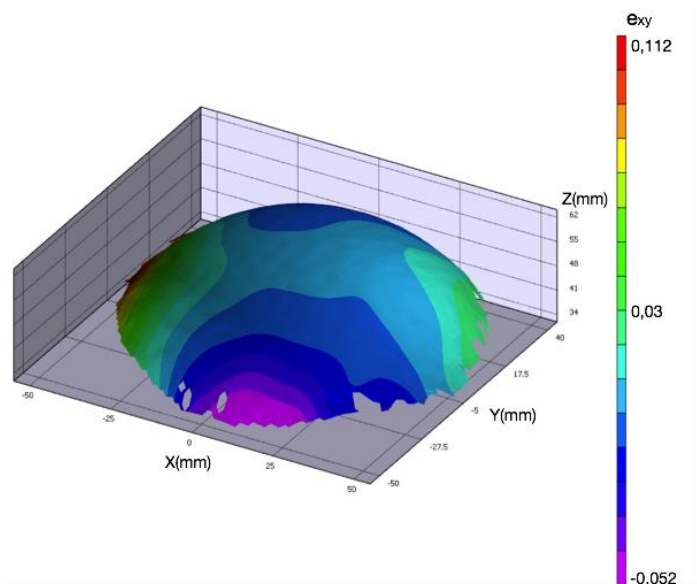


Figure 5 : Exemple de résultats : déformation en cisaillement à la fin de l'essai de drapage sur une demi-sphère

4 Discussion

La mesure de l'angle de blocage lors de l'essai Bias test a été réalisée par un système de stéréocorrélation. Cette méthode permet d'obtenir la surface de l'échantillon tout au long de l'essai. En plus de permettre une mesure adéquate de l'angle de cisaillement au cours d'un essai de drapage, ce système de mesure a l'avantage, lors de l'essai Bias test, de pouvoir déterminer précisément l'apparition de pli sur l'échantillon. Ceci permet de vérifier que le changement de comportement mécanique en cisaillement des tissus testés peut être lié à l'apparition de plis.

La mesure du champ d'angle de cisaillement tout le long de l'essai de drapage par un double système de stéréocorrélation est innovante. Elle a l'avantage majeur de déterminer en temps réel l'apparition de zones pour lesquelles l'angle de cisaillement atteint l'angle de blocage en cisaillement.

A moyen terme, ce projet cherche à faire le lien entre le degré de cisaillement du renfort textile et les propriétés mécaniques de la pièce composite consolidée. Pour faire ce lien, des pièces de forme pyramidale sont en cours de fabrication. Cette forme est choisie pour permettre la découpe d'éprouvettes plates. Des échantillons dans les différentes zones seront découpés et testés en traction, compression et cisaillement afin de déterminer le lien entre cisaillement du renfort textile et propriétés mécaniques de la pièce consolidée.

Une modélisation du drapage est également en cours de réalisation afin d'étudier l'impact des propriétés du renfort textile sur le drapage. Cette simulation numérique permettra de valider la mesure de l'angle de cisaillement au cours du drapage

5 Conclusion

Cette étude est une première approche d'une étude plus large en cours de réalisation. Elle montre le développement d'outils afin de caractériser le lien entre les propriétés mécaniques d'un renfort textile drapé et les propriétés mécaniques du composite ainsi fabriqué. Deux étapes ont été réalisées : (1) des essais de Bias Test pour caractériser le comportement en cisaillement des renforts textiles et (2) des essais de drapage sur ces renforts durant lesquels le champs d'angle de cisaillement est mesuré. Une dernière étape consistant à des caractérisations mécaniques des composites fabriqués est en cours de finalisation. Les pièces composites étudiées seront utilisées dans le domaine de l'aéronautique.

Remerciements

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ACAPULCO financé par BPI France et la région Midi-Pyrénées impliquant Reaéro Composite, Liebherr Aerospace, Porcher Industries, Technofan (Safran), Safran Power Units et la plateforme technologique CANOE.

Références

- [1] S.V. Lomov, P.Boisse, E. De Luycker, F. Morestin, K. Vanclooster, D. Vandepitte, I. Verpoest and A. Willems, Full-field strain measurements in textile deformability studies, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 39, no. 8, pp. 1232-1244, Aug. 2008.
- [2] P. Boisse, Mise en forme des renforts fibreux de composites, Techniques de l'ingénieur. P. 13, 2004.
- [3] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, and D. Duratti, Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects, Compos. Part B Eng., vol. 62, pp. 29-36, Jun. 2014.

- [4] S. Allaoui, P. Boisse, S. Chatel, N. Hamila, G. Hivet, D. Soulat, and E. Vidal-Salle, Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of tetrahedral shape, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 6, pp. 612-622, Jun. 2011.
- [5] C. Tephany, J. Gillibert, P. Ouagne, G. Hivet, S. Allaoui, and 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, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 81, pp. 22-33, Oct. 2015.
- [6] P. Harrison, F. Abdiwi, Z. Guo, P. Potluri, W.R. Yu, Characterising the shear-tension coupling and wrinkling behaviour of woven engineering fabrics, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, pp. 903-914, Jun. 2012.
- [7] J. Cao, R. Akkerman, P. Boisse, J. Chen, H.S. Cheng, E.F. de Graaf, J.L. Gorczyca, P. Harrison, G. Hivet, J. Launay, W. Lee, L. Liu, S.V. Lomov, A. Long, E. de Luycker, F. Morestin, J. Padvoiskis, X.Q. Peng, J. Sherwood, Tz. Stoilova, X.M. Tao, I. Verpoest, A. Willems, J. Wiggers, T.X. Yu, B. Zhu, Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 6, pp. 1037-1053, Jun. 2008.
- [8] E. De Luycker, Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks, Thèse, INSA Lyon, 2009.
- [9] J.J. Orteu, F. Bugarin, J. Harvent, L. Robert, V. Velay, Multiple-Camera Instrumentation of a Single Point Incremental Forming Process Pilot for Shape and 3D Displacement Measurements: Methodology and Results, *Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics (SEM), 2011, 51 (4), pp. 625-639.