



**HAL**  
open science

## Analyse par stéréo-corrélation d'images de la déformation hors-plan d'une préforme textile FC/PPS

Julien Patou, Rébecca Bonnaire, Emmanuel de Luycker, Geoffrey Brosseau,  
Gérard Bernhart

### ► To cite this version:

Julien Patou, Rébecca Bonnaire, Emmanuel de Luycker, Geoffrey Brosseau, Gérard Bernhart. Analyse par stéréo-corrélation d'images de la déformation hors-plan d'une préforme textile FC/PPS. JNC 20 - Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623677

**HAL Id: hal-01623677**

**<https://hal.science/hal-01623677>**

Submitted on 25 Oct 2017

**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.

# Analyse par stéréo-corrélation d'images de la déformation hors-plan d'une préforme textile FC/PPS

## *Out-of-plane deformation of a CF/PPS textile preform by stereo-digital image correlation analysis*

Julien PATOU<sup>1</sup>, Rébecca BONNAIRE<sup>1</sup>, Emmanuel DE LUYCKER<sup>2</sup>, Geoffrey BROUSSEAU<sup>1</sup>  
et Gérard BERNHART<sup>1</sup>

1 : Institut Clément ADER, UMR 5312  
Université de Toulouse

Campus Jarlard, F-81013 Albi

e-mail : [julien.patou@mines-albi.fr](mailto:julien.patou@mines-albi.fr), [rebecca.bonnaire@mines-albi.fr](mailto:rebecca.bonnaire@mines-albi.fr), [gerard.bernhart@mines-albi.fr](mailto:gerard.bernhart@mines-albi.fr),  
[geoffrey.brousseau@gmail.com](mailto:geoffrey.brousseau@gmail.com)

2 : Institut Clément ADER, UMR 5312  
Université de Toulouse

IUT Tarbes, F-65016 Tarbes

e-mail : [Emmanuel.De-Luycker@iut-tarbes.fr](mailto:Emmanuel.De-Luycker@iut-tarbes.fr)

### Résumé

La déformation hors plan d'une préforme textile comélé C/PPS lors de son drapage sur des poinçons de géométrie à double courbure a été étudiée dans le cadre de ces travaux. Plusieurs échantillons de comélé C/PPS (SCHAPPE) ont été, dans un premier temps, caractérisés en cisaillement plan à l'aide d'essais « Bias Extension Test » pour déterminer l'angle de cisaillement au blocage. Des essais de drapabilité sur des pièces à géométrie type « double courbure » ont été ensuite menés afin de déterminer les champs de déformation obtenus par stéréo-corrélation d'images. Suivant les géométries étudiées, l'évolution du champ de déformation au cours de l'emboutissage du semi-produit a permis de valider la technique de mesure de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images. Une campagne expérimentale de consolidation est en cours afin d'évaluer l'influence de la déformation en cisaillement plan sur les propriétés mécaniques finales de la pièce composite.

### Abstract

Out-of-plane deformation of a CF/PPS textile preform on double curvature geometry mold has been studied. Firstly, several commingled C/PPS (SCHAPPE) have been characterized with Bias Extension Tests to determine locking shear angle. Drapability tests have been performed on double curvature geometry mold in order to get deformation field by 3D digital image correlation. Strain field evolution captured by 3D-DIC with two mold setups has been validated for two molds geometries. The manufacturing of deformed laminates is in progress to assess the influence of in plane shear deformation on the mechanical properties of the final composite parts.

**Mots Clés :** Préforme textile, Comélé, Thermoplastique, Stéréo-corrélation, Déformation hors-plan, Bias-test

**Keywords :** Textile preform, Commingled, Thermoplastic, 3D digital image correlation, Out-of-plane deformation, Bias-test

## 1. Introduction

L'introduction des matériaux composites est étudiée depuis plusieurs années par les industriels 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 de polymère par voie de comélagage ou de cotissage afin d'optimiser la déformabilité du tissu lors de la mise en forme et de la consolidation de la pièce composite. Leurs mises en forme conduisent, du fait de leurs comportements non-linéaire en cisaillement plan, à des rigidifications locales des préformes en fonction de la géométrie [1]. La santé matière ainsi que les performances mécaniques de la pièce composites en sont donc impactés. Des essais de mise en forme de préformes textiles sur des géométries non développables permettent d'analyser le comportement en déformation du semi-

produit et d'établir des stratégies de préparation du tissu à draper en vue d'optimiser la qualité finale de la pièce composite. Plusieurs travaux scientifiques se sont intéressés à l'optimisation de la mise en forme de renforts secs et sur l'apparition de défauts à travers le choix et le dimensionnement des serres-flans utilisés pour forcer le drapage [2]. Généralement, la mesure de la déformation d'un renfort tissé lors d'un essai de drapage se fait essentiellement par des méthodes de corrélations d'images (méthode limitée à l'étude des déformations plan) et le suivi de marqueurs [3].


L'objectif de ces travaux est d'évaluer la déformation d'un tissu comélé C/PPS lors de son drapage sur une géométrie non-développable (de type double courbure) en utilisant un suivi du champ de déformation en cisaillement par des bancs de stéréo-corrélation d'images.

Une caractérisation du semi-produit par essai Bias Extension Test a permis d'évaluer son comportement en cisaillement plan [4], [5]. Des essais de drapabilité avec mesure de la déformation par stéréo-corrélation d'images ont été effectués sur deux géométries de moule. Les calculs des déformations en cisaillement en tout point de la surface du renfort ont permis de faire le lien avec les essais de caractérisation. De plus, de par cette technique de mesure, il est possible de suivre au cours d'un essai de drapage l'évolution des déformations en cisaillement et d'identifier les zones fortement sollicitées.

## 2. Méthode

### 2.1 Présentation du semi-produit

L'ensemble des essais présentés dans ces travaux ont été effectués avec un tissu comélé SCHAPPE C/PPS (Fig. 1). Le tableau suivant (Tab. 1) présente les propriétés de ce semi-produit.

| Comélé SCHAPPE C/PPS                 |           |  |
|--------------------------------------|-----------|--|
| Référence                            | 90163P    |  |
| Armure                               | Satin 5   |  |
| Chaîne / Trame                       | 3 K HS    |  |
| Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> ) | 469       |  |
| Contexture (fil/cm)                  | 7,5 x 7,5 |  |

Tab. 1. Propriété du semi-produit comélé SCHAPPE C/PPS

### 2.2 Caractérisation en cisaillement plan du tissu : Bias Extension Test

Le tissu a été caractérisé, dans un premier temps, en cisaillement plan à l'aide de l'essai « Bias Extension Test ». Ce dernier consiste à mettre en tension une éprouvette rectangulaire de tissu (300x100 mm<sup>2</sup>) dont les réseaux chaînes et trames sont orientés à +/- 45° par rapport à la direction de sollicitation (Fig. 1).

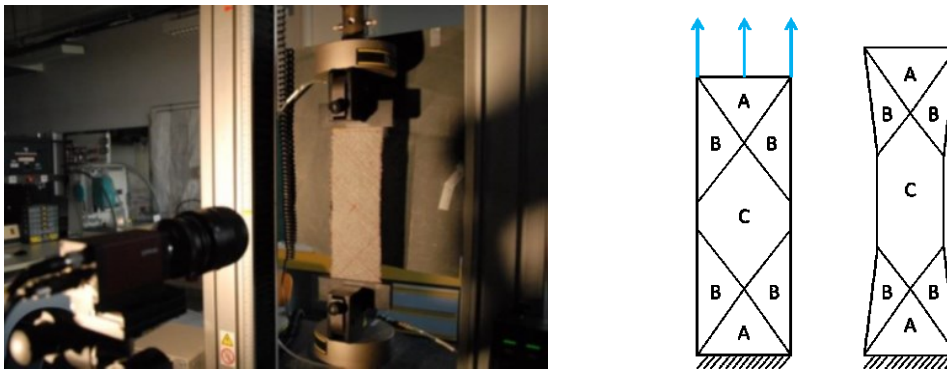


Fig. 1. Dispositif du "Bias Extension Test"

La capacité de déformabilité du tissu est ensuite caractérisée par l'angle de cisaillement, en particulier celui défini comme « bloquant » correspondant au changement du comportement mécanique linéaire/ non-linéaire du spécimen. Un banc de mesure optique est utilisé pour mesurer le champ de déplacement et obtenir ensuite les champs de déformations principales. La détermination de l'angle de cisaillement dans la zone de cisaillement pure est fonction du rapport de ces déformations principales ( $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ ) (Eq. 1) et est calculé à partir du logiciel ICASOFT [6], [7].

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

Afin d'assurer une « bonne » corrélation, un mouchetis blanc a été appliqué sur chaque éprouvette « Bias Test ». Le diamètre moyen des tâches est de l'ordre de 2,0 mm (Fig. 2).



Fig. 2. Tissu Comélé SCHAPPE C/PPS avec mouchetis

Des essais Bias test sur des renforts textiles avec et sans mouchetis ont été effectués afin d'évaluer l'impact des tâches dans le comportement en déformation du tissu. Les courbes effort de cisaillement ( $F_{sh}$ ) en fonction de l'angle de cisaillement ( $\gamma$ ) (Eq. 2) ont été tracées afin d'effectuer cette comparaison [8].

$$F_{sh}(\gamma) = \frac{F D}{l(2D - l) \cos \gamma} \left( \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - \frac{l \cos \frac{\gamma}{2}}{(2D - l) \cos \gamma} F_{sh} \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

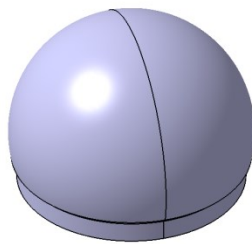
### 2.3 Mesure de la déformabilité du semi-produit à l'aide d'essais de drapabilité

Les essais de drapabilité ont été effectués à l'aide d'un pilote d'emboutissage initialement prévue pour de la déformation incrémentale de tôles métalliques [9]. Un poinçon, piloté suivant la direction z, vient déformer par le bas le renfort textile (Fig. 3).

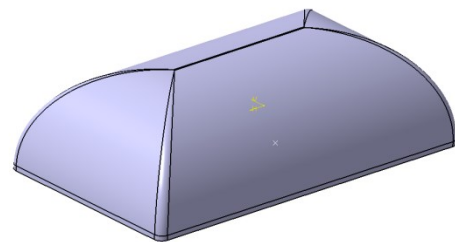


Fig. 3. Dispositif d'emboutissage de préformes textiles avec instrumentation par stéréo-corrélation

Dans le cadre de ces travaux, deux géométries de poinçons ont été étudiées : un hémisphère et une boîte aux bords arrondis s'inspirant de pièces semi-structurales aéronautiques (Fig. 4). Un dispositif serre-flan a été utilisé afin d'assurer un contact optimal entre le tissu et le poinçon. Sa conception et la configuration de la pré-charge appliquée sur la préforme textile a fait l'objet d'une phase de validation avec la réalisation d'un plan d'expériences. Les paramètres évalués sont les masses pour appliquer la pré-charge du renfort textile (1,6 Kg et 6,4 Kg), leurs répartitions sur le système, la vitesse de drapage (2 mm/s et 5 mm/s), le frottement entre le serre-flan et le tissu et l'orientation du tissu lors du drapage ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ).



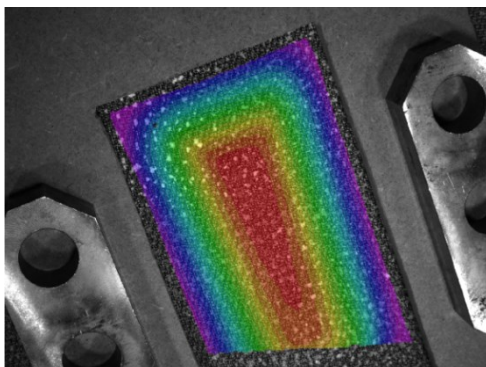
(a)  $R = 61,5$  mm



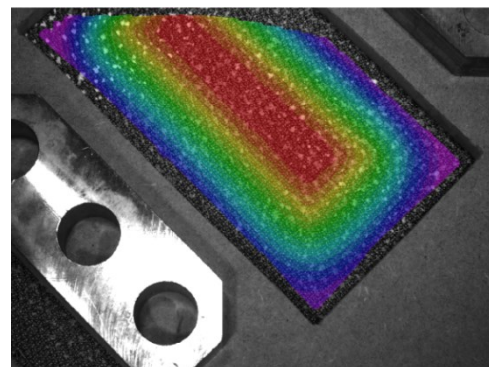
(b)  $L = 220$  mm ;  $l = 125$  mm ;  $h = 65$  mm

Fig. 4 (a) Poinçon hémisphérique - (b) Poinçon parallélépipédique avec congés d'arrête  $R = 5$  mm

Une instrumentation par stéréo-corrélation installée dans la partie supérieure du pilote permet de mesurer les champs de déplacement en tout point du semi-produit (Fig. 1). Un traitement d'image avec le logiciel VIC 3D permet de calculer les champs de déformations à chaque instant du drapage. Pour suivre la déformation hors-plan de toute la surface, deux systèmes de stéréo-corrélation ont été utilisés (Fig. 5). La surface complète est obtenue par le recalage des deux surfaces acquises par les deux bancs de stéréo-corrélation réalisé à l'aide de l'algorithme « Iterative Closest Point ». Le calcul de l'angle de cisailement est également fondé sur (Eq. 1) en prenant comme hypothèse le fait que les éléments de surface sont suffisamment petits par rapport à la courbure de la géométrie.



(a)



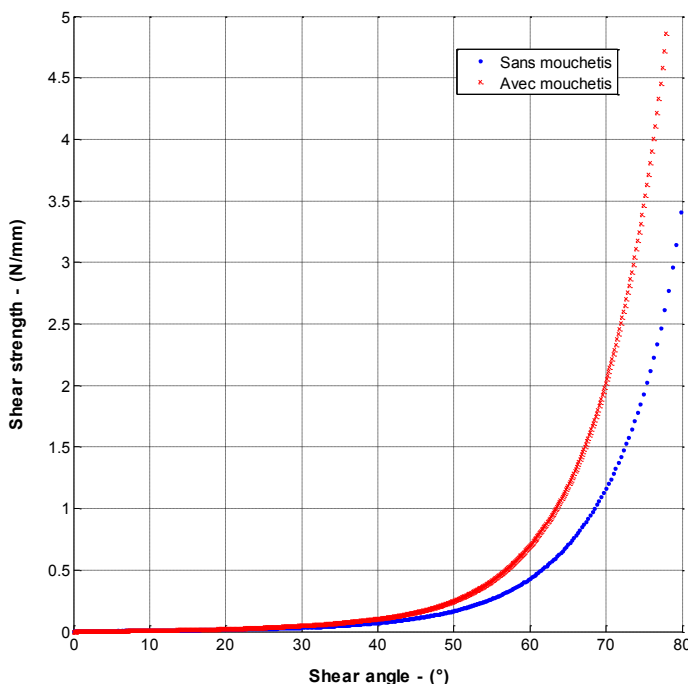
(b)

Fig. 5 Champs de position suivant  $z$  : (a) Système 1 - (b) Système 2

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Résultats Bias Test

Le comportement du renfort textile en cisaillement est non-linéaire ; comme le montre la (Fig. 6) représentant l'effort de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement dans la zone centrale (Zone C) déterminé par l'approche géométrique. La première partie linéaire caractérise une déformation du tissu sous des efforts relativement faibles correspondant à une rotation libre des nœuds de croisements des réseaux chaîne et trame. La mise en contact latéral des mèches au cours de l'essai entraîne une rigidification en cisaillement du renfort textile. L'intervalle définissant ce changement de comportement est estimé par l'angle de cisaillement au blocage. L'approche cinématique nous permet d'évaluer cet angle aux alentours de  $49^\circ \pm 2,9^\circ$  pour les éprouvettes textiles avec mouchetis. Des essais sur tissu sans mouchetis ont été effectués afin de valider l'utilisation de ce revêtement dans les essais de drapabilité. L'angle de blocage est estimé à  $52^\circ \pm 2,2^\circ$  (Tab. 2) dans ce cas. Les différences entre les deux configurations peuvent être liées au mouchetis qui rigidifie en surface le tissu et abaisserait la valeur de l'angle de cisaillement au blocage. Elles peuvent également s'expliquer par les imprécisions de mesures de l'essai Bias Test notamment liées à la préparation des éprouvettes. Néanmoins, la dispersion des résultats pour les éprouvettes mouchetés est comparable à celle des éprouvettes sans mouchetis. Par conséquent, l'effet du mouchetis sur le comportement en déformation du tissu peut être négligé.



|  | Avec mouchetis           | Sans mouchetis          |
|--|--------------------------|-------------------------|
| Angle de cisaillement au blocage – [°]     | 48,9<br>( $\pm 2,9$ )    | 52,0<br>( $\pm 2,2$ )   |
| Effort de cisaillement au blocage – [N/mm] | 0,445<br>( $\pm 0,137$ ) | 0,151<br>( $\pm 0,05$ ) |

Tab. 2 Résultats Bias Test pour le comélé C/PPS basés sur cinq échantillons

Fig. 6 Effort de cisaillement vs angle de cisaillement

La (Fig. 7) présente le champ d'angle de cisaillement obtenu à partir d'un système de corrélation d'image (DIC). La qualité du mouchetis est suffisante (Fig. 8) pour mesurer le champ de déplacement sur l'ensemble de l'éprouvette et pour évaluer l'évolution du champ de déformation en cisaillement au cours de l'essai.

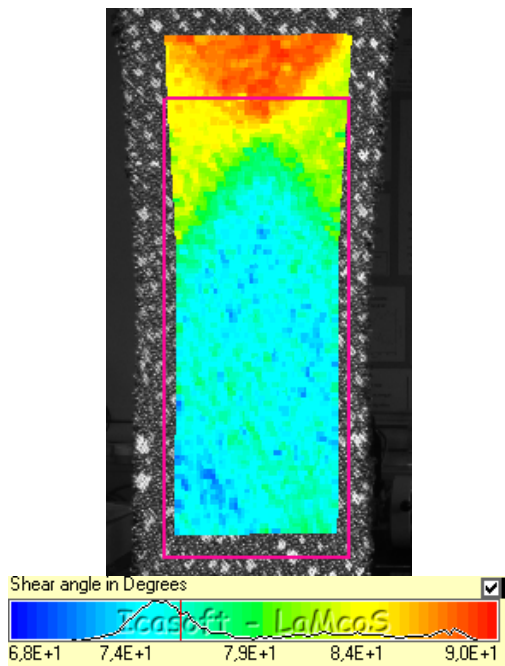


Fig. 7 Champs d'angle de cisaillement d'une préforme C/PPS avec mouchetis

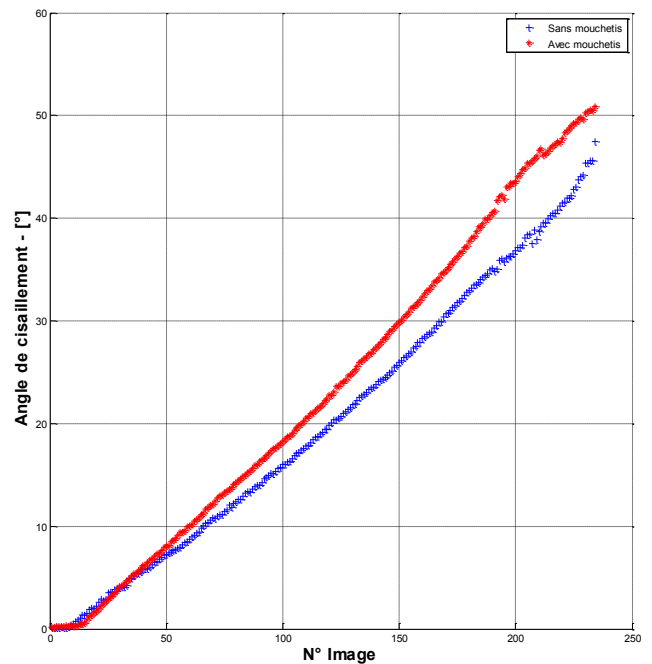


Fig. 8 Evolution de l'angle de cisaillement avec et sans mouchetis dans la zone centrale de l'éprouvette Bias Test

### 3.2 Résultats des essais de drapabilité

Deux géométries de poinçons ont été utilisées pour draper le comélé C/PPS. Dans le cas de l'hémisphère, les champs de déformation en cisaillement (déformation de Cauchy-Green) visibles en (Fig. 9) présentent deux plans de symétrie contenant l'axe z et centrés à l'origine du poinçon. Les valeurs extremum obtenues pour les déformations en cisaillement sont localisées aux extrémités de la demi-sphère. Dans les zones de mesure (N°1 & N°2), on observe une augmentation en valeur absolue de la déformation lors du drapage avec une stabilisation vers 0,6 (Fig. 10).

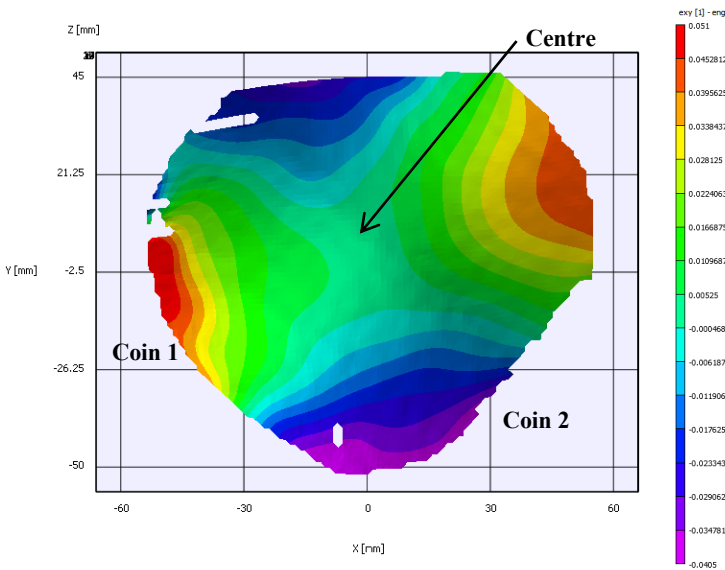


Fig. 9 Champ de déformation en cisaillement  $\epsilon_{xy}$  - Hémisphère

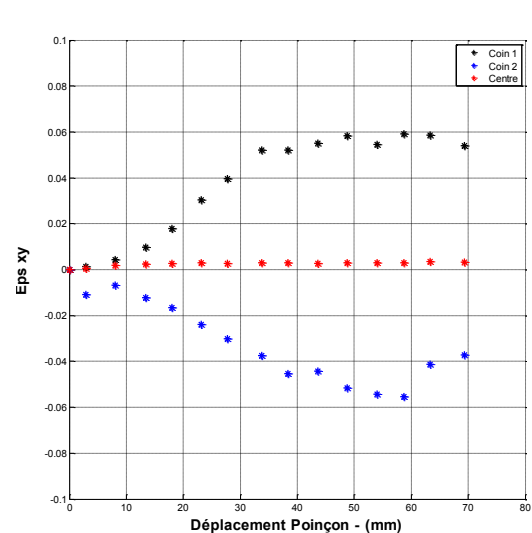


Fig. 10 Evolution de  $\epsilon_{xy}$  au cours du drapage

Pour le cas de la boîte, des essais de répétabilité des mesures de champs de déplacement ont été effectués. Le même essai, défini pour des conditions opératoires et une configuration serre-flan fixe, a été répété six fois. L'erreur relative entre deux mesures est de 2,7% maximum.

L'étude du serre-flan montre que les configurations utilisées, notamment l'utilisation de masses et de leurs répartitions pour assurer une pré-charge pour contraindre le tissu, a une influence sur le résultat de drapage. Néanmoins, son impact dans la mesure des déformations par stéréo-corrélation d'images reste faible.

En partant d'une configuration serre-flan défini, les zones les plus déformées sont localisées aux extrémités de la boîte (Fig. 11). On constate une asymétrie dans la localisation des champs de cisaillement avec des zones à déformation positive et des zones à déformation négative. Au cours du drapage, les valeurs absolues des déformations en cisaillement augmentent aux extrémités de la boîte (Coin 1 & 2) avec une stabilisation autour de 0,1. Les niveaux de déformations dans la partie centrale de la géométrie restent faibles tout au long de l'essai (Fig. 12).

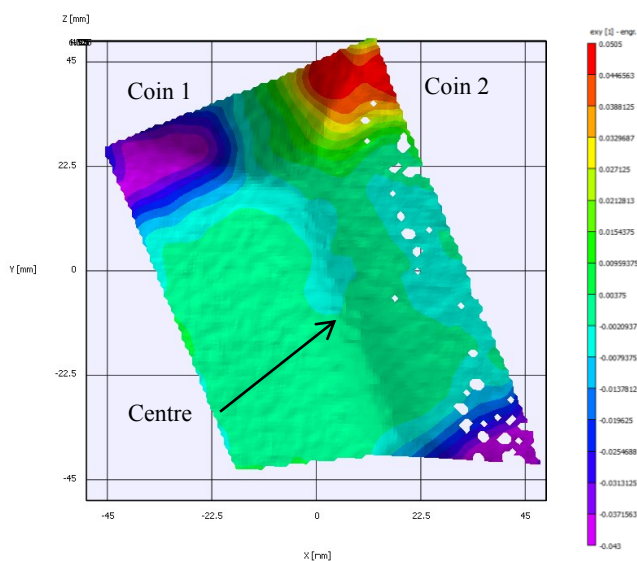


Fig. 11 Champ de déformation en cisaillement  $\epsilon_{xy}$

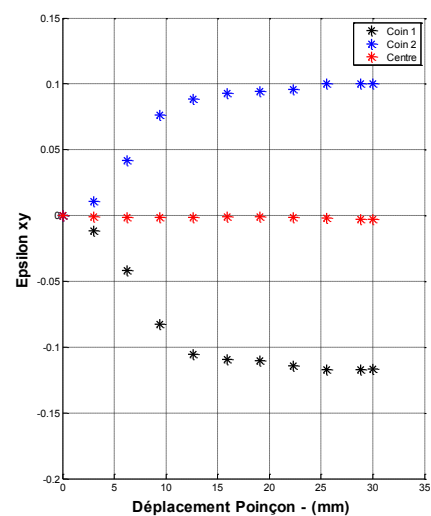


Fig. 12 Evolution de  $\epsilon_{xy}$  au cours du drapage

### 3.3 Poursuite de l'étude

Les essais de drapabilité nous ont permis d'obtenir les champs de déformation en cisaillement de la préforme textile à chaque instant de l'essai de drapabilité. Par la suite, ces champs de déformation seront utilisés pour obtenir les champs d'angle de cisaillement et ainsi avoir une première correspondance avec les essais de caractérisation Bias Test. La confrontation de ces deux phases permettra d'identifier le mode de comportement en déformation du renfort textile à l'échelle macroscopique en vérifiant notamment si le tissu s'est rigidifié localement. Une inspection visuelle par mesure ponctuelle des angles de cisaillement des préformes textiles déformées sera également effectuée afin de valider ces conclusions.

Dans la suite de ces travaux, une campagne de mise en œuvre par consolidation de plaques composites avec une déformation initiale en cisaillement sera effectuée afin d'évaluer son influence sur les propriétés mécaniques finales de la pièce. Une modélisation de la déformation textile est en cours de développement afin de simuler le drapage forcé de renfort textile et de confronter le résultat numérique et la mesure de l'angle de cisaillement à chaque instant de l'essai.



## Conclusion

Plusieurs échantillons de comés C/PPS ont été caractérisés mécaniquement par essais Bias Test afin d'obtenir l'angle de cisaillement au blocage et de valider la mesure de champs par corrélation d'images. Par la suite, des essais de drapage couplés à une instrumentation par stéréo-corrélation d'images ont permis de suivre au cours de l'essai les champs de déformation en cisaillement sur toute la surface de la géométrie.

De prochains essais de mise en œuvre de plaques composites permettront d'évaluer l'influence de la déformation textile en cisaillement plan sur les propriétés mécanique du composite consolidé. Un modèle mécanique sera établi pour faire le lien entre les déformations mesurées obtenues lors de la mise en forme du tissu et les propriétés finales de la pièce composite.

## Remerciements

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

## Références

- [1] S. V. Lomov, P. Boisse, E. Deluycker, 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] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, and D. Duriatti, "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.
- [3] 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.
- [4] W. Lee, J. Padvoiskis, J. Cao, E. De Luycker, P. Boisse, F. Morestin, J. Chen, and J. Sherwood, "Bias-extension of woven composite fabrics," *Int. J. Mater. Form.*, pp. 865–898, 2008.
- [5] W. Peng, H. Nahiène, B. Philippe, C. Philippe, and L. David, "Thermo-Mechanical Behavior of Stretch-Broken Carbon Fiber and Thermoplastic Resin Composites During Manufacturing," *Polym. Compos.*, p. 10, 2014.
- [6] E. De Luycker, "Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks," Thèse, INSA Lyon, 2009.
- [7] F. MORESTIN, S. TOUCHAL, and P. VACHER, "ICASOFT." INSA Lyon, Lyon, 2008.
- [8] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, and F. Dell'Isola, "The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: a review," *Int. J. Mater. Form.*, pp. 1–20, 2016.
- [9] N. DECULTOT, "Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement" Thèse, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 2009.