



**HAL**  
open science

## Mesures de champ pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés

François Dumont, Gilles Hivet, René Rotinat, Jean Launay, Philippe Boisse,  
Pierre Vacher

► **To cite this version:**

François Dumont, Gilles Hivet, René Rotinat, Jean Launay, Philippe Boisse, et al.. Mesures de champ pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés. *Mechanics & Industry*, 2003, 4 (6), pp.627-635. 10.1016/j.mecind.2003.09.004 . hal-00020295

**HAL Id: hal-00020295**

**<https://hal.science/hal-00020295>**

Submitted on 17 Feb 2018

**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.

# Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés

## Field measurements for shear tests on woven reinforcements

François Dumont <sup>a</sup>, Gilles Hivet <sup>a</sup>, René Rotinat <sup>a</sup>, Jean Launay <sup>a,\*</sup>, Philippe Boisse <sup>a</sup>,  
Pierre Vacher <sup>b</sup>

<sup>a</sup> LMSP, UMR CNRS, ENSAM-ESEM, 8, rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex, France

<sup>b</sup> LMéca, ESIA, 5, chemin de Bellevue, BP 806, 74016 Annecy cedex, France

Reçu le 29 avril 2002 ; accepté le 15 juillet 2003

### Résumé

Le comportement mécanique des tissus secs utilisés comme renforts de structures composites est étudié ici en utilisant une méthode optique pour la mesure des déformations lors d'essais de cisaillement au cadre. L'intérêt de cette technique réside notamment dans l'absence de contact avec l'éprouvette. L'utilisation d'objectifs adaptés permet des mesures de champ au niveau de l'interaction des mèches (à l'échelle mésoscopique) et au niveau de l'éprouvette (à l'échelle macroscopique). Des prises de vues de l'éprouvette, obtenues pour des incidences symétriques, permettent également des mesures du déplacement transversal du tissu, par stéréoscopie. Il est ainsi possible d'observer en détail ce qui se passe au cours de l'essai sur toute l'éprouvette, de vérifier des hypothèses sur le comportement des renforts tissés et d'obtenir des informations pour expliquer les différentes phases qui conduisent à la formation de plis.

### Abstract

The mechanical behaviour of dry woven fabrics as composite reinforcements is investigated using optical strain measurements during pure shear tests performed on a picture frame device. This optical measurement technique has many advantages, including the absence of contact with the sample. A change in lens allows measurements at different scales, from a whole sample (macroscopic measurement), to a few unit patterns only (mesoscopic measurement). On top of that, the out of plane displacement may be obtained by a stereoscopic method, using two symmetric points of view. Thus, detailed description of a pure shear test may be conducted, leading us to explain the forming of wrinkles within the woven sample, concluding the test.

### Introduction

Les tissus techniques, notamment à base de fibres de verre ou de carbone, présentent un grand intérêt pour des applications industrielles en raison de leurs performances mécaniques. Ces performances permettent de les intégrer comme renforts efficaces dans la réalisation de pièces qui peuvent être obtenues par la mise en forme du tissu sec. C'est par exemple la première étape du procédé de fabrication RTM (Resin Transfer Moulding). La simulation de cette mise en forme permet de préparer la fabrication de pièce. Pour cela, il est nécessaire de connaître le comportement mécanique

du matériau utilisé. Des essais de traction biaxiale [1] et de cisaillement plan [2] constituent une partie de la base expérimentale. Un tissu est une structure hétérogène, de faible rigidité en flexion, constituée d'un entrelacement de mèches (selon les directions trame et chaîne), composées elles-même d'un grand nombre de fibres de quelques micromètres de diamètre. La mise au point de modèles de comportement analytiques [3] et numériques [4] contribuent à une meilleure compréhension des phénomènes intervenant lors des sollicitations mécaniques des renforts tissés ; elle peut permettre de réduire les mesures nécessaires à l'obtention des courbes de comportement [5] et de mettre en évidence les paramètres les plus influents. La contribution de résultats d'essais de qualité pour la mise au point de ces modèles est très importante. L'utilisation de méthodes de mesure sans contact, no-

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : jean.launay@univ-orleans.fr (J. Launay).

## Nomenclature

$\gamma$  angle de cisaillement du cadre ( $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ )  
 $u(x, y)$  et  $v(x, y)$  composantes du déplacement  
 $E_{xy}$  déformation de Green–Lagrange

$EL_{xy}$  déformation logarithmique  
Embuvage  $((\text{longueur du fil} - \text{longueur du tissu}) / \text{longueur du tissu}) \times 100$

tamment les méthodes optiques, présentent un intérêt particulier pour ces essais [6]. En changeant de matériel optique, des mesures de champ aux échelles mésoscopique (celle de la mèche) et macroscopique (celle de l'éprouvette), permettent de vérifier le bon fonctionnement de l'essai, de fournir des résultats sur le comportement mécanique et de valider les résultats des modèles. Dans cet article, on examine l'apport de ces méthodes de mesure au cas des essais du cisaillement plan par la méthode du cadre.

## 1. Mécanique des renforts tissés

### 1.1. Essais mécaniques

La simulation de la mise en forme des renforts tissés utilisés pour la fabrication de pièces par le procédé RTM permet de s'assurer de la qualité du produit final, en prévoyant notamment les efforts dans les mèches, les variations angulaires, ainsi que l'apparition de plis. Des hypothèses simplificatrices ont permis de bâtir des éléments finis spécialisés pour cette simulation [7]. Elles conduisent à considérer que les mèches ne travaillent qu'en traction et qu'elles tournent au niveau de leur point de contact. Cet angle de rotation est limité à une valeur au-delà de laquelle, la mise en forme ne peut se poursuivre sans l'apparition de plis. Les performances mécaniques des tissus utilisés, sont obtenues à partir d'essais de traction biaxiale et de cisaillement. Les essais de traction biaxiale donnent les relations entre les tensions dans les mèches (chaîne et trame) et leurs déformations, sous forme de réseaux de courbes indexés par le rapport des déformations chaîne-trame. Les essais de cisaillement per-

mettent notamment d'obtenir l'angle de rotation limite avant l'apparition des plis.

Les essais de traction biaxiale sont réalisés à partir de carrés de tissus en reprenant les efforts suivant les directions chaîne et trame [8]. Une solution plus intéressante consiste à réaliser des éprouvettes en croix en détissant une partie du tissu. La mesure des déformations sur la zone centrale peut s'effectuer d'une façon globale, en tenant compte des déformations des fils de liaison [8].

Les essais de cisaillement sont souvent réalisés par l'intermédiaire d'un cadre articulé [9]. Les mesures effectuées sont alors l'angle de déformation du cadre et la force exercée sur la diagonale. Ce dispositif peut être adapté pour prendre en compte l'effet de la tension des mèches et donc du couplage entre le cisaillement et la traction biaxiale. D'autres essais [12] ont également été proposés, comme le cisaillement d'un rectangle de tissu fixé entre deux plaques rigides qui se déplacent en sens opposé, parallèlement l'une à l'autre. Dans tous les cas se pose le problème de la vérification de la qualité de l'essai. Notre analyse s'appuie sur l'observation d'images de l'éprouvette au cours des essais et de mesures en utilisant une méthode de corrélation d'images de mouchetis pour caractériser les champs de déplacement et de déformation.

### 1.2. Modèles de comportement pour les renforts tissés

La modélisation des essais en se plaçant au niveau des mèches présente l'intérêt de mieux faire comprendre les mécanismes qui entrent en jeu lors des sollicitations. La mèche est considérée comme un solide homogène, représenté géométriquement par un tuyau de section variable. Le renfort est

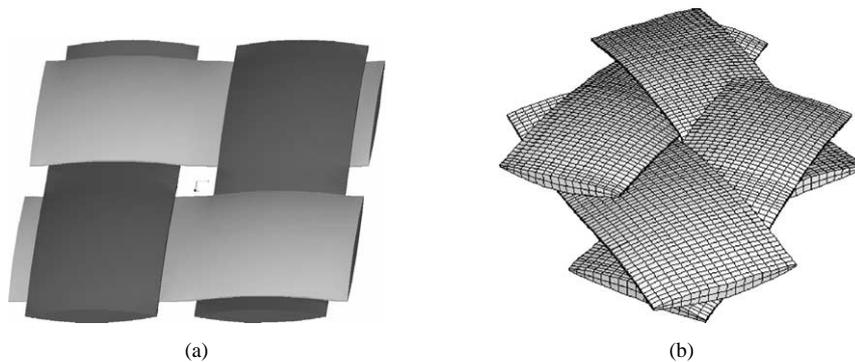


Fig. 1. Modèles mésoscopiques de taffetas.

Fig. 1. Plain weave mesoscopic models.

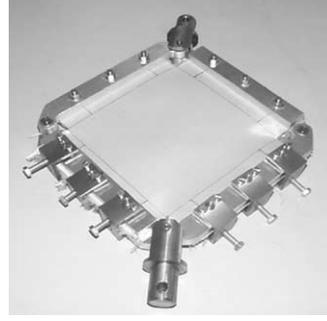
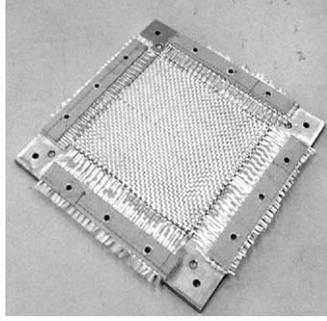


Fig. 2. L'éprouvette et le dispositif de cisaillement.

Fig. 2. Sample and shear frame.

composé de l'entrelacement de ces solides. A partir d'hypothèses sur la forme des mèches, un modèle géométrique 3D cohérent a pu être développé [9]; on en a représenté un exemple dans le cas d'un taffetas (Fig. 1a). Ce modèle géométrique nécessite la mesure des caractéristiques géométriques du renfort : largeur, épaisseur, embuvage (lié à l'ondulation) et densité de mèches.

Deux approches mécaniques exploitent ce modèle géométrique : une approche analytique [1], et une approche par éléments finis 3D (Fig. 1b), [1,9,14]. Pour identifier et valider ces deux modèles mécaniques il faut connaître les lois de comportement des mèches en traction uniaxiale et des renforts tissés en traction biaxiale et en cisaillement. Les mesures par contact ne sont guère possibles en raison de la très grande flexibilité des mèches et des tissus.

## 2. Essais de cisaillement au cadre sur des renforts tissés

L'éprouvette forme une croix contenue dans un carré de  $240 \times 240 \text{ mm}^2$ . Des talons composites kevlar/époxy sont collés de part et d'autre des quatre cotés pour donner des conditions aux limites plus fiables et plus homogènes. Le tissu est échancré de 20 mm aux quatre sommets (Fig. 2).

L'éprouvette est placée dans un cadre articulé sollicité en traction suivant une diagonale. Le schéma de principe de l'essai est représenté sur la Fig. 3.

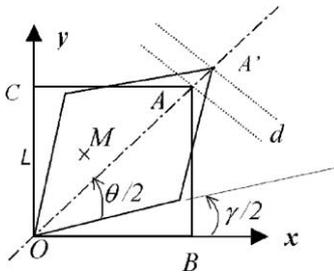


Fig. 3. Principe de l'essai de cisaillement au cadre.

Fig. 3. Frame shear test principle.

L'angle  $\gamma$  est lié au déplacement,  $d$ , de la diagonale du cadre par :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}L + d}{2L} \right) \quad (1)$$

La longueur du coté du cadre  $L$  vaut ici 240 mm.

Les composantes  $u(x, y)$  et  $v(x, y)$  du déplacement d'un point  $M$ , de coordonnée  $x, y$ , contenu dans l'éprouvette définie par le carré OBAC valent :

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \left( \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - 1 \right) x + \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) y \\ v(x, y) &= \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) x + \left( \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - 1 \right) y \end{aligned} \quad (2)$$

On en déduit le tenseur des déformations de Green-Lagrange  $E$ , dans la configuration initiale du cadre dont les axes sont alignés avec ceux du repère  $(O, x, y)$ .

$$E = \begin{bmatrix} E_{xx} = 0 & E_{xy} = \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ E_{yx} = \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\gamma}{2} & E_{yy} = 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La tension de l'éprouvette sur chaque coté du cadre est réglable (Fig. 3), ce qui permet d'étudier le couplage tension cisaillement [11].

## 3. Mesure des déformations par corrélation d'images

La mesure du champ de déplacement sur les renforts tissés lors d'essais de cisaillement s'effectue à partir d'images numérisées par des caméras CCD Basler, de résolution  $1300 \times 1030$  pixels, codés sur une échelle de 256 niveaux de gris. Les pixels sont carrés. Un logiciel de corrélation d'images, développé à l'ESIA d'Annecy, permet de faire les traitements adéquats [13]. La surface des éprouvettes est recouverte d'un mouchetis de trois couleurs différentes à l'aide d'un aérographe, permettant d'avoir un spectre des gris le plus large possible. La taille des points de peinture est d'environ 0,1 mm. L'éclairage est obtenu à partir d'une lampe néon torique à haute fréquence (85 kHz) de façon à éliminer les scintillements, les ombres et les reflets. L'utilisation d'objectifs télécentriques permet de s'affranchir lors des essais, des mouvements de l'éprouvette perpendiculairement à

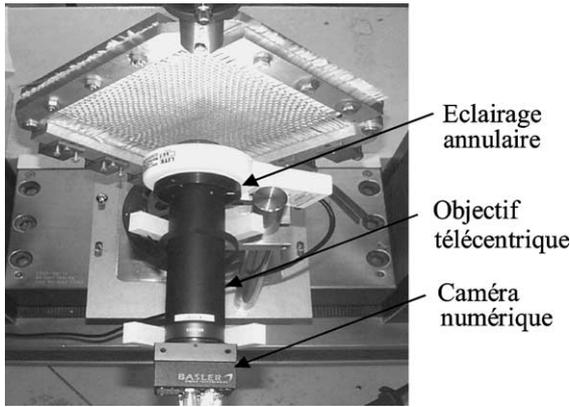


Fig. 4. Schéma du montage.  
Fig. 4. Experimental test device.

son plan, conduisant à des imprécisions qui pourraient être importantes. Les distorsions de l'image sont de plus très limitées. Plusieurs types d'objectifs sont ainsi utilisés pour visualiser des champs de tailles différentes sur l'éprouvette (Tamron 25 mm, et JENmetar 0,13×/12, et 0,7×/12).

On obtient ainsi des résultats à l'échelle macroscopique (au niveau de l'éprouvette) ou à l'échelle mésoscopique (au niveau de la maille). Le logiciel fournit à la fois le champ de déplacement et, par dérivation, les composantes du tenseur des déformations de Green-Lagrange.

En prenant des images de l'objet sous deux angles symétriques par rapport à la normale à l'éprouvette, on peut mettre en évidence par effet stéréoscopique des déplacements transversaux de la surface de l'éprouvette.

#### 4. Analyse des résultats d'un essai de cisaillement

##### 4.1. Résultats globaux

Les mesures sont réalisées avec un objectif permettant de voir la totalité de l'éprouvette. Le champ de déplacement mesuré, représenté sans la valeur moyenne par superposition avec l'éprouvette dans sa position initiale sur la Fig. 5, correspond très bien à celui que l'on peut calculer à partir de la cinématique du cadre; il est caractéristique d'une sollicitation de cisaillement pur. Les axes principaux de déformation concordent avec les diagonales du cadre.

La Fig. 6 montre l'homogénéité du champ de déformation obtenue sur une zone de 100 × 100 mm<sup>2</sup> de l'éprouvette. On prouve ainsi l'homogénéité du champ de déformation de cisaillement au sein de l'éprouvette à l'échelle globale, même dans le cas d'un matériau très hétérogène comme un tissu de fibres.

Pour le tracé des courbes caractéristiques de l'essai, ce sont les valeurs moyennes sur cette zone qui sont prises en compte. Comme les déplacements sont importants, il n'est pas possible de faire tous les calculs à partir de la configuration de départ; il est donc nécessaire d'utiliser les déformations logarithmiques,  $E_{ij}$ , afin de tenir compte des

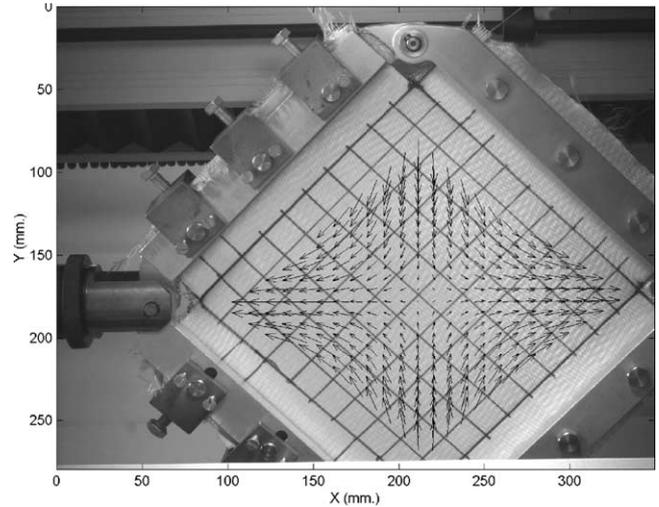


Fig. 5. Champ de déplacement expérimental à l'échelle macroscopique.  
Fig. 5. Experimental displacement field at macroscopic scale.

#### Déformation $E_{xy}$ ( $\times 10000$ )

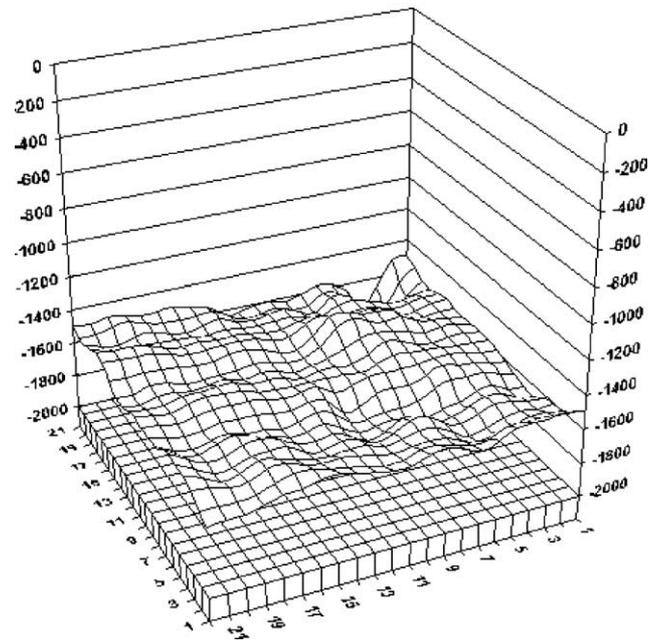


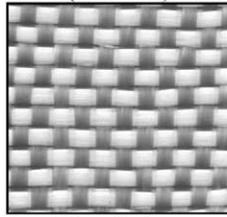
Fig. 6. Champ de déformation mesuré sur l'éprouvette.  
Fig. 6. Measured strain field.

configurations intermédiaires et tout représenter par rapport à la configuration non déformée.

$$EL_{xy} = \frac{1}{2} \ln(2E_{xy} + 1) \quad (4)$$

L'homogénéité ainsi vérifiée permet de déduire de ces mesures les courbes de comportement global en cisaillement de plusieurs types de renforts tissés. On présente ici le cas d'un renfort de fibres de verre, armure taffetas. La courbe (Fig. 7) représente l'effort nécessaire pour imposer

Tissa+ 850.0600.02  
(Taffetas)



Densité surfacique :  
 $W_{\text{tissu}} = 600 \text{ g/m}^2$   
Densité linéique :  
 $W = 1200 \text{ Tex}$   
Largeur mèches  
 $L_{\text{trame}} = 3.2 \text{ mm}$   
 $L_{\text{chaîne}} = 3.1 \text{ mm}$

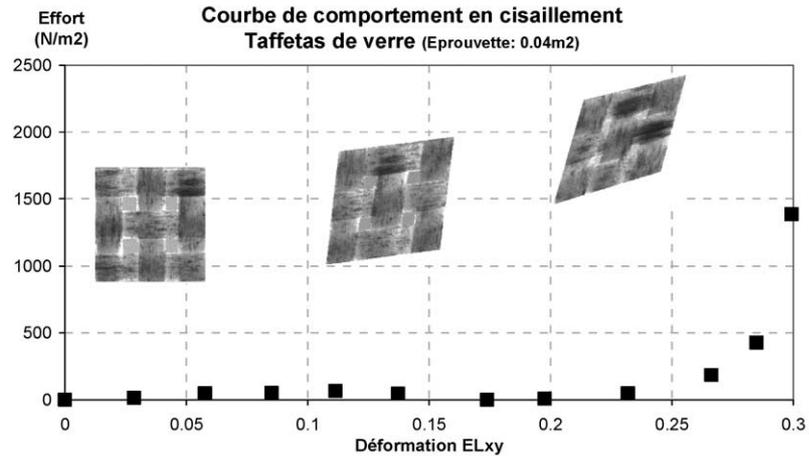


Fig. 7. Courbe de comportement en cisailment, obtenue par mesures optiques.

Fig. 7. Shear results obtained with optical measurements.

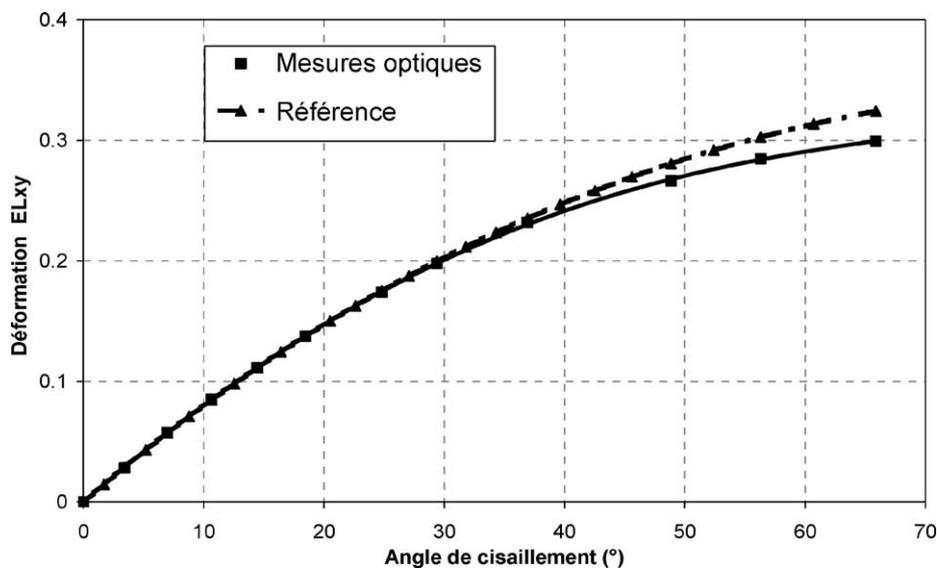


Fig. 8. Evolution de la déformation  $EL_{xy}$  globale mesurée par méthode optique, et solution de référence (donnée par l'Éq. (3)).

Fig. 8. Global strain component  $EL_{xy}$  measured with optical device, and reference solution (given by Eq. (3)).

le déplacement, à la vitesse de 10 mm/mn, en fonction de la déformation réelle moyenne.

Cette courbe est fortement non linéaire. Elle comporte 3 zones : un plateau de faible rigidité où les mèches glissent les unes par rapport aux autres et où les interstices entre elles se réduisent ; une zone de transition non-linéaire (débutant à  $EL_{xy} = 0,26$ ,  $\gamma = 41^\circ$ ) qui correspond à la mise en contact progressive des mèches parallèles ; et une zone à forte rigidité (débutant à  $EL_{xy} = 0,29$ ,  $\gamma = 50^\circ$ ) correspondant à la compression transverse des mèches et menant à un angle de blocage du renfort, avec finalement l'apparition de plis. Tous les interstices ont alors disparus. Le positionnement de ces deux étapes sur la courbe dépend du type de tissu (armure, densité, embuvage, largeur des mèches).

La comparaison de la mesure de déformation  $EL_{xy}$  obtenue par mesure optique à celle de référence, déduite

de la cinématique du cadre (Éq. (3)), est représentée sur la Fig. 8. Les deux courbes ne se superposent pas exactement en raison d'un écrasement des mèches près des bords du cadre que nous verrons plus loin.

On présente sur la Fig. 9 la courbe de comportement liant l'effort appliqué (adimensionné par rapport à la surface de l'éprouvette) aux déformations logarithmiques globales mesurées par méthode optique et à celles calculées à partir de l'Éq. (3), constituant la solution de référence.

#### 4.2. Mesures au niveau de l'interaction des mèches

On utilise maintenant un objectif permettant la visualisation de quelques mèches seulement. On peut observer différentes zones sur le cadre, en fonction de ce que l'on souhaite caractériser, grâce à un dispositif conçu au laboratoire.

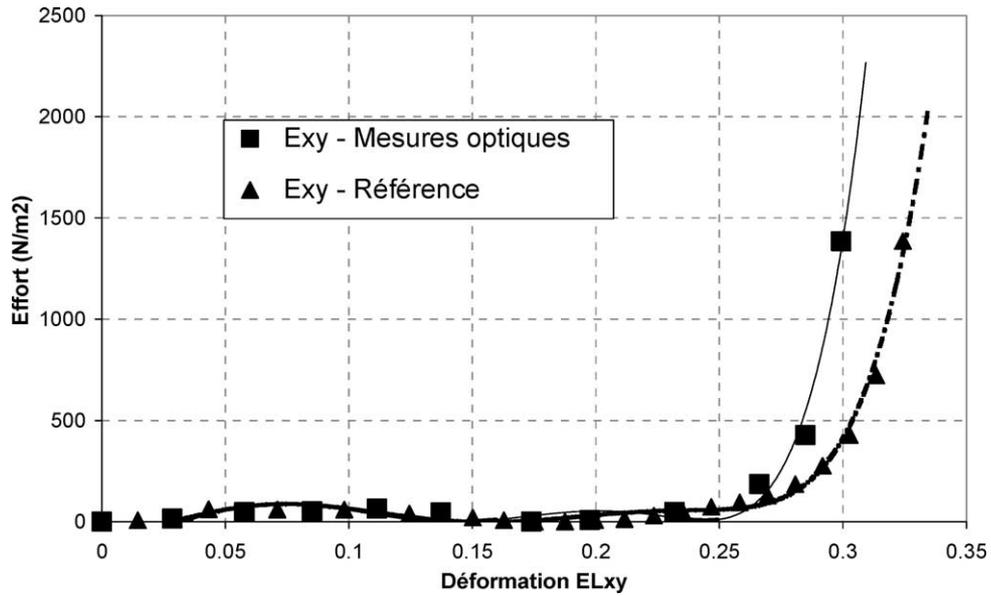


Fig. 9. Courbe de comportement en cisaillement, taffetas de verre (éprouvette 0,04 m<sup>2</sup>).

Fig. 9. Glass woven fabric shear behaviour.

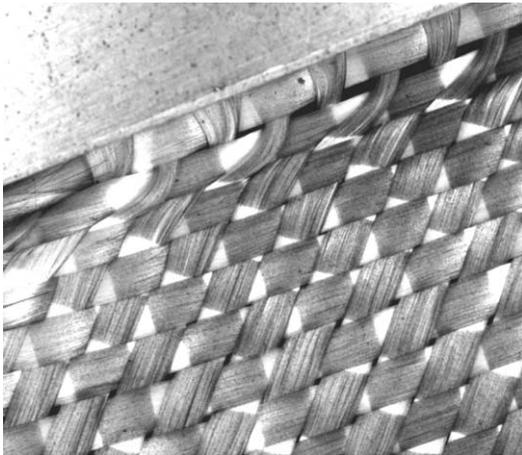


Fig. 10. Liaison des mèches sur le cadre.

Fig. 10. Frame-yarn connection.

#### 4.2.1. Rotation des mèches au niveau de la liaison avec le cadre

La liaison des mèches avec le cadre peut se faire de différentes façons. La Fig. 10, montre que celles qui sont perpendiculaires au cadre sont fortement tordues au cours de l'essai. Ce phénomène varie avec l'angle de cisaillement  $\gamma$ . Il explique la différence de cinématique observée Fig. 7, en modifiant le déplacement imposé par le cadre à l'éprouvette.

#### 4.2.2. Rotation des mèches dans la zone centrale de l'éprouvette

La Fig. 11 montre deux zones d'intérêt dans la partie centrale de l'éprouvette incluant chacune une mèche de trame et une de chaîne.

Un calcul de corrélation est effectué sur ces zones d'intérêt. On représente les vecteurs déplacement obtenus pour un angle de cisaillement de 25°, sans sa valeur moyenne et

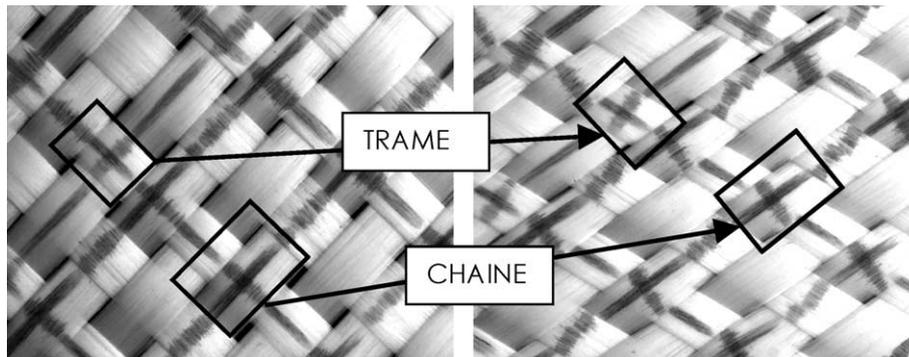


Fig. 11. Images de la partie centrale de l'éprouvette en cisaillement.

Fig. 11. Shear sample central part pictures.

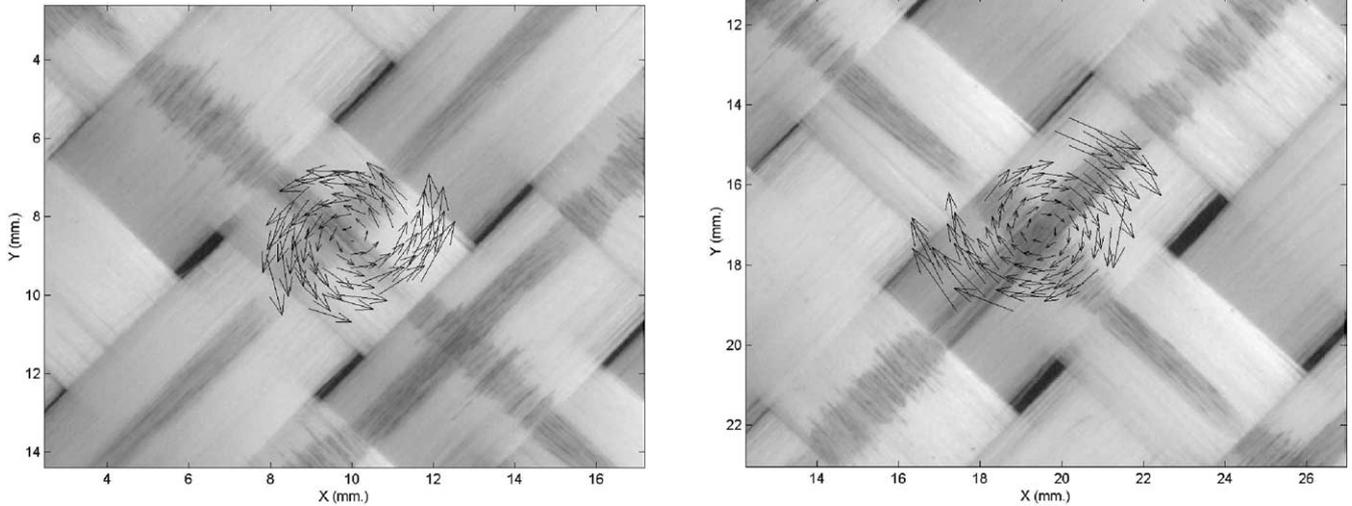


Fig. 12. Rotation des mèches chaîne et trame lors d'un essai de cisaillement.

Fig. 12. Warp and weft yarn rotation in shear test.

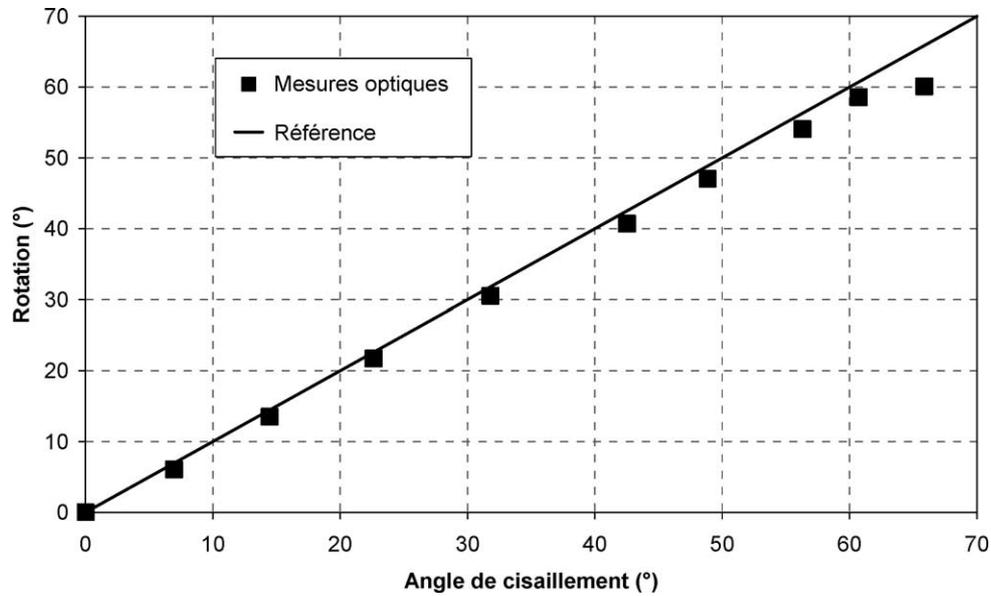


Fig. 13. Rotation des mèches et rotation du cadre.

Fig. 13. Yarn and frame rotation.

reportés sur l'image initiale (Fig. 12). Les champs de déplacement obtenus permettent de mettre clairement en évidence le mode de déformation du renfort tissé : les mèches ne sont pas cisailées. Le cisaillement global de l'éprouvette est du aux rotations individuelles des mèches les unes par rapport aux autres. Elles ont des sens opposés en chaîne et trame. Ce phénomène est d'autant plus remarquable que, les extrémités des mèches étant liées aux bords du cadre, on aurait pu penser que les conditions aux limites imposeraient un cisaillement pur aux mèches. L'observation faite sur la Fig. 10 montre que des mèches situées près des bords se tordent fortement empêchant ainsi ce cisaillement. Ce comportement particulier provient de la faible rigidité en flexion des mèches.

Les variations d'orientation des mèches chaîne et trame, mesurées sur les images, sont additionnées et comparées à l'angle de rotation donné par la cinématique du cadre. Les résultats montrent (Fig. 13) que cet angle déduit de la mesure de champ local est proportionnel à celui obtenu par la cinématique globale du cadre jusqu'à un angle de 60°. Il apparaît ensuite une divergence jusqu'à la fin de l'essai (65°). La mesure reste cependant toujours inférieure à la solution de référence, donnée par l'Éq. (1).

Les mèches ne tournent donc pas rigoureusement de l'angle imposé par le cadre en raison des fortes distorsions locales près des bords du cadre, visibles sur la Fig. 10. Ce déficit angulaire est même mesurable directement sur l'image de l'éprouvette.

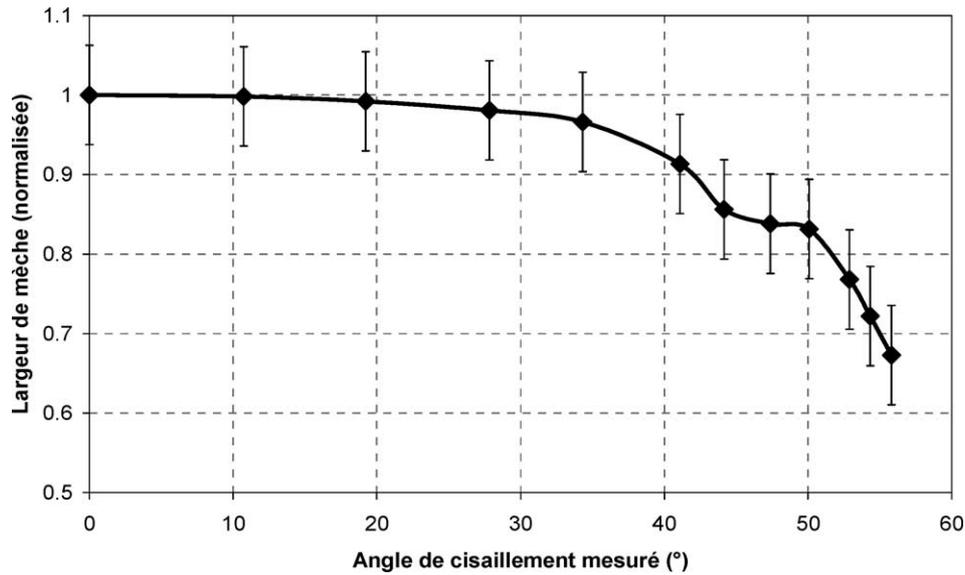


Fig. 14. Diminution de la largeur des mèches.

Fig. 14. Yarn broadness decreasing.

#### 4.3. Diminution de la largeur des mèches au cours de l'essai

Lors de l'essai, la surface utile à l'intérieur du cadre diminue ; la distance entre les extrémités de chaque mèches fixées au cadre restant la même, la diminution de cette surface utile s'accompagne donc d'une diminution de la largeur des mèches. Des mesures optiques réalisées au centre du cadre permettent de suivre leur évolution au cours de l'essai (Fig. 14).

Nous observons que la largeur des mèches varie peu jusqu'au début du contact latéral (41°). Les variations d'ondulation du renfort liées au changement de la zone de contact entre les mèches au cours de l'essai peuvent expliquer cette réorganisation. On observe ensuite une diminution rapide jusqu'à la fermeture de tous les interstices entre les mèches (50°). On constate alors une accentuation de cette diminution. Il semble donc que la réorganisation des mèches débute dès le début de l'essai mais devient significative à la mise en contact des mèches parallèles.

#### 4.4. Apparition de plis

L'apparition d'un pli selon la grande diagonale de l'éprouvette marque la fin de l'essai de cisaillement plan. C'est une instabilité macroscopique marquée par un mouvement hors-plan de l'éprouvette. La mise en place d'un critère objectif permettant la détection du début du plissement présente donc un intérêt. Quelques protocoles pour la mise en place de ce critère ont été proposés [10,11], mais soit ils utilisent un matériel spécifique, dédié à cette mesure, soit ils dépendent fortement de l'utilisateur. Nous proposons l'utilisation d'une méthode stéréoscopique s'appuyant sur la corrélation

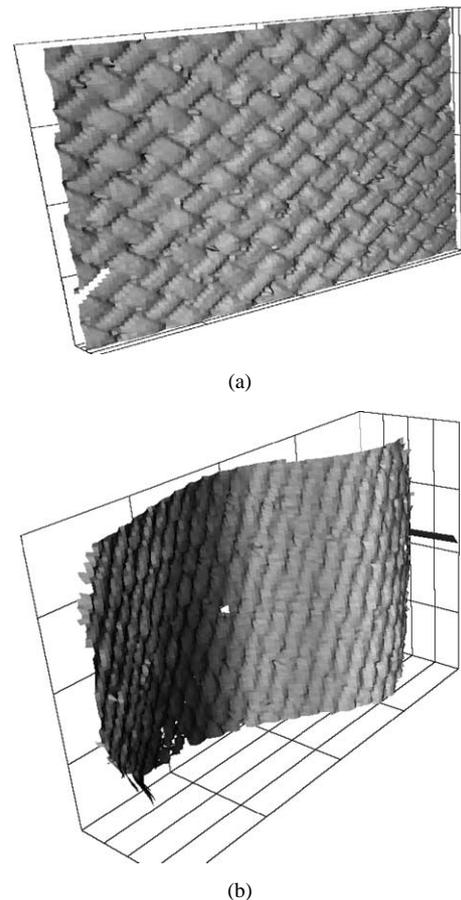


Fig. 15. Vues stéréoscopiques de la partie centrale de l'éprouvette. (a) À l'état initial, (b) en cours de plissement.

Fig. 15. Stereoscopies views of the sample. (a) Initial state, (b) during wrinkling.

de deux images de l'éprouvette sous des angles de vision différents pour mettre en évidence le phénomène. Par la donnée des paramètres internes (relatifs aux caractéristiques optiques du dispositif), et externes (relatifs à son positionnement), un calcul des altitudes de la surface libre est effectué par autocalibrage (c.à.d. sans objet partiellement connu). On positionne l'objectif pour voir une zone centrée sur la diagonale du cadre. On acquière deux points de vue de cette zone en faisant pivoter le cadre autour de cette diagonale. La rotation appliquée est faible et symétrique par rapport à l'axe optique ( $\pm 5^\circ$ ), afin d'assurer l'appariement des points dans les 2 images. La Fig. 15 montre un exemple de résultat ainsi obtenu.

Nous recherchons ici un critère qualitatif d'apparition des plis, indépendant de l'utilisateur, et non une mesure rigoureuse du mouvement hors-plan, qui imposerait une mise au point très exigeante.

## 5. Conclusion

L'utilisation d'une méthode de mesure de champ par corrélation d'images, a permis d'explorer les mécanismes de déformation d'un renfort tissé en cisaillement à plusieurs échelles. La mesure des déformations globales ainsi obtenues correspond assez bien à celle que l'on peut déduire de la cinématique du cadre jusqu'à un certain angle de 'blocage'. La mesure locale au niveau de la zone d'interaction de deux mèches fait apparaître des rotations en sens opposés dans les sens trame et chaîne. Leur somme ne correspond pas à l'angle de rotation du cadre ; la différence provient des fortes distorsions et écrasements des mèches au niveau de la liaison avec le cadre. Une cinématique 'locale' à donc été mesurée. C'est elle qui sera introduite dans la modélisation mésoscopique par éléments finis (Fig. 1b) [14]. Le cisaillement d'une surface tissée est donc assuré par la rotation des mèches la constituant, suivi d'un écrasement local fort, conduisant éventuellement à la formation de plis. La fermeture de tous les interstices entre mèches est progressive car les dispersions concernant les largeurs de mèches et leur agencement sont grandes. Il n'apparaît pas de cisaillement dans les mèches.

Le plissement de l'éprouvette qui apparaît après la fermeture des interstices s'accompagne d'un fort écrasement latéral de celles-ci. On a montré la faisabilité d'une mesure stéréoscopique basée sur la corrélation d'images symétriques de l'éprouvette pour détecter son apparition. Ce travail doit être poursuivi, en utilisant notamment une méthode de calibrage actuellement en cours d'implémentation.

## Remerciements

Nous tenons à remercier la société **tissa+**, pour la fourniture des renforts tissés. Ce projet a été soutenu par l'ANVAR Centre, dans le cadre d'une aide à l'innovation technologique (J0202026F).

## Références

- [1] K. Buet-Gautier, Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 1998.
- [2] U. Mohammed, C. Lekakou, M. Bader, Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics, *Composites, Part A: Appl. Sci. Manuf.* 31 (2000) 1409–1420.
- [3] S. Kawabata, M. Niwa, H. Kawai, The finite-deformation theory of plain-weave fabrics. Part III: The shear deformation theory, *J. Textile Inst.* 64 (2) (1973) 62–85.
- [4] A. Gasser, P. Boisse, S. Hanklar, Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests, *Comput. Mater. Sci.* 17 (1) (2000) 7–20.
- [5] A.G. Prodromou, J. Chen, On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms, *Composites, Part A: Appl. Sci. Manuf.* 28 (5) (1997) 491–503.
- [6] J. Launay, P. Boisse, F. Dumont, P. Vacher, Mesure de déformations par corrélation d'images lors d'essais mécaniques sur des renforts tissés, in: *Photomécanique*, Poitiers, France, 24–26 Avril, 2001, pp. 55–62.
- [7] J.L. Daniel, D. Soulat, F. Dumont, B. Zouari, P. Boisse, A.C. Long, Forming simulation of very unbalanced woven composite reinforcements, in: *5th Esaform*, 2002, Krakow, Poland, April 14–17, 2002, pp. 319–322.
- [8] K. Buet-Gautier, P. Boisse, Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements, *Exper. Mech.* 41 (3) (2001) 260–269.
- [9] P. Boisse, A. Gasser, G. Hivet, Analyses of fabric behaviour: determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations, *Composites, Part A: Appl. Sci. Manuf.* 32 (10) (2001) 1395–1414.
- [10] B.J. Souter, F. Robitaille, A.C. Long, C.D. Rudd, Geometric description of woven and warp-knitted industrial reinforcement for the calculation of preform deformation and flow properties, in: *Automotive Composites Workshop*, December 2–3, 1998.
- [11] T.M. McBride, J. Chen, Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformations, *Compos. Sci. Technol.* 57 (3) (1997) 345–351.
- [12] R.J. Basset, R. Postle, N. Pan, Experimental methods for measuring fabric mechanical properties: a review and analysis, *Textile Res. J.* 69 (11) (1999) 866–875.
- [13] P. Vacher, S. Dumoulin, R. Arrieux, Determination of the forming limit diagram from local measurement using digital image analysis, *Int. J. Forming Process.* 2 (3–4) (1999) 395–408.
- [14] F. Dumont, Expérimentations et modèles de comportement de renforts de composites tissés, Thèse de doctorat, Université de Paris VI, France, 2003.