

## La mesure des déformations pour l'étude du comportement et la mise en forme des renforts de composites

S. Allaoui\*, A. V. Duong\*, G. Hivet\*, J. Launay\*, V. Valle\*\*

\* Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés, UMR 8106, ENSAM Paris- Polytech'Orléans  
8 rue Léonard de Vinci 45072 Orléans Cedex 2

\*\* Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR 6610, Université de Poitiers

[jean.launay@univ-orleans.fr](mailto:jean.launay@univ-orleans.fr)

### Résumé :

*Nous faisons ici le bilan de campagnes d'essais mécaniques sur des renforts secs de composites réalisées au LMSP, au cours desquelles les déformations ont été mesurées par des méthodes optiques. La nature des renforts conduit dans certains cas à utiliser la corrélation d'images et dans d'autres le suivi de marqueurs. Dans tous les cas il est nécessaire d'avoir un marquage adapté à l'étude de ces matériaux. Il faut éviter le fractionnement des marqueurs à deux échelles : celle des fibres puis celle des mèches. La brillance des fibres gêne souvent les mesures. Ces problèmes techniques résolus, ces méthodes permettent d'obtenir des résultats très intéressants pour l'étude de ces matériaux.*

### Abstract :

*This paper is a resume of several mechanical tests on dry composite reinforcements realised in LMSP. Two optical methods are used for strain measurements: images correlation and marks tracking technique. In all cases, specific marks must be adapted to these materials. Marks division must be avoided at filament scale and roving scale. Another problem must be resolved: filament brilliance. Thus these two methods are complementary and give very interesting results for the study of these materials.*

### Mots-clefs :

**RTM ; corrélation d'images ; suivi de marqueurs**

### 1 Introduction

Pour fabriquer des pièces en matériaux composites il faut réaliser un compromis entre des résistances mécaniques et des rigidités spécifiques importantes, des cadences de production suffisantes, le respect des conditions environnementales (l'émission des composés organiques) et le prix de revient des pièces. Les procédés de type RTM (Resin Transfert Moulding) répondent assez bien à ces préoccupations ; ils consistent à mettre en forme le renfort sec puis à injecter une résine thermodurcissable à travers le renfort, dans un moule. La fabrication de composites obtenus par emboutissage de tissus comportant un mélange de fibres de verre et de thermoplastique répond également à ces exigences. La mise au point de ces procédés de fabrication, pour les pièces devant répondre à des exigences de performances précises, justifie l'utilisation d'outils de simulation (Boisse *et al.* 1997). La performance de ces outils nécessite d'une part de connaître les caractéristiques mécaniques des matériaux, d'autre part d'être validés sur des cas tests de mise en forme. Les essais mécaniques sur les renforts ont été facilités par l'utilisation de méthodes optiques pour la mesure des déformations (Boisse *et al.* 2001 ; Dumont *et al.* 2003). Ces méthodes sans contact, permettant des mesures de champ à des échelles variables sont très bien adaptées à l'étude de ces matériaux. La corrélation d'images et

le suivi de marqueurs (Garcia *et al.* 2002 ; Bretagne *et al.* 2005) sont deux techniques complémentaires qui permettent d'obtenir des résultats adaptés au type d'essais et aux renforts concernés.

## 2 Mise en forme des renforts de composites

### 2.1 Les différents types de renforts étudiés

Les renforts étudiés au LMSP pour la réalisation de composites à partir de mise en forme dans un système poinçon-matrice, sont :

- Des tissus de fibre de verre, carbone ou aramides classiques (taffetas, sergés).
- Des renforts à base de fibres de carbone, avec des armures plus complexes.
- Des tissés de fibre de verre associés à des fibres de thermoplastiques (noires ou blanches) comme le Twintex® (figure 1).

Le comportement mécanique de ces matériaux est obtenu à partir d'essais de traction biaxiale et de cisaillement plan. Ces données sont nécessaires à la simulation de la mise en forme (Boisse *et al.* 2006).

Tous les renforts ne sont pas adaptés à la réalisation de pièces, par le procédé RTM. La perméabilité du renfort compacté doit rester suffisante pour que les pressions d'injection de la résine ne soient pas trop grandes. Ces pièces, soumises à des sollicitations importantes, auront souvent des épaisseurs de plusieurs millimètres. Il est donc également avantageux d'utiliser des renforts de masse surfacique assez grande, pour réduire si possible le nombre de plis.

Parmi les renforts adaptés au RTM, on trouve des matériaux tissés épais (appelés parfois 2,5d) et des non tissés. Les renforts tissés de type 2.5d, sont constitués d'au moins deux rangées de mèches de chaîne assemblées de façon complexe par des mèches de trame. La surface visible de ces renforts présente des variations d'épaisseur de l'ordre du millimètre (figure 1). Les non tissés, appelés NCF (Non Crimp Fabric), sont constitués de deux ou plusieurs rangées de mèches orientées symétriquement par rapport au plan moyen et cousues les unes avec les autres (Lomov *et al.* 2001 et 2005). Ces renforts se manipulent plus difficilement que les tissés ; leur surface est plate et brillante et comporte des fils de couture très visibles et régulièrement disposés (figure 1).

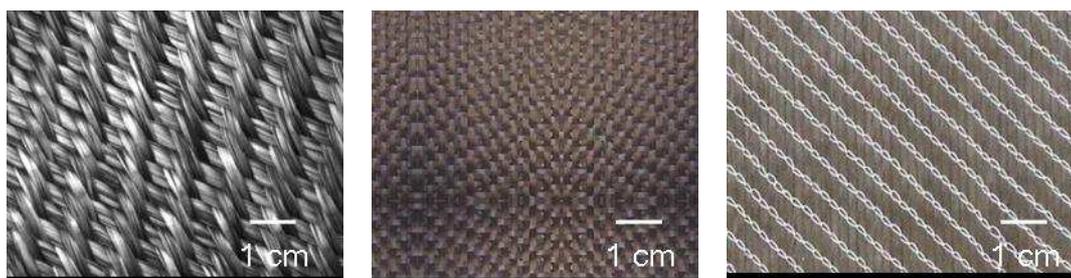


FIG. 1 – Tissés et non tissés : Twintex®, renforts de carbone 2.5 D et NCF

### 2.2 Essais sur les renforts tissés

La simulation de la mise en forme des renforts prend actuellement en compte le comportement en traction biaxiale, cisaillement plan (Boisse *et al.* 2006). Un dispositif de traction biaxiale a spécialement été conçu pour utiliser des méthodes optiques de mesure des

déformations. Les essais de cisaillement plan sont réalisés par la méthode du cadre et par de la traction hors axes (bias test) (figure 2).



FIG. 2 – Traction biaxiale et bias test sur carbone 2.5d ; cisaillement au cadre sur Twintex

### 3. Mesure des déformations par méthodes optiques sur les renforts de composites

#### 3.1 Mesure par corrélation d'images

La mesure des déformations par corrélation d'images, sur des renforts tissés de carbone ou de Twintex® nécessite de déposer un mouchetis de peinture ; la surface visible du renfort ne possède pas naturellement de motifs suffisamment aléatoires. Les mèches sont rectilignes ou régulièrement torsadés et leur tissage est périodique ; on note également dans certains cas des vides au croisement de deux mèches. Cette technique fonctionne très bien pour mesurer les champs de déplacement et de déformation en traction biaxiale ou en cisaillement. Elle a permis en particulier, avec des objectifs adaptés, de bien mettre en évidence la cinématique des mèches pour l'essai de cisaillement (Dumont *et al.* 2003) (figure 3) et l'apparition de l'angle de blocage conduisant à l'apparition de plis. Cependant lorsque les déplacements deviennent trop grands, le mouchetis se dégrade et ne permet plus le calcul des déformations en se référant à l'image initiale. De même, lorsqu'il est nécessaire de traiter un grand nombre d'images comme c'est le cas pour des essais de routine en traction biaxiale, les temps de calcul peuvent devenir importants ; la méthode de suivi de marqueurs devient alors plus intéressante (Bretagne *et al.* 2005).

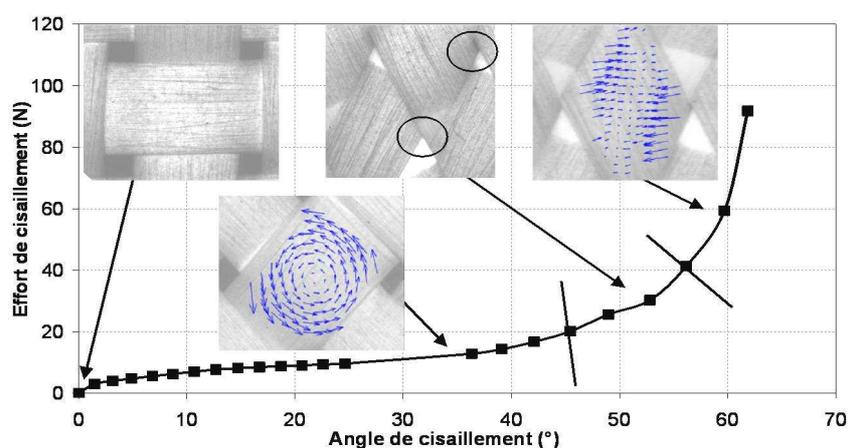


FIG. 3 – Essais de cisaillement au cadre d'un tissu de verre ; mouvement et déformations des mèches au cours de l'essai

### 3.2 Mesure des déformations par suivi de marqueurs

Pour la méthode de suivi de marqueurs, le repérage se fait en déposant des points de peinture d'une couleur complémentaire de celle du renfort, en des endroits stratégiques ; le diamètre de ces points doit être inférieur à la largeur des mèches pour éviter leur détérioration pendant l'essai. On peut ainsi par exemple mesurer le déplacement ou la déformation d'une ou plusieurs mèches (figure 4). Les temps de calculs sont très courts ; ils permettent même d'avoir des résultats en temps réel. On peut également jouer sur la nature du marqueur et l'éclairage. La mesure des déformations sur des NCF de carbone, très brillants, possédant des rangées de fils de couture blancs régulièrement espacés, est rendue possible avec cette technique en utilisant des marqueurs de peinture fluorescente éclairés en lumière ultraviolette. L'utilisation d'un mouchetis ou de marqueurs classiques n'est pas possible dans ce cas.

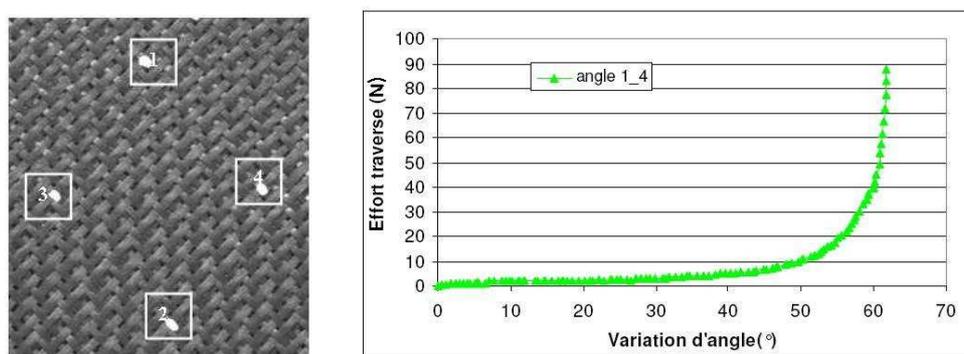


FIG. 4 – Essais de cisaillement au cadre sur un tissu 2.5d ; représentation de l'effort appliqué sur le cadre en fonction de la variation angulaire de la mèche repérée par les marqueurs 1- 4

La simulation de la mise en forme des renforts de composites nécessite également des essais de validation. Ces essais consistent à emboutir un renfort et à mesurer les déformations à la surface de la pièce obtenue par une méthode stéréoscopique. Le suivi de marqueurs est dans ce cas une solution appropriée car le marquage du tissu par des points est ce qui résiste le mieux à la mise en forme.

Le dispositif d'emboutissage est constitué d'un poinçon et d'une matrice associée ; pour obtenir des images lors de la mise en forme, on utilise une matrice sans fond, ce qui n'est pas trop différent des situations réelles.

Le tissu utilisé dans l'exemple présenté est un 2.5d de carbone dont une zone est recouverte de marqueurs. Après calibrage du système, le renfort est placé au dessus du poinçon, entre la matrice et le serre flanc. On enregistre avec les deux caméras, des images provenant de la zone comportant des marqueurs visibles à l'état initial puis progressivement d'autres images comportant des marqueurs qui se trouvaient initialement masquées sous la matrice et le porte matrice. Ces zones sont visibles sur les cotés de la pièce (figure 5b). Une fois l'essai terminé, la forme est démoulée (figure 5c).

Le traitement des images prises aux différents instants est réalisé avec Deftac 3D développé au Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers. Il permet de remonter à la position instantanée de chaque point marqué sur le tissu puis aux déformations locales (figure 6).

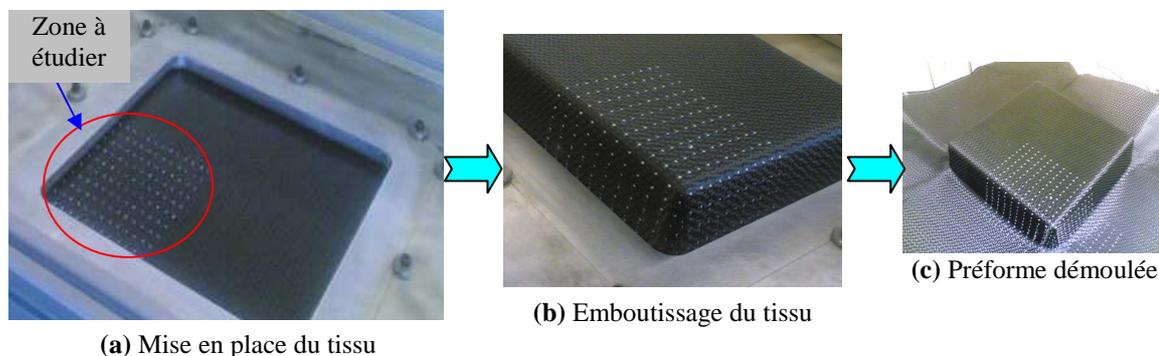


FIG. 5 – Emboutissage d’une préforme carrée en tissu sec.

La figure 6 montre l’enveloppe finale de la zone latérale de la préforme. On notera que chaque nœud de la figure représente une marque sur le tissu.

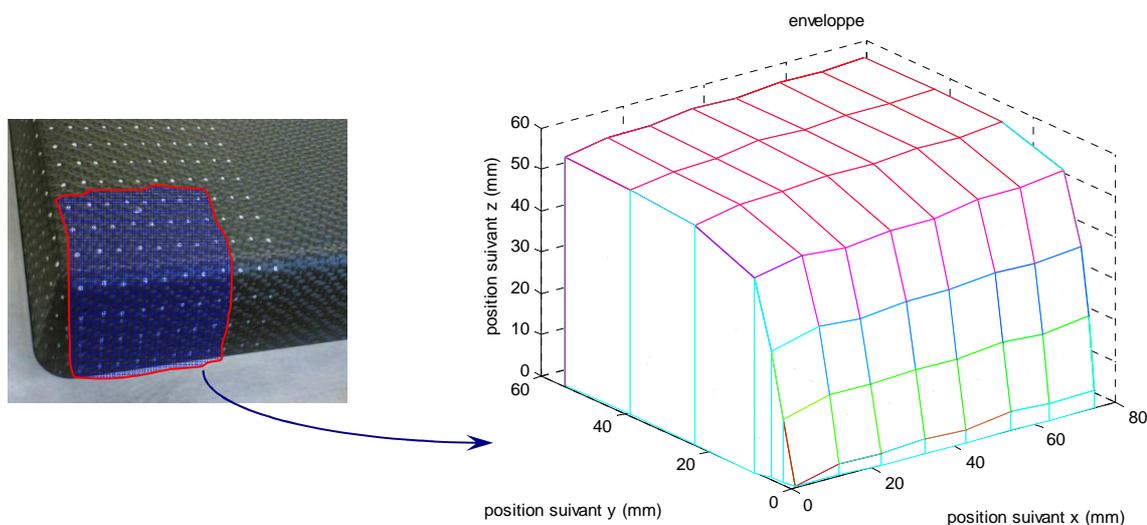


FIG. 6 – Reproduction de la forme 3D du tissu à travers les résultats de l’essai d’emboutissage.

#### 4 Conclusions

Les méthodes optiques de mesure des déformations sont parfaitement bien adaptées aux tests mécaniques sur les renforts de composites ou lors de leur mise en forme. Ce sont des méthodes de mesures sans contact qui permettent de mesurer des champs à diverses échelles suivant les objectifs utilisés. Le choix entre la corrélation d’images et le suivi de marqueurs dépend des applications et du type de renfort. Le suivi de marqueurs est bien adapté lorsqu’il s’agit de mettre en évidence des déformations de mèches individuelles.

## Références

- Boisse P., Borr M., Buet K. and Cherouat A. 1997. Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour in *Composites Part B: Engineering*, Volume 28, Issue 4, Pages 453-464.
- Dumont F., Hivet G., Rotinat R., Launay J., Boisse P. and Vacher P. 2003. Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés in *Mécanique & Industries*, Volume 4, Issue 6, , Pages 627-635.
- Bretagne N., Valle V. and Dupré J.C. 2005. Development of the marks tracking technique for strain field and volume variation measurements in *NDT & E International*, Volume 38, Issue 4, Pages 290-298.
- Boisse P., Gasser A. and Hivet G. 2001. Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension-strain surfaces and their use in forming simulations in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 32, Issue 10, Pages 1395-1414
- Boisse P., Zouari B. and Daniel J.L. 2006. Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 37, Issue 12, Pages 2201-2212
- Lomov S.V., Belov E.B., Bischoff T., Ghosh S.B., Truong Chi T. and Verpoest I. 2002 Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 1. Geometry of the preform. in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 33, Issue 9, Pages 1171-1183.
- Lomov S.V., Barburiski M., Stoilova Tz., Verpoest I., Akkerman R., Loendersloot R. and R.H.W.ten Thije. 2005. Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 3: Biaxial tension, picture frame and compression tests of the preforms in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 36, Issue 9, Pages 1188-1206.
- Garcia D., Orteu J.J., Penazzi L. 2002. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacement : application to sheet metalforming. *Journal of Material Processing Technology*, vol 125-126, pp 736-742.