

## **Etude des défauts de glissements lors de la mise en forme de renforts tressés triaxiales**

### ***Investigation of the yarns sliding during the triaxial braided composite reinforcements forming***

**Shenglei Xiao<sup>1,2</sup>, Peng Wang<sup>1,\*</sup>, Damien Soulat<sup>1</sup>, Xavier Legrand<sup>1</sup>, Hang Gao<sup>2</sup>**

1 : University of Lille, Ensait, Gemtex, F-59000 Roubaix, France

2 : Dalian University of Technology, School of Mechanical Eng. Da Lian, China

\*e-mail : peng.wang@ensait.fr

#### **Résumé**

La mise en forme de renforts composites est une étape qui met en jeu les comportements complexes de la déformabilité du renfort et qui se doit d'être maîtrisée. Dans cet article, nous étudions la déformabilité des tresses triaxiales en tant que renfort de composite. Le glissement des mèches dans la direction longitudinale des mèches est un phénomène important lors de la mise en forme des tresses triaxiales, dont la déformabilité est très différente de celle des renforts tissés. De plus, le glissement des mèches dans les deux directions, axiales et de biais pour la structure tresse triaxiale se doit d'être analysée. Les défauts de fabrication pendant la mise en forme des tresses triaxiales, comme par exemple le manque de fibres, sont également abordés. L'influence du glissement de mèche sur les défauts de la mise en forme et la qualité des pièces composites est étudiée.

#### **Abstract**

The composite reinforcements forming is a complicated physical stage, which concerns the complex deformability behaviours. In the present paper, the deformability of the triaxial braided fabrics as one of the advanced composite reinforcements is investigated. The yarns sliding along the longitudinal yarn direction is the primary forming behaviour during the triaxial braids forming, which is quite distinct from the woven fabrics forming. Moreover, the yarns sliding along two yarn directions present a big difference between the axial and bias yarns for the triaxial braided structures. The manufacturing defects during the triaxle braided fabrics forming such as fibre vacancies are also discussed. The influence of the yarns sliding on the forming defects and the quality of composite parts is summarized.

**Mots Clés :** Textiles composites, Mise en forme, Renforts tressés, Glissement

**Keywords :** Textile composites, Forming, Braided reinforcement, Sliding

### **1. Introduction**

Les procédés de fabrication de composites sont nombreux et souvent complexes. Généralement, ces procédés comportent une phase de préformage des renforts de textiles secs, comme dans les procédés Liquid Molding Processes (LCM) [1, 2]. Cette première étape joue un rôle important dans la fabrication des composites. La maîtrise des paramètres du procédé peut être complexe pendant la mise en forme, et peut conduire à des défauts, comme par exemple, le plissement, les boucles, le désalignement... [3-5]. Ces défauts influent fortement sur les performances mécaniques des pièces composites finales [6]. Les structures élaborées par tissage et tressage sont très utilisées comme renforts textiles dans la fabrication de composites. Une tresse est principalement caractérisée par son angle de tressage (Figure 1) qui est le paramètre plus important dans le procédé de tressage pour

contrôler la structure d'une tresse. Après découpe et ouverture des tresses tubulaires, ces renforts peuvent servir comme renfort textile bidimensionnel (ou renfort 2D) [10].

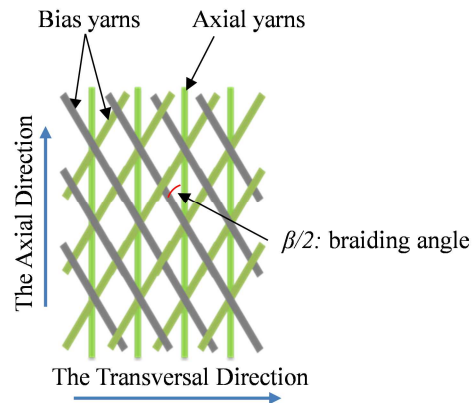


Fig.1. Structure de tresse triaxiale.

De nombreux travaux de recherche concernant la mise en forme des renforts tissés ont été réalisés [4-9]. Par contre, très peu d'études ont été effectuées sur la mise en forme des renforts tressés [10], en particulier pour des tresses de type triaxiale, qui contiennent en plus des renforts dits de biais, des mèches dans la direction axiale (Fig.1). Afin d'analyser la déformabilité d'une tresse triaxiale, cette étude se concentre sur la mise en forme de tresse carbone triaxiale. Grâce à un banc d'emboutissage, les paramètres importants qualifiant la déformabilité des renforts peuvent être suivis lors du procédé, tels que l'avalement, l'angle de cisaillement dans le plan, l'effort d'emboutissage. Les résultats expérimentaux montrent qu'il n'y a pas d'avalement dans les directions axiale et transversale. Par contre, des glissements importants de mèches peuvent être observés. Ces glissements dans la zone utile peuvent provoquer des défauts de type inhomogénéité de densité de renforts qui conditionneront l'étape d'imprégnation mais également les propriétés mécaniques de la pièce composite finale. Comprendre ce phénomène de glissement sera détaillé dans cet article et optimiser la phase du préformage pour les renforts de type tresse est l'objectif de cette étude.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1 Renforts tressés

Les renforts tressés triaxiaux sont fabriqués à partir de fibres de carbone continues par un procédé de surtressage [10]. L'angle de tressage peut être contrôlé grâce à la sélection des paramètres du procédé de tressage. Après le tressage, les renforts tressés sont soigneusement coupés et ouverts pour obtenir des tresses bidimensionnelles sans modification de l'angle de tressage (Fig. 1). Comme montré sur la figure 2, les tresses triaxiales sont caractérisées par des mèches axiales dans la direction axiale et entrelacées avec les mèches biais. Les paramètres importants du renfort tressé sont présentés dans le tableau 1.

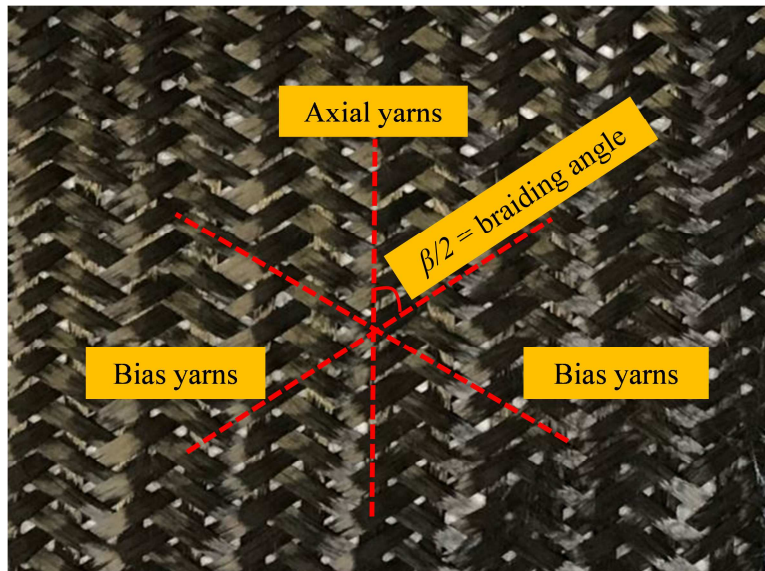


Fig. 2. La tresse de carbone.

Paramètres	
Mèche	792 tex
Densité surfacique ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	$510 \pm 5$
Epaisseur (mm)	2,37
Angle tressage ( $^\circ$ )	55
Nombre de mèches par cm	3.9
Dimension ( $\text{mm}^2$ )	$280 \times 280$
Largeur de la mèche (mm)	4,0
Distance entre deux mèches axiales adjacentes $-L_0$ (mm)	4,0
Distance entre deux mèches biais adjacentes $-L'_0$ (mm)	1,4

Tab. 1. Les principaux paramètres du renfort tressé.

## 2.2 Tests d'emboutissage

Les essais d'emboutissage ont été réalisés avec le banc d'emboutissage développé par le laboratoire GEMTEX représenté sur la figure 3 [9]. Ce dispositif permet d'analyser la déformabilité d'un renfort sec sur une géométrie à double courbure sous différentes conditions d'essais (forme du poinçon, position et pression du serre-flan...). La pression appliquée sur le renfort peut être réglée avec un système de quatre vérins pneumatiques reliés au serre-flan (0,05, 0,1, 0,2 et 0,3 MPa). Un

autre vérin électrique relié au poinçon impose un déplacement qui est détecté par un capteur de force (vitesse du poinçon 45 mm/min).

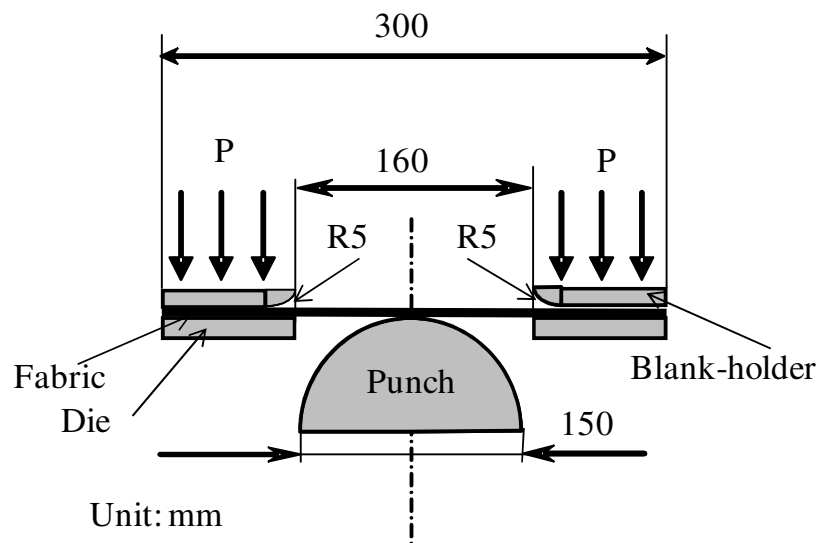
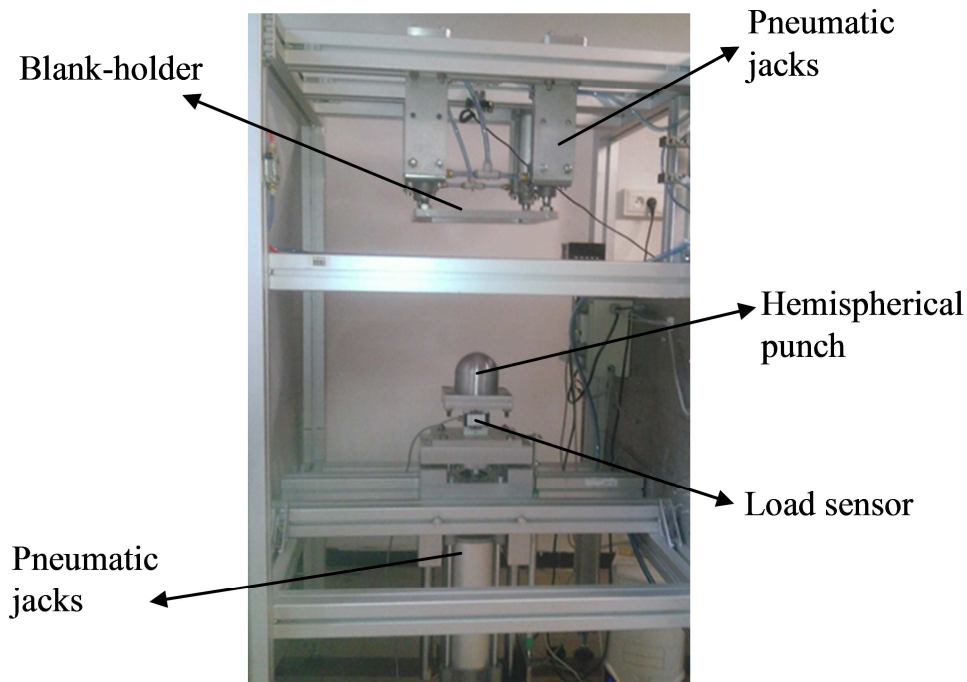


Fig. 3. Emboutissage hémisphérique

Afin d'analyser le comportement lors du préformage, en particulier les glissements des mèches, les mèches axiales et biaises doivent être numérotées avant l'essai. Les mèches axiales sont numérotées suivant la direction transversale comme indiqué dans la figure 4. Comme le nombre de mèches axiales dans la zone utile de l'hémisphère après le préformage est d'environ douze, le nombre indiqué dans la figure 4 est compris entre 0 et 11. La mèche axiale N°0 passe par le centre de la tresse et  $L_0$  est défini comme la distance initiale entre les mèches axiales. La valeur de  $L_0$  est également indiquée dans le tableau 1. Avec la même définition, les mèches de biaises peuvent également être numérotées (Fig.4).  $L'_0$  présente la distance initiale entre deux mèches de biaises adjacentes. Les mèches numérotées après le préformage peuvent être facilement observées afin de quantifier les glissements.

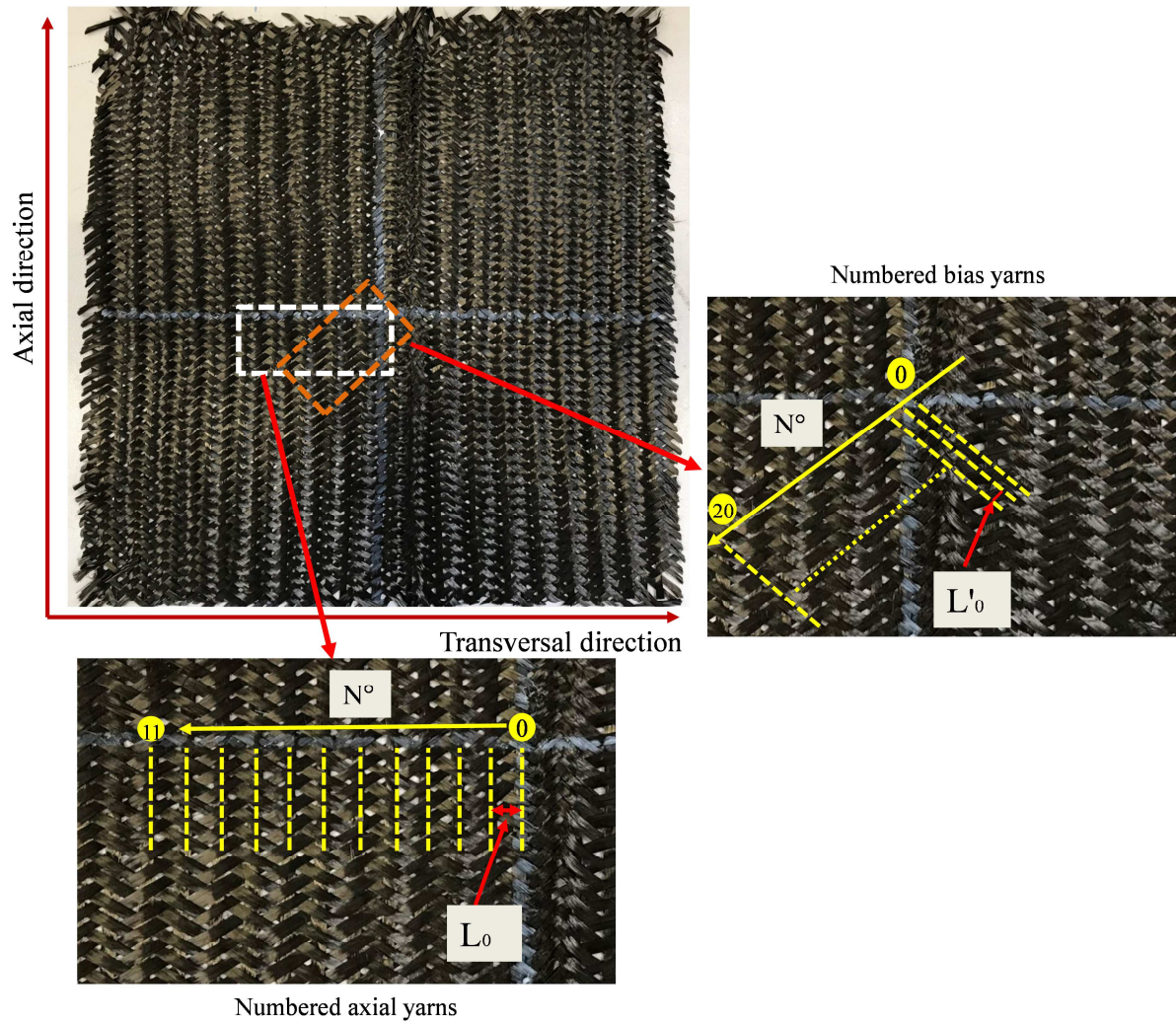


Fig. 4. Renfort tressé avant le préformage.

### 3. Le glissement des mèches

La figure 5 montre la tresse après le préformage avec une pression du serre-flan de 0,1 MPa. Le profil déformé est marqué par des lignes blanches. Le glissement du réseau correspondant principalement au glissement des mèches peut être observé dans les directions axiale et transversale, ce qui entraîne localement un manque de matière.

Comme indiqué précédemment, les glissements des mèches peuvent être analysés indépendamment pour les mèches axiales et de biais. Le glissement des mèches, dans la zone utile, et selon la direction longitudinale de mèche est normalement induit par la tension due à la flexion dans le plan. Ce glissement conduit à un phénomène de retrait aux deux extrémités de la mèche. Les mèches glissent dans la direction longitudinale de mèche présentent un profil symétrique, même si les mèches axiales et de biais montrent un glissement différent. Le glissement maximal des mèches axiales peut être observé sur la mèche qui passe par le centre de l'hémisphère (Fig. 5). Etant donné que la longueur des mèches axiales assujetties à la flexion hors plan dans la zone utile est symétrique par rapport à la direction transversale, la tension aux deux extrémités des mèches axiales est identique. Par conséquent, le glissement de la mèche axiale dans la direction longitudinale lors



du préformage est presque identique. Par contre, le glissement des mèches biais dans la direction longitudinale de mèche présente une valeur non similaire entre les deux côtés des mèches.

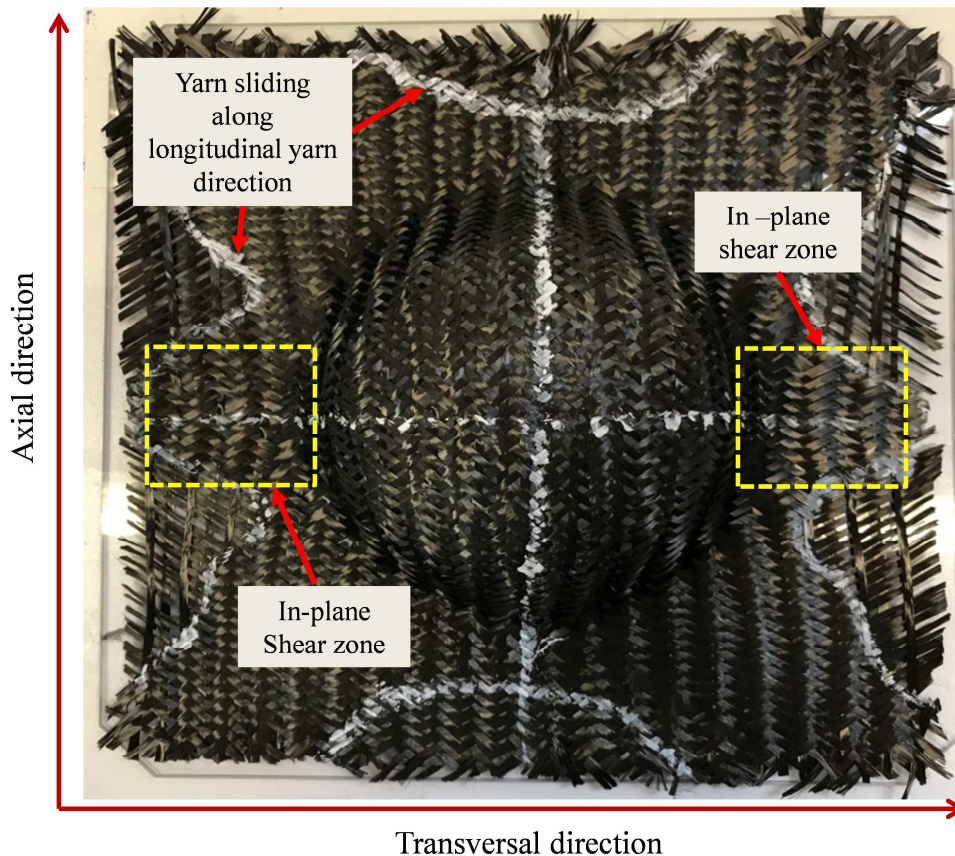


Fig. 5. Renfort tressé après le préformage.

### 3.1 Le glissement des mèches axiales

La figure 6 montre la force maximale du poinçon et le glissement maximal de mèche dans la direction longitudinale de mèche pour les différentes pressions serre-flan. La valeur moyenne est indiquée sur la figure avec les écart-types des mesures. On peut observer d'abord que l'augmentation de la pression serre-flan implique une augmentation de la force de l'emboutissage correspondant à un frottement plus important entre l'outil et la tresse. Le glissement maximal des mèches axiales dans la direction longitudinale de mèche n'augmente pas avec l'augmentation de la pression du serre-flan. Comparativement aux mèches axiales, l'augmentation de la pression serre-flan n'a aucun effet sur le glissement des mèches de biais dans la direction longitudinale de mèche. En revanche, l'augmentation de la pression du serre-flan peut renforcer l'extension de ces mèches. Si la pression du serre-flan augmente et atteint une valeur limite, l'endommagement de mèche sera observé à la place du glissement de mèche.

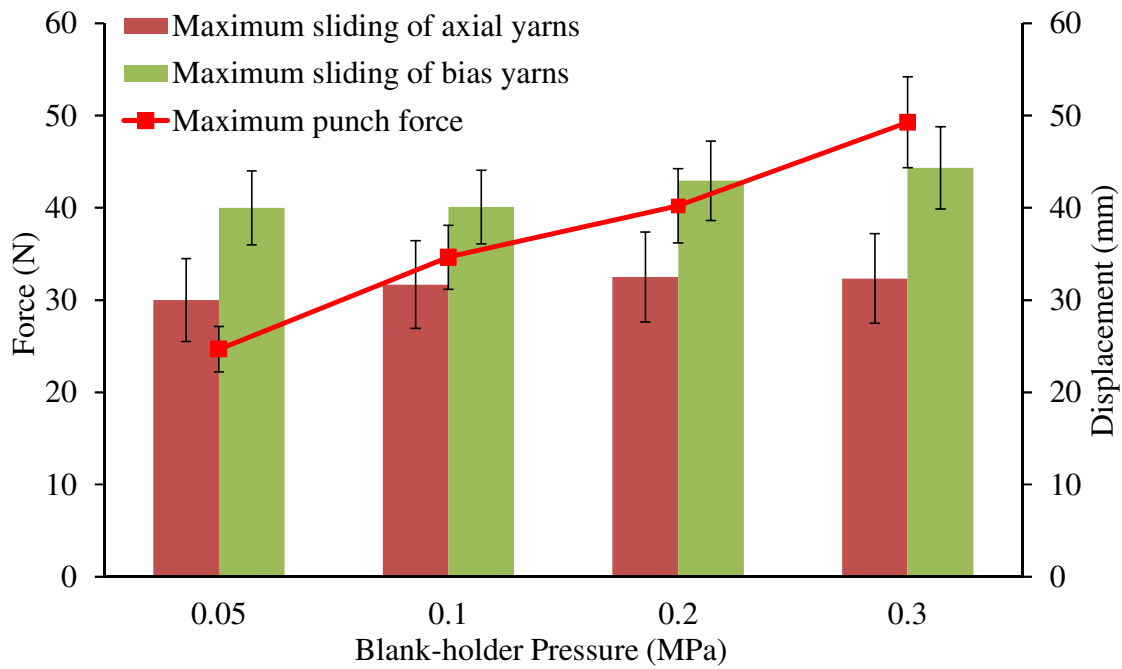


Fig. 6. Le glissement maximal dans la direction longitudinale de mèche en fonction de la pression du serre-flan.

### 3.2 Le glissement des mèches biais

Le glissement des mèches biais dans la direction longitudinale de mèche peut être caractérisé sur la figure 7a. Ce glissement des mèches biais montre un phénomène très différent par rapport au glissement des mèches axiales. Dans la figure 7a, les zones  $A_1.B_2$ ,  $A_2.B_1$ ,  $A_4.B_1$  et  $A_3.B_2$  représentent les zones de glissement non homogènes. Une mèche de biais qui, à une extrémité, a une distance relativement courte à la base de la forme du poinçon pourrait glisser plus par rapport à l'autre extrémité de la mèche. Ce phénomène est attribué au fait que la longueur des mèches de biais soumises à une flexion hors plan (la longueur à l'intérieur de la zone utile) ne coïncide pas avec la longueur totale, il conduit à une tension déséquilibrée aux deux extrémités de la mèche. La figure 7b schématise ce comportement de glissement déséquilibré. Les zones  $A_1.B_2$  et  $A_2.B_1$  illustrées à la figure 7a montrent également que certaines mèches de biais ne se contractent pas uniquement d'un seul côté, par contre, l'autre côté ne bouge pas du tout. Ce phénomène permet de vérifier que le glissement maximal des mèches de biais est plus important que les mèches axiales comme présenté à la figure 6. On observe également dans les zones  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_4$  que certaines mèches de biais, à la base de la forme hémisphérique, ne glissent presque pas en raison de la tension relativement faible générée par une petite flexion dans le plan. Le glissement inhomogène des mèches de biais dans la direction longitudinale de mèche dépend principalement l'angle de tressage. Cet angle peut limiter la longueur totale de mèche dans la zone utile. Par conséquent, la tension sur les deux côtés de mèche biais produite par la flexion hors plan pourrait être probablement inhomogène, ce qui entraînerait un glissement des mèches non équilibré aux deux extrémités de la mèche.

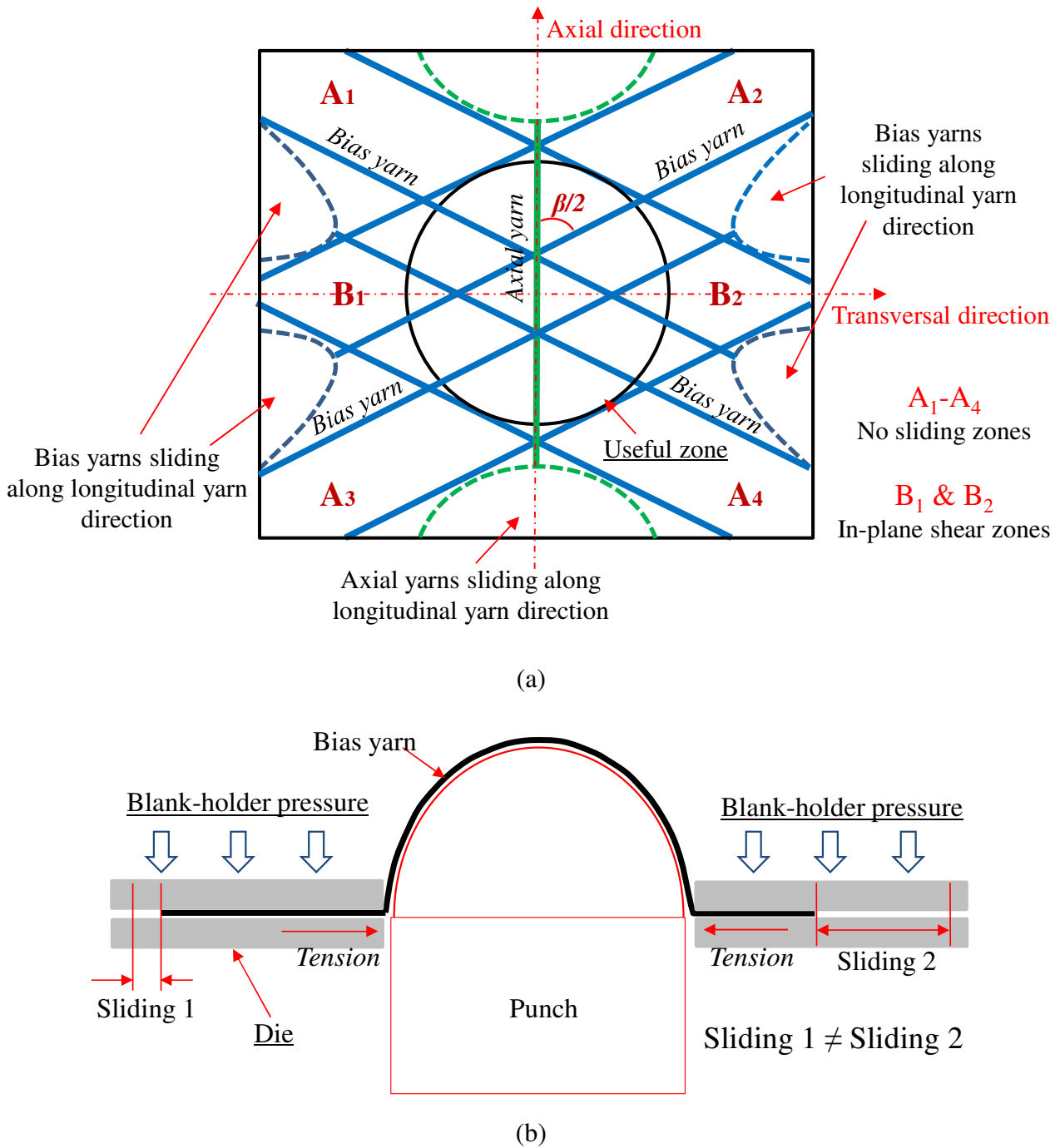


Fig. 7. Le glissement dans la direction longitudinale de mèche, (a) le profil du glissement et (b) le glissement déséquilibré des mèches biais.

#### 4. Conclusion

La déformabilité des renforts tressés triaxiaux lors de la fabrication a été analysée dans cet article. Le comportement lors du préformage des tresses triaxiales est très intéressant et très différent de celui des renforts tissés, en particulier le glissement des mèches. Le glissement des mèches dans la direction longitudinale de mèche est généré par la flexion dans un plan. Les deux extrémités des mèches axiales glissent en même temps pendant le préformage. Au contraire, le glissement des mèches de biais montre une inhomogénéité aux deux extrémités de la mèche. Le



glissement des mèches biais dépend principalement de l'angle de tressage, les dimensions du renfort et du poinçon. La pression du serre-flan n'influence pas sur le glissement des mèches dans la direction longitudinale de mèche.

Les défauts de fabrication peuvent apparaître lors de la mise en forme des tresses triaxiales et ces défauts, comme par exemple le manque de matière, sont liés directement au glissement des mèches. Il est possible que le glissement des mèches dans la direction longitudinale de mèche conduise au manque de fibre dans la zone utile. Si le glissement est suffisamment important pour entraîner le retrait des mèches dans la zone utile, on observera qu'il y a des zones où il manque des fibres de renfort. Ce défaut mènera à une influence négative sur la phase d'injection / infusion de résine ainsi que sur les performances mécaniques des pièces composites finales. Par conséquent, l'un des travaux à venir portera sur la manière de contrôler et d'optimiser les défauts du préformage afin d'améliorer la qualité de fabrication des composites renforcés par des tresses triaxiales.

## Références

- [1] Ruiz E, Trochu F. Flow modeling in composite reinforcements. *Compos Reinf Optim Perform* 2011;588–615.
- [2] Sozer EM, Simacek P, Advani SG. Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites. *Manuf Tech Polym Matrix Compos* 2012;245–309.
- [3] Laberge-Lebel L and Hoa SV. Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites With Carbon/Nylon Commingled Fibers. *Journal of Composite Materials* 2007; 41: 1101–1121.
- [4] Ouagne P, Soulat D, Moothoo J, Capelle E and Gueret S. Complex shape forming of a flax woven fabric; analysis of the tow buckling and misalignment defect. *Composites Part A* 2013; 51: 1–10.
- [5] Gatouillat S, Bareggi A, Vidal-Sallé E and Boisse P. Meso modelling for composite preform shaping. Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites Part A* 2013; 54: 135–144.
- [6] Bickerton S, Simacek P, Guglielmi SE, Advani SG. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *Composites Part A* 1997; 28:801-16.
- [7] Boisse P, Hamila N, Vidal-Sallé E and Dumont F. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses. *Compos Sci Technol* 2011; 71(5): 683-692.
- [8] P. Wang, X. Legrand, P. Boisse, N. Hamila, D. Soulat. Experimental and numerical analyses of manufacturing process of a composite square box part: Comparison between textile reinforcement forming and surface 3D weaving. *Composites Part B: Engineering*, 78: 26-34, 2015.
- [9] E. Guzman-Maldonado, N. Hamila, P. Boisse, J. Bikard. Thermomechanical analysis, modelling and simulation of the forming of pre-impregnated thermoplastics composites. *Composites Part A* 78, 211-22, 2015.
- [10] P.B. Jacquot, P. Wang, D. Soulat, X. Legrand. Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 46: 698-18, 2016.