

Analyse du comportement en traction de renforts tressés pour application composite

C. LANCERON^{a*}, B. DUCHAMP^a, D. SOULAT^a, F. VEYET^a, X. LEGRAND^a

a. Univ.Lille Nord de France, GEMTEX, ENSAIT, Roubaix, France

* charles.lanceron@ensait.fr

Résumé :

De nombreuses études existent dans la littérature sur les potentialités des tresses utilisées comme renforts dans les composites, mais peu de travaux concernent l'analyse de leur comportement mécanique sec, avant imprégnation. Le présent travail décrit à partir de l'élaboration de tresses à base de multi-filament de PEHD (Polyéthylène à haute densité) sur une tresseuse disponible au laboratoire GEMTEX, la caractérisation de leur comportement en traction. L'influence de l'angle de tressage initial ainsi que du nombre de fils droits est discutée. Le suivi, par vidéométrie, de l'évolution de l'angle est également analysé. L'échauffement constaté lors de ces essais de traction est quantifié par le suivi du champ de température à l'aide d'une caméra thermique.

Abstract :

The tensile behaviour of braid reinforcement is classically described by the behaviour of composite manufactured from these reinforcements. Few studies concern the tensile behavior of braided fabrics. In this paper triaxial braids are manufactured on a braiding loom from multifilament of PEHD. Braid reinforcements are characterized in uniaxial tensile. The mechanical behaviour is analyzed in function of the braiding angle and the number of axial yarns. The evolution of the braiding angle and also the temperature measured during tensile tests gives a comprehension on the mechanical behaviour of dry braids.

Mots clefs : tressage, comportement en traction, caractérisation mécanique, tresses

Keywords: Braiding process, tensile behaviour, mechanical characterization, braided reinforcement

1 Introduction

En comparaison du procédé de tissage [1, 2] le tressage permet d'entrelacer des fils selon des orientations non-orthogonales et de réaliser des renforts pour des structures complexes [3-5]. Les

structures tressées les plus simples sont dites biaxiales puisqu'elles sont constituées de deux groupes de fils axiaux entrelacés. L'angle de tressage est défini entre l'axe longitudinal (dans le sens de production de la tresse) et la direction de ces fils biaxiaux. Ce paramètre est un élément clé dans l'élaboration des tresses lors du procédé de tressage [3, 6] et a une influence primordiale sur les propriétés mécaniques du renfort [7-12]. Il est possible d'intégrer des fils axiaux dans le sens de production et ainsi obtenir des tresses triaxiales qui ont une meilleure résistance à la traction et à l'impact [8, 14]. Les structures tressées sont utilisées en tant que renfort dans diverses applications telles que l'automobile, l'aérospatial, la défense, le sport et le médical, par conséquent beaucoup de travaux sont disponibles dans la littérature sur le comportement mécanique des composites à base de renforts tressés et le développement de modèles mécaniques prédictifs [4, 6, 7, 15-17]. A contrario, peu d'études concernent la description du comportement mécanique de ces renforts secs. Harte et Fleck [18] ont mis en évidence lors d'essais de traction menés sur des tresses biaxiales, d'une augmentation des déformations maximales lorsque l'angle de tressage initial augmente. La compréhension du comportement mécanique en traction de tresses biaxiales et triaxiales ainsi que des paramètres-clés influant sur ces caractéristiques font l'objet de travaux de Rawal [19-23], notamment par le biais de modèles prenant en compte à une échelle mésoscopique l'embuvage présent dans ces structures entrelacées. Duchamp et al. [24, 25] ont présenté des études couplant l'élaboration de tresses et la caractérisation expérimentale du comportement en traction. Le phénomène de double-pic, caractéristique du comportement des tresses triaxiales a été analysé. Ce papier s'inscrit dans la continuité de ces travaux et a pour objectif d'étudier l'influence de l'angle de tressage et du nombre de fils axiaux sur le comportement en traction de tresses triaxiales. La première partie décrit l'élaboration de ces tresses à partir de multi-filaments de Polyéthylène Haute Densité (PEHD), matière caractérisée par une excellente résistance aux chocs et par des plages de températures d'utilisation comprises entre -50°C et +80°C. Les caractéristiques du comportement en traction, de l'effort maximal, de la déformation à rupture sont analysées en fonction des paramètres étudiés. Le suivi de l'angle de tressage ainsi que l'évolution de la température, due aux frottements entre les multi-filaments, lors de ces essais de traction, sont également présentés.

2 Matériaux et démarche expérimentale

Les tresses sont élaborées à partir d'un multi-filament de PEHD de densité 0,97 g/cm³. Le tableau 1 présente les propriétés mécaniques de ce fil. Ces propriétés mécaniques ont été identifiées en suivant le protocole de la norme IN ISO 2062 [26]. Le fil est retordu pour lui donner une tenue et éviter la dégradation lors du procédé de tressage.

Tableau 1: Caractéristiques du fil

| Propriétés | Valeurs |
|-----------------------------------|------------------------|
| Densité linéaire (Tex) | 169 |
| Déformation à la rupture (%) | 3,9 |
| Résistance à la traction (cN/Tex) | 265 |
| Torsion (tours/m) | 50 (± 10) sens Z |

Ces fils sont ensuite entrelacés à l'aide d'un métier à tresser Herzog GLH 1/97/96-100, représenté figure 1.a [27, 28], afin de réaliser des tresses triaxiales, schématisées figure 1.b qui comportent des fils axiaux, dans le sens de production, et des fils de biais, dont la direction est définie par l'angle de

tressage. Dans cette étude, 11 échantillons de tresses triaxiales ont été élaborés. Ils diffèrent par leur angle de tressage, imposé par les paramètres de production [29-31], mais également par le nombre de fils axiaux.

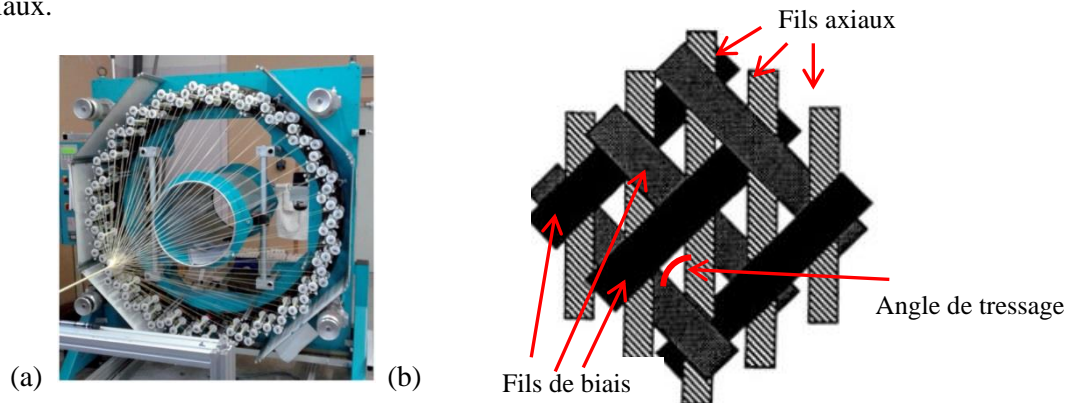


Figure 1 : (a) Métier à tresser [27, 28]. (b) Schéma d'une tresse triaxiale.

Les tresses contiennent en totalité 288 fils de biais et le nombre de fils droits varie entre 48, 98 ou 144. Il existe différents motifs de tressage, qui sont analogues aux armures en tissage. Les tresses ont été réalisées avec un motif de type 'regular', qui peut être associé en tissage à des motifs natté 2x2. La figure 2 illustre, dans le cas d'un angle de tressage de 45°, le motif élémentaire de ces échantillons, et notamment la variation du nombre de fils axiaux.

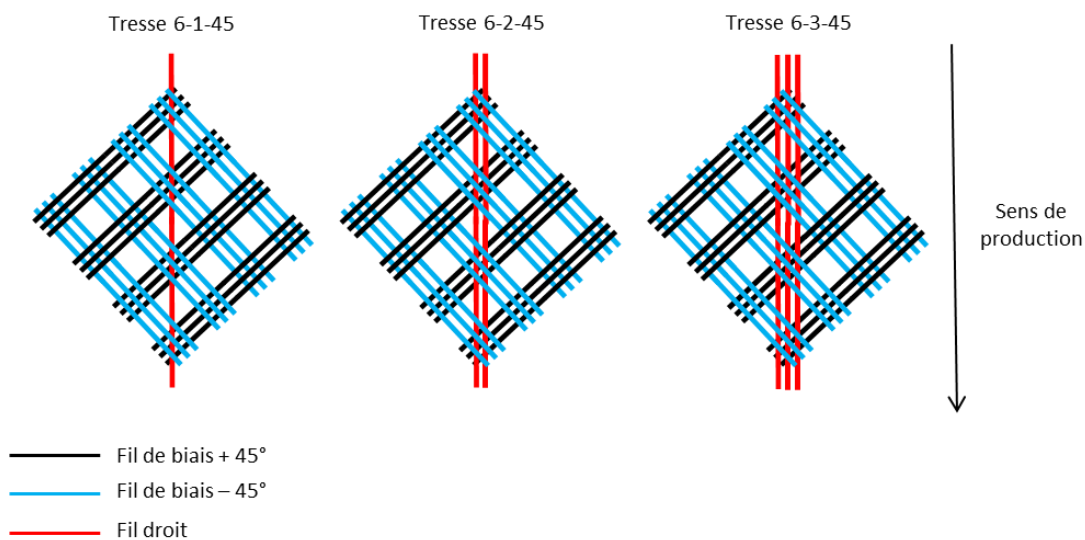


Figure 2 : Motifs de tressage des tresses triaxiales

La nomenclature utilisée pour classier les onze échantillons de tresses triaxiales et utilisée figure 2 est relative au nombre de fils utilisés pour élaborer ces tresses. Les deux premiers chiffres désignent respectivement, par groupe de 48, le nombre de fils de biais et axiaux, le troisième chiffre correspond à l'angle de tressage. Ainsi l'échantillon 6-3-45 désigne une tresse ayant 288 ($=6 \cdot 48$) fils de biais, 144 ($=3 \cdot 48$) fils axiaux avec un angle de tressage de 45°. L'ensemble des échantillons est présenté dans le tableau 2.

Tableau 2: Tresses réalisées

| Dénomination | Nombre de fils de biais | Nombre de fils axiaux | Angle de tressage (°) |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 6-1-12 | 288 | 48 | 12 |
| 6-1-20 | 288 | 48 | 20 |

| | | | |
|--------|-----|-----|----|
| 6-1-29 | 288 | 48 | 29 |
| 6-2-12 | 288 | 96 | 12 |
| 6-2-21 | 288 | 96 | 21 |
| 6-2-42 | 288 | 96 | 42 |
| 6-2-68 | 288 | 96 | 68 |
| 6-3-12 | 288 | 144 | 12 |
| 6-3-23 | 288 | 144 | 23 |
| 6-3-48 | 288 | 144 | 48 |
| 6-3-54 | 288 | 144 | 54 |

Pour chacun de ces échantillons des essais de traction uniaxiaux dans le sens de production, sont réalisés. En sus des quantités globales (effort-déplacement) fournies par le banc de traction, on couple la mesure de l'évolution de l'angle de tressage et par ailleurs de la température. Ces données sont fournies à l'aide de mesures sans contact. Concernant l'angle de tressage, un marqueur de l'orientation initiale des fils de biais est apposé sur l'échantillon (figure 3.a) puis l'essai est filmé à l'aide d'une caméra, les images, à l'aide du logiciel ImageJ sont synchronisées avec les déformations afin de post-traiter cette évolution de l'angle lors de l'essai. La précision est de l'ordre de $\pm 1^\circ$. La mesure de la température s'effectue à l'aide d'une caméra thermique qui renvoie, d'une part la température au centre de la zone de mesure (en haut à gauche, sur la figure 3.b) mais également les valeurs maximales et minimales dans toute la zone de mesure (échelle à droite de la figure 3.b). La synchronisation avec les déformations, permet de post-traiter l'évolution de température au cours de l'essai. La précision de mesure est de l'ordre de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Ces essais de traction sont réalisés selon la norme NF ISO 13934, avec une vitesse de 50 mm/min, le banc de traction étant équipé d'un capteur de 250kN. Les éprouvettes sont munies de talons afin d'éviter tout glissement sous les mors. La distance entre les mors est de 200 mm. Pour chaque échantillon, les courbes présentées sont la moyenne de 5 essais réalisés.

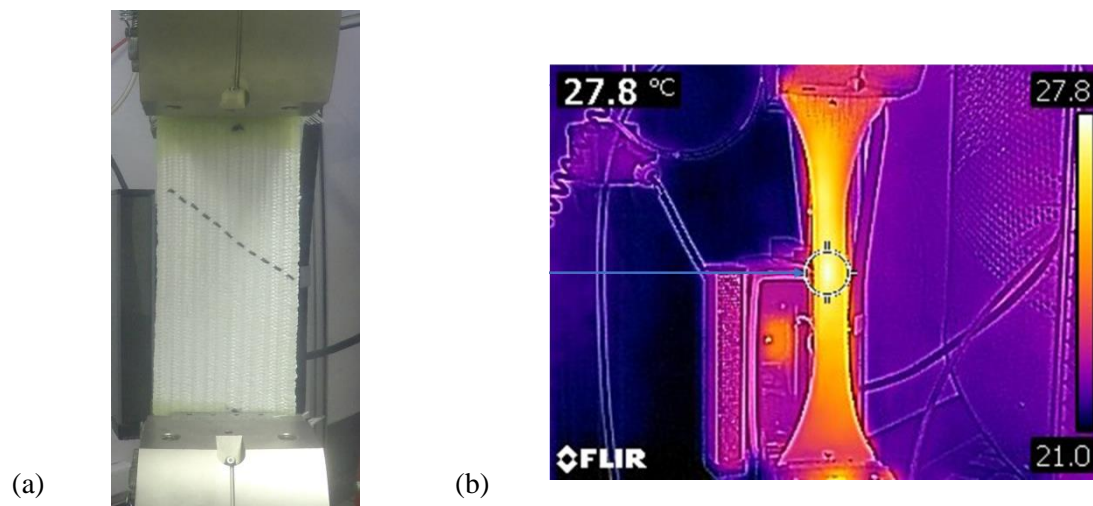


Figure 3 : (a) Eprouvette en traction avec mesure de l'angle. (b) Comportement thermique

3 Comportement en traction

La réponse du comportement en traction est dissociée en deux groupes. Pour les échantillons à grand angle de tressage initial (6-2-42 ; 6-2-68 ; 6-3-48 ; 6-3-54) pour lesquels des déformations à rupture

sont importantes ($>30\%$), les courbes efforts-déformations sont présentées figure 4.a. Pour les 7 autres échantillons, caractérisés par un angle de tressage inférieur à 30° , les courbes sont reportées figure 4.b.

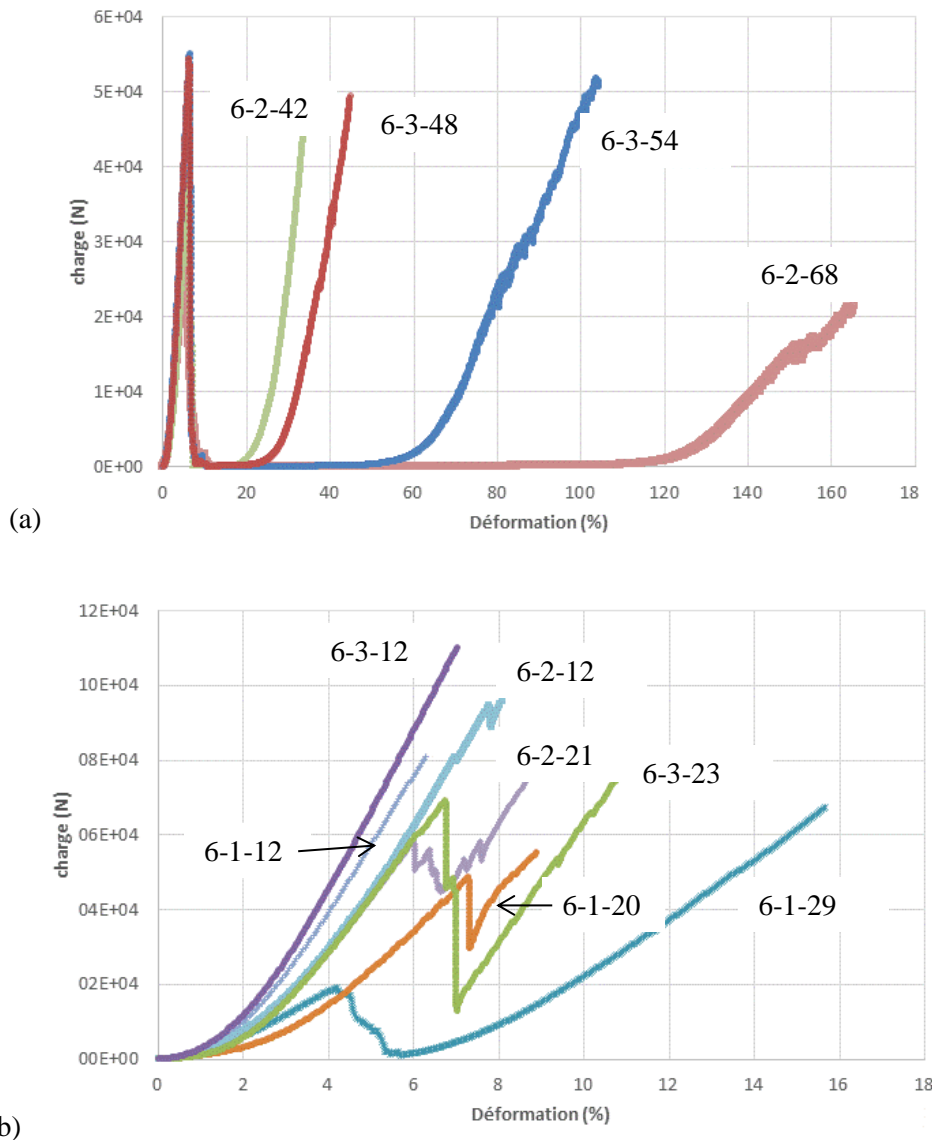


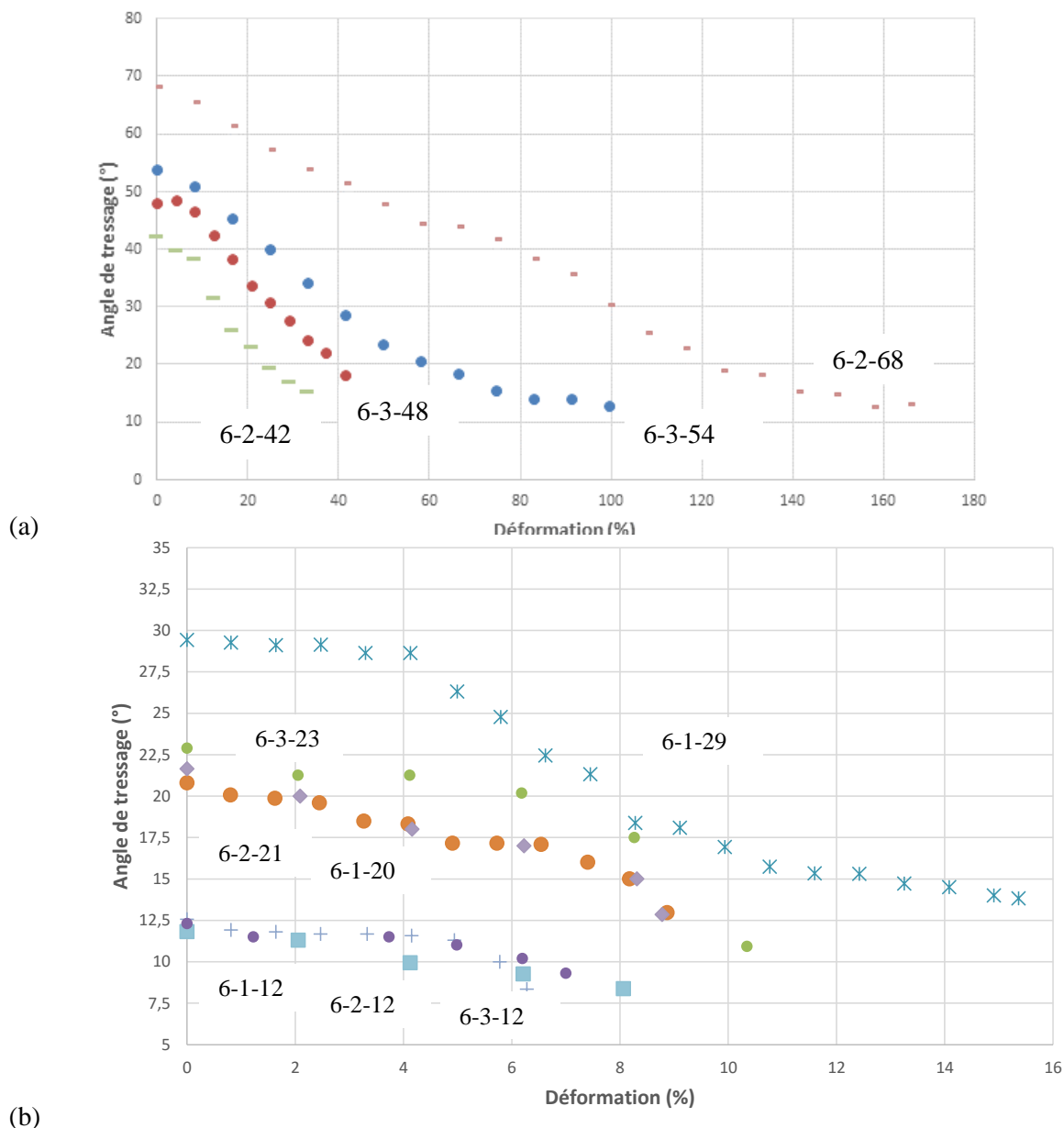
Figure 4 : Courbes de comportement des tresses triaxiales (a) Echantillons à grand angle de tressage. (b) Echantillons à plus faible angle de tressage.

L'analyse de ces courbes conduit aux conclusions suivantes. Pour les grands angles de tressage (figure 4.a), le comportement en traction uniaxiale est caractérisé par des déformations à rupture importantes, pouvant atteindre 160% (6-2-68). Comparativement aux autres échantillons (figure 4.b) (pour lesquels les déformations restent dans une gamme de (6-16%) on peut constater des efforts à rupture inférieurs. Par conséquent plus l'angle des tresses est grand, plus la déformation est importante, mais moins l'effort est conséquent. Le comportement en traction, spécifiquement des tresses triaxiales, est caractérisé par un phénomène de double-pic (chute puis reprise de l'effort) qui a été analysé dans [24, 25] comme la conséquence de la rupture des fils axiaux, dans un premier temps, puis un réalignement des fils de biais dans la direction de sollicitation pour une reprise de l'effort. Ce phénomène de double-pic dépend de l'angle initial de tressage, pour les échantillons à petit angle de tressage (6-1-12, 6-2-12, 6-3-12, figure 4.b), ce phénomène de double-pic n'apparaît pas. La rupture de tous les fils apparaît en même temps. Pour les échantillons d'angle de tressage similaire (6-1-20 ; 6-2-21 et 6-3-23, figure 4.b), le comportement au premier pic est caractérisé par des niveaux d'efforts différents, en fonction du nombre de fils axiaux, mais à des déformations proches. A l'inverse pour les grands angles de tressage

(figure 4.a) le premier pic des 4 échantillons semble identique, le comportement de ces tresses se dissocie sur le second pic. Le comportement de ces tresses peut-être par conséquent synthétisé par les paramètres suivants : Effort et déformation au premier pic ainsi que ces mêmes quantités au second pic, pour les tresses présentant un phénomène de double-pic.

L'augmentation du nombre de fils axiaux se concrétise sur ce premier pic, pour les tresses à faible angle (6-1-12, 6-2-12, 6-3-12, figure 4.b), par une augmentation de l'effort ; la rigidité (en termes de pente de la partie linéaire, ici du premier pic) s'accroît également. Les mêmes conclusions peuvent être tirées sur l'effort maximal au premier pic des échantillons à angle de tressage proche de 20° (6-1-20 ; 6-2-21 et 6-3-23, figure 4.b). L'augmentation de ces paramètres (effort, rigidité) au second pic avec le nombre de fils axiaux, semble, dans une moindre mesure se confirmer, tendant à prouver que les fils axiaux rompus après le premier pic, conservent une influence sur la réorientation des fils de biais. Notons que dans [24, 25] des modèles analytiques prédictifs de la rigidité des tresses en fonction des caractéristiques du fil, du nombre de fils (axiaux et de biais) et de l'angle de tressage ont été proposés.

4 Evolution de l'angle de tressage



(b) **Figure 5** : Mesure de l'angle lors de l'essai de traction (a) Echantillons à grand angle de tressage. (b) Echantillons à plus faible angle de tressage.

Lors des essais de traction, la mesure de l'évolution de l'angle de tressage est réalisée par le protocole, sans contact, décrit précédemment. La variation de l'angle en fonction des déformations est présentée figure 5.a pour les échantillons à grand angle de tressage, et figure 5.b pour les 7 autres échantillons.

L'analyse de ces résultats amène aux conclusions suivantes. Plus la valeur initiale de l'angle de tressage est grande, plus l'amplitude de variation est importante. Ainsi l'échantillon 6-2-68 atteint un angle final de 13° (variation de 55°), alors que les échantillons d'angle initial de 12° (6-1-12,6-2-12 ; 6-3-12), ont un angle final entre 8 et 9° (variation de $3-4^\circ$). On peut constater que tous les échantillons atteignent un angle final compris dans une gamme ($8-13^\circ$). Cette valeur définissant l'orientation finale des fils de biais est liée à l'emplacement disponible, soit la largeur des fils, indépendamment du nombre de fils axiaux. Pour les échantillons à grand angle de tressage, on ne dissocie pas l'évolution des angles des deux pics. Lors du second pic la diminution de l'angle est quasi linéaire lors de l'essai. Pour les échantillons à plus faible angle de tressage, on constate que pour les tresses à simple pic (6-1-12,6-2-12 ; 6-3-12, figure 5.b), la diminution de l'angle est relativement faible et quasi linéaire en fonction des déformations. Pour ces échantillons il n'y a pas d'effet du nombre de fils droits sur la modification de l'orientation des fils de biais. Pour les 3 échantillons à angle initial $\sim 20^\circ$ (6-1-20,6-2-21 ; 6-3-23, figure 5.b), on peut distinguer les 2 pics, avec d'une part une diminution faible ($2-3^\circ$) de l'angle jusqu'à la déformation associée à la rupture des fils axiaux, puis une réorientation lors du second pic et une diminution plus conséquente. Cette quantification des 2 pics par la diminution de l'angle de tressage est illustrée avec l'échantillon 6-1-2 pour laquelle l'angle varie peu jusqu'à environ 4% de déformation qui correspond à la rupture des fils axiaux, la diminution se poursuit linéairement, lors de la reprise de l'effort par les fils de biais.

5 Evolution de la température

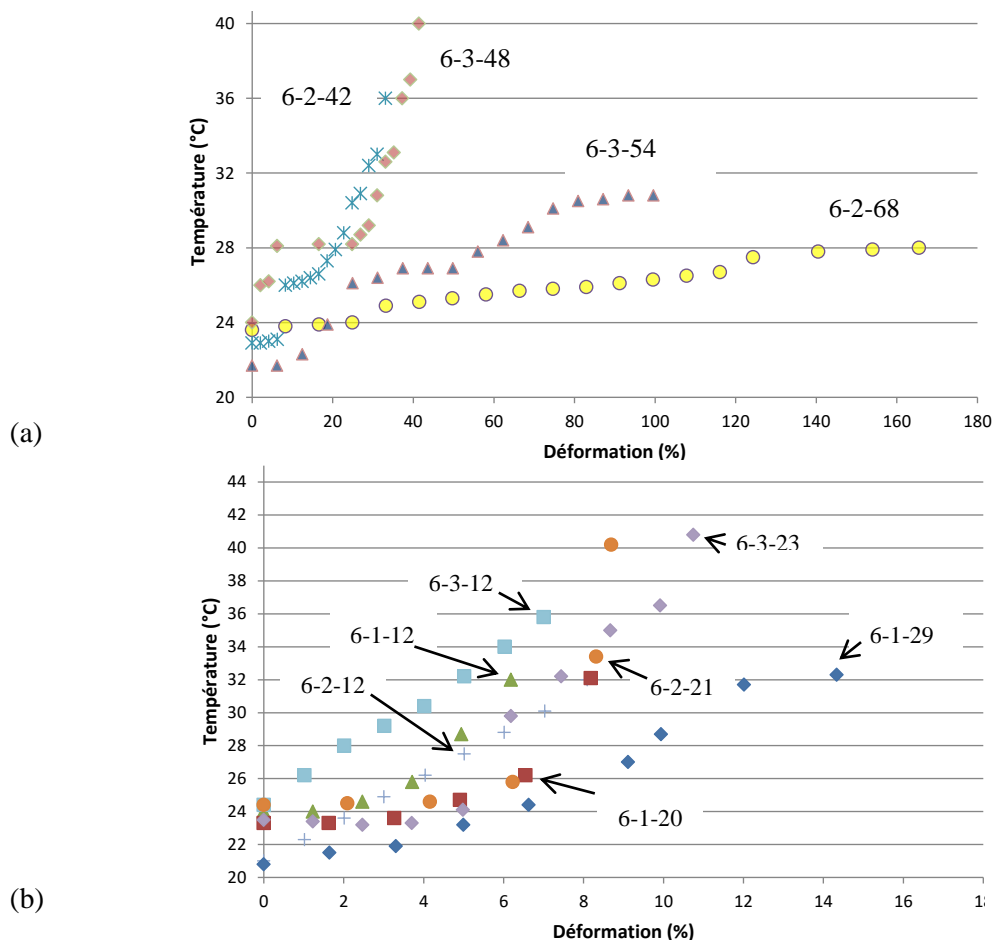


Figure 6 : Relevé de températures lors de l'essai de traction. (a) Echantillons à grand angle de tressage. (b) Echantillons à plus faible angle de tressage.

Lors des essais de traction un échauffement des éprouvettes a été constaté, il a été par conséquent décidé de coupler à cette identification mécanique, une quantification de cette élévation de température, par le protocole décrit précédemment. On reporte les relevés de température en fonction des déformations, figure 6.a pour les échantillons à grand angle de tressage, et figure 6.b pour les 7 autres échantillons. La température initiale des échantillons est entre 21 et 24°C, température environnante. A la lecture de la figure 7.a on constate que lorsque le comportement mécanique s'effectue sur des grandes déformations, (6-3-48 et 6-3-54), l'échauffement reste faible (3-7°C), par contre il atteint respectivement 12-16°C, pour les échantillons (6-2-42 ; 6-3-48) qui ont une pente mécanique lors du double-pic importante (figure 5.a). Pour ces deux échantillons, la figure 6.a montrait que la chute de l'angle de tressage, lors de cette reprise d'effort, était importante, on peut par conséquent associer l'échauffement mesuré, au frottement entre les fils. Pour les échantillons à plus faible angle de tressage, on peut les regrouper, comme pour l'évolution de l'angle de tressage, en 3 groupes. Les tresses à simple pic (6-1-12,6-2-12 ; 6-3-12) qui ont un échauffement limité (6-12°C) et augmentant linéairement. Pour les 3 échantillons à angle initial $\sim 20^\circ$ (6-1-20,6-2-21 ; 6-3-23), on peut distinguer les 2 pics du comportement mécanique, avec d'une part une augmentation assez faible de la température (2-3°C) jusqu'à la déformation associée à la rupture, soit au premier pic, puis un échauffement plus important lors du second pic. Cette phase (figure 6.b) correspondait également à une variation plus importante de l'angle entre les fils. La similarité du comportement thermique avec l'évolution de l'angle de tressage se vérifie également pour l'échantillon 6-1-29. On peut conclure que plus la variation d'angle est rapide et importante, plus l'échauffement, par le frottement des fils, afin de changer d'orientation, est important.

6 Conclusion

Dans le présent travail, une étude expérimentale a été menée sur des renforts tressés couplant l'élaboration d'échantillons sur le métier à tresser du laboratoire GEMTEX, l'analyse de la réponse mécanique en traction uniaxiale, mais également la mesure de l'évolution de l'angle de tressage ainsi que des relevés de températures. Cette étude s'est inscrite dans la continuité des travaux de thèse de B. Duchamp [32] qui avaient mis en évidence le comportement dit à double-pic de tresses triaxiales. La production d'échantillons avec une plus large gamme d'angle de tressage a permis de compléter ces travaux. Le comportement mécanique des tresses triaxiales est fortement dépendant des paramètres d'élaboration, nombre de fils, notamment axiaux et angle de tressage. Le nombre de fils axiaux conditionne le comportement lors du 1^{er} pic de charge, et lors de cette phase la réorientation des fils de biais, et donc l'évolution de l'angle de tressage reste faible. Pour les tresses d'angle supérieur à 15° , et présentant une reprise de sollicitation après rupture des fils axiaux, les fils de biais s'orientent dans la direction de sollicitation, et l'angle de tressage diminue de manière conséquente. Liée à l'utilisation de cette matière, PEHD, les phénomènes de frottement dus au réagencement des fils lors de la sollicitation, et ont pu être mis en évidence via des mesures de températures dans les échantillons, ce qui à la connaissance des auteurs, n'avait pas été réalisé précédemment. Les travaux à venir concerneront, sur la même démarche, l'élaboration et le suivi de l'angle et de la température lors d'essais de traction, de tresses biaxiales.

Références

- [1] Dauda B, Oyadiji SO and Potluri P. Characterising mechanical properties of braided and woven textile composite beams. *Applied Composite Materials*, 2009; 16: 15–31.
- [2] Naik RA. Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 1995; 29: 2334–2363
- [3] P. Potluri, A. Rawal, M. Rivaldi, and I. Porat, Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms. *Composites Part A*, 2003, 34,6: 481-492.

- [4] Mouritz AP, Bannister MK, Falzon PJ, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Composites Part A*, 1999; 30: 1445–1461.
- [5] Bilisik K. Three-dimensional braiding for composites: A review. *Text Res J* 2013; 83: 1414–1436.
- [6] Zhang Q, Beale D, Adanur S, et al. Structural analysis of a two-dimensional braided fabric. *Journal of the Textile Institute*, 1997; 88: 41–52.
- [7] K. Birkefeld, M. Röder, T. von Reden, M. Bulat, and K. Drechsler, "Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties," *Applied Composite Materials*, 2011, 19, 3-4:259-273.
- [8] Ayranci C and Carey J. 2D braided composites: A review for stiffness critical applications. *Composite Structures*, 2008; 85: 43–58.
- [9] Ayranci A and Carey J. Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry. *Composites Part B*, 2010; 41: 229–235.
- [10] Potluri P, Manan A, Francke M, et al. Flexural and torsional behaviour of biaxial and triaxial braided composite structures. *Composite Structures*, 2006; 75: 377–386.
- [11] Li S, Liu L, Yan J, et al. An approach for testing and predicting longitudinal tensile modulus of 3D braided composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014; 33: 775–784.
- [12] Pickett AK, Sirtautas J and Erber A. Braiding simulation and prediction of mechanical properties. *Applied Composite Materials*, 2009; 16: 345–364.
- [14] Byun JH and Chou T-W. Modelling and characterization of textile structural composites. A review. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1989; 24: 253–262.
- [15] L. Laberge-Lebel and Suong Van Hoa, Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Carbon/Nylon Commingled Fibers. *Journal of Composite Materials*, 2007, 41, 9:1101-1121.
- [16] Potluri P. Braiding. In: Nicolais L, Borzacchiello A (eds) *Wiley encyclopedia of composites*, 2nd edn. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [17] Head AA, Ko FK and Pastore C. *Handbook of Industrial Braiding*. Atkins and Pearce, 1990.
- [18] Harte AM, Fleck NA. On the mechanics of braided composites in tension. *European Journal of Mechanics - A/Solids* 2000; 19: 259–275.
- [19] Rawal A, Kumar R and Saraswat H. Tensile mechanics of braided structures. *Textile Research Journal*, 2012; 82: 1703–1710.
- [20] Rawal A, Potluri P and Steele C. Geometrical modeling of the yarn paths in threedimensional braided structures. *Journal of Industrial Textiles*, 2005; 35: 115–135.
- [21] Rawal A, Saraswat H and Kumar R. Tensile response of tubular braids with an elastic core. *Composites Part A* 2013; 47: 150–155.
- [22] Rawal A, Sibal A and Saraswat H. Tensile behaviour of regular triaxial braided structures. *Mechanics of Material* 2013; 91: 277–289.
- [23] Rawal A, Saraswat H and Sibal A. Tensile response of braided structures: A review. *Textile Research Journal*, 2015; 85: 2083–2096.
- [24] Duchamp B., Legrand X., Soulat D. Structural and tensile behaviors of braided reinforcements: characterization and model," In Y. Kyosev Ed. *Advances in Braiding Technology Specialized Techniques and Applications*, Woodhead Publishing, ISBN :9780081009260, 2016
- [25] Duchamp B., Legrand X., Soulat D.. The tensile behavior of biaxial and triaxial braided fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, first published on June 16, 2016 as doi: 10.1177/1528083716654469
- [26] ISO 2062: Yarns from packages – determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester. International Standard, ISO 2062 modified, 2009.
- [27] Risicato JV, Kelly F, Soulat D, et al. A complex shaped reinforced thermoplastic composite part made of commingled yarns with integrated sensor. *Applied Composite Materials*, 2015; 22: 81–98.
- [28] Jacquot P.B., Wang P., Soulat D., Legrand X. Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 2016; 46 (3): 698-718.

- [29] Branscomb D, Beale D and Broughton R. New directions in braiding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2013; 8: 11–24.
- [30] Kostar TD and Chou TW. A methodology for Cartesian braiding of three-dimensional shapes and special structures. *Journal of Material Science*, 2002; 37: 2811–2824.
- [31] Du GW and Popper P. Analysis of a circular braiding process for complex shapes. *Journal of the Textile Institute*, 1994; 85: 316–337.
- [32] Duchamp B. Contribution à l'élaboration de préformes textiles pour le renforcement de réservoir souples. *Phd_Thesis Université Lille*. October 2016.