



HAL
open science

Caractérisations mécaniques de renforts à base de fibres naturelles pour l'analyse de la déformabilité

J. Moothoo, D. Soulat, P. Ouagne, Samir Allaoui

► **To cite this version:**

J. Moothoo, D. Soulat, P. Ouagne, Samir Allaoui. Caractérisations mécaniques de renforts à base de fibres naturelles pour l'analyse de la déformabilité. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.55. hal-00597931

HAL Id: hal-00597931

<https://hal.science/hal-00597931>

Submitted on 2 Jun 2011

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.

Caractérisations mécaniques de renforts à base de fibres naturelles pour l'analyse de la déformabilité.

Mechanical properties of natural fibre based reinforcements for the analysis of the deformability

J. MOOTHOO, D.SOULAT, P. OUAGNE, S.ALLAOUI

Laboratoire Prisme
Université d'Orléans – 8, rue Léonard de Vinci -45072 Orléans CEDEX
e-mail : julien.moothoo@univ-orleans.fr , damien.soulat@univ-orleans.fr, pierre.ouagne@univ-orleans.fr, samir.allaoui@univ-orleans.fr

Résumé

Ce travail s'inscrit dans l'analyse de la déformabilité des renforts à base de fibres naturelles lors de l'étape de préformage du procédé RTM. Lors de cette phase, étudiée expérimentalement sur un banc d'essai spécifique, et plus spécialement lorsque les formes souhaitées sont très non-développables, les limites du comportement mécanique peuvent être atteintes par le biais d'un certain nombre de défauts. Cet exemple, au travers du procédé montre la nécessité de connaître et d'identifier les potentialités et caractéristiques mécaniques de ces renforts mais pas seulement à l'échelle des fibres mais à l'échelle des mèches et des renforts tissés. Cette démarche est présentée dans le cadre de renforts de lin.

Abstract

This paper presents one of the first experimental investigations on dry woven preform made of flax yarns with the view to analyze the formability of these reinforcements made of natural fibre. The specific preforming device is presented. It is constituted by a mechanical module designed to form severe geometries such as strongly double curved shapes. It is also constituted by an optical module to measure local strains during the forming process. An analysis of the defects at the scale of the preform, such as wrinkling or buckle and the measurement of the shear angle of the reinforcement is conducted in conjunction to a mechanical characterisation of the considered reinforcement

Mots Clés : Composite, préformage RTM, renforts de lin, fibres naturelles.

Keywords : Composites, Preforming, flax fabric, Natural Fibres.

1. Introduction.

Les fibres naturelles, d'origines animales ou végétales font l'objet de nombreuses études quant à leurs potentialités en tant que renforts pour des composites thermodurcissables ou thermoplastiques [1, 2]. Cet intérêt croissant est relatif à leurs caractéristiques de recyclabilité, leur faible densité comparativement aux fibres de verres ou de carbone, mais également leurs caractéristiques notamment en tension [3]. Par conséquent de nombreuses publications portent sur l'identification de leurs caractéristiques mécaniques et ce pour des fibres de différentes natures et origines [4-7]. Ces travaux, à l'échelle des fibres ou de paquets de fibres, investiguent l'influence de nombreux paramètres comme le type de fibres, leur densité, la longueur et la section sur le module d'Young, la contrainte à rupture mais également les déformations à rupture [8]. L'extrême complexité de la microstructure (longueur, alignement, agencement des micro-fibrilles) constituant ces fibres et son influence sur le comportement mécanique en tension uniaxiale justifie ces nombreux travaux. Notons qu'une alternative pour démontrer les potentialités de ces renforts consiste à les pré-imprégner et d'identifier le comportement mécanique du composite ainsi réalisé, cet aspect fait l'objet de nombreuses publications [9-11]. L'intérêt relève que l'identification ne porte pas seulement sur la caractérisation en tension, mais également en flexion, compression à l'échelle de l'échantillon en fonction des fractions volumiques de renfort introduites. Par contre sur cet axe le choix de la résine (thermodurcissable, thermoplastique), l'influence des conditions procédés [12,

13] mais surtout l'adhésion fibres matrices [14] source de fragilité dans les composites sont à prendre en compte.

Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons aux procédés de fabrications des pièces composites au cours desquels le renfort, sans résine, est déformé. Ainsi dans la famille des procédés de type LCM (Liquid Composite Moulding), on peut citer la phase de préformage du renfort sec du procédé RTM (Resin Transfer Moulding) [15], ou également les étapes d'enroulement filamenteuses de mèches. Dans ces applications, les échelles concernées par ces renforts sont celles des mèches (assemblage de fibres) ou celle des renforts (assemblage de mèches). La faisabilité de réaliser ces préformes, et notamment lorsque les formes sont complexes, dépend des caractéristiques mécaniques. Or peu de travaux, contrairement aux fibres de carbone ou de verres [16, 17], portent sur l'identification des caractéristiques mécaniques des renforts à base de fibres naturelles à ces échelles. A l'image des études menées sur ces renforts largement utilisés dans l'aéronautique on se propose, dans le cadre de renfort de lin d'identifier le comportement mécanique en tension uniaxiale (mèches et renforts tissés), en traction biaxiale et cisaillement plan (renforts tissés). Le lien entre déformabilité de ces renforts de lin, lors du procédé de fabrication et comportement mécanique est illustré lors de la phase de préformage du procédé RTM. Dans le cas de forme fortement non-développables, il est nécessaire d'utiliser des renforts tissés bidirectionnels ; la modification de l'orientation des mèches et de la variation locale de densité de renfort a une influence sur l'étape d'imprégnation par le biais des perméabilités mises en jeu. Par ailleurs les défauts obtenus lors de cette phase, tels que les plis, influent sur les caractéristiques finales de la pièce. Lors de cette étape, des travaux expérimentaux [18] et numériques [19, 20], menés sur le carbone ont montré que les déformations induites dans le renfort étaient complexes. Ainsi si les déformations en tensions dans les mèches peuvent être faibles, les angles de cisaillement peuvent atteindre des valeurs importantes (plus de 50°) [17]. Dans la section 2, sera présenté le dispositif de préformage de renfort sec utilisé. Les premiers résultats de l'analyse de la déformabilité des renforts tissés de lin seront introduits dans la section 3. Les étapes du protocole expérimental seront détaillées ainsi que l'analyse menée à l'échelle de la préforme mais également localement afin de suivre les déformations dans certaines zones. Enfin dans la section 4, le lien entre déformabilité et identification du comportement mécanique est abordé.

2. Dispositif de préformage de renfort sec

Un banc d'essai spécifique (Fig.1a) a été réalisé en collaboration avec la société EADS [21], l'objectif est de pouvoir préformer des renforts secs, notamment sur des formes complexes, mais également analyser les déformations lors du procédé. Cette démarche expérimentale est essentielle pour corréliser avec les outils de simulations par éléments finis de cette étape de préformage [19]. Ce banc est constitué de deux parties, une section mécanique capable d'imprimer la forme et une partie associée à la mesure optique des déformations. La partie mécanique est composée de couples interchangeables de poinçons/matrice mais également de serres-flans. Un vérin électrique central commande la montée du poinçon. La particularité des matrices est qu'elles sont ouvertes pour permettre la prise d'image par les caméras. Neufs serres-flans pneumatiques, interchangeables dans leur position, dimension, et qui permettent de faire varier la pression appliquée sont présents autour de la préforme. Cet aspect est important pour prendre en compte l'influence des paramètres procédés sur la qualité des préformes obtenues. Contrairement à des études menées sur des formes hémisphériques ou sphériques pour lesquelles les préformages peuvent se réaliser sans défauts en l'absence de pressions serres-flans [22], pour des formes très non-développables il est essentiel d'appliquer des pressions pour éviter les plis. A cet effet, différents poinçons contenant des points-triples, des faces, des arêtes ont été conçus. Ce banc d'essai dispose par ailleurs d'un outillage (non représenté sur le schéma, Fig.1.a) permettant d'appliquer une pré-tension initiale sur le renfort, afin d'assurer de rester plan en début d'essai. Dans le cadre de ce travail, le poinçon tétraédrique

(Fig.1b) a été utilisé. L'objectif étant d'analyser la faisabilité d'obtenir des préformes sans défauts à partir de renforts de lins.

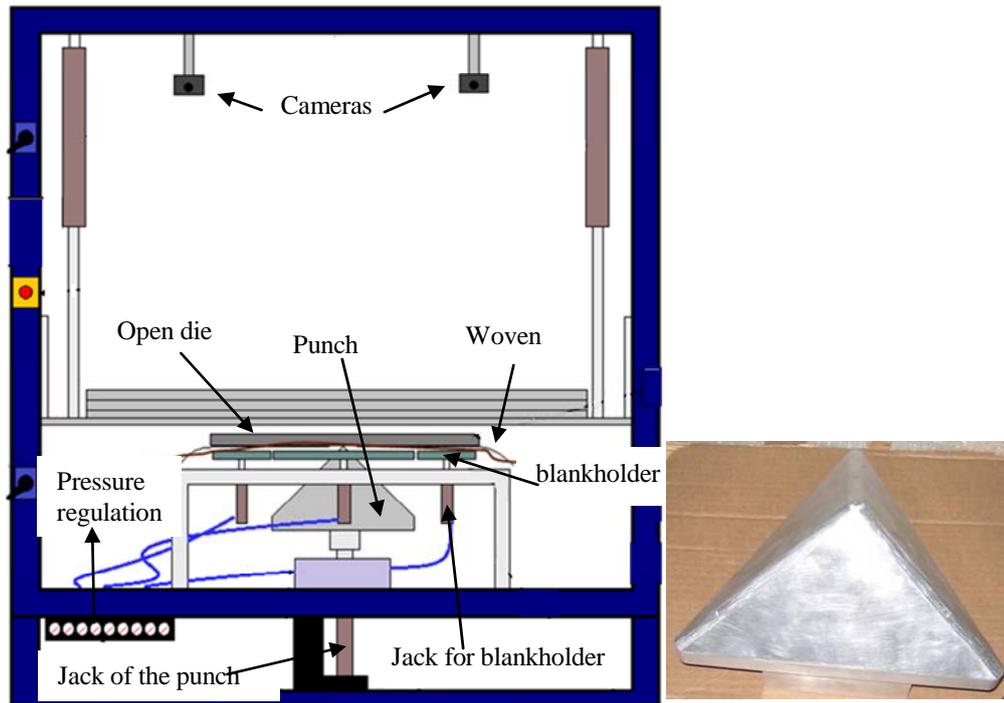


Fig. 1. (a) Description du banc d'essai. (b) Poinçon utilisé.

La seconde partie de ce banc est constitué d'une chaîne d'acquisition optique pour la mesure des déformations lors de l'essai. Cette chaîne permet des mesures localisées à certains endroits de l'échantillon. Deux caméras placées au-dessus du banc enregistrent les images lors de l'essai, et sont associées à une technique de suivi de marqueurs [23] qui permet de calculer la position et le déplacement des marqueurs initialement placés sur l'échantillon. Du champ de déplacement sont déduites les composantes de déformations et plus spécifiquement celles de cisaillement plan mais également les déformations le long des mèches, et ce en différents endroits de la préforme. Lors de la préparation le positionnement et le type des marqueurs demande une certaine attention, notamment pour le lin, de couleur claire qui nécessite des marqueurs permettant un contraste suffisant pour les caméras.

3. Essais de déformabilité des renforts de lins

3.1 Caractéristiques du renfort et condition des essais

Le renfort de lin utilisé est un taffetas tissé de masse surfacique d'environ 625 g/m². Ce renfort n'est pas équilibré au sens que les mèches dans le sens chaîne sont plus larges (3-4 mm) que celles dans le sens trame (2,8 mm), l'espacement entre les mèches dans cette direction est par conséquent plus important. Ce renfort est constitué de mèches (fig.2.b) qui contiennent elles-mêmes un grand nombre de fibres (environ 1000) (Fig.2.c). La constitution est importante quant à son influence sur le comportement mécanique. On peut ainsi constater qu'à l'échelle des mèches le nombre de fibres et leur alignement influera sur le comportement mécanique en tension dans l'axe de la mèche; à

l'échelle du renfort tissé le déséquilibre entre les largeurs de mèches fait que l'orientation initiale du renfort, relativement à la forme du poinçon est à prendre en compte.



Fig 2. (a) Renfort tissé de lin (b) Mèches. (c) Constitution des mèches

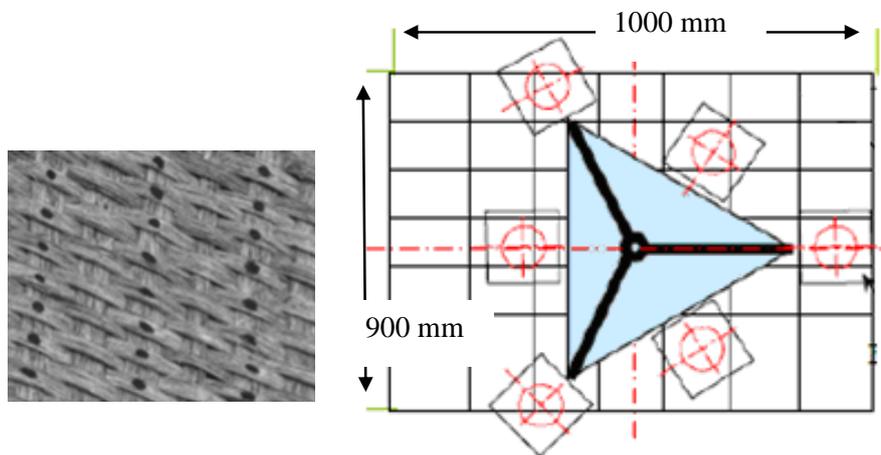


Fig 3. (a) Marqueurs (b) Position des serres-flans

Les différentes étapes du protocole sont les suivantes, un échantillon initialement rectangulaire du renfort tissé est découpé dans le rouleau. La première phase consiste en l'application de marqueurs sur le renfort (Fig.3.a). Ces marqueurs doivent être disposés au centre des mèches et surtout en nombre suffisant pour pouvoir calculer le déplacement en différentes zones. L'échantillon est alors positionné sur le banc d'essai et mis en tension par le système de pré-tension afin d'être bien plan avant l'application des pressions serres-flans. Pour ce test, six serres-flans (Fig.3.b) sont utilisés et répartis de sorte à appliquer une pression aux 3 coins du tétraèdre mais également au milieu des faces. Une pression de 1 bar est appliquée de manière uniforme. Le déplacement maximal du poinçon est de 150mm. L'ensemble de ces paramètres, liés au procédé (position des serres-flans, valeur des pressions appliquées, forme du poinçon, course du poinçon) mais également liés au matériau (type de renfort tissé, disposition originel du tissu) influent sur la forme et sur les défauts sur la préforme. Cette étude qualitative fera l'objet de prochains travaux. Lors de ce protocole, le positionnement et le réglage des caméras spécifiquement vers une des faces de la préforme font l'objet de la procédure de tests. Pendant toute la durée de l'essai les deux caméras prennent des photos, qui enregistrent ainsi la position des marqueurs associée aux différents états de la préforme. A l'issue du test, une résine epoxy est appliquée sur la préforme afin de la figer et ainsi l'extraire des outils sans l'endommager. Deux types d'analyses sont conduits à la fin de l'essai. Une analyse globale à l'échelle de la préforme, mais également une analyse locale, sur certaines zones, grâce au logiciel de suivi de marqueurs.

3.2 Analyse globale de la préforme

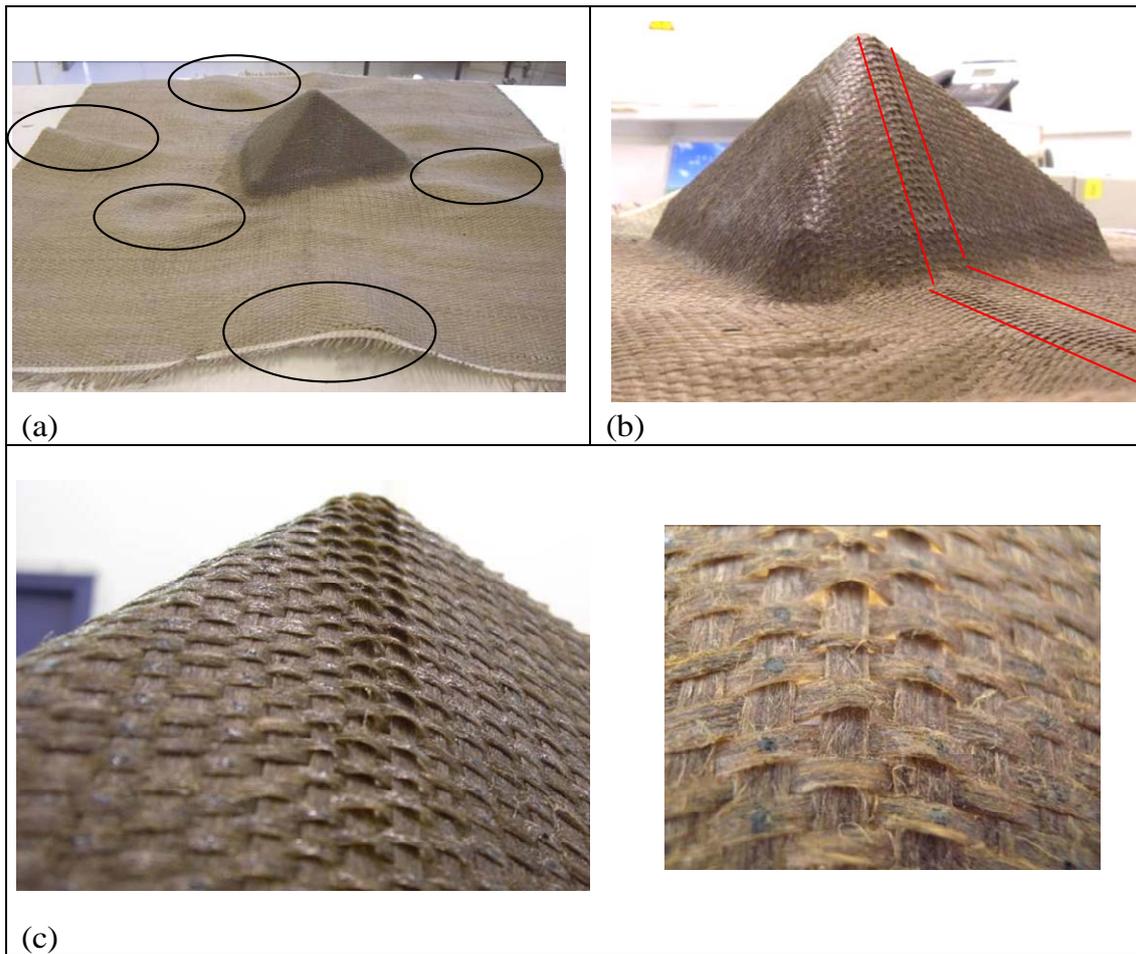


Fig 4. (a) Plis en-dehors de la zone utile ; (b) Position de surépaisseur ; (c) zoom sur ces boucles

L'analyse globale de la préforme montre qu'il n'y a pas de plis sur la zone utile, et que le renfort est bien plaqué sur les faces. On peut conclure que les pressions serres-flans appliquées sont suffisantes dans ce cas pour obtenir le bon avalement. On constate qu'en dehors de cette zone utile des plis se forment (Fig.4.a), soit sur les contours de l'échantillon mais également autour des serres-flans. Plus localement des zones de surépaisseurs de matière sont présentes, au milieu de faces (Fig.4.b) et sur une arête du tétraèdre. Ces surépaisseurs proviennent de boucles générées par les mèches perpendiculaires à celle qui passe par le point-triple du poinçon. Ce phénomène de boucle ou de flambement des mèches a pour conséquence que localement la préforme présente une surépaisseur de matière qui n'est pas acceptable en terme de qualité de la préforme. En effet l'imprégnation de résine ne pourra s'effectuer correctement lors de la phase d'injection. Ce type de défaut provient de la forme spécifique du poinçon et notamment du point triple par lequel passe une mèche qui est plus tendue que les autres. Par le tissage les mèches perpendiculaires sont entraînées et se courbent jusqu'à flamber et sortir du plan de la face pour générer cette surépaisseur.

3.3 Analyse locale des déformations

Grâce au système optique composé des caméras et du logiciel de suivi de marqueurs il est possible de se focaliser sur certaines zones de la préforme et de calculer, à l'aide de l'évolution de la position

des marqueurs, des déformations spécifiques dans le plan du renfort tissé. Sur une des faces de la préforme on peut ainsi calculer l'angle de cisaillement entre les mèches, à l'instant final (Fig.5.a). On constate que ces déformations de cisaillement, autour de la zone de surépaisseur, sont homogènes en terme d'angle atteint. Cette homogénéité quantifie l'aspect que le renfort sur toutes ces faces épouse bien le poinçon. Notons que ces calculs ne peuvent être réalisés dans la zone des boucles car les marqueurs ne sont plus dans le plan de la face. L'intérêt du système optique relève du fait que les quantités sont enregistrées tout au long du procédé, on peut ainsi tracer (Fig.5.b) pour ces zones l'évolution de l'angle de cisaillement entre les mèches en fonction de la course du poinçon.

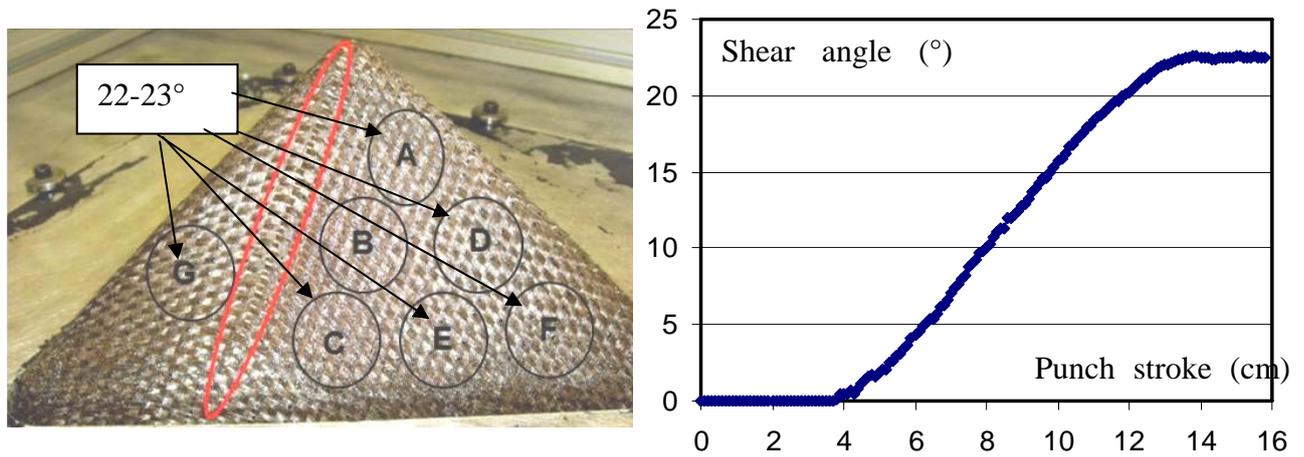


Fig 5. (a) Angle de cisaillement sur une des faces ; (b) Evolution lors du procédé

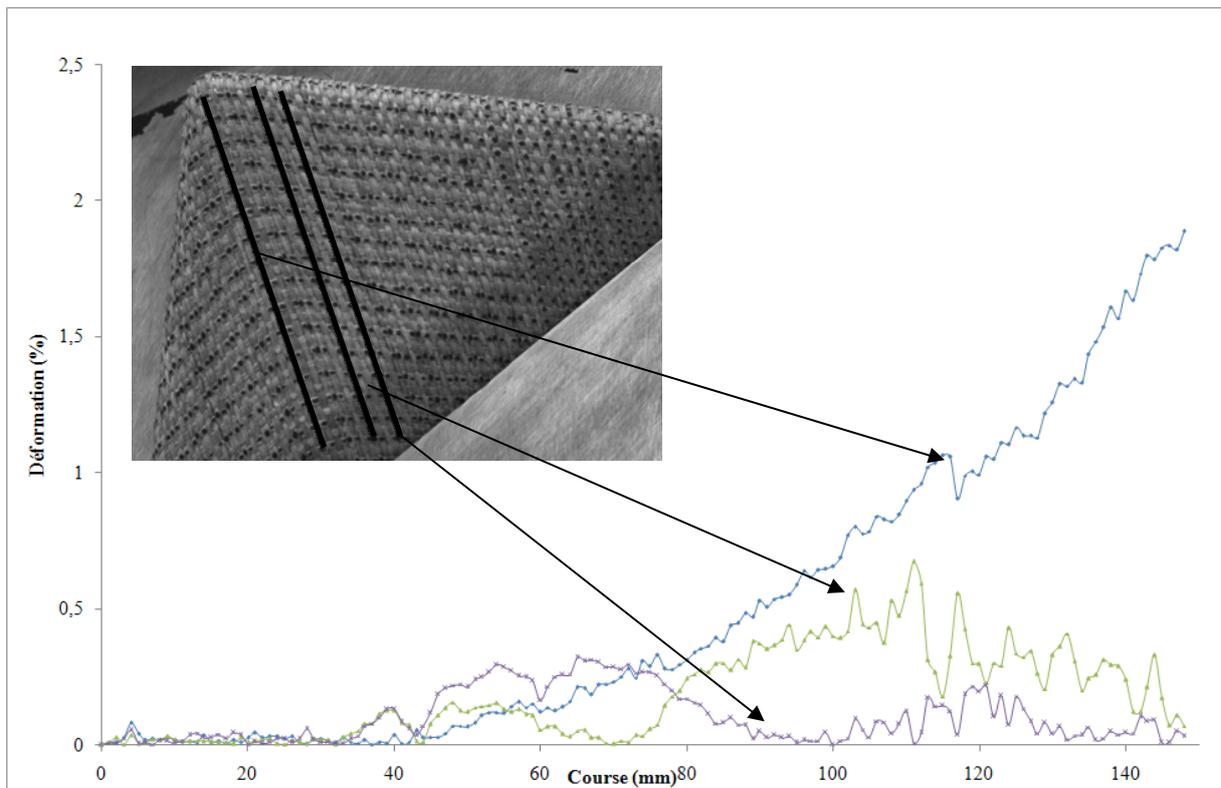


Fig 6. Evolution des déformations dans les mèches

L'analyse globale de la préforme a montré que certaines mèches, et notamment celle qui passe par le point triple, sont assujetties à des efforts de tension, plus conséquentes que d'autres. Ce phénomène peut-être quantifié grâce à l'analyse locale des déformations. On s'intéresse à 3 mèches dont celle qui passe par le point triple. En suivant des marqueurs positionnés sur ces mèches, on reporte (Fig.6) l'évolution des déformations le long de ces mèches en fonction de la course du poinçon, soit au cours du procédé. On vérifie que les déformations de tension sont quantitativement plus importantes dans cette mèche comparativement aux deux autres. Ce résultat est intéressant car ce phénomène de tension est dû à la forme spécifique mais également à la pression du serre-flan sous lequel les mèches sont comprimées. Une étude quantitative de ces déformations de tension en fonction des pressions imposées fera l'objet de futurs travaux. Notons que pour les post-traitements des quantités au cours du procédé la localisation des zones d'intérêt est importante. Ces zones doivent être, au cours du procédé toujours accessible par les caméras, lorsque des points apparaissent avec l'avalé de matière, le calcul des déformations devient alors approximatif.

4. Lien entre comportement mécanique et déformabilité

Les études antérieures menées entre autre sur les renforts de carbone [18, 24], ont montré que les déformations lors du préformage de renforts secs sont complexes et sont une combinaison de plusieurs phénomènes : traction biaxiale, cisaillement plan, traction dans les mèches, mais également de la compaction lors d'essais de préformage de multiplis et de la flexion. Il est nécessaire pour une forme et des conditions procédés (pression serre-flan, entre autre) donnés de savoir si les déformations atteintes lors du procédé sont acceptables par le renfort. Associé aux essais de déformabilité décrits dans les sections précédentes, une première campagne d'essai d'identification du comportement a été menée sur les renforts de lin, d'une part à l'échelle des mèches en traction uniaxiale mais également à l'échelle du renfort tissé pour identifier le comportement en cisaillement.

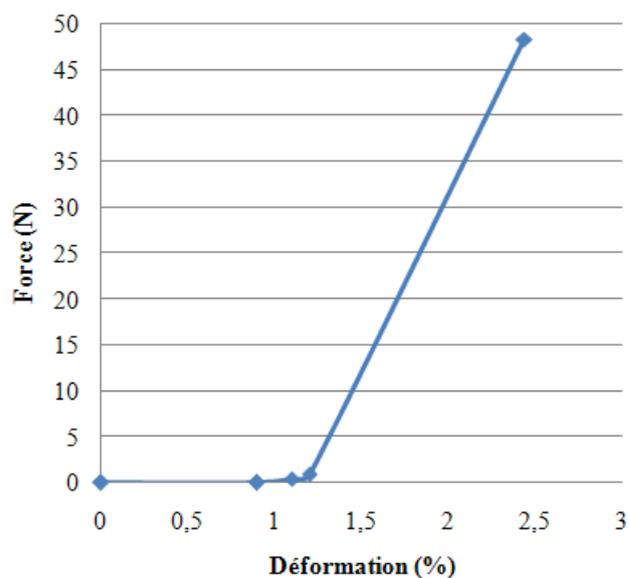


Fig 7. (a) Echantillon mèche pour l'essai de traction. (b) Comportement en traction.

Des mèches de différentes longueurs sont extraites du renfort tissé afin de réaliser une série d'échantillon. Des mors sont fixés aux extrémités (Fig.7.a). Les résultats présentés (fig.7.b) sont la moyenne de 10 lots testés pour des mèches de 50 mm de long. Vu la disparité des sections et épaisseurs de ces mèches de Lin, les résultats sont présentés en terme d'effort (par mèche) en fonction de la déformation, et non en contraintes-déformation. Cette présentation permettra par ailleurs de comparer le comportement en traction, des mèches et des renforts tissés.

On constate une première phase d'effort quasi-nul puis un comportement linéaire. La première phase, classique dans le comportement en traction des mèches [25] est associée à l'alignement des nombreuses fibres constituant la mèche dans la direction de traction. Ce phénomène est un peu plus prononcé dans le cas du renfort de lin testé, car les mèches sont assez larges et contiennent de nombreuses fibres. Notons que les déformations obtenues sont comparables aux résultats présentés dans la littérature pour la fibre de lin [9].

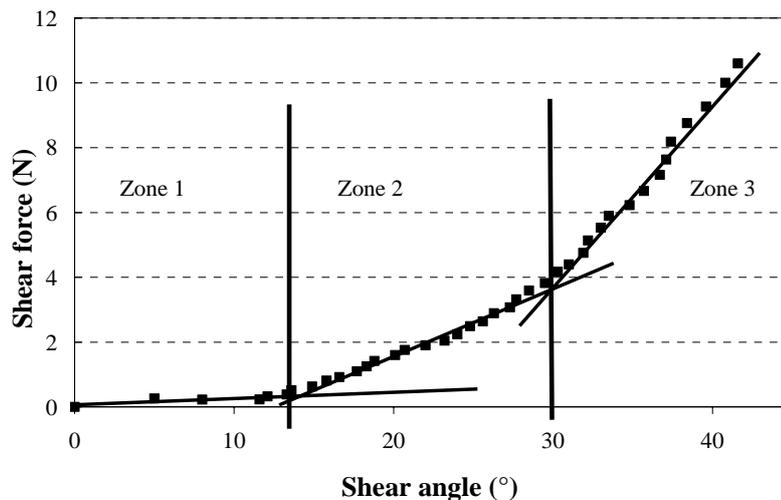


Fig 8. Comportement en cisaillement plan d'un renfort tissé de lin

Un essai d'identification du comportement en cisaillement a été réalisé, à l'échelle du renfort tissé, par un essai de bias-test [16]. La courbe (Fig.8) montre les 3 zones caractéristiques d'un comportement en cisaillement. Tout d'abord une zone où la rigidité est très faible au cours de laquelle les mèches peuvent facilement tourner. Dans la zone 2 les mèches viennent en contact et des phénomènes de compression entre les mèches apparaissent, la rigidité croit alors. Puis la rigidité augmente, à partir d'une valeur de l'angle, dit angle de blocage, au-delà duquel des défauts de type plis apparaissent. Les résultats montrent que pour ce renfort de lin, l'angle de blocage se situe aux alentours de 30°. Cette valeur confirme que les angles relevés sur la face de la préforme restent en-deçà de cette valeur limite et qu'aucun pli n'apparaît sur cette face.

5. Conclusions et perspectives

Dans ce travail, les premiers essais de déformabilité de renforts tissés de lin ont été menés et plus spécifiquement sur des formes complexes. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des nombreuses études portant sur les renforts à base de fibres naturelles tendant à montrer les potentialités de ces renforts en vue de leurs applications techniques. Ces potentialités longuement étudiées à l'échelle des fibres tentent à se confirmer lorsque l'on assemble ces fibres en mèches ou en renfort. La constitution des mèches de lin et notamment les différents assemblages que l'on peut trouver, influe fortement sur la déformabilité à l'échelle du renfort. Le nombre de fibres, leurs alignements, les sections mais également leur composition (fibres de lin pur ou pré imprégnées de résine (PLA, PP)) de même que le type de tissage à l'échelle du renfort sont des paramètres à

prendre en compte pour analyser leur influence sur la déformabilité. Ces études feront l'objet de travaux futurs qui seront menés sur le banc d'essai de préformage présenté dans ce travail. Ce banc associé à des poinçons de forme complexe comme celle utilisée dans ce travail permet de prendre en compte l'influence des paramètres procédés sur l'obtention d'une préforme sans défaut. En parallèle de ces travaux sur le procédé de préformage de renforts secs, les travaux à venir vont porter sur l'identification des caractéristiques mécaniques des mèches et renforts tissés à base de fibres naturelles, par le biais d'essais de traction uniaxiale et biaxiale mais également en cisaillement plan.

Remerciements

Les auteurs remercient le Groupe Depestelle pour la fourniture des matériaux

Références

- [1] Wambua P., Ivens J., Verpoest. "Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastic?" *Composite Science and Technology*. 63:1259-1264 (2003).
- [2] Summerscales, J., Dissanayake, N.P., Virk, A.S., Hall, W., A Review of Bast Fibres and their Composites. Part 1 – fibres as reinforcements, *Composites: Part A* (2010), doi: 10.1016/j.compositesa.2010.06.001
- [3] Malkapuram R, Kumar V, Yuvraj SN. Recent development in natural fibre reinforced polypropylene composites. *J Reinf Plast Compos* 2008;28:1169–89.
- [4] Baley C. "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile increase" *Composite Part A*. 33:2143-2145 (2002).
- [5] Bodros E., Baley C. "Study of the tensile properties of stinging nettle fibres" *Materials Letters*. 62:2143-2145 (2008).
- [6] Alawar A., Hamed A.M., Al-Kaabi K.. "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement" *Composite Part B*. 40:601-606 (2009).
- [7] Kim J.T., Netravili A.N. "Mercerization of sisal fibers: Effects of tension on mechanical properties of sisal fibers and fiber-reinforced composites" *Composite Part A*. doi:10.106/j.compositesa.2010.05.007.
- [8] Virk A.S., Hall W., Summerscales J. "Failure strain as the key design criterion for fracture of natural fibre composite". *Composite Science of Technology*. 70:995-999 (2010).
- [9] Ku H et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part B* (2011), doi:10.1016/j.compositesb.2011.01.010
- [10] H. Anuar, A. Zuraida. Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre. *Composites: Part B* 42 (2011) 462–465
- [11] Summerscales, J., Dissanayake, N., Virk, A., Hall, W., A Review of Bast Fibres and their Composites. Part 2 – composites, *Composites: Part A* (2010), doi: 10.1016/j.compositesa.2010.05.020
- [12] Ouagne P, Bizet L, Baley C, Breard J. Analysis of the film stacking processing parameters for PLLA/flax fibre biocomposites. *Journal of Composite Materials* (2009) doi:10.1177/0021998309349019
- [13] La Mantia FP, Morreale M. Green composites: A brief review. *Composites: Part A* (2011), doi:10.1016/j.compositesa.2011.01.017.
- [14] A. Le Duigou, I. Pillin, A. Bourmaud, P. Davies, C. Baley. Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(L-lactide) composites. *Composites: Part A* 39 (2008) 1471–1478
- [15] Buntain M.J., Bickerton S. "Modeling forces generated within rigid liquid composite moldings tools. Part A: Experimental study" *Composites Part A*. 38:1729-1741 (2007).
- [16] Cao J. et al. "Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results". *Composites: Part A*; 39: 1037–1053, (2008).
- [17] J. Launay, G. Hivet, A.V. Duong, P. Boisse. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composites reinforcements. *Composite Science of Technology*. Vol. 68, Issue 2, 2008, pp.506-515.
- [18] Hivet G., Allaoui S., Soulat D., Wendling A., Chatel S. Analysis of woven reinforcement performing using an experimental approach. *Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials (ICCM17)* 27 Jul 2009 - 31 Jul 2009, Edinburgh, UK.
- [19] Allaoui S et al. Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape. *Composites: Part A* (2011), doi:10.1016/j.compositesa.2011.02.001
- [20] Boisse P., Hamila N., Helenon F., Hagege, B., Cao J. "Different approaches for woven composite reinforcement forming simulation" *International Journal of Material Forming*. DOI: 10.1007/s12289-008-0002-7.

- [21] Soulat D., Allaoui S., Chatel S. "Experimental device for the preforming step of the RTM process". *International Journal of Material Forming* 2 (1) 181–184 (2009).
- [22] B. Zhu, T.X. Yu, H. Zhang, X.M. Tao. Experimental investigation of formability of commingled woven composite preform in stamping operation. *Composites: Part B* 42 (2011) 289–295.
- [23] Launay J., Lahmar F., Boisse P., Vacher P.. "Strain measurement in tests of fibre fabric by image correlation method". *Advanced Composite Letters* 11, (1), 7-12 (2002).
- [24] Boisse, P., Hamila, N., Vidal-Sallé, E., Dumont, F., Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses, *Composites Science and Technology* (2011), doi: 10.1016/j.compscitech.2011.01.011
- [25] A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, P. Boisse. Approche hyperélastique pour la simulation de renforts tissés de composites. *Revue des Composites et Matériaux avancés*, 2011, à paraître.