

Développement de rovings guipés chanvre/thermoplastique pour la réalisation de préformes pour matériaux composites

Anne-Clémence Corbin^a, Damien Soulat^a, Manuela Ferreira^a, Ahmad-
Rashed Labanieh^a

a. ENSAIT-GEMTEX – Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles, 2 Allée Louise et Victor
Champier BP30329 59056 Roubaix Cedex 1, anne-clemence.corbi@ensait.fr

Résumé :

Les fibres naturelles sont de plus en plus utilisées en remplacement des fibres synthétiques dans la réalisation de préformes pour matériaux composites. Ces fibres naturelles, utilisées notamment pour leur aspect respectueux de l'environnement, sont majoritairement utilisées avec des résines thermodurcissables, qui sont difficilement recyclables. L'utilisation de résines thermoplastiques peut alors apparaître comme une alternative pour produire des matériaux biosourcés, puisqu'elles sont plus simples à recycler et permettent de réduire les temps et coûts de production. Une fois le polymère thermoplastique associé aux fibres naturelles dans une même préforme, le composite est produit par thermocompression. Cette association fibre naturelle/polymère thermoplastique peut se faire par le procédé de guipage, dans lequel un multifilament de polymère thermoplastique est enroulé autour d'un fil de fibres naturelles. Dans cette étude, un roving guipé chanvre/PA12 sera produit et caractérisé, puis des préformes et des plaques composites seront également élaborés et leurs propriétés analysées.

Abstract:

Natural fibers are more and more used to substitute for man-made fibers in manufacturing of preforms for composite applications. These natural fibers, used in particular for their environmental friendly aspect, are mainly used with thermosetting resins, which are difficult to recycle. The used of thermoplastics resins can be an alternative to manufacture biobased composites, since they are easier to recycle and lead to a decrease of production time and costs. Once the thermoplastic polymer is combined with natural fibers in the same preform, the composite material is produced by thermocompression. This combination of natural fiber and thermoplastic polymer can be achieved by wrap spinning process, in which a thermoplastic polymer multifilament is wound around a natural fiber yarn. In this study, a wrap roving hemp/PA12 will be produced and characterized, then preforms and composite plates will be manufactured and their properties will be analyzed.

Mots clefs : biocomposites, caractérisation mécanique, fibres naturelles, préformes

1 Introduction

L'utilisation de fibres naturelles dans la fabrication de préformes pour matériaux composites entraîne un allègement des matériaux tout en conservant des bonnes propriétés d'isolation thermique, acoustique ainsi que de bonnes propriétés mécaniques, les propriétés mécaniques spécifiques des fibres naturelles étant analogues à celles des fibres synthétiques utilisées dans les préformes composites (telles que le verre, le carbone ou l'aramide). Les biocomposites présentent un intérêt croissant pour les industriels, puisqu'ils permettent de réduire l'impact environnemental des matériaux, tant sur la phase de production que sur celle d'utilisation, en réduisant par exemple la consommation de carburant lorsque ces composites sont utilisés dans le domaine des transports [1,2]. A l'heure actuelle, les matériaux composites sont principalement produits avec des résines thermodurcissables, ce qui rend compliquée la recyclabilité des matériaux en fin de vie. Afin d'améliorer cet aspect, des polymères thermoplastiques peuvent être utilisés : ils sont plus facilement recyclables, et permettent de réduire les temps et coûts de production (ces résines étant moins chères et ne nécessitant pas d'étape de réticulation) [3].

Les polymères thermoplastiques sont préalablement transformés sous forme de multifilaments puis introduits aux cotés des fibres naturelles pour produire des pièces composites par thermocompression des structures textiles. L'insertion de polymère thermoplastique aux cotés de fibres naturelles conduit à l'obtention d'un fil comélé. Divers procédés peuvent être utilisés, et notamment le procédé de guipage. Dans ce procédé, le multifilament obtenu à partir de granulés de polymère thermoplastique est enroulé autour d'un fil réalisé à partir de fibres naturelles. Le multifilament va ainsi venir protéger la surface du fil de fibres naturelles et lui apporter de meilleures propriétés, puisqu'il va venir compacter la structure interne du fil. Ce fil comélé peut par la suite être utilisé pour divers procédés de transformation textile (tissage, tricotage ou tressage par exemple), pour produire des préformes comélées [3,4]. La production de plaques composites est alors simplifiée, par rapport aux procédés nécessitant une étape d'injection ou d'infusion de résine : les préformes comélées sont utilisables en thermocompression, sous l'effet de la chaleur le multifilament de thermoplastique entourant les fibres naturelles va fondre et former ainsi la matrice du composite. Lors de l'étape de thermocompression, l'imprégnation des fibres naturelles doit avoir lieu à cœur, pour assurer la cohésion entre les fibres et la matrice et éviter une rupture prématurée du matériau composite [5,6].

L'étude présentée dans cet article propose une description du procédé de développement de rovings comélées, par procédé de guipage, en vue de la réalisation de plaques composites. Dans un premier temps, un roving de chanvre est guipé par un multifilament de polyamide 12 pour obtenir un roving guipé dont les propriétés sont analysées. Ce roving guipé est ensuite utilisé pour la production de préformes tissées comélées, dont les performances sont également caractérisées. Enfin, des plaques composites sont produites, avec différentes configurations de stratifications, pour évaluer la faisabilité de ce développement à l'échelle composite.

2 Développement des rovings guipés

Dans le cadre de cette étude, des rovings guipés sont réalisés à partir de rovings de chanvre fournis par l'entreprise italienne Linificio e Canapificio Nazionale et de multifilaments de polyamide 12 (PA12), filés en voie fondue au laboratoire GEMTEX à partir de granulés de PA12 Rilsamid® AMNO TLD.

2.1 Procédé de guipage chanvre/thermoplastique

Le procédé de guipage permet de produire un roving comélé grâce à l'enroulement d'un multifilament de thermoplastique autour d'un roving. Dans cette étude, le roving utilisé est un roving de chanvre, et le guipage est utilisé d'une part pour renforcer les propriétés mécaniques du roving, mais également le thermoplastique sera la matrice des plaques composites réalisées ultérieurement [6]. Ce procédé est réalisé au sein du laboratoire GEMTEX sur une machine broche creuse Fantaroc, de la marque Gualchieri e Gualchieri, et présenté en Figure 1. Le roving de chanvre est inséré à l'entrée de la broche creuse, le multifilament de PA12 est alors enroulé autour du roving grâce à un mouvement de rotation de la broche et le roving guipé ainsi produit est bobiné. Le roving de chanvre présente un titrage de 334 ± 26 Tex et le multifilament de PA12 un titrage de 99 ± 12 Tex. Après guipage, le roving comélé possède un titrage de 538 ± 102 Tex. Lors du passage dans la broche creuse, de nombreuses impuretés présentes dans le roving de chanvre sont enlevées, de manière non uniforme, ce qui crée des irrégularités au niveau du titre du roving guipé. Le procédé de guipage, de par l'ajout du PA12, entraîne une augmentation du titre du roving (par rapport au roving de chanvre), ce qui rend le roving plus lourd. Une analyse thermogravimétrique (ATG) est réalisée au sein du laboratoire GEMTEX sur le roving comélé pour déterminer sa composition : il contient ainsi 48% de chanvre et 52% de PA12.

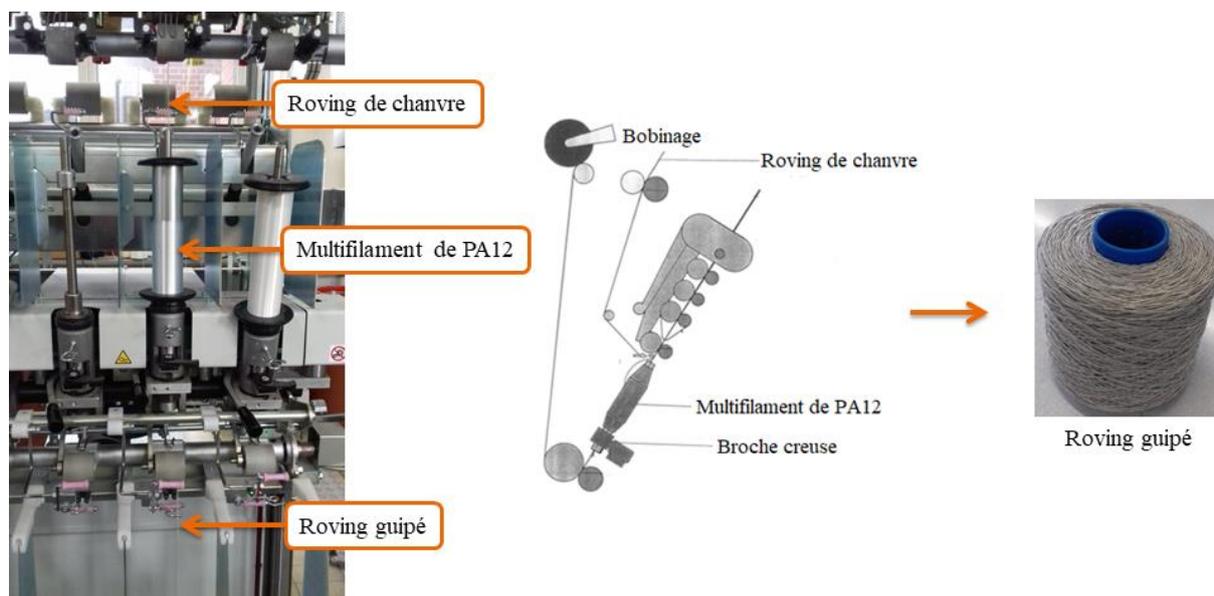


Figure 1 : Présentation du procédé de guipage

2.2 Propriétés des rovings guipés

Les propriétés mécaniques du roving guipé sont présentées en Figure 2, et comparées aux propriétés du roving de chanvre. Les essais de traction sont réalisés sur un banc de traction MTS Criterion 45, selon la norme NF EN ISO 2062 [7], sur une longueur de 200 mm, avec une vitesse de 200 mm/min et une précharge de 0 cN/Tex. Afin de pouvoir utiliser les rovings dans un procédé de tissage, qui sera détaillé dans le paragraphe suivant, les rovings doivent avoir une certaine ténacité, aux environs de 15 cN/Tex au minimum, pour ne pas se rompre pendant la production. Le roving constitué uniquement de fibres de chanvre ne répond pas à cette condition, puisque sa ténacité à rupture est inférieure à 8 cN/Tex. Grâce au guipage du multifilament de PA12, les propriétés mécaniques du roving guipé sont améliorées par rapport à celles du roving de chanvre : l'allongement à rupture reste similaire mais la

rigidité et la ténacité à rupture sont augmentées. Ainsi, le roving guipé présente une ténacité à rupture aux alentours de 15 cN/Tex, ce qui est compatible avec une utilisation en tissage. En effet, le multifilament de PA12 enroulé autour des fibres de chanvre va venir comprimer la structure, ce qui va augmenter les forces de frictions interfibrilles et ainsi améliorer la résistance du roving. La rupture du roving guipé correspond à la rupture du roving de chanvre à l'intérieur du roving guipé, le multifilament de PA12 ayant une ténacité à rupture aux alentours de 35 cN/Tex et un allongement à rupture d'environ 80%. De plus, du fait de l'irrégularité des rovings guipés, qui est plus importante que celle des rovings de chanvre, la courbe ténacité-allongement du roving guipé présente des écart-types plus importants que celle du roving de chanvre.

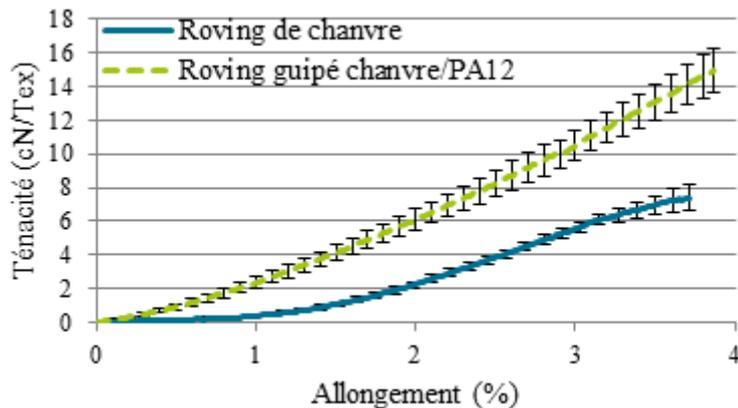


Figure 2 : Propriétés mécaniques du roving de chanvre et du roving guipé

3 Production des préformes

A partir des rovings guipés chanvre/PA12 développés au paragraphe précédent, des préformes pour plaques composites sont produites grâce à la technologie de tissage et caractérisées.

3.1 Tissage des préformes

Le tissage des préformes coméleées est réalisé sur un métier manuel Leclerc Weavebird au sein du laboratoire GEMTEX. Les différentes étapes de production sont présentées en Figure 3. Plusieurs étapes de préparations du métier sont nécessaires avant de pouvoir tisser la préforme. Lors de l'ourdissage, les fils de chaîne sont d'abord enroulés parallèlement les uns par rapports aux autres puis transférés sur l'ensouple qui sera placée à l'arrière du métier. Les fils sont ensuite passés un par un à travers les lisses des cadres et les dents du peigne lors des étapes de rentrage et de piquage. C'est lors de ces étapes préparatoires que les fils de chaîne sont très sollicités et mis sous tension, d'où la nécessité d'avoir des fils présentant une certaine ténacité. Les fils de trame sont insérés à l'aide d'une navette, il est donc nécessaire de bobiner le roving guipé sur des petites cannettes pour ensuite alimenter la navette. Dans le cadre de cette étude, une seule préforme coméleée est produite, avec une armure satin 6 effet trame, une densité chaîne de 6 fils/cm et une densité trame de 7,3 fils/cm.

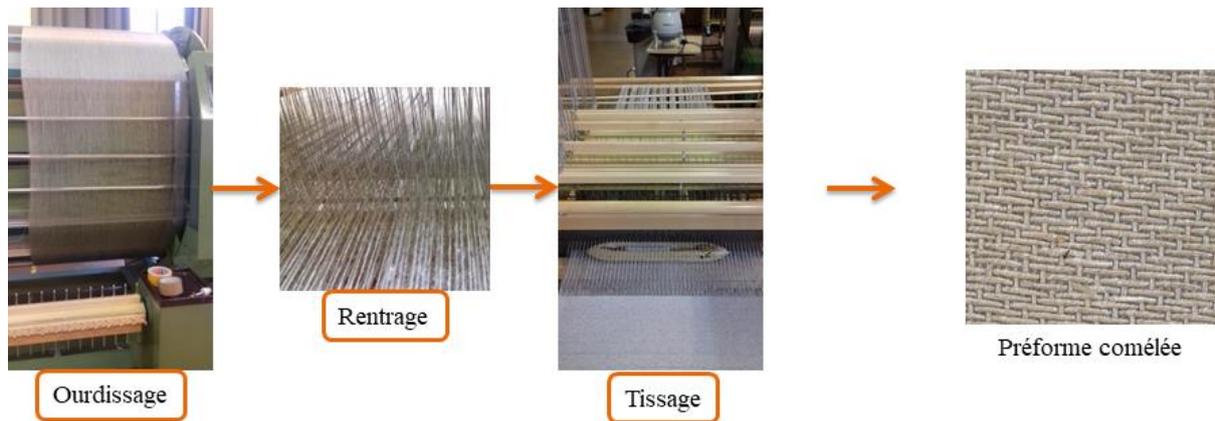


Figure 3 : Présentation du procédé de tissage

3.2 Propriétés des préformes

Les propriétés textiles de la préforme comélée produite précédemment sont présentées en Table 1. L'épaisseur est déterminée selon la norme NF EN ISO 5084 [8], la masse surfacique selon la norme NF EN 12127 [9] et la perméabilité à l'air selon la norme NF EN ISO 9237 [10]. Du fait du titrage important du roving comélé, l'ajout du multifilament de PA12 autour du roving venant alourdir ce dernier, la préforme tissée présente une épaisseur et une masse surfacique plus élevées que les préformes plus classiquement utilisées dans la production de matériaux composites. La perméabilité est, quant à elle, peu élevée pour des étoffes textiles : l'air va avoir des difficultés à traverser cette structure dense.

Table 1 : Propriétés textiles de la préforme comélée

	Epaisseur (mm)	Masse surfacique (g/m ²)	Perméabilité à l'air (L/m ² /s)
Préforme comélée	2,43 ± 0,17	889 ± 38	706 ± 125

La Figure 4 présente les propriétés mécanique de la préforme comélée, la rigidité en flexion en Figure 4.a. selon la norme ISO 4604 [11], sur flexomètre et la réponse en traction en Figure 4.b. selon la norme NF EN ISO 13934-1 [12]. Pour des raisons pratiques, ces deux caractérisations ont été réalisées avec les mêmes échantillons, l'essai de rigidité en flexion étant non destructif, avec des bandes de 50 x 300 mm découpées dans les directions chaîne et trame de la préforme. Les essais de traction sont réalisés sur une machine MTS Criterion 45 sur une longueur de jauge de 200mm, à une vitesse de 20 mm/min et une précharge de 5N. Du papier abrasif est inséré dans les mors pour éviter d'éventuels glissements de la préforme. En termes de rigidité en flexion, la préforme ne présente pas de différence significative entre les directions chaîne et trame. Les densités chaîne et trame et l'armure satin n'ont donc pas d'influence sur cette propriété. Les réponses en traction des deux directions sont présentées en N/fil pour s'affranchir des effets de la densité de fils. Les deux directions de la préforme présentent un effort maximal à rupture similaire, mais la déformation à rupture est plus importante dans la direction trame. Sous l'effet de la force de traction, les fils vont se désonduler et, une fois tendu, ils seront en mesure de répondre à la sollicitation mécanique et ce phénomène est plus long dans la direction trame. Durant le procédé de tissage, les fils de chaîne sont maintenus sous tension constante, et sont donc mieux tendus au sein de la structure.

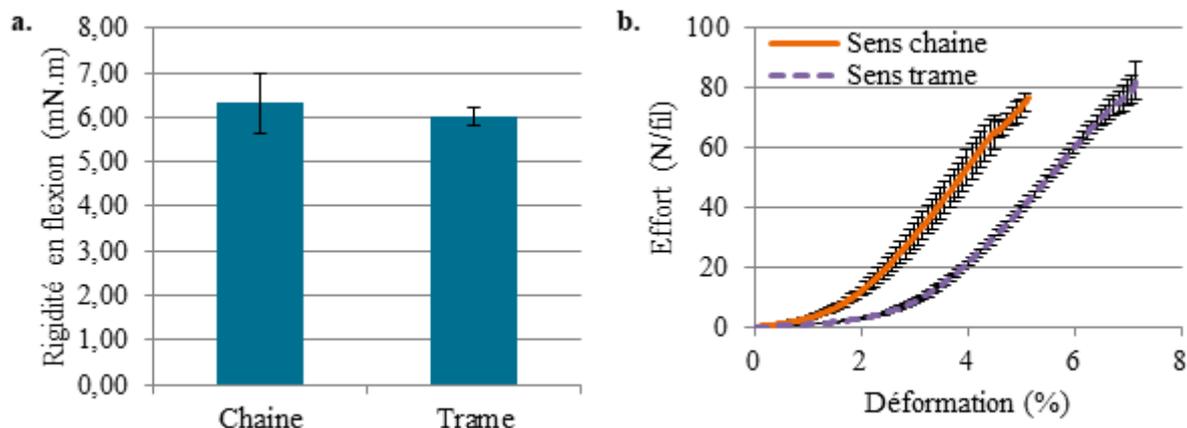


Figure 4 : Propriétés mécaniques de la préforme comelée a. rigidité en flexion b. réponse en traction

4 Réalisation des plaques composites

Le tissu réalisé précédemment à partir des rovings comelés chanvre/PA12 est ensuite utilisé en thermocompression pour former des plaques composites. En effet, grâce au guipage fibres de chanvre par un polymère thermoplastique, des plaques composites peuvent être produites sans nécessiter d'étape d'ajout de résine : sous l'effet de la chaleur, le thermoplastique fond et forme la matrice des plaques composites.

4.1 Production par thermocompression

Le procédé de thermocompression des préformes est réalisé au laboratoire GEMTEX et comporte plusieurs phases. La presse est préalablement chauffée à 220°C, puis la préforme est introduite entre deux plaques recouvertes de Téflon, puis, une fois la température remontée et stabilisée à 220°C, une pression de 40 bars est appliquée pendant 3 minutes, puis le matériau est refroidi à 130°C avant d'être sorti. La température de fusion du PA12 étant de 178°C, d'après sa fiche technique, et la température de dégradation du chanvre étant de 276°C, d'après l'analyse ATG réalisée au laboratoire, la température du procédé de 220°C permet de faire fondre le PA12 sans dégrader les fibres de chanvre. Deux types de plaques composites sont réalisés, comme indiqué sur le schéma en Figure 5, la première avec un seul pli, et la seconde avec deux plis, avec une stratification à 0°/90°. Pour chaque composite, une analyse ATG est réalisée pour déterminer la composition, en pourcentage massique, des deux plaques. Dans les deux cas, les plaques se composent de 60% de chanvre et de 40% de PA12. Cette composition diffère de celle du roving guipé (48% de chanvre et 52% de PA12). Lors de la thermocompression, du PA12 a coulé en dehors des plaques composites, ce qui a conduit à une perte de PA12 et donc une augmentation de la proportion de chanvre dans la plaque finale.

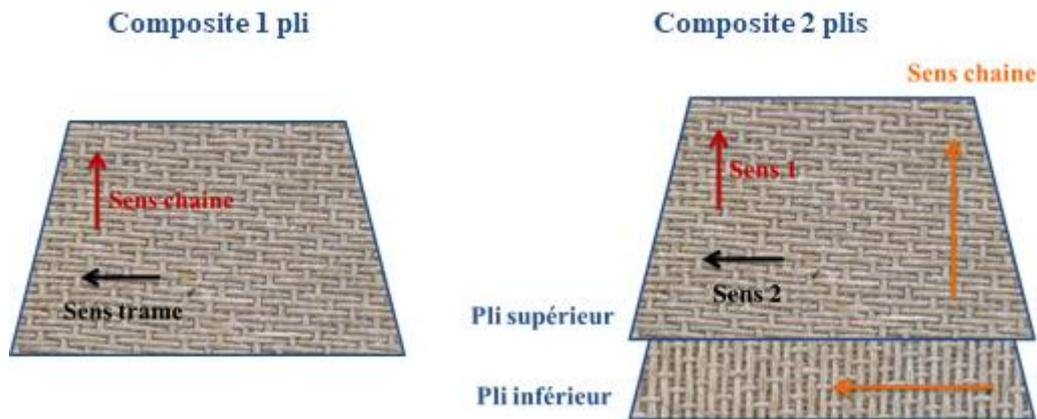


Figure 5 : Stratification des plaques composites réalisées

Les deux types de composites produits sont coupés et polis afin d'observer leur coupe transversale à la loupe binoculaire. Ces différentes coupes sont présentées en Table 2. Pour la vue des fils de chaîne, ou sens 1, l'éprouvette est coupé dans le sens trame, ou sens 2, et la section des fils de chaîne est observable sur la vue de coupe, et inversement. Sur ces coupes transversales, la pénétration de la résine au cœur des rovings, et donc des fibres, est observable. De plus, du fait du guipage, la section des rovings comelés est circulaire, alors que celle des rovings de chanvre est plus proche d'une ellipse. Lors de la thermocompression, les rovings gardent cette section circulaire, ils ne sont pas aplatis par le phénomène de compression de la presse. Dans le composite 1 pli, quel que soit le sens de coupe, les fils d'une direction entrelacent un fil de l'autre direction tous les six fils, ce qui correspond à la définition de l'armure satin. Dans le composite 2 plis, du fait de la stratification à $0^\circ/90^\circ$ des préformes, l'arrangement des fils au sein de la plaque composite est différent. Pour la vue dans le sens 1, le composite est coupé dans le sens 2, et les flottés des fils de trame des deux plis se situent sur les faces extérieures de la plaque composite. Ainsi, les fils de chaîne sont comprimés entre les deux faces et peuvent donc s'arranger côte à côte. Dans le sens 2, les flottés des fils de chaîne se situent à l'interface entre les deux plis, les fils de trame des deux plis ne peuvent pas se mélanger, ce qui conduit à une superposition des fils des deux couches.

Table 2 : Coupes transversales des plaques composites

	Vue des fils de chaîne ou sens 1	Vue des fils de trame ou sens 2
Composite 1 pli		
Composite 2 plis		

4.2 Propriétés des plaques composites

Après réalisation des deux plaques composites, leur épaisseur est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse et présentée en Table 3. L'épaisseur du composite 2 plis est supérieure à celle du composite 1 pli, mais n'est pas le double de celle de ce dernier. En effet, même si les deux plis se superposent, les fils ne sont pas parfaitement superposés les uns par rapport aux autres, et les fils d'un pli peuvent venir s'intercaler entre les fils de l'autre pli. Ce phénomène est appelé « nesting » dans la littérature [13].

Table 3 : Epaisseur des plaques composites

	Epaisseur (mm)
Composite 1 pli	$0,89 \pm 0,05$
Composite 2 plis	$1,59 \pm 0,10$

La Figure 6 présente les résultats des essais de tractions réalisés sur les plaques composites, selon la norme ASTM D3039-00 [14], sur un banc de traction MTS Criterion 45, une longueur de jauge de 150 mm, une largeur de 25 mm et à une vitesse de 1 mm/min. Dans les deux cas (1 pli et 2 plis), les modules sont similaires entre les différentes directions. Le composite 1 pli (en Figure 6.a.) présente une contrainte à rupture et une déformation à rupture plus importantes en direction chaîne qu'en direction trame. Les résultats à l'échelle préforme ont montré que les rovings dans la direction chaîne sont mieux tendus que ceux dans la direction trame (Figure 4.b.). Ainsi, dans la direction chaîne, les fils sont mieux imprégnés et il y a plus de fibres dans la direction de la sollicitation mécanique, ce qui entraîne, à l'échelle composite, une meilleure contrainte à rupture et une déformation plus importante par rapport à la direction trame. Cette meilleure imprégnation dans la direction chaîne entraîne également des propriétés plus homogènes, et donc un écart-type plus faible, que dans la direction trame. La stratification à $0^\circ/90^\circ$ permet d'obtenir des propriétés mécaniques équilibrées dans les deux directions (comme visible sur les courbes en Figure 6.b.).

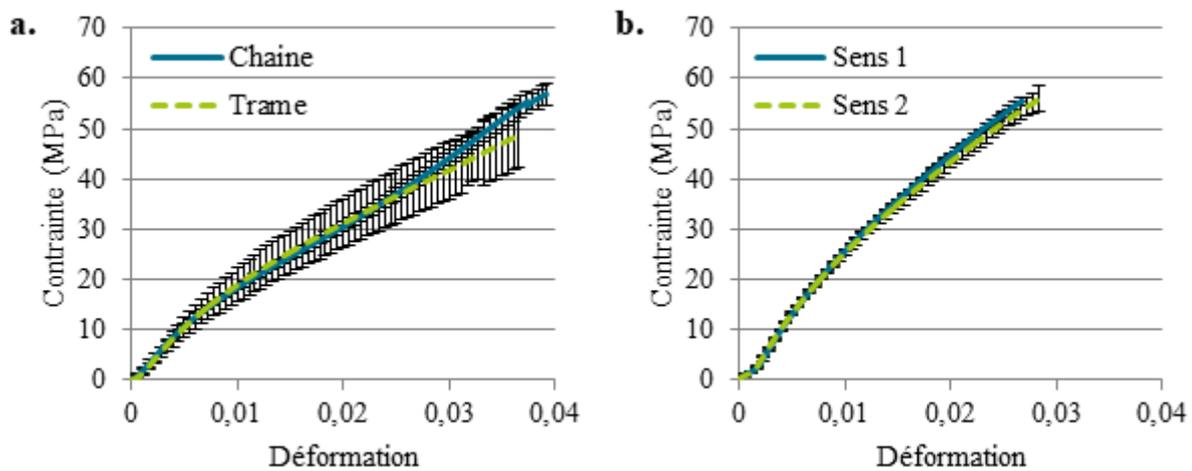


Figure 6 : Comportement en traction des plaques composites a. composite 1 pli b. composite 2 plis

Les résultats des essais de flexion 3 points, réalisés selon la norme NF EN ISO 14125 [15], sur un banc de flexion MTS Criterion 45, une longueur de 80 mm, une largeur de 25 mm, une portée de 64 mm et à vitesse de 1 mm/min, sont présentés en Figure 7. Trois directions sont testées : chaîne/sens 1, trame/sens 2 et 45° . Pour le composite 1 pli (dont les résultats sont visibles sur la Figure 7.a), le comportement en flexion dans les trois directions (chaîne, trame et 45°) est similaire, avec néanmoins des écart-types importants. Le composite 2 plis, quant à lui, présente un comportement qui diffère selon les trois directions testées (en Figure 7.b.). Le comportement des sens 1 et 45° est similaire à celui du composite 1 pli, mais le sens 2 présente une contrainte et un module en flexion plus importants. Ce phénomène peut s'expliquer par l'orientation des fils au sein de la plaque composite, interprétées au paragraphe précédent à l'aide des vues de coupes de la Table 2. Dans le sens 2, les flottés sont situés à l'extérieur de la plaque, ce qui permet une rigidité supplémentaire par rapport au sens 1, dans lequel les flottés sont situés à l'intérieur de la plaque. L'utilisation de deux plis lors de la

production de la plaque permet d'obtenir des propriétés en traction équilibrées entre les différentes directions, tandis qu'un seul pli conduit à des propriétés équilibrées en flexion.

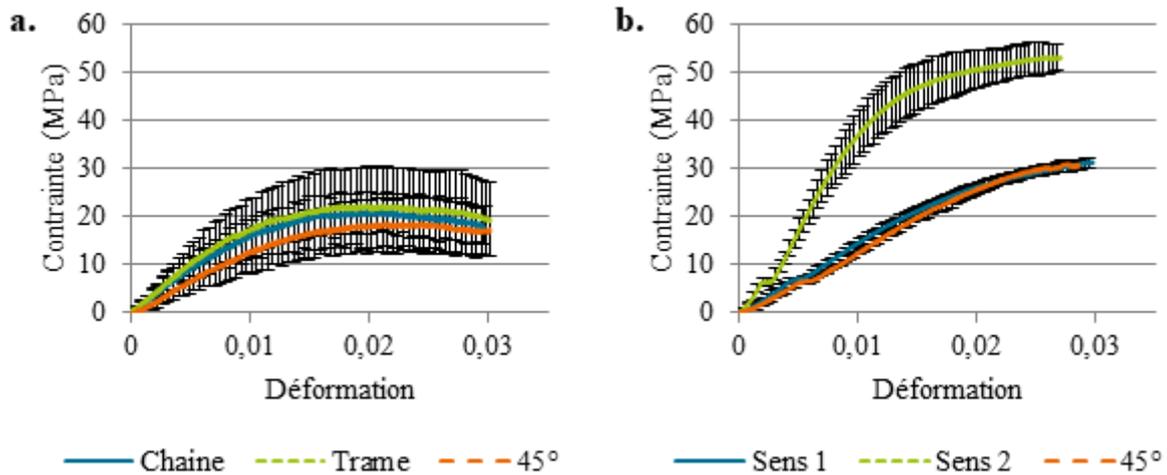


Figure 7 : Comportement en flexion des plaques composites a. composite 1 pli b. composite 2 plis

Conclusion

Au travers de cette étude, des plaques composites ont été réalisées à l'aide de rovings de chanvre guipés par un polymère thermoplastique, le polyamide 12. Lors du procédé de guipage, le multifilament de PA12 est enroulé autour du roving de chanvre, et conduit à une amélioration des propriétés mécaniques du roving. Ce roving ainsi produit présente alors la ténacité appropriée pour être utilisé en tissage, et notamment en direction chaîne où les contraintes appliquées sur les fils sont importantes. La préforme tissée, avec des rovings comelés chanvre/PA12 dans les deux directions et une armure satin, présente des propriétés mécaniques (rigidité en flexion et traction) similaires dans les deux directions, à l'exception de l'allongement à rupture. Cette préforme est ensuite utilisée en thermocompression, pour produire des plaques composites, avec un pli et deux plis à 0°/90°. Si le composite 2 plis permet d'obtenir des propriétés en traction équilibrées entre les deux directions, ce n'est pas le cas en flexion, du fait de la position des rovings au sein de la structure. Le composite 1 pli, permet, quant à lui, l'obtention de propriétés en flexion équilibrées entre les différentes orientations testées.

Outre le compromis entre l'obtention de propriétés équilibrées en flexion ou en traction lors de la réalisation de la plaque composite, ce procédé peut être optimisé. En effet, le fait de guiper le PA12 autour du roving de chanvre ajoute de la matière et donc augmente le titre du roving. Cet accroissement de matière entraîne une augmentation de l'épaisseur et de la masse surfacique de la préforme produite, ce qui conduit à l'obtention de plaques composites plus lourdes. Suivant l'application finale du composite, cette augmentation de masse peut freiner l'utilisation de ce procédé. La suite de l'étude consistera donc à l'optimisation de ce procédé en vue d'alléger la plaque composite finale.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'entreprise italienne Linificio e Canapificio Nazionale pour la fourniture des rovings de chanvre utilisées dans cette étude. Ce projet est financé par « Bio Based

Industries Joint Undertaking » sous le programme de recherche et d'innovation « European Union's Horizon 2020 » avec la convention de subvention n°744349 – Projet SSUCHY.

Références

- [1] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, I. Verpoest, Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 83 (2016) 193–205. doi:10.1016/j.compositesa.2015.11.004.
- [2] M.I. Misnon, M.M. Islam, J.A. Epaarachchi, K. Lau, Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications, *Materials & Design*. 59 (2014) 359–368. doi:10.1016/j.matdes.2014.03.022.
- [3] B. Baghaei, M. Skrifvars, L. Berglin, Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 50 (2013) 93–101. doi:10.1016/j.compositesa.2013.03.012.
- [4] B. Baghaei, M. Skrifvars, Characterisation of polylactic acid biocomposites made from prepregs composed of woven polylactic acid/hemp–Lyocell hybrid yarn fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 81 (2016) 139–144. doi:10.1016/j.compositesa.2015.10.042.
- [5] M. Bar, A. Das, R. Alagirusamy, Effect of interface on composites made from DREF spun hybrid yarn with low twisted core flax yarn, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 107 (2018) 260–270. doi:10.1016/j.compositesa.2018.01.003.
- [6] L. Zhang, M. Miao, Commingled natural fibre/polypropylene wrap spun yarns for structured thermoplastic composites, *Composites Science and Technology*. 70 (2010) 130–135. doi:10.1016/j.compscitech.2009.09.016.
- [7] AFNOR, NF EN ISO 2062 - Textiles - Yarns from packages - Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester, 2010.
- [8] AFNOR, NF EN ISO 5084 - Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products, 1996.
- [9] AFNOR, NF EN 12127 - Textiles - Fabrics - Determination of mass per unit area using small samples, 1998.
- [10] AFNOR, NF EN ISO 9237 - Textiles - Determination of permeability of fabrics to air, 1995.
- [11] ISO, ISO 4604 - Reinforcement fabrics - Determination of conventional flexural stiffness - Fixed-angle flexometer method, 2011.
- [12] AFNOR, NF EN ISO 13934-1 - Tensile properties of fabrics - Part 1 : determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method, 2013.
- [13] L. Montero, S. Allaoui, G. Hivet, Characterisation of the mesoscopic and macroscopic friction behaviours of glass plain weave reinforcement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 95 (2017) 257–266. doi:10.1016/j.compositesa.2017.01.022.
- [14] ASTM International, ASTM D3039-00 - Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2000. doi:10.1520/D3039_D3039M-00.
- [15] AFNOR, NF EN ISO 14125 - Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties, 1998.