



HAL
open science

Amélioration de la tissabilité des préformes pour applications composites par l'utilisation de rovings guipés chanvre/PA12

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

► To cite this version:

Anne-Clémence Corbin, Ahmad-Rashed Labanieh, Manuela Ferreira, Damien Soulat. Amélioration de la tissabilité des préformes pour applications composites par l'utilisation de rovings guipés chanvre/PA12. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02424034

HAL Id: hal-02424034

<https://hal.science/hal-02424034>

Submitted on 26 Dec 2019

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.

Amélioration de la tissabilité des préformes pour applications composites par l'utilisation de rovings guipés chanvre/PA12

Improvement in the weavability of preforms for composite applications with hemp/PA12 wrap rovings

Anne-Clémence Corbin¹, Damien Soulat¹, Manuela Ferreira¹ et Ahmad-Rashed Labanieh¹

¹ : ENSAIT-GEMTEX – Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles

² Allée Louise et Victor Champier BP 30329 59056 Roubaix Cedex 1

e-mail : anne-clemence.corbi@ensait.fr, damien.soulat@ensait.fr, manuela.ferreira@ensait.fr et ahmad.labanieh@ensait.fr

Résumé

Les fibres de chanvre sont de plus en plus utilisées pour le renfort de matériaux composites biosourcés, du fait de leur faible densité, de leur faible coût de production et de leurs bonnes propriétés. Les renforts en fibres de chanvre actuellement disponibles sur le marché sont sous forme de nontissés ou d'unidirectionnels. Les quelques préformes tissées disponibles sont produites à partir de fils, ce qui entraîne une faible imprégnation du renfort et ainsi de faibles propriétés mécaniques. Afin d'optimiser les performances des matériaux composites, des rovings (comportant un meilleur taux de fibres en section et une plus faible torsion que les fils) peuvent être utilisés, mais leurs propriétés ne sont pas adaptées aux technologies textiles d'élaboration des préformes. L'industrie textile a traditionnellement recours au traitement chimique pour remédier à cet inconvénient, ce qui augmente l'impact environnemental du renfort. L'étude présentée ici propose une amélioration des propriétés du roving en ayant recours au guipage par un multifilament de polymère thermoplastique (polyamide 12) autour du roving. Les apports de cette technologie sont étudiés, tant à l'échelle du roving qu'à l'échelle de la préforme, pour mettre en évidence ses avantages et ses inconvénients par rapport à la méthode plus classique du traitement chimique.

Abstract

Hemp fibers are more and more used to reinforce biobased composite materials, thanks to their low density, their low production cost and their good properties. Composite reinforcements with hemp fibers currently available on the market are nonwovens or unidirectional preforms. The few woven preforms available are made of yarns, which leads to poor impregnation and poor mechanical properties of the composite. In order to increase composite properties, rovings (with higher fiber number in cross section and lower twist level than yarns) can be used, but their properties are not sufficient for manufacturing processes of preforms. In textile industry, properties are traditionally improved by chemical treatment, which increase environmental impact of reinforcement. The study presented in this paper proposes an improvement of roving properties by wrapping a multifilament of thermoplastic polymer (polyamide 12) around a roving made of hemp fibers. Contributions of this technology are studied, both at the roving and the preform scales, to highlight advantages and disadvantages compared to the more traditional chemical treatment method.

Mots Clés : biocomposites, préformes tissées, fibres naturelles, caractérisation mécanique

Keywords : biocomposites, woven preforms, natural fibers, mechanical behavior

1. Introduction

Les matériaux composites biosourcés sont de plus en plus étudiés et utilisés par les communautés scientifique et industrielle du fait de leurs nombreux atouts, tels que la réduction de l'empreinte carbone et des émissions de CO₂, et la recyclabilité des matériaux, tout en conservant de bonnes propriétés. Ces composites biosourcés peuvent être issus à 100% de ressources renouvelables, ou hybrides, c'est-à-dire n'avoir seulement que le renfort ou la matrice issus de ressources renouvelables. Du fait de leur faible densité, les fibres naturelles, comme par exemple les fibres de chanvre, ont des bonnes propriétés mécaniques spécifiques, ainsi que bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique. De plus, contrairement aux fibres synthétiques traditionnellement utilisées

dans les renforts pour composites, ces fibres sont également biosourcées, biodégradables, et sans danger pour la santé humaine [1-3].

Comme la plupart des fibres libériennes, les fibres de chanvre sont extraites de la tige des plantes, elles sont donc discontinues de longueur finie [4]. Des opérations de purification, de parallélisation et d'assemblage sont alors nécessaires pour assembler ces fibres sous forme de fil ou de roving continu pour pouvoir produire les préformes grâce aux technologies de transformation textiles [5]. Durant ce procédé de filature, des rubans de fibres sont étirés progressivement pour atteindre le titre requis et retordus pour conférer au fil la cohésion inter-fibres nécessaire en vue de leur future utilisation. Cependant, plus la torsion appliquée est élevée, plus la structure du fil est compacte, et il est alors plus difficile pour la résine de pénétrer au cœur des fibres. De plus, les fibres suivent une direction hélicoïdale entraînée par la torsion appliquée et ne sont plus alignées dans l'axe du fil. A l'échelle composite, cela entraîne une diminution des propriétés mécaniques du matériau dans l'axe du fil, par rapport à un matériau renforcé d'unidirectionnels. Une alternative à l'utilisation de fils, et qui permet de réduire l'impact de ces deux inconvénients, est l'utilisation de rovings, qui présentent un titre plus élevé et une torsion plus faible par rapport aux fils. Le taux de fibres en section au sein d'un roving est plus important, et un plus faible taux de torsion suffit pour apporter la cohésion inter-fibres nécessaire à leur manipulation. Cependant, ces rovings ont de faibles propriétés mécaniques, ce qui rend impossible leur utilisation dans les procédés de mise en œuvre textile, et notamment en tissage [4-5].

Avant d'envisager l'utilisation des rovings pour la production des préformes, une amélioration de leurs propriétés mécaniques est nécessaire. Dans l'industrie textile, le procédé le plus couramment utilisé est le recours à un traitement chimique. Ce dernier agit sur les constituants de la fibre et entraîne des modifications de leur microstructure et de leur composition chimique [8]. Les propriétés mécaniques du roving sont alors améliorées et leur utilisation en tissage est rendue possible [9]. Un autre type d'amélioration, avec un impact environnemental diminué et sans influence ni sur la microstructure ni sur la composition de la fibre, peut être envisagé : le guipage du roving par un polymère thermoplastique. Le multifilament de thermoplastique est enroulé autour du roving, et compacte sa structure, augmentant ainsi la cohésion inter-fibres et la ténacité du roving comélé. Cette technologie de guipage apporte un second avantage : l'ajout d'un polymère thermoplastique dans la préforme sèche. Ainsi, les matériaux composites peuvent être produits directement à partir de la préforme comélée par thermocompression, le thermoplastique, en fondant, constitue la matrice du matériau [10].

Les deux méthodes d'amélioration présentées ci-dessous sont comparées dans cette étude, pour évaluer la tissabilité des rovings ainsi développées. A partir d'un roving de fibres de chanvre non traitées, un traitement chimique et un guipage avec un polyamide 12 sont réalisés, puis des préformes sont tissées avec ces deux rovings. Les propriétés des rovings et des préformes sont ensuite caractérisées et comparées afin d'évaluer l'influence de ces améliorations. Ainsi, cette étude permet de mettre en évidence les similitudes et les différences entre la technologie de guipage, technologie peu utilisée à l'heure actuelle, et le recours au traitement chimique, plus traditionnellement utilisé.

2. Matériaux et méthodes

Au travers de cette étude, deux méthodes d'amélioration des propriétés des rovings de chanvre sont étudiées pour permettre leur utilisation dans le procédé de tissage. La première méthode d'amélioration, un traitement chimique, est réalisé sur les fibres. Une étude préalable a démontré que ce traitement n'a pas d'impact sur les propriétés des fibres et des matériaux composites renforcés par des rovings avec ce traitement [11]. La deuxième méthode d'amélioration, le guipage, est présentée ci-dessous ainsi que le procédé de tissage.

2.1 Guipage

La technologie de guipage est un procédé textile issu de la filature, qui consiste à recouvrir un fil, appelé « fil d'âme », par un autre fil, appelé « fil de guipage ». Dans cette étude, le fil d'âme est un roving de chanvre, sans traitement chimique, fourni par l'entreprise italienne Linificio e Canapificio Nazionale, de titrage 336 ± 26 Tex, et le fil de guipage un multifilament de polyamide 12 (PA12) obtenu au sein du laboratoire GEMTEX à partir de granulés de PA12 Rilsamid® AMNO TLD, de titrage 99 ± 12 Tex. Le guipage du roving, présenté en Fig. 1, est réalisé sur une machine broche creuse Fantaroc, de la marque Gualchieri e Gualchieri, au sein du laboratoire GEMTEX. Le roving du chanvre est introduit à l'entrée de la broche creuse, dont la rotation entraîne l'enroulement du multifilament de PA12 autour du roving. Le multifilament de PA12 est situé sur une canette positionnée sur la broche creuse. En sortie, le roving guipé est bobiné pour pouvoir être utilisé par la suite en tissage. Le taux de couverture du fil d'âme par le fil de guipage est fonction de la vitesse d'alimentation et de la vitesse de rotation de la broche creuse.

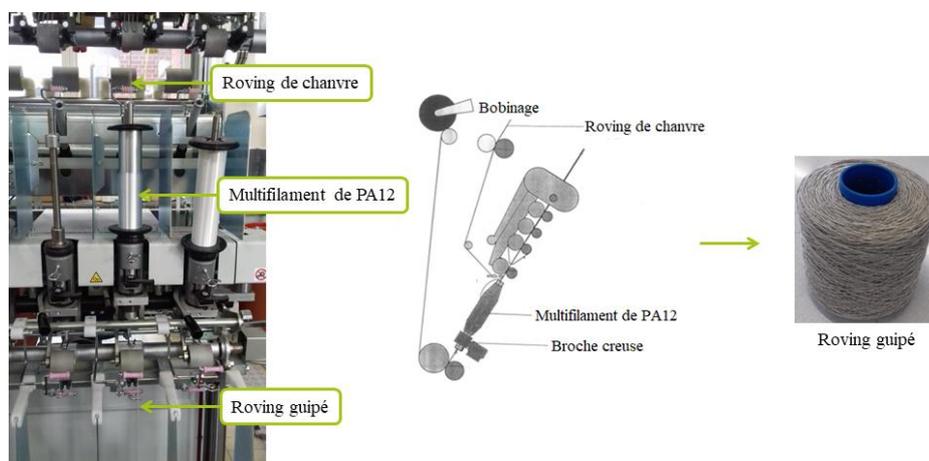


Fig. 1. Description du procédé de guipage

Les trois types de rovings (Fig. 2), sans traitement chimique, avec traitement chimique et guipé, sont ensuite caractérisés et comparés. Le titre est évalué selon la norme NF G07-316 [12], la pilosité à l'aide d'un régularimètre USTER UT4 et les propriétés mécaniques selon la norme NF EN ISO 2062 [13], sur un banc de traction MTS Criterion 45, avec une longueur de jauge de 200 mm, une vitesse de 200 mm/min et une précharge de 0 cN/Tex. Cette caractérisation est nécessaire afin d'évaluer la tissabilité des rovings, et notamment leur utilisation en direction chaîne, puisqu'il faut en effet une ténacité aux environs de 15 cN/Tex pour supporter toutes les étapes de tissage, présentées au paragraphe suivant.



Fig. 2. Rovings utilisées

2.2 Tissage

Le tissage des préformes est réalisé sur un métier manuel Leclerc Weavebird, au laboratoire GEMTEX, selon le procédé exposé en Fig. 3. La première étape consiste à préparer l'ensouple, support des fils de chaîne. Pour cela, les fils sont enroulés les uns à côté des autres et parallèlement entre eux sur l'ourdissoir, puis transférés sur l'ensouple. Ces fils de chaîne sont ensuite introduits un à un dans les lisses des cadres, lors de l'étape de rentrage, puis dans le peigne, lors de l'étape de piquage, et les fils sont alors mis sous tension. Le tissage peut alors débuter, à chaque mouvement de cadre, la trame est insérée à l'aide d'une navette puis tassée par le peigne.

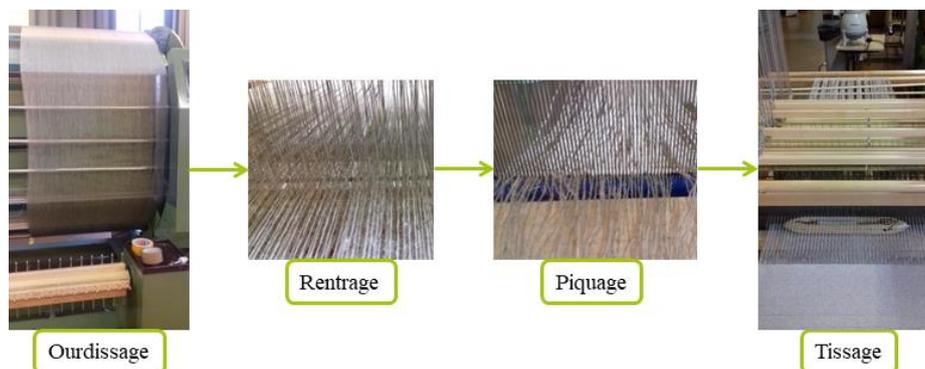


Fig. 3. Description du procédé de tissage

Deux préformes sont produites, la préforme P1 avec les rovings ayant subi un traitement chimique, dans les deux directions chaîne et trame, et la préforme P2 avec les rovings guipés, également dans les deux directions chaîne et trame, avec la même armure, un satin de 6 effet trame, la même densité chaîne, soit 6 fils/cm, et une densité trame de 9,5 fils/cm pour la préforme P1 et de 7,3 fils/cm pour la préforme P2. Ces deux préformes (Fig. 4) sont ensuite caractérisées et comparées entre elles. L'épaisseur est déterminée selon la norme NF EN ISO 5084 [14], la masse surfacique selon la norme NF EN 12127 [10], la perméabilité à l'air selon la norme NF EN ISO 9237 [16], la rigidité en flexion selon la norme ISO 4604 [17] et les propriétés mécaniques en traction selon la norme NF EN ISO 13934-1 [13]. Les essais de traction sont réalisés sur un banc de traction MTS Criterion 45, avec une longueur de jauge de 200 mm, une vitesse de 20 mm/min et une précharge de 5N. La caractérisation de la rigidité en flexion étant non destructive, les éprouvettes de traction, de dimensions 50 x 300 mm, sont d'abord utilisées pour les essais de rigidité en flexion puis pour les essais de traction. De plus, lors des essais de traction, du papier abrasif est utilisé dans les mors pour éviter d'éventuels glissements.



Fig. 4. Préformes développées

3. Résultats et discussions

Dans le cadre de cette étude, seules les échelles rovings et tissus sont étudiées.

3.1 Echelle rovings

Roving	Titre (Tex)	Pilosité
Sans traitement chimique	334 ± 26	17,7 ± 7,9
Avec traitement chimique	259 ± 10	14,0 ± 6,5
Guipé	538 ± 102	-

Tab. 1. Propriétés textiles des rovings

Les rovings étudiés sont les rovings sans traitement chimique, avec traitement chimique et avec guipage. Leurs propriétés textiles sont présentées en Tab. 1. Les deux améliorations proposées sont effectuées à partir du même type de roving, le roving sans traitement chimique, qui constitue la référence en termes de comparaisons. L'application du traitement chimique entraîne une diminution de 22% pour le titre et de 21% pour la pilosité. En effet, ce traitement détruit certains constituants présents au sein des fibres de chanvre et notamment les impuretés et les fibrilles présentes à la surface, ce qui va alléger le fil et diminuer sa pilosité. Le roving guipé possède quant à lui un titre 61% plus élevé que le roving de départ. L'ajout de PA12 autour du roving de chanvre entraîne une augmentation de la masse du roving final et donc une augmentation de son titre. Lors du passage dans les différents organes de la broche creuse, les grosses impuretés présentes dans les rovings sont enlevées de manière non uniforme, ce qui entraîne un écart-type important au niveau du titre du roving guipé. En termes de pilosité, le multifilament venant recouvrir le roving pileux, cette dernière est diminuée pour le roving guipé. Le régularimètre USTER UT4 éprouve de trop nombreuses difficultés pour analyser le roving comélé, c'est pourquoi il n'y a pas de valeurs de pilosité pour ce dernier dans le Tab. 1, la pilosité du roving guipé est donc seulement interprétée selon les observations visuelles. Les effets des deux améliorations sur la pilosité sont visuellement observables sur la Fig. 2 : les fibrilles sont beaucoup moins présentes à la surface du roving avec traitement chimique et absentes à la surface du roving guipé par rapport au roving sans traitement chimique.

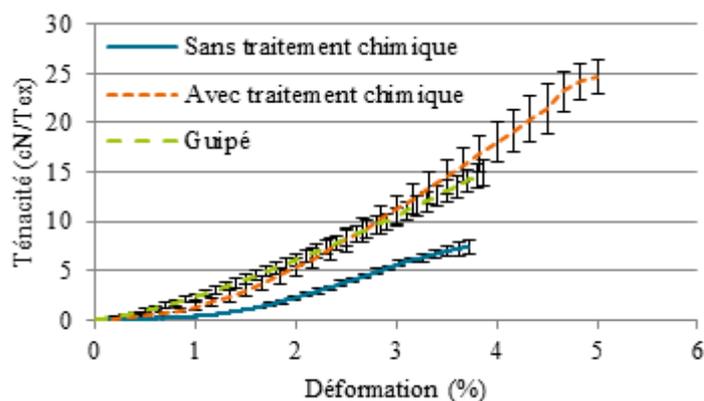


Fig. 5. Propriétés mécaniques des rovings

Les propriétés mécaniques des trois types de rovings sont présentées en Fig. 5. Ces essais de traction confirment l'impossibilité d'utiliser les rovings sans traitement chimique, puisqu'ils ont une trop faible ténacité, et la nécessité d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Les deux solutions proposées (traitement/guipage) confèrent aux rovings de meilleures propriétés mécaniques, et qui sont suffisantes pour le tissage. Le traitement chimique, en plus d'enlever les impuretés présentes au

sein du roving, augmente la cohésion inter-fibres et ainsi la ténacité et l’allongement à rupture du roving. Pour le roving guipé, l’enroulement du multifilament de PA12 autour du roving de chanvre compacte la structure interne du roving guipé, ce qui entraîne une augmentation de la ténacité à rupture. Cependant, la rupture du roving guipé étant caractérisée par la rupture du roving de chanvre et non par celle du multifilament de PA12, l’allongement à rupture est inchangé par rapport à celui du roving sans traitement chimique.

3.2 Echelle tissus

Les rovings guipés et ceux avec traitement chimique ayant des propriétés suffisantes pour pouvoir être utilisés en tissage, deux préformes sont produites : la préforme P1 à partir des rovings avec traitement chimique et la préforme P2 avec les rovings guipés. Les propriétés textiles de ces deux préformes sont présentées en Tab. 2. Pour rappel, les deux préformes ont la même armure, un satin de 6 effet trame, la même densité chaîne, 6 fils/cm, et une densité trame de 9,5 fils/cm pour la préforme P1 et 7,3 fils/cm pour la préforme P2. La préforme P2 a une épaisseur et une masse surfacique plus importantes que la préforme P1 : le roving guipé étant plus lourd et plus gros que le roving avec traitement chimique, cela entraîne le même phénomène à l’échelle de la préforme. La perméabilité à l’air est également plus faible pour la préforme P1 que pour la préforme P2. Les rovings guipés ayant une section plus ronde que les rovings avec traitement chimique, du fait du procédé de guipage, l’espace entre les rovings guipés au sein de la structure est donc plus distinct dans la préforme P2 que dans la préforme P1, dans laquelle les rovings vont avoir tendance à s’étaler. Ce phénomène peut s’observer sur la Fig. 4 : les fils de la préforme P2 sont facilement distinguables, tandis que ceux de la préforme P1 semblent comme « mélangés » entre eux. Ainsi, lorsque la préforme est traversée par l’air, ce dernier pourra plus facilement passer entre les rovings guipés de la préforme P2, ce qui entraîne une perméabilité à l’air plus élevée.

Préforme	Epaisseur (mm)	Masse surfacique (g/m ²)	Perméabilité à l’air (L/m ² /s)
P1	1,55 ± 0,05	426 ± 8	401 ± 46
P2	2,43 ± 0,17	889 ± 38	706 ± 125

Tab. 2. Propriétés textiles des préformes

Les propriétés mécaniques des deux préformes sont exposées en Fig. 6.a. pour la rigidité en flexion et Fig. 6.b. pour la réponse en traction. Le comportement en flexion des préformes diffère selon le type de fil qui les compose. La préforme P1 présente une rigidité en flexion beaucoup plus faible en sens chaîne qu’en sens trame. La densité de fils étant plus importante dans la direction trame, la préforme est plus lourde dans cette direction et donc plus rigide en flexion. Les rovings guipés de la préforme P2 sont beaucoup plus lourds que les rovings avec traitement chimique de la préforme P1, ce qui rend la préforme P2 plus lourde dans les deux directions, et lui confère ainsi une rigidité de flexion plus importante dans les deux directions. Comme pour la rigidité en flexion, le comportement en traction entre les deux préformes est différent. L’effort sur la courbe de réponse en traction est exprimé en N/fil/Tex pour s’affranchir des effets de la densité et du titre des fils. Pour la préforme P1, l’allongement et la rigidité (pente de la courbe) sont similaires dans les deux directions, mais l’effort à rupture est plus important dans la direction trame. Pour la préforme P2, la rigidité est également similaire entre les deux directions, et légèrement plus élevée que pour la préforme P1, mais l’allongement et l’effort à rupture sont plus importants dans la direction trame par rapport à la direction chaîne. Lors du procédé de tissage, les fils de chaîne sont maintenus sous une tension constante, ils sont donc mieux tendus au sein de la structure, ce qui explique que, pour les deux préformes, l’allongement à rupture soit similaire à celui des rovings pris seuls (Fig. 5). Dans le sens trame, les fils sont plus ondulés au sein de la structure et vont donc se désonduler sous l’effet de la force appliquée avant d’être tendus et de pouvoir répondre à la sollicitation mécanique. Le retrait étant plus important dans la préforme P2 (2.84 ± 0.36 %) que dans la préforme P1 (1.90 ±

0.30 %), l'allongement à rupture de la préforme P2 dans la direction trame est plus élevé que celui de la préforme P1 dans la même direction. Par ailleurs, le faible retrait de la préforme P1 est à l'origine d'un allongement à rupture de la préforme en sens trame similaire à celui des rovings le composant. Enfin la préforme P1, produite avec des rovings avec traitement chimique et ayant de meilleures performances en traction que les rovings guipés, présente de meilleures propriétés en traction que la préforme P2.

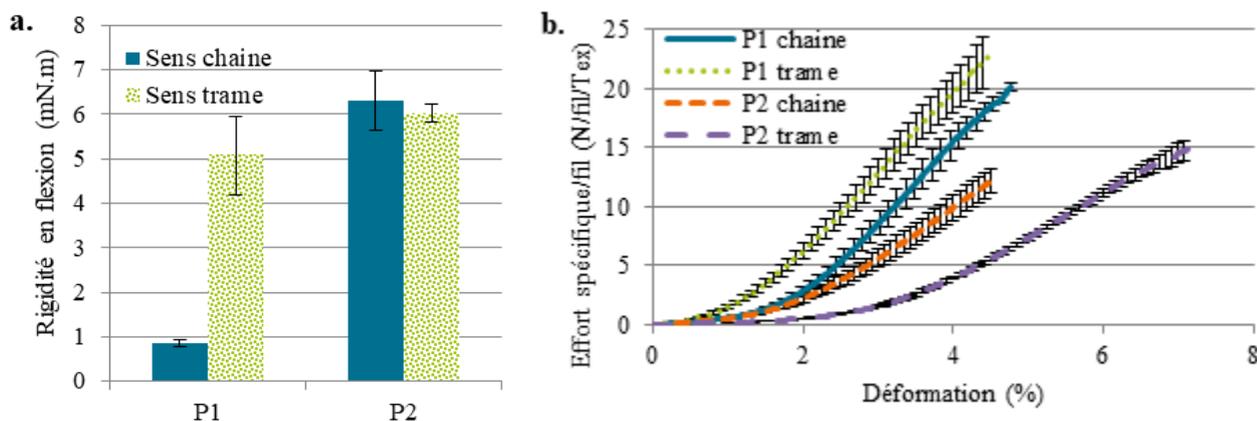


Fig. 6. Propriétés mécaniques des préformes a. Rigidité en flexion b. Réponse en traction

4. Conclusion

Les composites biosourcés sont en plein essor sur le marché mondial du fait de leur aspect respectueux de l'environnement mais également de leur potentielle recyclabilité. Cependant, les fibres naturelles, même assemblées sous forme de rovings, ne possèdent pas les caractéristiques nécessaires pour permettre la production de préformes. Cette étude a mis en évidence deux méthodes pour améliorer les propriétés des fibres : un traitement chimique effectué sur le roving et un guipage du roving par un polymère thermoplastique. Ces deux méthodes ont permis d'augmenter significativement les propriétés mécaniques des rovings et pour la réalisation de préformes tissées, avec des propriétés distinctes selon le type de roving utilisé. Selon le type de propriétés souhaitées pour la préforme, et le mode de fabrication du composite, il est possible de choisir entre la technologie de guipage ou celle du traitement chimique. L'utilisation de rovings guipés pour la fabrication de la préforme permet de produire le matériau composite par thermocompression, le PA12 fondant sous l'effet de la chaleur pour former la matrice, tandis que l'utilisation de rovings avec traitement chimique nécessite une étape supplémentaire d'ajout de résine lors de la fabrication du composite. Ainsi, le guipage apporte une alternative avantageuse par rapport au recours au traitement chimique, puisqu'il ne modifie pas la structure interne des fibres, permet de réduire les coûts et temps de production et permet de recycler le matériau (si le polymère utilisé étant thermoplastique). Cependant, le roving guipé développé dans cette étude est relativement lourd, ce qui alourdi la préforme et donc le matériau composite final, par rapport à un composite réalisé avec une préforme non comélée et dont le taux de résine serait inférieur au taux de fibres.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'entreprise italienne Linificio e Canapificio Nazionale pour la fourniture des rovings de chanvre utilisés dans cette étude. Ce programme 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] A. K. Mohanty, S. Vivekanandhan, J.-M. Pin, et M. Misra, « Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations », *Science*, vol. 362, n° 6414, p. 536-542, nov. 2018.
- [2] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, et I. Verpoest, « Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites? », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, n° Supplement C, p. 193-205, avr. 2016.
- [3] M. I. Misnon, M. M. Islam, J. A. Epaarachchi, et K. Lau, « Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications », *Materials & Design*, vol. 59, n° Supplement C, p. 359-368, juill. 2014.
- [4] C. Goudenhoofft, A. Bourmaud, et C. Baley, « Varietal selection of flax over time: Evolution of plant architecture related to influence on the mechanical properties of fibers », *Industrial Crops and Products*, vol. 97, p. 56-64, mars 2017.
- [5] C. Baley *et al.*, « Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials », *Int J Mater Form*, p. 1-30, déc. 2018.
- [6] S. Goutianos et T. Peijs, « The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites », *Advanced Composites Letters*, vol. 12, p. 237-241, janv. 2003.
- [7] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, et M. Ferreira, « Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites: Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 93, n° Supplement C, p. 72-81, févr. 2017.
- [8] A. Y. Al-Maharma et N. Al-Huniti, « Critical Review of the Parameters Affecting the Effectiveness of Moisture Absorption Treatments Used for Natural Composites », *Journal of Composites Science*, vol. 3, n° 1, p. 27, mars 2019.
- [9] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, et F. Caputo, « Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites », *Composites Part B: Engineering*, vol. 133, n° Supplement C, p. 210-217, janv. 2018.
- [10] B. Baghaei, M. Skrifvars, et L. Berglin, « Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 50, p. 93-101, juill. 2013.
- [11] A. C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A. R. Labanieh, X. Gabrion, et V. Placet, « Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications », *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 406, n° 1, 2018.
- [12] AFNOR, « NF G07-316 - Textiles - Tests of yarns - Determination of linear density. », 1988.
- [13] 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.
- [14] AFNOR, « NF EN ISO 5084 - Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products », 1996.
- [15] AFNOR, « NF EN 12127 - Textiles - Fabrics - Determination of mass per unit area using small samples », 1998.
- [16] AFNOR, « NF EN ISO 9237 - Textiles - Determination of permeability of fabrics to air », 1995.
- [17] ISO, « ISO 4604 - Reinforcement fabrics - Determination of conventional flexural stiffness - Fixed-angle flexometer method », 2011.
- [18] 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.