

Influence du nombre de couches sur les propriétés mécaniques de tissus 3D interlock chaîne en lin

Influence of the number of layers on mechanical properties of flax 3D warp interlock fabric

Henri Lansiaux¹, Damien Soulat¹, François Boussu¹ et Ahmad Rashed Labanieh¹

1 : ENSAIT, GEMTEX – Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles
2 allée Louise et Victor Champier, BP 30329, F-59056 Roubaix Cedex 1
e-mail : henri.lansiaux@ensait.fr

Résumé

Le tissage 3D interlock chaîne permet de réaliser des préformes épaisses pour matériaux composites. Or, cette technologie est très peu employée pour des renforts à base de fibres naturelles. Cette étude démontre à la fois la faisabilité du tissage 3D interlock chaîne pour les fibres naturelles et s'intéresse à l'influence du nombre de couches sur les propriétés structurales et mécaniques. À partir de rovings de lin 1000 Tex, cinq tissus 3D interlock chaîne, dérivée de la toile, ont été tissés. Suite à la chaîne de caractérisation mise en place, de nombreux paramètres structuraux tels que la densité trame, l'épaisseur ou la masse surfacique sont proportionnels au nombre de couches de la structure tissée 3D interlock chaîne. Le comportement en traction uni-axiale de ces structures sèches est également étudié via les paramètres structuraux.

Abstract

3D warp interlock weaving allows to realize thicker preform for composites materials. Nevertheless, this technology is not widely used with natural fibres. This study demonstrates the feasibility of 3D warp interlock weaving with natural fibres, and the influence of the number of layers on structural and mechanical properties of this fabric. Thanks to the characterization results, structural parameters as the weft density, the thickness or the areal density have been found correlated to the number of layers. Mechanical parameters are also studied and explained thanks to structural parameters.

Mots clés : Fibre naturelle, Tissage 3D interlock chaîne, Caractérisation mécanique.

Keywords : Natural fibre, 3D warp interlock weaving, mechanical characterization.

1 Introduction

Le lin (*Linum usitatissimum* L.) est une plante industrielle d'intérêt croissant, notamment pour ses fibres. Ces dernières années, la popularité des composites à base de fibres végétales s'est considérablement accrue pour remplacer les fibres de verre [1]; les avantages des fibres végétales par rapport aux fibres de verre sont leur origine biologique issue de la photosynthèse et leur aspect renouvelable, leur faible densité, etc... [2]. Par ailleurs les fibres de lin ont des propriétés mécaniques spécifiques similaires à celles des fibres de verre, avec un module d'élasticité moyen de 52,4 GPa, une résistance à la rupture de 976 MPa et une déformation à la rupture de 2,15 % pour une densité de fibre de 1,53 [3]. Relativement à ces propriétés intéressantes à l'échelle fibre, de nombreuses études portent sur l'élaboration des composites à base de fibres naturelles afin de lever les verrous (taux de porosité, maîtrise des paramètres de fabrication, compréhension de l'endommagement, tenue à la fatigue) [4–7] inhérents à la difficulté, à

l'échelle composite, d'obtenir des propriétés mécaniques comparables, voire meilleures, que celles des composites à base de fibres de verre.

Parmi ces travaux le choix de l'architecture (UD, tissé, NCF, non-tissé) du renfort élaboré à partir des fibres de lin [8–10] fait partie des paramètres d'optimisation des performances des matériaux composites. Parmi ces structures de renfort, peu d'études se sont intéressées à l'élaboration de structures-multicouches à base de fibres naturelles [11–13]. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des caractéristiques de tissus 3D interlock chaîne, à base de fibres de lin sur leur comportement structurel et mécanique. Un tissu 3D interlock chaîne est un assemblage de plusieurs couches de tissus liées dans l'épaisseur par des fils de chaîne de renfort [14]. A la différence des tissus 2D classiques, ce genre de structure permet de disposer des fils dans l'épaisseur. Les technologies de réalisation de renfort 3D sont nombreuses, telles que le tissage 3D, le tressage 3D mais également les procédés permettant de lier dans l'épaisseur plusieurs couches 2D de renfort, telles que la couture (stitching), le piquage (tufting) et le Z-pinning [15, 16]. Le tissage 3D interlock chaîne permet cependant de lier en une étape l'ensemble des couches, tout en les renforçant dans l'épaisseur. Les matériaux composites renforcés d'une structure tissée 3D interlock chaîne montrent une plus grande résistance aux délaminages inter-plis et des tolérances supérieures à l'impact [10]. BOUSSU et al. [14] ont classifié la nomination des structures 3D interlock chaîne en fonction du parcours du fil de liage dans l'épaisseur, mais également du nombre de couche globale de la structure, sous la forme suivante :

$$X_1 - X N Y_1 - Y_2 \{Liage\}$$

avec	X_1	Type d'angle du fil de liage, O (orthogonal) ou A (angle)
	X_2	Type de liage dans l'épaisseur, L (couche à couche) ou T (au travers de l'épaisseur)
	N	Nombre de couches de fils de trame
	Y_1	Pas du fil de chaîne de liage
	Y_2	Profondeur du fil de liage
	$Liage$	Type d'armure réalisé par les fils de chaîne de liage

Ces architectures complexes sont composées de trois types de fils. Les fils de chaîne de liage assurent la cohésion de la structure et apportent les propriétés mécaniques au travers de l'épaisseur. Les fils de chaîne de renfort et les fils de trame contribuent aux propriétés mécaniques dans le plan de la structure. De par cette complexité de structures mais également par la maîtrise du procédé de tissage 3D interlock chaîne, des propriétés spécifiques sont requises à l'échelle de la mèche avant tissage, et notamment relativement à la torsion. Par conséquent dans ce papier, une étude multi-échelle est proposée avec des étapes de caractérisations à l'échelle des mèches puis à l'échelle des tissus 3D interlock chaîne en lin.

2 Matériels et méthodes

Les mèches de lin utilisées dans cette étude sont fournies par le groupe Depestele. Des analyses thermogravimétriques (ATG), infrarouge (IR) et calorimétrie différentielle à balayage (DSC) sont menées sur la mèche pour déterminer leur composition. Le titrage de la mèche est mesuré selon la norme NF G07-316. Les mèches sont par la suite retordues sur un banc Twistec TW 4/300. Différents niveaux de torsion, respectivement de 30, 45, 60, 75, 90 et 110 tpm (tours par mètre), ont été appliqués pour définir la ténacité suffisante pour pouvoir tisser, sans pour autant affecter l'imprégnabilité par la résine. Le niveau de torsion est vérifié selon la norme NF ISO 2061. La mèche est ensuite soumise à un essai de traction selon la norme NF ISO 2062.

Dans un second temps, différentes structures 3D interlock chaîne sont réalisées afin de comparer l'influence du nombre de couches sur les propriétés structurelles et mécaniques des tissus secs. Pour ce faire, cinq structures ont été tissées sur une machine à tisser prototype développée au sein du laboratoire Gemtex [17]. Les structures sont présentées Figure 1.

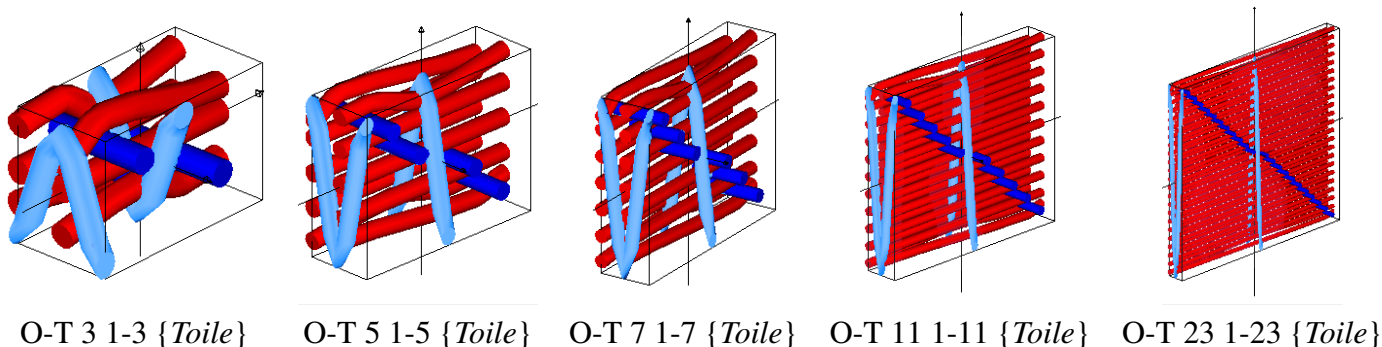


Fig. 1 – Coupe transversale et représentation 3D des cinq structures tissées

Sur cette figure comme dans l'ensemble de ce document, les fils de chaîne de liage sont représentés en bleu clair, les fils de chaîne de renfort en bleu foncé et les fils de trame en rouge.

Le choix des structures est limité par le nombre de cadre disponibles de la machine à tisser. Toutes les structures sont liées orthogonalement ($X_1 = O$) et au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). Ainsi pour tisser la structure O-T 7 1-7 {Toile}, six fils de chaîne de renfort et deux fils de chaîne de liage sont nécessaires. Chacun de ces huit fils formant le motif est associé à un cadre. La machine à tisser disposant de 24 cadres, le motif est répété trois fois dans la largeur. En direction transversale, les quatorze trames sont insérées les unes à la suite des autres pour former les deux colonnes de sept fils. Dans le cas de ces cinq structures, les fils de chaîne de liage traversent la structure au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$), ce qui implique que la profondeur de liage est égale au nombre de couches ($Y_2 = N$).

A l'issue de l'étape de tissage, les densités chaîne et trame sont mesurées selon la norme ISO 4602. Les valeurs d'embuage et de retrait sont mesurés pour chaque profondeur de fils de chaîne de renfort et fils de trame selon la norme ISO 7211-3. Les mesures d'épaisseurs et de masses surfaciques sont respectivement effectuées selon les normes ISO 4603 et ISO 12127. L'analyse du comportement en traction des tissus secs s'effectue selon la norme ISO 13934-1. Des talons composites sont réalisés aux extrémités des éprouvettes de traction pour limiter les glissements dans les mors.

3 Résultats et discussions

Comportement mécanique des mèches

Le titre de la mèche avant torsion est de $1057 \pm 41,3$ Tex. Les mèches n'étant pas retordues, seul un agent de cohésion assure une tenue des fibres au sein des mèches. La nature de cet agent de cohésion a été identifiée par spectroscopie infrarouge, puis validée par analyse thermogravimétrique (ATG) et calorimétrie différentielle à balayage (DSC). L'agent de cohésion avoisine les 10 % en masse de la mèche. Cet agent assure la cohésion des fibres de lin entre-elles. Pour des raisons de confidentialité, la nature de cet agent, qui assure la cohésion des fibres de lin entre-elles, ne peut être communiquée. On reporte sur la Figure 2, la courbe d'ATG de la mèche de lin. On constate sur ce graphique trois principales températures de dégradation. La perte de masse avoisinant les 100°C est due à l'évaporation de l'eau contenue dans la fibre. La fibre de lin se dégrade ensuite dès 210°C . Et enfin l'agent de cohésion se dégrade à son tour aux alentours de 380°C .

On reporte sur la Figure 3 la force à rupture de la mèche sous différents niveaux de torsion (30, 45, 60, 75, 90 et 110 tpm). La force à rupture augmente jusqu'à un maximum, ici 250 N. Des résultats similaires ont été relevés dans la littérature [13, 18, 19]. Les valeurs de torsion mesurées sont légèrement inférieures aux valeurs de consigne. On notera également que la déformation à rupture (Figure 4) est proportionnelle

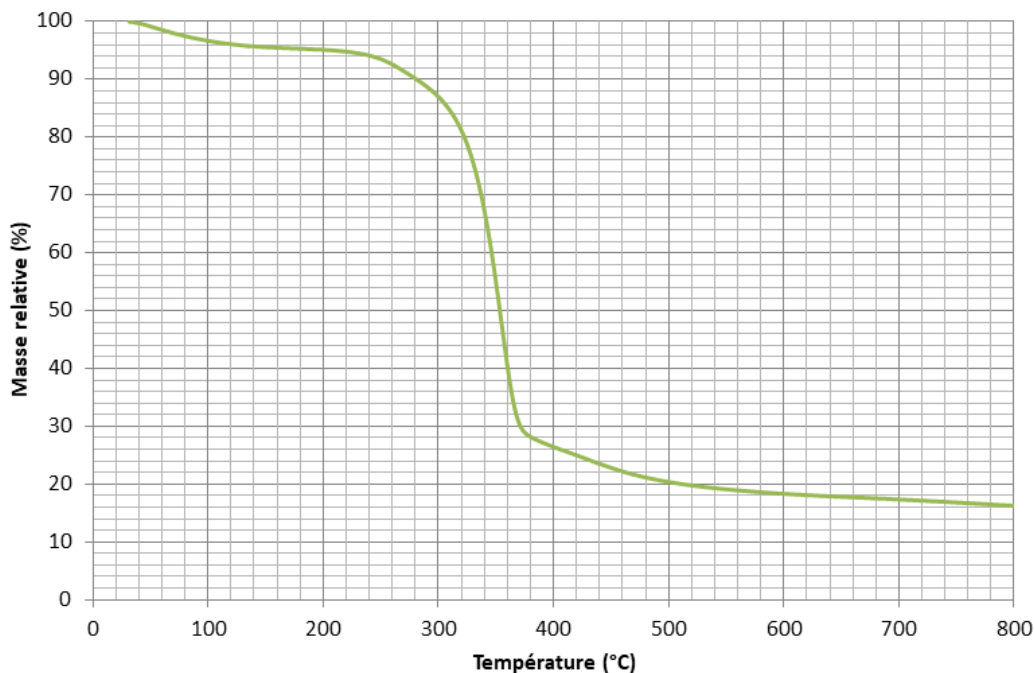


Fig. 2 – Courbe d’analyse thermogravimétrique

au niveau de torsion ($R^2 = 0,976$). Finalement, une torsion de 45 tpm est appliquée, pour répondre aux sollicitations mécaniques du tissage mais qui reste suffisamment faible pour assurer une bonne adhésion avec la matrice.

Comportement structurel des tissus 3D interlock chaîne secs

Les densités chaîne mesurées sont toutes équivalentes et correspondent à la densité du peigne, soit 6 fils/cm. Pour les cinq structures, la densité trame mesurée, rapportée au nombre de colonnes, est d’environ 2 colonnes/cm. Cette densité trame dépend principalement du type de liage (ici orthogonal au travers de l’épaisseur) et du titre des fils de chaîne et de trame. Lors du tissage d’une structure 3D interlock chaîne, les trames s’insèrent les unes sous les autres pour former des colonnes. La densité trame est ainsi proportionnelle au nombre de fils de trame, soit au nombre de couches de la structure. Or, plus le nombre de couche augmente, plus le nombre de fils de trame se superposant augmente, et crée l’épaisseur de la structure. L’épaisseur est également proportionnelle au nombre de couches. La densité chaîne ne variant pas, la masse surfacique des cinq structures est fonction du nombre de fils de trame insérés, mais également du titrage. Les fils de chaîne et le titrage de la mèche étant les mêmes pour les cinq architectures, la masse surfacique est proportionnelle au nombre de couches. Les valeurs d’embuvage des fils de chaîne de liage sont également proportionnelles au nombre de couches de la structure. En effet, plus la structure est épaisse, plus la longueur de fils nécessaire à lier la structure est importante. Dans le cas de la structure O-T 23 1-23 {Toile}, la valeur moyenne d’embuvage des fils de chaîne de liage atteint $237 \pm 12,5\%$. Les valeurs d’embuvage des fils de chaîne de renfort et de retrait des fils de trame sont négligeables par rapport aux valeurs d’embuvage des fils de chaîne de liage. Les fils de trame sont néanmoins plus ondulés que les fils de chaîne de renfort, car ces fils ne sont pas sous tension lors du tissage. Ces résultats sont présentés dans la Figure 5, sous forme radar. L’influence de chaque paramètre issue de l’élaboration des 5 structures 3D interlock chaîne est représentée par les valeurs associées aux 5 sommets du pentagone. Le tissage interlock permet de réaliser des structures à base de fibres naturelles d’épaisseur supérieure à

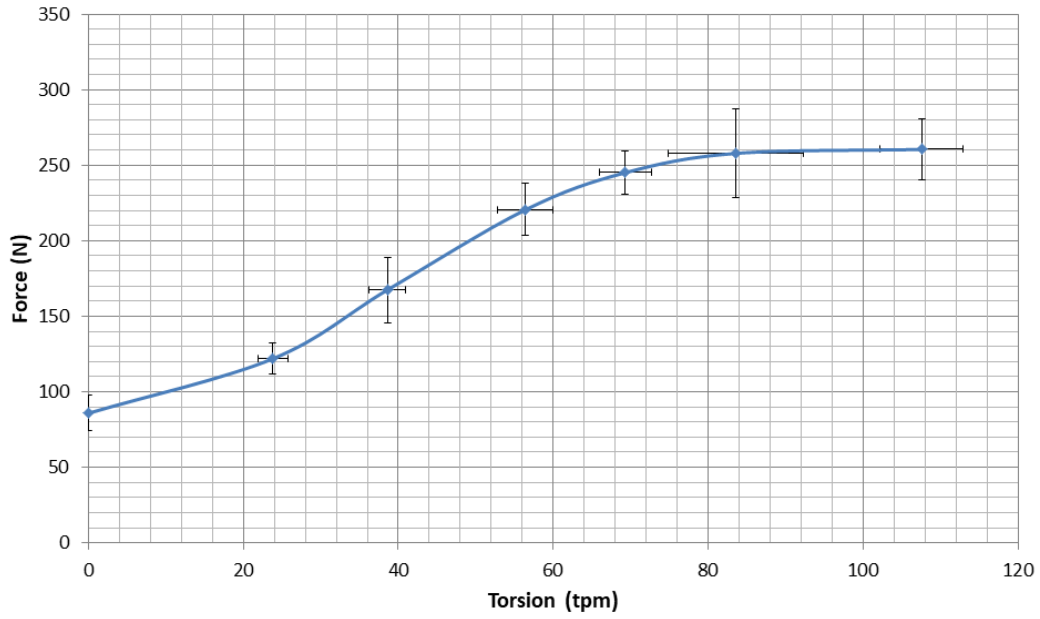


Fig. 3 – Force à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

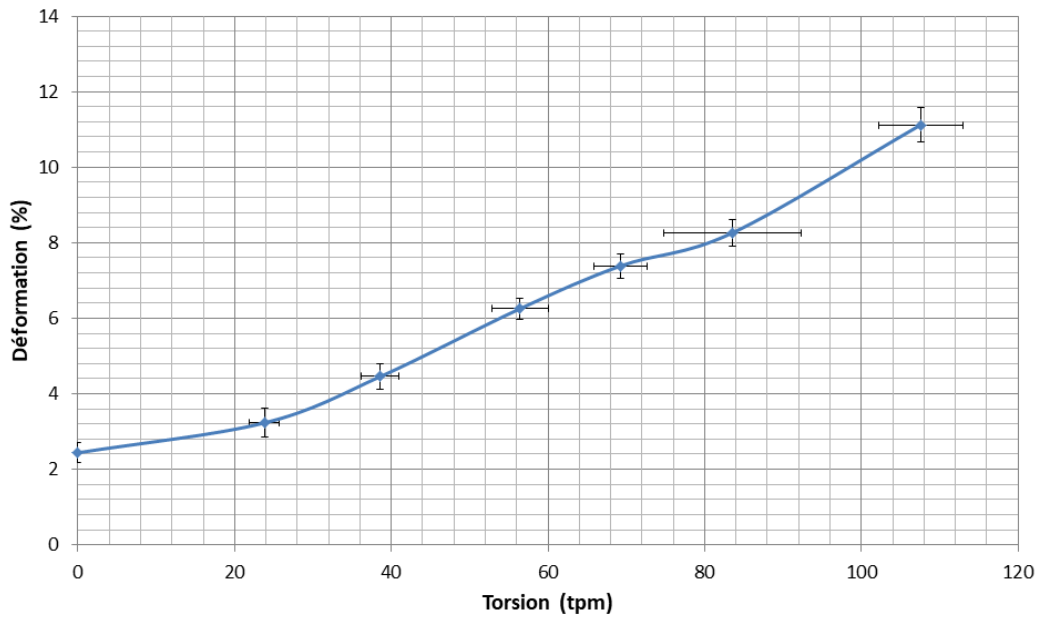


Fig. 4 – Déformation à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

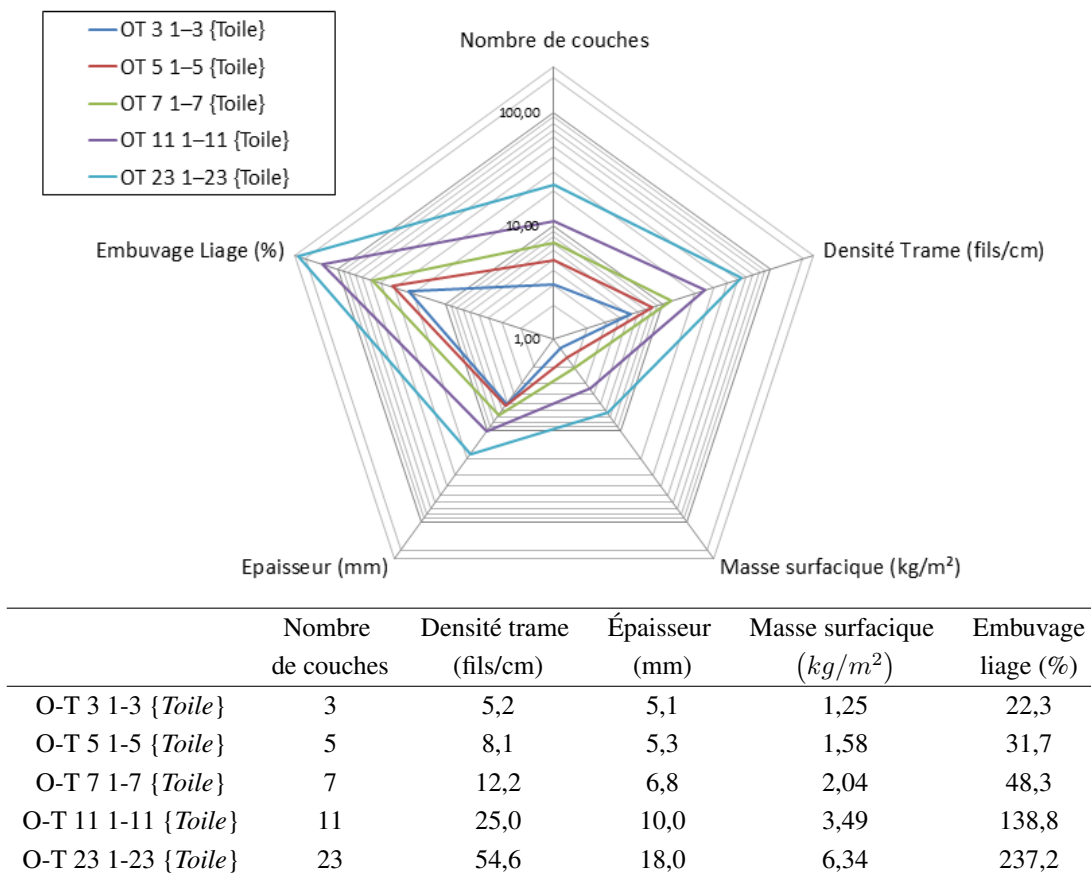


Fig. 5 – Influence des paramètres constitutifs des 5 structures 3D interlock chaîne

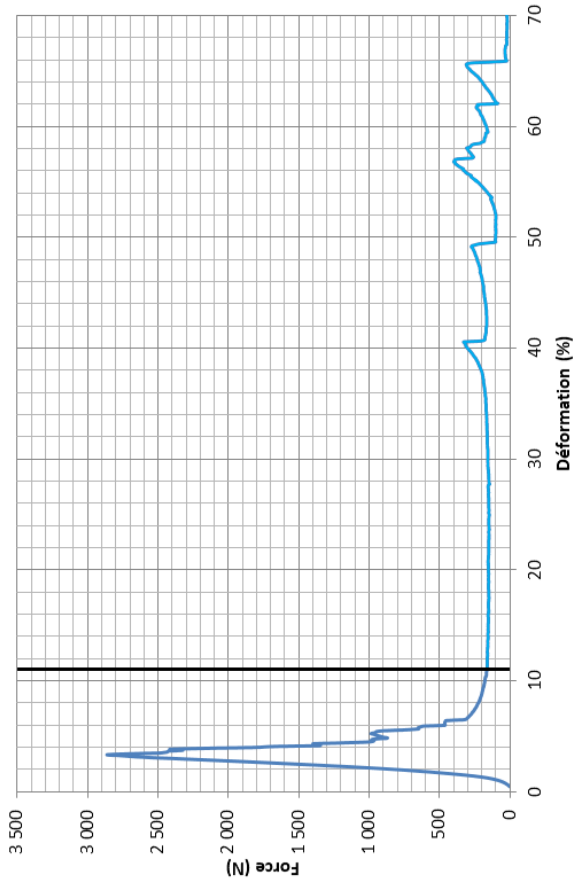
15 mm et de masse surfacique supérieure à $5 kg/m^2$.

Comportement mécanique des tissus 3D interlock chaîne secs

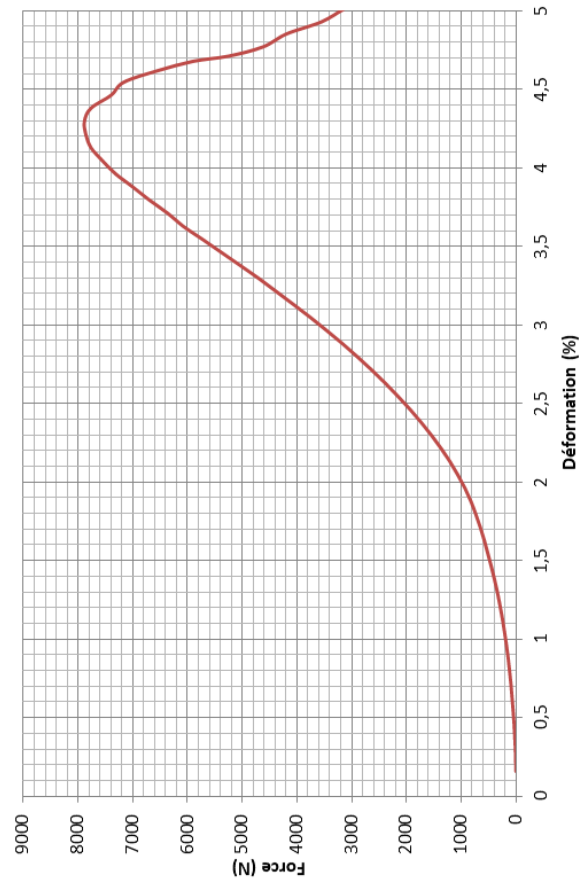
Le comportement mécanique des structures sèches est établi à partir d'essais de traction uni-axiaux dans les deux directions du tissage (chaîne et trame). Les courbes obtenues sont tout d'abord analysées en fonction des caractéristiques structurales des tissus. Les valeurs des efforts et des déformations maximales en sens trame sont données en Table 1. On reporte par ailleurs les courbes de comportement en traction pour la structure à 3 couches (O-T 3 1-3 {Toile}) en sens chaîne Figure 6a et en sens trame Figure 6c; ainsi que pour la structure à 7 couches (O-T 7 1-7 {Toile}) en sens chaîne en Figure 6b et en sens trame Figure 6d.

Architecture	Force maximale (N)	Déformation à effort maximum (%)
O-T 3 1-3 {Toile}	$4\,616 \pm 639$	$4,22 \pm 0,17$
O-T 5 1-5 {Toile}	$5\,750 \pm 410$	$3,94 \pm 0,26$
O-T 7 1-7 {Toile}	$8\,114 \pm 644$	$4,27 \pm 0,05$
O-T 11 1-11 {Toile}	$17\,722 \pm 1\,208$	$5,33 \pm 0,31$
O-T 23 1-23 {Toile}	$29\,356 \pm 1\,514$	$9,14 \pm 0,78$

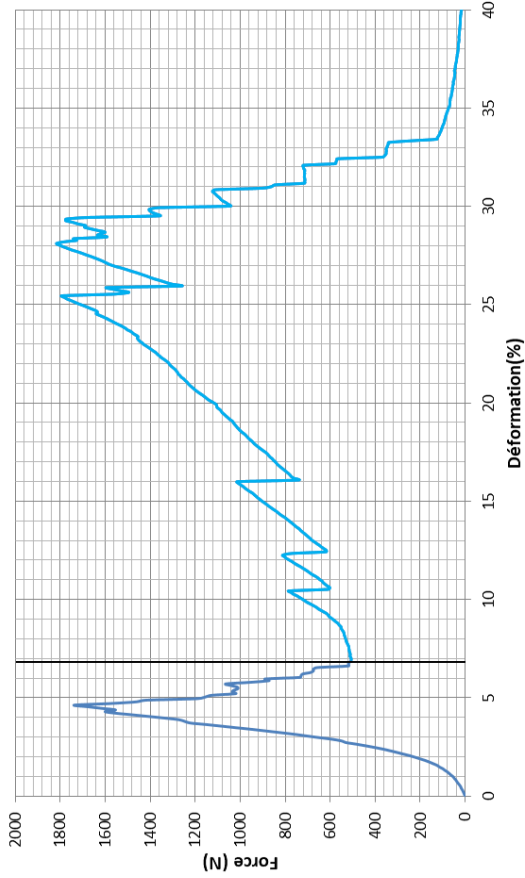
Tab. 1 – Force et déformation à rupture des cinq structures



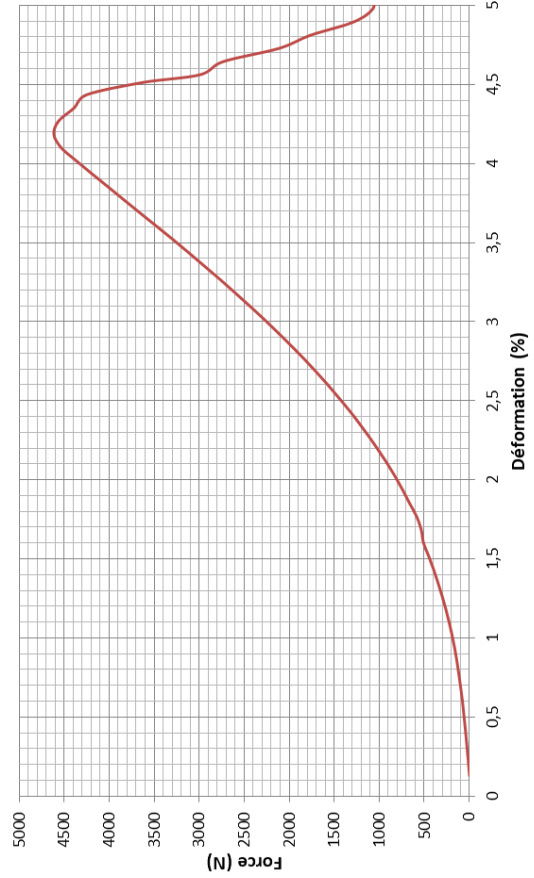
(b) O-T 7 1-7 Liage{Toile}, sens chaîne



(d) O-T 7 1-7 Liage{Toile}, sens trame



(a) O-T 3 1-3 Liage{Toile}, sens chaîne



(c) O-T 3 1-3 Liage{Toile}, sens trame

Fig. 6 – Essais de traction

En sens trame, l'allure des courbes (Figure 6c et Figure 6d) est similaire pour les deux structures. Dans un premier temps, les fils de trame s'alignent progressivement, ce qui se traduit par une zone de non-linéarité, qui est identique pour les deux structures, ce phénomène traduit le fait que les valeurs de retrait ne sont pas affectées par l'augmentation du nombre de couches. Dans un second temps, les fils de trame sont alignés dans la direction de sollicitation et la courbe est linéaire. Les valeurs d'efforts atteintes dépendent de la densité trame qui augmente avec le nombre de couches des structures. Les écart-types des valeurs de retrait restent faibles, les courbes fluctuent peu après rupture, ce qui signifie que tous les fils de trame cassent majoritairement au même moment. Les déformations à rupture ne semblent pas être affectées par l'augmentation du nombre de couches, hormis pour la structure à 23 couches (Tableau 1).

Le travail à rupture est un paramètre choisi pour analyser l'influence de l'augmentation du nombre de couches sur le comportement en traction. Le travail est calculé à partir de l'intégrale de la courbe de traction effort-déplacement et est représenté en Figure 7. L'évolution du travail dans le sens trame montre une linéarité avec l'augmentation du nombre de couches.

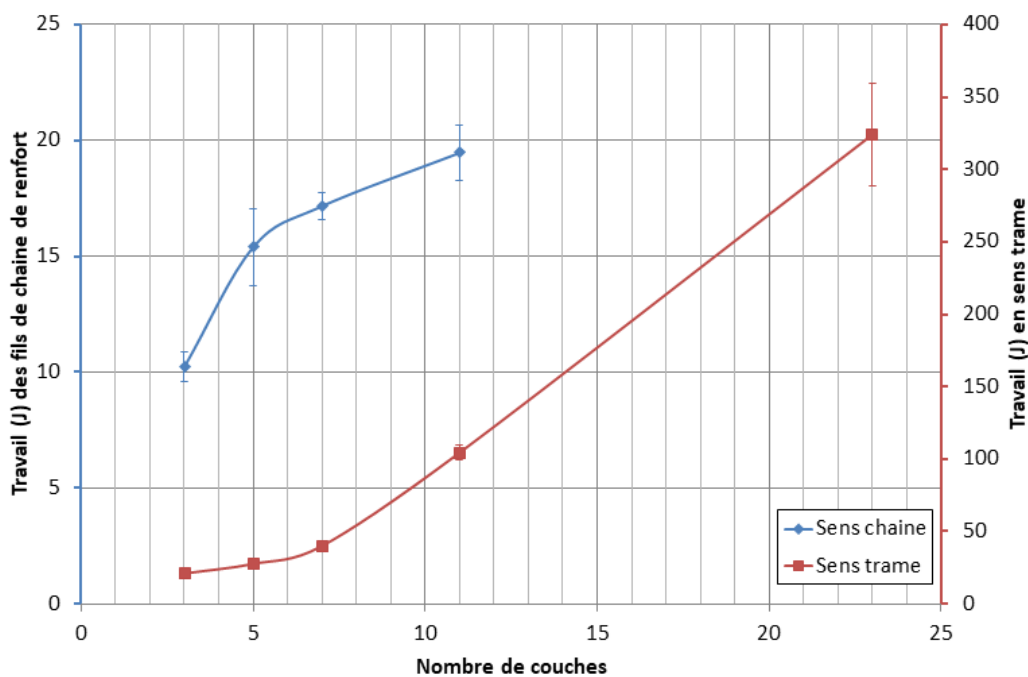


Fig. 7 – Travail à rupture en fonction du nombre de couches

En sens chaîne les courbes de traction présentent des profils différents de ceux en sens trame. On reporte en Figure 6a et 6b, les courbes représentatives des essais de traction en sens chaîne des structures O-T 3 1-3 {Toile} et O-T 7 1-7 {Toile}. Le comportement des structures est caractérisé par un double-pic d'efforts. Ce phénomène est caractéristique des architectures 3D interlock chaîne [20]. Dans la première partie de la courbe, ce sont les fils de chaîne de renfort qui travaillent en traction (surlignées en bleu foncé sur les courbes Figures 6a et 6b). À la rupture de ces derniers, une importante chute de l'effort est constatée. Lors de cette diminution, les oscillations des courbes sont attribuées à la reprise d'effort assurée par d'autres fils de chaîne de renfort.

Dans la seconde partie de ces courbes (surlignées en bleu clair sur les courbes Figures 6a et 6b), les fils de chaîne de liage s'alignent progressivement dans la direction de sollicitation. On constate alors l'influence significative des valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage (22 et 48% pour les structures à 3 et 7 couches), sur les gammes de déformation atteintes lors de ces essais. La rupture des fils de chaîne de liage

débute au-delà de 40% de déformation pour la structure O-T 7 1-7 {Toile}. Cette déformation dépasse même les 120% pour la structure O-T 11 1-11 {Toile}. Les différences d'embuvage des fils de liage au sein des structures étant importantes, ces fils ne cèdent pas au même moment et créent ces fluctuations en fin de courbe. Ces différences sont principalement dues à la régulation des tensions entre les ensouples. Afin de comparer les structures entre-elles, le travail en sens chaîne a été calculé dans les seules zones associées à la rupture des fils de chaîne de renfort (délimitées par des traits verticaux dans les Figures 6a et 6b). Suite aux très hautes valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage de la structure O-T 23 1-23 {Toile} (environ 230%), la gamme de déformation à rupture n'a pas pu être atteinte sur le banc de traction. Une augmentation du travail en traction (cf. Figure 7) en sens chaîne avec le nombre de couches semble se dégager. L'allure de la courbe semble se stabiliser pour les structures à partir de la structure O-T 11 1-11 {Toile}, mais reste à vérifier.

Conclusion

Cinq tissus 3D interlock chaîne ont été réalisés à base de mèche de lin de 1 000 Tex. L'utilisation d'une machine à tisser développée au sein de notre laboratoire a permis de gagner flexibilité et de tisser les cinq structures les unes à la suite des autres sans modification du rentrage. Les résultats montrent la relation de nombreux paramètres structuraux des tissus 3D interlock chaîne avec leur nombre de couches. La densité trame, l'épaisseur, la masse surfacique et l'embuvage des fils de chaîne de liage évoluent proportionnellement au nombre de couches. L'augmentation de ce premier paramètre est la principale cause du gain de force à rupture lors de l'essai de traction uniaxial en sens trame. En sens chaîne, l'allure des courbes de traction est similaire pour les cinq structures. Un premier pic traduit la rupture des fils de chaîne de renfort. Une reprise d'efforts survient ensuite, jusqu'à une déformation à rupture qui est fonction des valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage. La chaîne de caractérisation mise en place a ainsi permis de relier les paramètres structuraux à leur comportement mécanique en traction avant imprégnation. Outre les résultats, cette étude démontre également la faisabilité de structures 3D à base de fibres naturelles. L'analyse du comportement mécanique à l'échelle des composites sera effectuée par la suite.

Remerciements

Cette étude est cofinancée par la région Hauts-de-France, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et le groupe Depestele, fournisseurs des mèches de lin.

Références

- [1] C. GOUDENHOFT, A. BOURMAUD et C. BALEY, « Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement : Exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties », *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, apr 2019.
- [2] K. L. PICKERING, M. G. A. EFENDY et T. M. LE, « A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, p. 98–112, apr 2016.
- [3] A. LEFEUVRE, A. BOURMAUD, C. MORVAN et C. BALEY, « Tensile properties of elementary fibres of flax and glass : Analysis of reproducibility and scattering », *Materials Letters*, vol. 130, p. 289–291, sep 2014.
- [4] T. CADU, M. BERGES, O. SICOT, V. PERSON, B. PIEZEL, L. V. SCHOORS, V. PLACET, S. CORN, R. LÉGER, L. DIVET, P. IENNY et S. FONTAINE, « What are the key parameters to produce a high-grade bio-based composite ? application to flax/epoxy UD laminates produced by thermocompression », *Composites Part B : Engineering*, vol. 150, p. 36–46, oct 2018.

- [5] E. S. IHAB, Z. FAWAZ, R. ZITOUNE et H. BOUGHERARA, « An investigation of the damage mechanisms and fatigue life diagrams of flax fiber-reinforced polymer laminates », *Journal of Materials Science*, vol. 49, p. 2338–2346, dec 2013.
- [6] T. JEANNIN, X. GABRION, E. RAMASSO et V. PLACET, « About the fatigue endurance of unidirectional flax-epoxy composite laminates », *Composites Part B : Engineering*, vol. 165, p. 690–701, may 2019.
- [7] F. BENSADOUN, K. A. M. VALLONS, L. B. LESSARD, I. VERPOEST et A. W. VAN VUURE, « Fatigue behaviour assessment of flax-epoxy composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 82, p. 253 – 266.
- [8] A. CUYNET, D. SCIDA, E. ROUX, F. TOUSSAINT, R. AYAD et M. LAGACHE, « Damage characterisation of flax fibre fabric reinforced epoxy composites during low velocity impacts using high-speed imaging and stereo image correlation », *Composite Structures*, vol. 202, p. 1186–1194, oct 2018.
- [9] E. CAPELLE, P. OUAGNE, D. SOULAT et D. DURIAATI, « Complex shape forming of flax woven fabrics : Design of specific blank-holder shapes to prevent defects », *Composites Part B : Engineering*, vol. 62, p. 29–36.
- [10] F. OMRANI, P. WANG, D. SOULAT, M. FERREIRA et P. OUAGNE, « Analysis of the deformability of flax-fibre nonwoven fabrics during manufacturing », *Composites Part B : Engineering*, vol. 116, p. 471–485, may 2017.
- [11] M. KASHIF, S. T. HAMDANI, M. ZUBAIR et Y. NAWAB, « Effect of interlocking pattern on short beam strength of 3d woven composites », *Journal of Composite Materials*, p. 002199831983944, apr 2019.
- [12] M. JABBAR, Y. NAWAB, M. KARAHAN, M. ASHRAF et T. HUSSAIN, « Mechanical response of novel 3D woven flax composites with variation in Z yarn binding », *Journal of Natural Fibers*, p. 1–16.
- [13] C. BALEY, M. GOMINA, J. BREARD, A. BOURMAUD, S. DRAPIER, M. FERREIRA, A. L. DUIGOU, P. J. LIOTIER, P. OUAGNE, D. SOULAT et P. DAVIES, « Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials », *International Journal of Material Forming*, dec 2018.
- [14] F. BOUSSU, I. CRISTIAN et S. NAUMAN, « General definition of 3D warp interlock fabric architecture », *Composites Part B : Engineering*, vol. 81, p. 171 – 188.
- [15] I. GNABA, X. LEGRAND, P. WANG et D. SOULAT, « Through-the-thickness reinforcement for composite structures : A review », *Journal of Industrial Textiles*, apr 2018.
- [16] A. P. MOURITZ, « Review of z-pinned composite laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, p. 2383–2397, dec 2007.
- [17] F. BOUSSU, F. VEYET et N. DUMONT, « Développement d’une machine prototype de tissage pour la réalisation d’échantillons textile 2,5D ». Projet privé A0807017N, OSEO, Lille, France, 03/11/2008 - 03/05/2009, 2008-2009.
- [18] S. GOUTIANOS et T. PEIJS, « The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre bio-composites », *Advances Composites Letters*, vol. 47, p. 425–436, 2003.
- [19] D. U. SHAH, P. J. SCHUBEL et M. J. CLIFFORD, « Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites », *Journal of Composite Materials*, vol. 47, p. 425–436, mar 2012.
- [20] A.-C. CORBIN, A. KECECI, F. BOUSSU, M. FERREIRA et D. SOULAT, « Engineering design and mechanical property characterisation of 3d warp interlock woven fabrics », *Applied Composite Materials*, vol. 25, p. 811–822, 2018.