

Caractérisation mécanique de tissus 3D interlock chaîne en lin à différents nombres de couches

H. LANSIAUX^a, D. SOULAT^a, F. BOUSSU^a, A. R. LABANIEH^a

a. ENSAIT, GEMTEX – Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles, F-59000 Lille, France
henri.lansiaux@ensait.fr

Résumé

À partir de rovings de lin 1000 Tex, cinq tissus 3D interlock chaîne, dérivée de la toile, ont été tissés sur une machine à tisser dédiée au prototypage. Dans le cadre de cette étude, l'influence du nombre de couches sur les propriétés structurales et mécaniques des tissus secs est plus spécifiquement analysée. Les résultats montrent que de nombreux paramètres structuraux tels que la densité trame, l'épaisseur ou la masse surfacique sont proportionnelles au nombre de couches de la structure tissée 3D interlock chaîne. A l'aide d'une caractérisation en traction de ces structures tissées 3D cette étude analyse également l'influence de la variation du nombre de couches sur ces caractéristiques mécaniques.

Abstract

Form 1000 Tex roving, five 3D warp interlock fabrics were woven on a weaving machine dedicated to prototyping. In this study, the influence of the number of layers on the mechanical behaviour properties of dry reinforcement has been investigated. Results show that structural parameters, as weft densities, thicknesses, or areal densities are linked to the number of layers. This study also demonstrates that mechanical properties in warp and weft directions of dry fabric are correlated to structural parameters.

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

1 Introduction

Le lin est une fibre libérienne, extraite de la plante éponyme par une succession de procédés naturels et mécaniques. La fibre en résultant présente le plus fort taux de cellulose (hemi-cellulose compris) parmi les fibres cellulosiques [1]. Avec un module d'Young compris entre 15 et 70 GPa [2, 3], le lin à l'échelle fibre, peut rivaliser, en valeur spécifique et par sa plus faible densité avec la fibre de verre. Les matériaux composites renforcés de fibres naturelles présentent des propriétés ; par exemple sur l'atténuation de vibrations [4].

L'architecture des structures de renfort ainsi que le taux final de fibres dans le matériau composite jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et sur le mode de rupture du matériau final. Si l'utilisation de ces fibres naturelles est très répandue pour élaborer des préformes de renforts non-tissés, tissés,

tressés ou sous forme d'unidirectionnels [5], très peu d'études ont porté sur l'élaboration de structures multicouches dites 3D, au sens qu'elles sont renforcées dans l'épaisseur, et à base de ces fibres naturelles. Les technologies de réalisation de renfort 3D sont nombreuses. La couture (stitching), le piquage (tufting) et le Z-pinning permettent de lier dans l'épaisseur plusieurs couches de renfort [6, 7]. Le tissage 3D et le tressage 3D permettent en une étape de réaliser les couches dans le plan tout en les renforçant dans l'épaisseur. Les matériaux composites renforcés de structures tissées 3D interlock chaîne montrent une plus grande résistance aux délaminages inter-plies et des tolérances supérieures à l'impact. Un tissu 3D interlock chaîne est un assemblage de plusieurs couches de tissus liées dans l'épaisseur par des fils de chaîne de liage [8]. Boussu et al. [9] ont défini ces structures 3D interlock chaîne à l'aide d'une dizaine de paramètres dont :

$$X_1 - X_2 \ N \ Y_1 - Y_2 \ \text{Liage} \ \{ \text{Liage} \}$$

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 trames
	Y_1	Pas du fil de chaîne de liage
	Y_2	Profondeur du fil de liage
	<i>Liage</i>	Type d'armure réalisé par les fils de chaîne de liage

L'objectif de cette étude est de réaliser, à partir de mèches de lin, des structures tissées 3D interlock chaîne avec un nombre variable de couches de trame et d'étudier l'influence de ce paramètre sur les propriétés structurelles et mécaniques de ces structures sèches.

2 Matériels et méthodes

Les mèches de lin utilisées dans cette étude sont fournies par le groupe Depestele. Le titrage de la mèche est mesuré selon la norme NF ISO 2061. Les mèches sont par la suite légèrement retordues sur un banc Twistec TW 4/300. Cette torsion apporte la cohésion nécessaire à la mèche pour le tissage sans réduire de manière excessive son imprégnabilité à la résine. La mèche est caractérisée en traction selon la norme NF ISO 2062. Cinq structures 3D interlock chaînes ont été tissées sur une machine à tisser prototype développée au sein du laboratoire Gemtex [10]. Cette machine à tisser permet de limiter la déformation des structures tissées qui sont conservées à plat après élaboration. Afin de faciliter la mise en œuvre du tissage, 24 ensouples, associées chacune à un cadre de la machine à tisser, ont été réalisées. Par conséquent la consommation de fils pour chaque cadre est indépendante. En fonction de ce nombre de cadres, le nombre de couches des différentes structures a été sélectionné et fixé respectivement à 3, 5, 7, 11 et 23 couches. Pour réaliser la structure à 3 couches, 4 fils de chaîne sont nécessaires (deux fils de chaîne de liage et deux fils de chaîne de renfort). Le motif est répété six fois en largeur, pour utiliser les 24 cadres. De même, pour la structure à 11 couches, le motif se répète deux fois en 24 cadres. La coupe chaîne et la représentation 3D schématique des cinq structures sont données en Table 1. Dans l'ensemble de ce document, les fils de chaîne sont représentés en bleu et les fils de trame en rouge. La densité chaîne définie au cours du piquage est de 6 fils/cm, avec l'ensemble des ensouples.

A l'issue du tissage, les densités chaîne et trame, l'embovement des fils de chaîne de renfort et liage, le retrait des fils de trame, ainsi que l'épaisseur et la masse surfacique sont mesurés. Les normes associées aux protocoles de caractérisation sont données en Table 2. Les éprouvettes sont également caractérisées en traction uniaxiale dans les directions chaîne et trame. L'essai de traction est effectué sur un banc Instron. Les dimensions des éprouvettes sont $300 \times 50 \text{ mm}^2$.

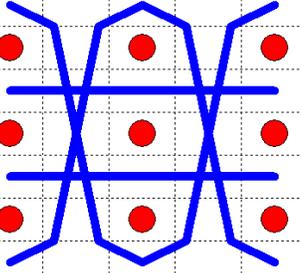
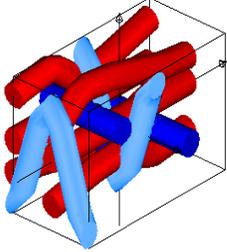
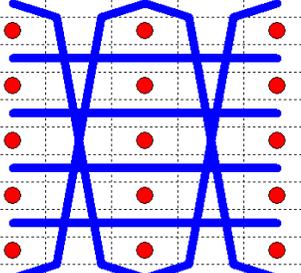
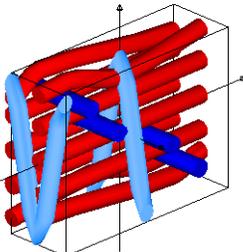
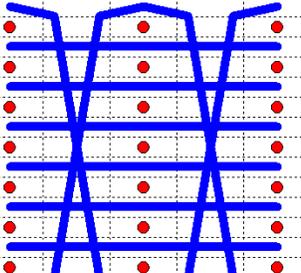
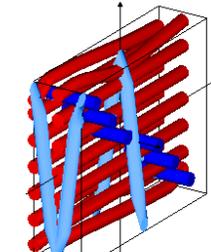
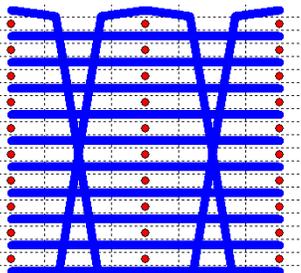
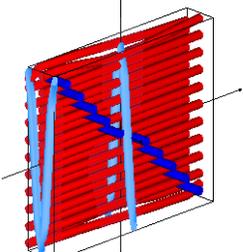
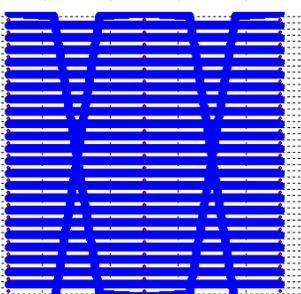
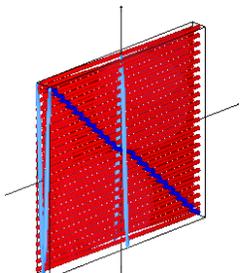
Nom	Coupe transversale	Représentation 3D
OT 3 1-3 Toile		
OT 5 1-5 Toile		
OT 7 1-7 Toile		
OT 11 1-11 Toile		
OT 23 1-23 Toile		

TABLE 1 – Coupe chaîne et représentation 3D des cinq structures tissées

Test	Norme
Densité	ISO 4602
Embuage & retrait	ISO 7211-3
Épaisseur	ISO 4603
Masse surfacique	ISO 12127
Traction	ISO 13934-1

TABLE 2 – Normes de caractérisation des tissus 3D interlock chaîne

3 Résultats

Influence sur les paramètres structuraux Les mèches de lin ont un titre de $1\,057,0 \pm 41,3$ Tex et une torsion de 45 tpm. On reporte sur la figure 1, les évolutions des densités trame (nombre de fils/cm), épaisseur (mm) et masse surfacique (kg/m^2) en fonction du nombre de couches. Les densités chaîne relevées sont toutes proches de la densité définie lors du piquage, soit 6 fils/cm. Les densités trame quant à elles varient davantage. Cependant, rapportée aux nombres de couches, la densité trame est d'environ 2 colonnes/cm. Ce nombre de colonnes par centimètre est identique pour toutes les architectures tissées; il dépend principalement du type de liage (ici orthogonal au travers de l'épaisseur) et du tirage des fils de chaîne et de trame. En conséquence la densité trame mesurée est proportionnelle au nombre de couches et évolue linéairement. L'épaisseur des cinq tissus 3D interlocks chaînes est également proportionnelle au nombre de couches. Plus le nombre de couche augmente, plus les fils de trame se superposent et génèrent cette épaisseur. La densité chaîne étant identique pour les cinq tissus, la masse surfacique est fonction du nombre de fils de trame insérés, soit du nombre de couches de la structure tissée interlock (Figure 1). La structure à 23 couches atteint une épaisseur de $18,0 \pm 0,1$ mm pour une masse surfacique de $6,34 \pm 0,12$ kg/m^2 .

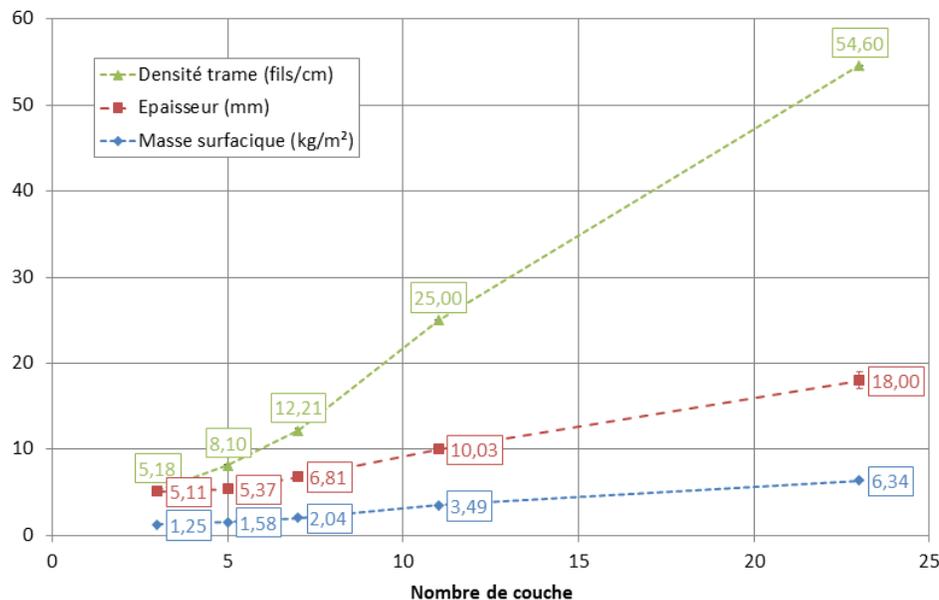


FIGURE 1 – Densités trame, épaisseur et masse surfacique en fonction du nombre de couches

Pour la structure à 11 couches, on reporte figure 2 les valeurs d'embuage de fils de chaîne de renfort et de retrait des fils de trame. Les valeurs moyennes d'embuage des fils de chaîne de renfort pour les structures 3, 5, 7, 11 et 23 sont respectivement 2,1; 1,4; 0,5; 2,2 et 2,2%. Les valeurs moyennes de retrait des

fil de trame pour les structures 3, 5, 7, 11 et 23 sont respectivement 2, 7; 1, 0; 1, 3; 3, 3 et 2, 3 %. Notons que ces valeurs sont très faibles, comparativement aux valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage. Pour cette structure à 11 couches l'embuvage des fils de liage est de 139 %. La variabilité des valeurs d'embuvages entre les différents fils de chaîne de renfort est principalement due au fait que chaque fil de chaîne est issu d'une ensouple différente avec des tensions différentes. Notons que les fils de trame sont néanmoins plus ondulés que les fils de chaîne de renfort. Cela est dû au fait que le fil de trame est inséré sans tension alors que les fils de chaîne sont tendus sur les ensouples. Concernant les structures à 3, 5, 7, et 23 couches les valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage sont respectivement de 22, 32, 48, et 237 %. On constate que ces valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage est également proportionnel au nombre de couches. En effet, plus le nombre de couche augmente, plus l'épaisseur augmente et plus la longueur de fils nécessaire pour lier la structure augmente. La Figure 3 illustre ces importantes valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage de la structure à 23 couches, dont la définition est O-T 23 1-23 Liage {Toile}, en accord avec les paramètres introduits précédemment. Sur cette figure sont distingués les fils de chaîne de liage en bleu clair et les fils de chaîne de renfort en bleu foncé.

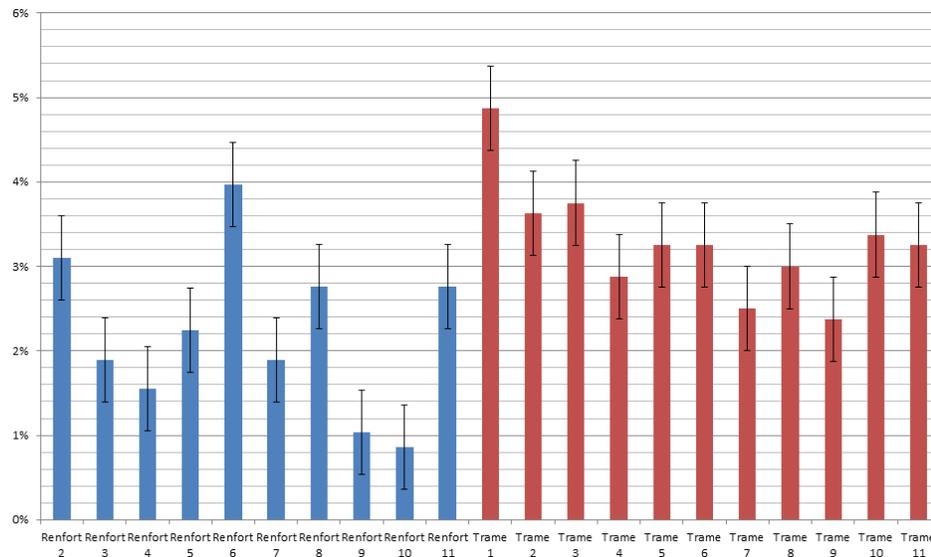


FIGURE 2 – Embuvement et retrait des fils de la structure à 11 couches (OT 11 1-11 Liage {Toile})

Influence sur les paramètres mécaniques Le comportement en traction des structures est caractérisé par des essais uni-axiaux dans chacune des directions (chaîne, trame). Les courbes effort/déformation sont, dans un premier temps, analysées en fonction des caractéristiques des structures. On reporte en figure 4, les courbes obtenues pour deux des cinq structures, la structure à 3 couches (OT 3 1-3 Liage {Toile}) avec respectivement le comportement en sens chaîne (Figure 4a) et trame (Figure 4c) et la structure à 11 couches (OT 11 1-11 Liage {Toile}) avec respectivement le comportement en sens chaîne (Figure 4b) et trame (Figure 4d). Les valeurs des efforts maximaux et des déformations associées en sens trame sont données en Table 3

En sens trame, les courbes (Figure 4c, Figure 4d) se caractérisent par une première zone de non-linéarité liée aux valeurs de retrait et au temps d'alignement des fils de trame dans la direction de sollicitation. Cette zone reste identique pour les 2 structures concernées, ce qui montre que les valeurs de retrait ne sont pas affectées par l'augmentation du nombre de couches. Dans une seconde partie l'effort augmente linéairement en fonction de la déformation jusqu'à un effort maximal dont la valeur dépend de



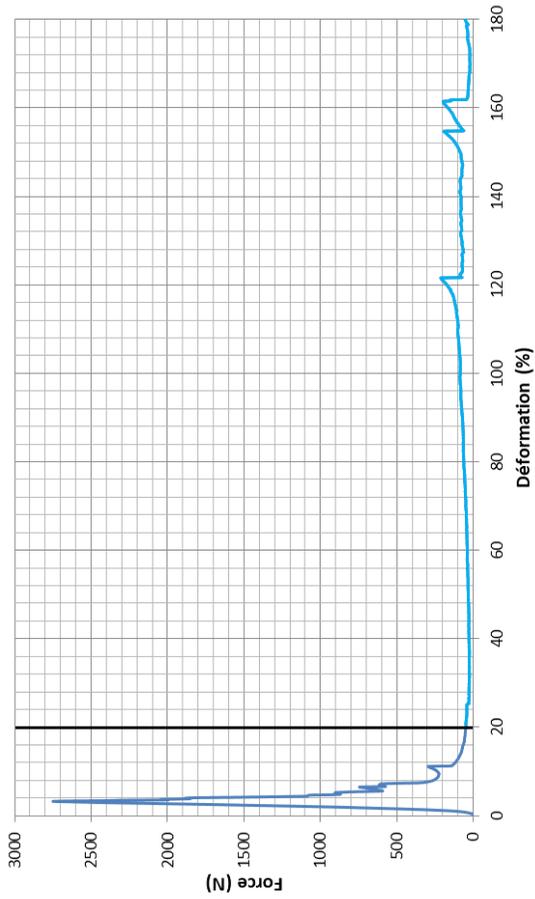
FIGURE 3 – Coupe chaîne de la structure 23 couches (O-T 23 1-23 Liage {Toile})

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

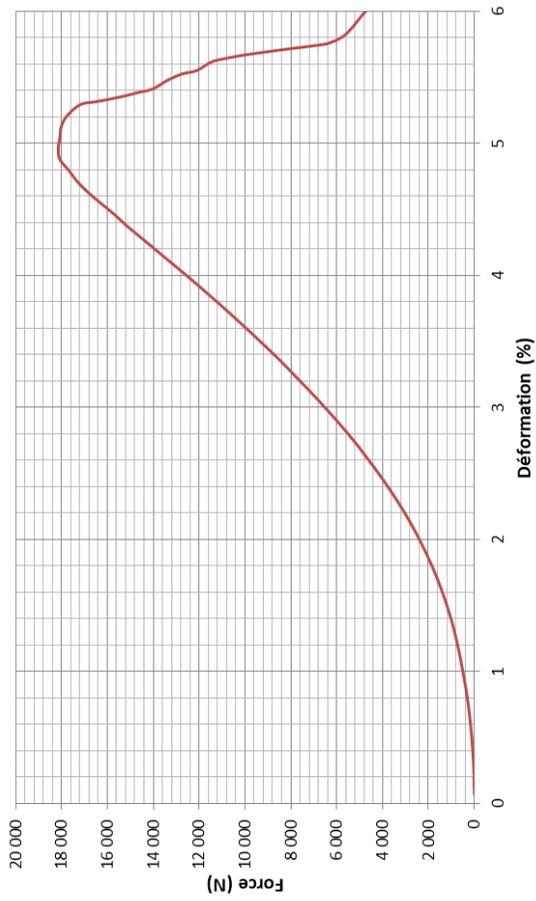
TABLE 3 – Efforts et déformations à rupture en sens trame

la densité trame. Comme vu précédemment (Figure 1) plus le nombre de couches est important, plus la densité trame augmente et plus la valeur de l'effort maximal augmente (Table 3). Au-delà de cette valeur à rupture, les courbes (Figure 4c et Figure 4d) ne montrent pas de fluctuations importantes ce qui signifie que tous les fils de trame cassent majoritairement en même temps. Par ailleurs les déformations à rupture, associées à ces valeurs d'effort maximal ne semblent pas affectées par l'augmentation du nombre de couches, hormis la structure 23 couches. L'influence de l'augmentation du nombre de couches sur le comportement en traction de ces 5 structures tissées 3D Interlock chaîne peut être interprétée également par l'évolution du travail à rupture (calculé à partir de l'intégrale de la courbe de traction effort-déplacement) en fonction du nombre de couches, représentée Figure 5. On constate une augmentation du travail exercé avec l'augmentation du nombre de couches.

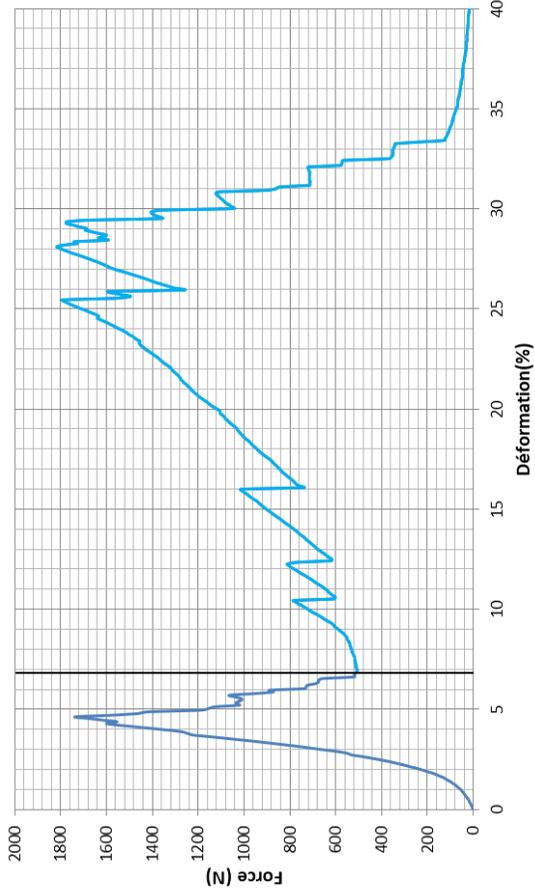
En sens chaîne les courbes de traction (Figure 4a, Figure 4b) exhibent des profils différents, relativement au comportement dans la direction trame mais également pour les 2 architectures concernées (OT 3 1-3 Liage {Toile} et OT 11 1-11 Liage {Toile}). Le comportement de la structure à 3 couches est caractérisé par un double-pic d'efforts. Ce phénomène est caractéristique des architectures 3D interlock chaîne pour lesquelles la valeur d'embuvage des fils de chaîne de renforts est du même ordre de grandeur de celui des fils chaîne de liage [11]. Dans la première phase ce sont plutôt les fils de chaîne de renfort qui travaillent en traction (zone de la courbe surlignée en bleu foncé), jusqu'à rupture de ceux-ci qui provoque une chute de l'effort mesuré. Lors de cette diminution, les oscillations de la courbe sont attribuées à la reprise d'effort de certains fils de chaîne. Dans la seconde phase, les fils de liage s'alignent progressivement dans la direction de sollicitation et l'effort de traction ré-augmente sur une gamme de déformation proportionnelle aux valeurs d'embuvage de ces fils. Pour la courbe associée au



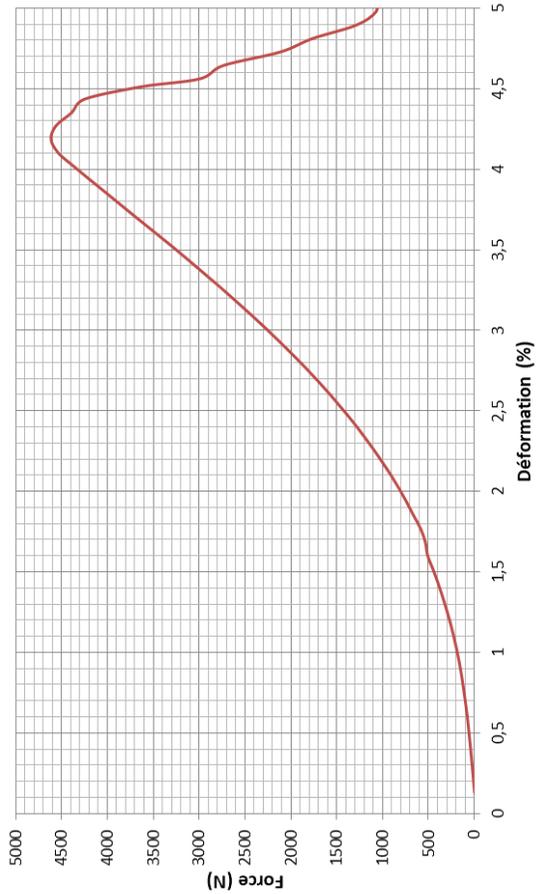
(b) OT 11 1-11 Liage (Toile), sens chaine



(d) OT 11 1-11 Liage (Toile), sens trame



(a) OT 3 1-3 Liage (Toile), sens chaine



(c) OT 3 1-3 Liage (Toile), sens trame

FIGURE 4 – Essais de traction

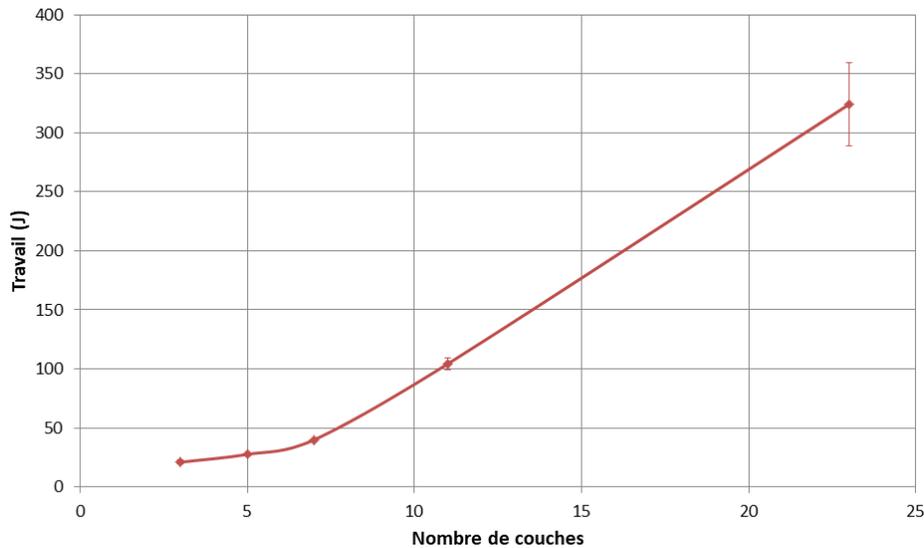


FIGURE 5 – Travail en traction des structures tissées 3D interlock chaîne, direction trame, en fonction du nombre de couches

comportement de la structure à 11 couches, on constate l'influence significative de l'embuvage des fils de chaîne de liage (139 %), sur les gammes de déformation atteintes lors de cet essai (rupture au delà de 120 % de déformation). Le premier pic d'effort est associé également au comportement des fils de chaîne de renfort et par effet d'échelle du graphe, la seconde partie de la courbe se caractérise par un plateau d'efforts de valeurs non-nulles lié au maintien, très long, du comportement de la structure par les fils de chaîne de liage le temps qu'ils s'alignent dans la direction de sollicitation. Afin de comparer en direction chaîne le comportement en traction de l'ensemble des structures tissées 3D interlock chaîne, le travail a été calculé dans la zone associée à la rupture des fils de chaîne de renfort (délimitée par un trait vertical dans les Figures 4a et 4b). L'évolution du travail en fonction du nombre de couches, est représentée en Figure 6. Notons qu'avec les valeurs d'embuvage (237 %) de la structure à 23 couches (O-T 23 1-23 Liage {Toile}), et par conséquent les gammes de déformations à rupture atteinte, les essais de traction en direction chaîne n'ont pu être effectués avec des éprouvettes de même longueur que celle choisie pour les autres structures. On constate dans cette direction chaîne une augmentation du travail en traction, avec le nombre de couches, qui semble se stabiliser pour les structures à partir de 11 couches.

4 Conclusion

A partir de mèches de lin de 1 000 Tex, et légèrement retordues à 45 tpm, cinq architectures de tissus 3D interlock chaîne ont été produits sur une machine semi-automatique développée au sein du laboratoire GEMTEX. La flexibilité obtenue avec l'association d'une ensouple par cadre de la machine à tisser a permis de tisser les cinq structures grâce à un seul et unique rentrage tout en faisant varier le nombre de couches. La chaîne de caractérisation des propriétés textiles (épaisseur, masse surfacique, densité trame) a montré l'évolution proportionnelle de ces caractéristiques avec le nombre de couches. Les mesures d'embuvage des fils de chaîne de renfort et de liage, et de retrait des fils de trame ont été analysées. Les valeurs d'embuvage des fils de liage sont fortement corrélées à l'augmentation du nombre de couches. Les caractérisations en traction ont permis de relier de manière significative le comportement en sens trame à l'augmentation des densités des fils de trame induit par l'augmentation du nombre

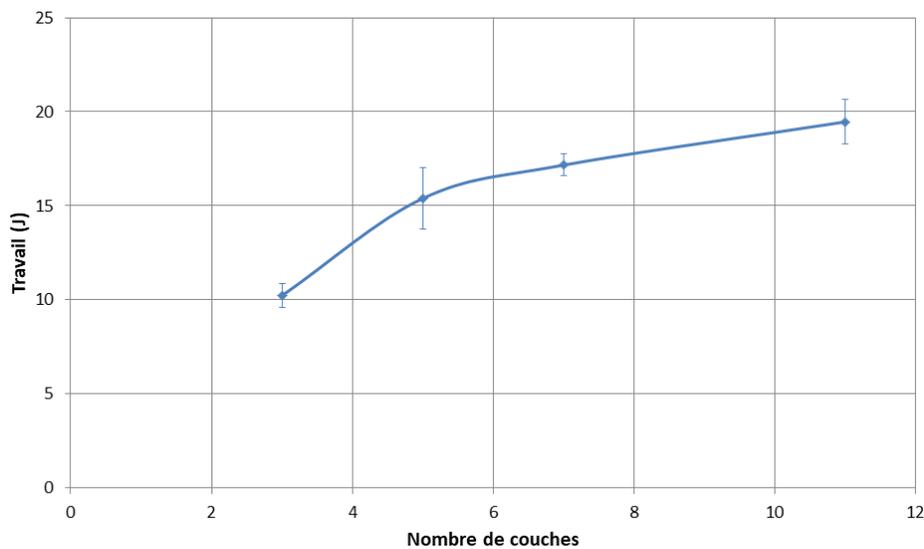


FIGURE 6 – Travail en traction des structures tissée 3D interlock chaîne, direction chaîne, en fonction du nombre de couches

de couches et d'exhiber des comportements plus singuliers en direction chaîne selon le ratio entre les valeurs d'embuvage des fils de chaîne de renfort et des fils de chaîne de liage. Plus la valeur de cet embuvage des fils de liage augmente et plus les déformations à rupture sont importantes. Cette étude, menée à la connaissance des auteurs pour la première fois sur des rovings de lin a permis de démontrer la faisabilité ce type d'architecture. Par ailleurs la chaîne de caractérisation mise en place a permis de relier les paramètres, structuraux, issus de l'élaboration des structures 3D interlock chaîne, à leur comportement mécanique en traction, et ce avant imprégnation. Cette étude sera à compléter avec l'analyse du comportement mécanique à l'échelle des composites réalisés à base de ce type de renforts.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet [FLAX3D](#). Ce projet 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, fournisseur des mèches de lin.

Références

- [1] M. P. M. DICKER, P. F. DUCKWORTH, A. B. BAKER, G. FRANCOIS, M. K. HAZZARD et P. M. WEAVER, « Green composites : A review of material attributes and complementary applications », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 56, p. 280 – 289.
- [2] D. U. SHAH, « Natural fibre composites : Comprehensive ashby-type materials selection charts », *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 62, p. 21–31.
- [3] C. BALEY, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux, Plastiques et composites*.
- [4] 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, p. 193–205.

-
- [5] 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.
- [6] I. GNABA, X. LEGRAND, P. WANG et D. SOULAT, « Through-the-thickness reinforcement for composite structures : A review », *Journal of Industrial Textiles*, apr 2018.
- [7] A. P. MOURITZ, « Review of z-pinned composite laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, p. 2383–2397, dec 2007.
- [8] A. P. MOURITZ et B. N. COX, « A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, p. 709–728, jun 2010.
- [9] F. BOUSSU, I. CRISTIAN et S. NAUMAN, « General definition of 3D warp interlock fabric architecture », *Composites Part B : Engineering*, vol. 81, p. 171 – 188.
- [10] 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.
- [11] 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.