



**HAL**  
open science

## **Caractérisation mécanique multi-échelle des propriétés des fibres de lin : Influence du type de fil**

Fatma Omrani, Damien Soulat, Manuela Ferreira, Peng Wang

### ► **To cite this version:**

Fatma Omrani, Damien Soulat, Manuela Ferreira, Peng Wang. Caractérisation mécanique multi-échelle des propriétés des fibres de lin : Influence du type de fil. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. ⟨hal-01623690⟩

**HAL Id: hal-01623690**

**<https://hal.science/hal-01623690v1>**

Submitted on 25 Oct 2017

**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.



HAL Authorization

## Caractérisation mécanique multi-échelle des propriétés des fibres de lin : Influence du type de fil

### *Multi-scale mechanical characterisation of flax fibres: influence of the yarn's type*

F. Omrani<sup>1</sup>, D. Soulat<sup>1</sup>, M. Ferreira<sup>1</sup>, P. Wang<sup>1</sup>

1 : Université de Lille, ENSAIT, GEMTEX  
2 allée Louise et Victor Champier, 59056 Roubaix, France  
e-mail : [fatma.omrani@ensait.fr](mailto:fatma.omrani@ensait.fr), [damien.soulat@ensait.fr](mailto:damien.soulat@ensait.fr)  
[manuela.ferreira@ensait.fr](mailto:manuela.ferreira@ensait.fr), [peng.wang@ensait.fr](mailto:peng.wang@ensait.fr)

### Résumé

Les fibres de lin se présentent comme des nouveaux produits innovants vis-à-vis des défis écologiques actuels. Elles viennent renforcer des matériaux techniques de haute performance y compris les composites. Afin d'améliorer la compréhension des propriétés mécaniques et contrôler l'uniformité de ces renforts naturels, une analyse multi-échelle est réalisée avec trois différents types de fil. Les tests de caractérisation sont effectués à l'échelle fil, tissu et composite pour étudier l'influence des propriétés telles que le taux de torsion et le type de fibres utilisées. L'étude montre une grande variabilité des propriétés mécaniques à l'échelle fil qui diminue significativement de l'échelle tissu à l'échelle composite où on retrouve des résultats équivalents aux composites à base de fibres synthétiques. Les résultats en traction des renforts secs montrent l'influence du tissage sur les propriétés du fil. L'étude expérimentale est complétée par une analyse microscopique des images MEB des sections rompues des composites. Elle confirme la variabilité due à la non uniformité des fibres de lin et met l'accent de l'effet de la torsion sur le comportement du composite. En dépit de la variabilité en forme sèche, les résultats démontrent que les composites à base de fibre de lin ont des propriétés régulières et reproductibles.

### Abstract

Due to environmental challenges, flax based composites are introduced as innovative products that meet the current requirements for high performances' materials. In order to improve the understanding of the mechanical properties and to control their uniformity, a multi-scale study is carried out with three different types of yarns. The characterization is conducted on yarn, fabric and composite scales to study the influence of properties such as the twist level and the type of fibres used. The results shows a high variability of the mechanical properties at the yarn scale which decreases significantly with the fabric and the composite. In fact, the results found for the composite are equivalent with the synthetic fibres based composites. In addition, the influence of the weaving process on the properties of the yarn is shown with the tensile tests of the dry reinforcement. The experimental characterization is associated with a microscopic analysis with SEM images of composites' cross-section. It confirms the variability due the non-uniformity of flax fibres sections and mostly emphasises the impact of yarn twist level on the composites' behaviour. Despite the variability shown on the dry form, this study demonstrates that flax fibres composites can have regular and reproducible properties.

**Mots Clés :** fibres de lin, composites biosourcés, caractérisation mécanique, renfort/tissu

**Keywords:** flax fibres, biocomposite, mechanical characterization, reinforcement/fabric

## 1. Introduction

De plus en plus de recherches et d'études sont menées dans le domaine des biocomposites où l'objectif est comprendre et contrôler les propriétés des fibres naturelles afin d'optimiser la réalisation de composites à haute performances et répondant aux attentes industrielles. Ce phénomène est illustré par le nombre de publications et articles abordant les problématiques liées à l'utilisation des fibres naturelles. Parmi ces publications, on peut citer Shah [1] qui a montré que les composites à base de fibres naturelles peuvent être des alternatives écologiques aux composites renforcés par les fibres de verre pour des applications demandant une grande rigidité en traction. Les propriétés mécaniques des fibres simples et des composites ont été largement étudiées [2-4],

mais les échelles intermédiaires, telles que celles des fils et renforts, sont moins traitées en dépit de leurs influences sur le résultat final. Par exemple, pour le choix du type de renfort, Goutianos et al. [5] ont constaté que l'utilisation de renforts tissés au lieu des renforts non tissés augmente de 3 à 4 fois les propriétés mécaniques du composite. Egalement, en utilisant une approche d'Ashby, Shah [1, 6] a récemment montré que les renforts unidirectionnels à base de fibres de lin offrent des propriétés en traction 2 à 20 fois meilleures que les composites à base de non tissé. Ces études démontrent l'importance du choix adéquat de la structure du renfort en relation avec l'application finale. A l'échelle du fil, l'étude de Baets et al. [7] focalise sur l'effet de la torsion sur les propriétés des fils et composites. A cet effet, il est constaté que la rigidité des fils rovings, calculée à l'échelle composite, diminue de 63 GPa à 34 GPa lorsqu'une torsion de 19° est introduite sur les fils initialement parallèles. De plus, une torsion plus élevée entraîne la réduction de la perméabilité du fil ce qui affaiblit la qualité d'imprégnation du composite et ainsi ses propriétés mécaniques.

A l'échelle du renfort sec, Bensadoun et al. [8] ont comparé le comportement mécanique de composites à base de fibres de lin et d'une résine époxy avec neuf architectures de renforts de masses surfaciques différentes (non tissé, tissu toile, tissu sergé, quasi-UD, UD ...). Il a été démontré que le module de traction varie de 7,3 GPa pour le non tissé à 26 GPa pour l'UD et la contrainte maximale respectivement de 84 MPa à 249 MPa.

Plus récemment, une étude multi-échelle a été proposée par Blanchard et al. [4] où une caractérisation mécanique est réalisée sur un lot de matière à l'échelle fil, tissu et composite. Les résultats ont montré la grande variabilité des propriétés en traction à l'échelle fil qui diminue progressivement à l'échelle tissu et composite.

Dans la même optique, cet article porte sur les propriétés mécaniques des renforts et composites à base de fibres de lin en se basant sur une approche à plusieurs échelles. La matière d'entrée consiste en trois fils à base de fibres de lin ayant la même densité linéique mais différents taux de torsion et types de fibres. A partir de cette matière, les trois quasi-UD ainsi que composites correspondants ont été réalisés en suivant les mêmes réglages et paramètres de fabrication. Notre but est d'analyser l'influence des différents paramètres tels que les différents fils et le procédé de tissage sur les performances mécaniques du matériau à chaque échelle.

## 2. Démarche expérimentale

La démarche expérimentale est établie sur le principe d'un suivi qualité matière de la chaîne de caractérisation en commençant par l'échelle fil jusqu'au composite final élaboré. Lors de cette première étape, une caractérisation complète d'une première gamme de renforts est réalisée afin d'étudier l'influence de quelques paramètres procédés sur les propriétés mécaniques multi-échelles.

### 2.1 Echelle fil / mèche

La filature est un procédé important transformant les fibres de lin brut en fils prêts pour le tissage. Par conséquent, elle apporte des changements permanents et irréversibles sur la fibre. Pour cette raison, la caractérisation à l'échelle fil est primordiale. Les fils utilisés dans cette étude contiennent des fibres de lin issues de la culture en France, provenant du même lot de fibres et ayant subi le même procédé de préparation. Les fibres ont un diamètre moyen de 20  $\mu\text{m}$  mais la longueur change selon le type de fibre. Aussi, la différence a été introduite dans l'étape de filature avec le taux de torsion étant donné que le taux et l'angle de torsion peuvent être modifiés entre un fil faiblement ou fortement torsadé [7-10]. Les trois différents fils utilisés dans cette étude sont :

- Y1 : le fil noté Y1 est un fil de faible torsion contenant principalement des fibres long brin. Il est fabriqué suivant la filature mouillée où les faisceaux de fibres sont plongés dans l'eau à 60-70 °C pour les rendre plus flexibles. Ensuite, elles peuvent être peignées étant donné qu'elles sont déjà bien alignées. La qualité de ces fibres est supérieure et par conséquent elles sont plus couteuses. Elles sont très utilisées pour fabriquer les tissus et les renforts unidirectionnels.

- Y2 : le fil Y2 est un fil étoupe composé principalement de fibres théoriquement plus courtes que les fibres long brin. Il est obtenu par une filature au sec. Ce fil a été fortement retordu afin d'obtenir la même densité linéique que le fil Y1. Concernant la qualité des fibres, les étoupes sont différentes des précédentes vu qu'elles sont enchevêtrées entre elles et contiennent des anas. Donc, l'opération de nettoyage et de cardage est nécessaire. Ce type de fil est souvent utilisé pour son faible coût par contre il possède des faibles propriétés mécaniques. N. Martin et al. [11] ont démontré que les fibres étoupes, après qu'elles soient nettoyées et alignées, ont des propriétés mécaniques similaires à celles de fibres teillées. L'objectif de cette étude est confirmer ce constat à l'échelle du tissu et des composites.
- Y3 : noté Y3 est un fil roving, souvent utilisé pour des applications techniques. Les fibres sont rassemblées dans une bande parallèle avec une faible torsion. Les fils rovings sont maintenus suivant la même direction pour de meilleures performances mécaniques et d'imprégnation à l'échelle du composite. Les fibres naturelles telles que le lin ont besoin d'une légère torsion lors de la filature afin de leur procurer suffisamment de cohésion pour l'opération de tissage.

En considérant le caractère hydrophile des fibres de lin, les fils ont été conditionnés pendant au moins 48 heures à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et une humidité relative HR% de  $65 \pm 2 \%$  (ISO 139 [12]). La densité linéaire, appelée aussi titre, et la torsion sont mesurées suivant respectivement les normes ISO 2060 [13] et ISO 2061[14]. Les propriétés des fils sont présentées dans le tableau 1. Le comportement mécanique en traction des fils est étudié selon la norme ISO 2062 [15] sur une moyenne de 20 échantillons prélevés dans la bobine.

Fils	Longueurs des fibres (mm)	Type	Torsion	Composition	Titre (tex)	Torsion (tours/m)
Y1	$43 \pm 11$	Fil long brin	Low twist	100 % lin	$103,3 \pm 2,0$	$112 \pm 10$
Y2	$44 \pm 15$	Fil étoupe	High twist	100 % lin	$103,5 \pm 1,8$	$403 \pm 20$
Y3	$38 \pm 14$	Roving	Low twist	100 % lin	$102,0 \pm 5,7$	$115 \pm 9$

Tab. 1. Propriétés des fils testés

Par ailleurs le comportement mécanique en traction des fils après tissage est identifié en prélevant et testant les fils tissés dans la direction chaîne et trame. En effet, lors du tissage de fortes sollicitations sont exercées sur les fils et cette comparaison nous permet de quantifier l'impact de cette opération sur les performances mécaniques des fils en lin.

## 2.2 Echelle tissu

Les propriétés du composite final dépendent significativement du renfort utilisé. Pour cette raison, le choix du type et d'architecture du renfort est primordial. Suivant les fils caractérisés précédemment, trois différents quasi-UD sont fabriqués avec les mêmes paramètres de tissage. Ils sont notés UD1, UD2 et UD3 avec respectivement les fils Y1, Y2 et Y3. Les tissus n'ont subi aucun traitement post ou pré-tissage. Les quasi-UD sont tissés selon une armure sergé 2/2 et avec la trame comme direction préférentielle. Dans la direction chaîne, un fil de lin blanchi de très faible densité, est utilisé comme fil de liage afin de connecter les fils de trame. Par conséquent, les propriétés mécaniques sont négligeables dans cette direction.

De même qu'à l'échelle fil, les échantillons ont été conditionnés à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et HR% de  $65 \pm 2 \%$  pour 48 heures. La masse surfacique et l'épaisseur sont mesurées sur une moyenne de 5 échantillons pour chaque renfort. Les résultats sont illustrés dans le tableau 2. Ensuite, la caractérisation mécanique est réalisée en traction simple selon la norme ISO 13 934-1[16].

Tissus	Fil en chaîne (tex)	Fil en trame (tex)	Compte fil / cm	Masse surfacique (g.m <sup>-2</sup> )	Epaisseur (mm)
UD1	Lin blanchi (26)	Y1 (105)	Chaîne : 13 Trame : 18	214,7 ± 0,8	0,58 ± 0,01
UD2	Lin blanchi (26)	Y2 (105)	Chaîne : 13 Trame : 19	247,8 ± 3,6	0,64 ± 0,01
UD3	Lin blanchi (26)	Y3 (105)	Chaîne : 13 Trame : 17,4	217,8 ± 3,5	0,52 ± 0,02

Tab. 2. Propriétés des renforts quasi-UD utilisés

### 2.3 Echelle composite

Les plaques composites sont élaborées avec le procédé de l'infusion sous vide. L'imprégnation est réalisée avec une résine époxy en plaçant 7 couches de quasi-UD suivant les mêmes empilements et orientations. Les composites 1, 2, 3 sont réalisés respectivement avec les renforts UD1, UD2 et UD3. Les propriétés principales sont présentées dans le tableau 3. Le nombre de couches a été déterminé théoriquement afin d'obtenir un taux de fibres dans l'intervalle de 30 à 40 %. Néanmoins, on peut remarquer que la fraction volumique des fibres varie selon le type de fil utilisé dans la direction trame. Ce paramètre a été déterminé expérimentalement en calculant le volume de chaque matériau afin de prendre en considération le taux de vide pouvant exister dans le composite final. Pour cette raison, la masse totale du renfort a été mesurée avant et après imprégnation. Les composites fabriquées sont ensuite caractérisés en traction simple selon la norme ISO 527 [17]. Les faciès de rupture des échantillons sont analysés sous microscopie à l'aide des images MEB afin de comprendre le mécanisme de rupture entrant en jeu.

Composites	Renfort	Nombre de couches	Fraction volumique des fibres (%)	Epaisseur (mm)	Densité	Taux du vide (%)
Composite 1	UD1	7	32	3,5	1,12	3
Composite 2	UD2	7	33	3,9	1,21	3
Composite 3	UD3	7	39	2,9	1,23	2

Tab. 3. Propriétés des composites réalisés

## 3. Analyse multi-échelle

Dans le cadre de cet article, l'étude se limitera à l'influence du tissage sur les propriétés du fil ainsi que le suivi qualité matière pour les tissus secs et composites renforcés avec les quasi-UD.

### 3.1 Echelle fil – tissu

Les courbes moyennes de traction sont représentées dans la figure 1 (gauche) avec les écart-types de chaque échantillon. A l'échelle fil, une grande variabilité de la réponse mécanique peut être observée pour les trois différents fils. Cette variabilité est le résultat de l'irrégularité des fibres de lin ainsi que le procédé de préparation des fibres et fils. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont aussi souligné l'inhomogénéité importante des fils pendant les essais de traction [9, 13]. En dépit une densité linéique identique de 105 tex, les fils possèdent un comportement mécanique différent. En effet, les fils Y1 et Y3 ont une évolution similaire avec une plus faible déformation à la rupture autour 1,9 % en comparaison avec le fil Y2 (déformation à rupture de 3,7 %). En revanche, ce dernier possède une plus faible force à la rupture en particulier par rapport à Y1. Ce résultat peut être expliqué par la forte torsion appliquée sur le fil Y2 qui de l'ordre de 400 tours/m peut dépasser la valeur critique de la torsion. Ceci peut entraîner la dégradation des fibres dans le fil et ainsi cette chute de la résistance mécanique [7, 10].

En outre, l'effet du tissage est étudié avec les fils détissés de chaque quasi-UD. La figure 1 (droite) montre les courbes de traction de ces fils et les valeurs sont reportées dans le tableau 4. En comparaison avec les fils avant tissage, la valeur maximale de la force à la rupture pour le fil Y2 diminue de 15 % et la déformation maximale augmente pour les fils Y1 et Y3 de respectivement 110 % et 33% (tableau 4). Par conséquent, compte tenu de l'écart-type, la variation de la force maximale est très faible. En revanche, la déformation à la rupture augmente considérablement après tissage pour les fils de faible torsion Y1 et Y3.

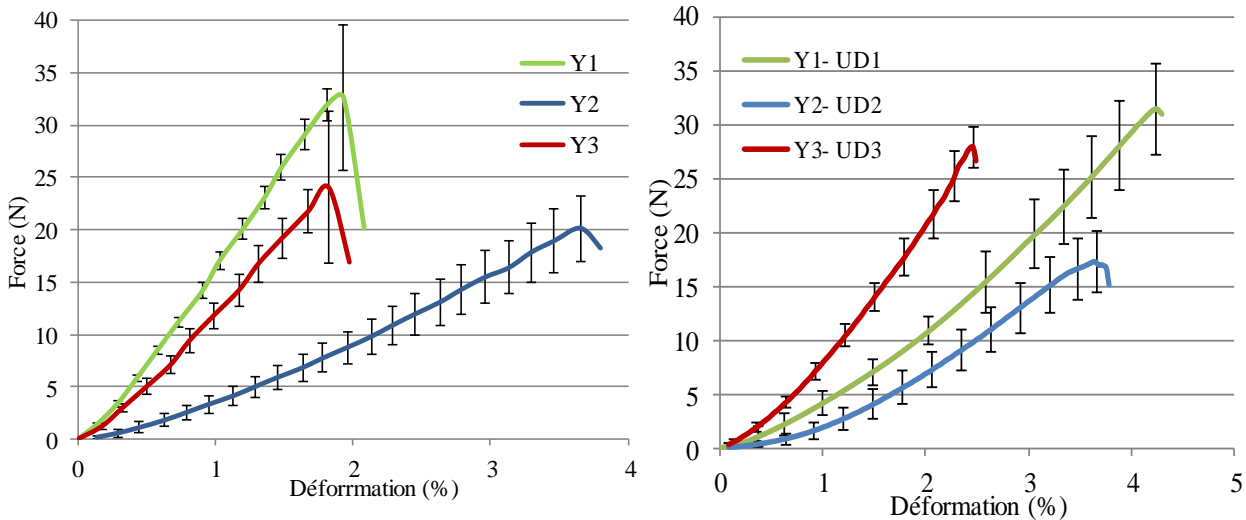


Fig. 1. Courbes en traction de la force en fonction de la déformation des fils avant et après tissage (quasi-UD)

Fils	Avant tissage		Après tissage	
	Force maximale (N)	Déformation à $F_{max}$ (%)	Force maximale (N)	Déformation à $F_{max}$ (%)
Y1	$32,7 \pm 6,9$	$1,93 \pm 0,18$	$31,4 \pm 4,3$	$4,25 \pm 0,92$
Y2	$20,2 \pm 3,6$	$3,65 \pm 0,33$	$17,3 \pm 2,8$	$3,64 \pm 0,08$
Y3	$24 \pm 7,2$	$1,83 \pm 0,12$	$27,9 \pm 1,96$	$2,46 \pm 0,05$

Tab. 4. Propriétés en traction des fils avant et après tissage

Un autre paramètre à prendre en compte est la rigidité du fil. En théorie, le module est calculé à partir de la force appliquée sur la section testée. Or, avec ces fils à base des fibres naturelles, la section est difficile à mesurer étant donné qu'elle est très irrégulière. Par conséquent, on introduit le module de force (N), qui est calculé à partir la pente de la courbe de traction de la force en fonction de la déformation. D'après l'allure des courbes (figure 1), deux modules de force peuvent être déduits sur deux intervalles différents de déformation : le module E1 entre 0-0,5 % et le module E2 entre 1,4-1,8 %. Ces valeurs de modules des fils avant et après tissage sont reportées dans le tableau 5. Le module de force augmente d'une manière considérable entre E1 à E2 de 34 %, 89% et 40 % pour respectivement Y1, Y2 et Y3. Le fil de faible torsion Y1 présente une plus grande rigidité en traction avec le module de force en particulier en comparaison avec le fil fortement torsadé Y2 [6, 8, 9, 12].

En ce qui concerne les fils après tissage, le module de force diminue pour les trois fils. En conséquence, le tissage entraîne la réduction de la rigidité du fil exprimée par ce module de force. On peut constater que l'impact du tissage sur la rigidité du fil est plus élevé avec le fil long brin Y1. De plus, une baisse importante du module de force après tissage est aussi observée pour tous les fils, jusqu'à 79 % pour le fil Y1. Pour le fil de forte torsion Y2, le module E2 reste quasi-équivalent avant et après tissage. Ces résultats montrent que la torsion a une grande influence sur les propriétés du fil. En effet, elle peut aider à conserver la rigidité du fil lors du tissage. Le procédé de tissage implique l'utilisation de fortes contraintes mécaniques sur le fil qui est la cause probable

d'endommagements irréversibles et permanents. D'où cette baisse considérable des performances mécaniques.

Fils	Module de force avant tissage (N)		Module de force après tissage (N)		Pourcentage de baisse du module du fil après tissage	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2
Y1	1351 ± 135	1805 ± 153	284 ± 69	655 ± 73	79%	64%
Y2	301 ± 134	569 ± 100	124 ± 54	531 ± 83	59%	7%
Y3	1016 ± 142	1425 ± 249	639 ± 102	1273 ± 143	37%	11%

Tab. 5. Module de force des fils (E1 et E2) avant et après tissage

### 3.2 Echelle tissu - composite

Suivant la direction préférentielle, le comportement mécanique des tissus et composites à base de quasi-UD est analysé dans la direction trame. Les courbes de la force en fonction de la déformation des trois quasi-UD lors du test de traction simple sont représentées sur la figure 2. Ces courbes afin de prendre en compte des contextures différentes sont ramenées en effort par fil. L'allure des courbes est très semblable et peut être dissociée en deux parties : une première partie non linéaire au pied de la courbe associée à l'alignement des fils au sein de la structure dans la direction de la charge suivie d'une zone linéaire où la force augmente jusqu'à la rupture totale. Comme à l'échelle fil, UD2 présente une force maximale plus faible et une déformation à la rupture plus importante en comparaison avec les autres.

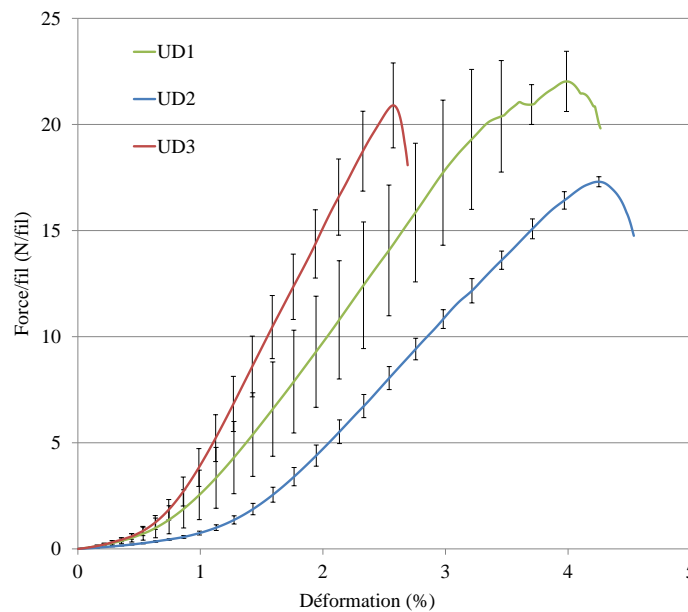


Fig. 2. Courbes de traction de la force/fil en fonction de la déformation des renforts quasi-UD dans la direction trame

Comme proposé à l'échelle du fil, le paramètre module de force est introduit afin d'étudier la rigidité du tissu. Ces modules sont calculés dans les mêmes zones de déformations (0 - 0,5 % et 1,4 - 1,8%) et représentés dans la fig. 3. Ce module est un module de force spécifique calculé en fonction de la force par fil pour pouvoir être comparé directement avec les résultats à l'échelle du fil. Une augmentation significative du module d'E1 à E2 est observée pour tous les quasi-UD. Le renfort UD2 présente encore un module plus faible pour les deux zones. Les renforts UD1 et UD3 possèdent un premier module E1 similaire mais le module E2 devient plus important pour le renfort UD3. Ainsi, on peut constater une baisse significative de l'ordre de 85 % du module de force E1 de l'échelle fil à l'échelle du tissu causée principalement par le tissage.

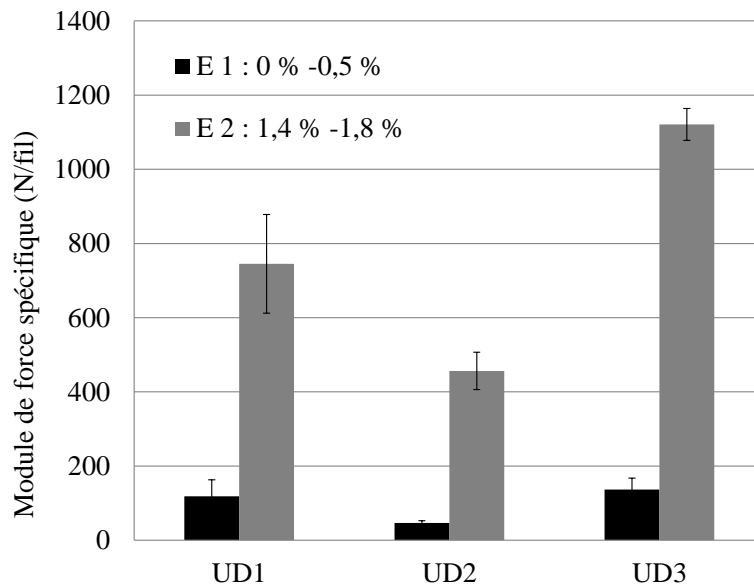


Fig. 3. Modules de force spécifiques E1, E2 des quasi-UD en trame

Concernant les composites, les résultats sont illustrés sur la figure 4 (gauche) avec les courbes moyennes de traction. La variabilité des résultats est nettement plus faible à l'échelle composite, en particulier en comparaison avec l'échelle fil (figure 1). L'allure de la courbe de traction est caractérisée par un adoucissement décrit par Bensadoun et al. [18]. Par conséquent un premier module tangent E1 est calculé entre 0 - 0,2 % de gamme de déformation puis un second module E2 est défini entre 0,3 – 0,5 %. Les courbes des composite 1 et composite 2 sont quasi-équivalentes avec des contraintes maximales respectivement de 190 et 180 MPa correspondants à des déformations de 2,05 et 2,12 %. Suivant les résultats aux échelles fil et tissu, le composite 2 (renforcé par UD2) présente le comportement mécanique le plus faible. En revanche, le composite 3 présente une meilleure résistance mécaniques avec une contrainte qui s'élève à 250 MPa. En effet, ce dernier possède une fraction volumique de fibres plus importante (tableau 3) du à l'utilisation des fils rovings. La forme des rovings en bandes parallèles de fibres faiblement tordues permet d'aligner et comprimer les fibres dans la direction préférentielle pendant l'infusion sous vide. La figure 4 (droite) reporte les évolutions des 2 modules tangents et la baisse traduisant l'adoucissement. Une réduction significative de la rigidité est observée pour les trois composites avec une baisse du module E2 d'environ 36 % par rapport au module E1. L. Zhang et M. Miao [19] ont démontré dans leur étude que, pour différentes architectures de tissus renforcés avec des fibres de lin, la réduction entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>eme</sup> module représente la réduction de la déformation et elle tourne autour de 35 %. En général, les résultats trouvés en traction entrent dans la gamme de ceux trouvés dans la littérature pour des composites à base de fibres de lin [1, 4, 6, 8, 20].

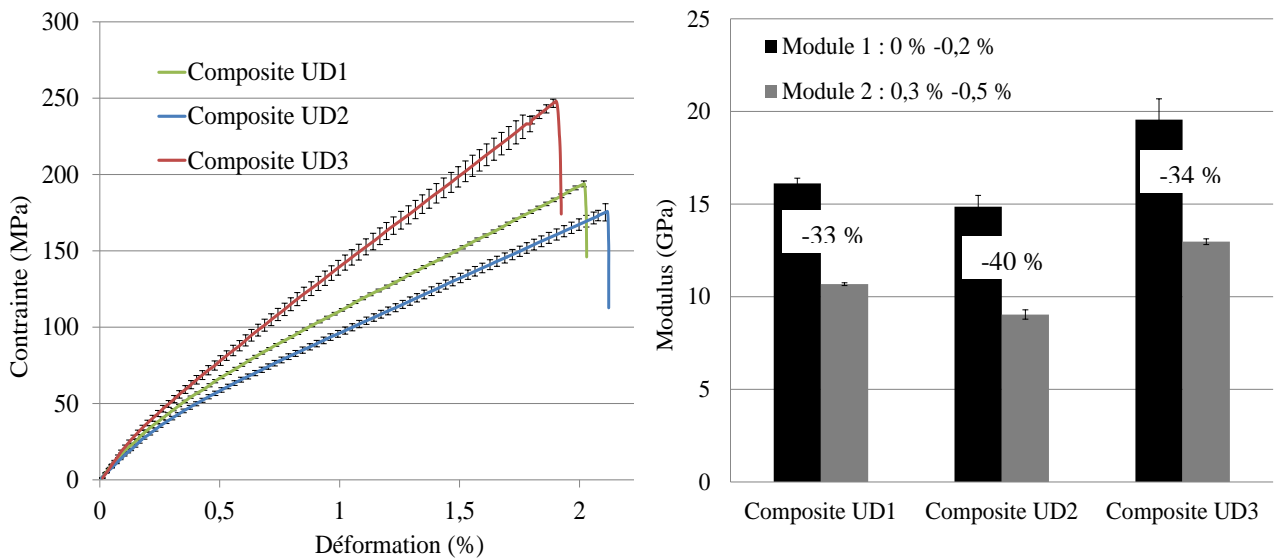
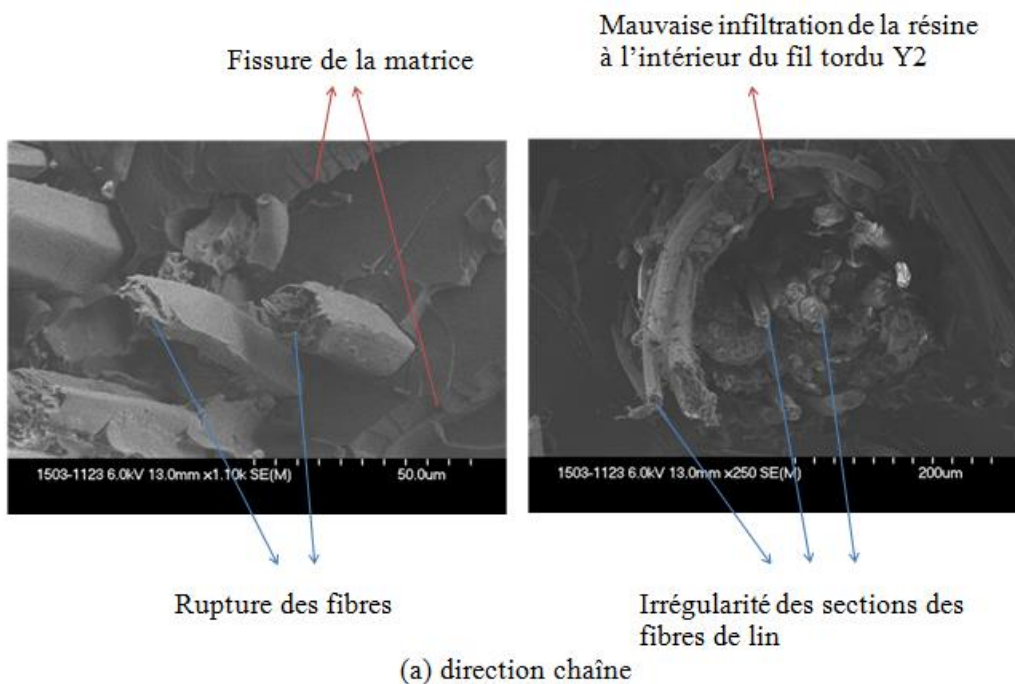


Fig. 4. Propriétés des composites quasi-UD dans la direction trame : Courbes de la traction à gauche et modules calculés à droite

La figure fig. 5 présente les images MEB des faciès de rupture des essais de traction du composite 2 dans les deux directions. Les observations microscopiques montrent que les coupes transversales des fibres de lin sont irrégulières avec des sections non uniforme, ce qui appuie la grande variabilité retrouvée à l'échelle fil. Les images montrent potentiellement des problèmes de mauvaise pénétration de la résine au cœur des fibres en dépit d'une bonne imprégnation à l'échelle mésoscopique. Ce défaut est fortement observé sur le composite 2 étant donné la résine peut difficilement s'infiltrer dans les fils en raison de la torsion trop élevée appliquée. L'autre phénomène observé est l'extraction du fil (ou « pull-out ») après la rupture dans la direction chaîne. Ainsi, l'effet de la forte torsion est constaté avec les marques laissées sur la matrice par les fils sortant violemment de la structure initiale. Dans le cas du fil Y2, la torsion a aidé à réduire la dégradation des propriétés des fils pendant le procédé de tissage mais ce niveau de torsion élevé a une influence négative sur les performances mécaniques du composite final avec une plus mauvaise imprégnation et la désorientation des fibres par rapport à l'axe principal.



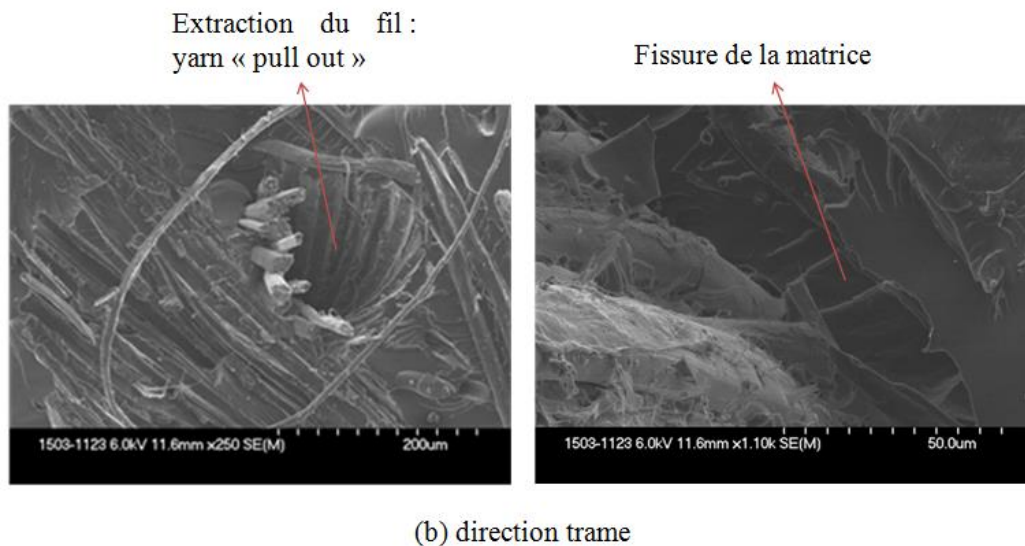


Fig. 5. Images MEB des faciès de rupture du composite (composite UD2- Y2) :  
(a) direction chaîne et (b) direction trame

#### 4. Conclusion

Dans cet article, une démarche multi-échelle est adoptée avec une caractérisation mécanique des propriétés de trois différents fils, tissus et composites à base de fibres de lin. Pour la même qualité de fil, une caractérisation complète de toute la chaîne de production est réalisée afin d'étudier l'impact réel de chaque paramètre aux différentes échelles du matériau. A l'échelle fil, les résultats soulignent la variabilité des propriétés du même lot voire au sein de la même bobine. Par ailleurs, l'application d'une torsion est nécessaire pour aligner les fibres naturelles, contrairement aux fibres synthétiques. Pour cette raison, l'effet de la torsion est étudié. A l'échelle tissu, la caractérisation du en traction des fils détissés et des renforts quasi-UD montre la forte influence du tissage sur leurs comportements mécaniques. En comparaison aux performances mécaniques des fils avant tissage, le module de force baisse significativement en raison de la dégradation des fils avec les fortes contraintes exercées lors du tissage. A cette échelle, l'effet de la torsion est primordial étant donné qu'elle peut aider à maintenir la rigidité du fil pendant le tissage. Ensuite, à l'échelle composite, des analyses d'images MEB a complété la caractérisation mécanique afin d'étudier la qualité de l'imprégnation de la résine à l'intérieur du renfort.

D'après le suivi multi-échelle, les réponses mécaniques en traction du fil après tissage, du tissu et du composite semblent suivre la même tendance, contrairement au fil avant tissage. Ce phénomène montre l'effet irréversible et permanent du tissage sur les propriétés des fils. En outre, le taux de torsion appliqué influence fortement les performances mécaniques à plusieurs échelles. On peut constater qu'un niveau de torsion optimal est nécessaire afin d'en avoir suffisamment pour faciliter le tissage et conserver la rigidité du fil et, au même temps, obtenir les meilleures propriétés mécaniques à l'échelle du composite. Le roving à faible torsion se distingue comme la meilleure réponse à ces contraintes.

#### Remerciements

Cette étude s'intègre dans le cadre du projet « SINFONI », financé par BPI-France.

## Références

- [1] D.U Shah. «Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts». *Materials and Design* Vol.62, pp.21-31, 2014
- [2] Dittenber DB, Gangarao HVS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A*, 2012; 43:1419-29
- [3] Dicker MPM et al. Green composites: A review of material attributes and complementary applications. *Composites Part A* 2012; 56: 280-289.
- [4] J.M.F.A. Blanchard, A.J. Sobey, J.I.R. Blake. «Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form». *Composites Part B*, Vol. 84, pp. 228-235, 2016.
- [5] Goutianos S, Peijs T, Nystrom B, Skrifvars M. Development of flax fibre based textile reinforcements for composite applications. *Appl Compos Mater* 2006;13(4):199-15.
- [6] Shah DU, Nag RK, Clifford MJ. Why do we observe significant differences between measured and ‘back-calculated’ properties of natural fibres? *Cellulose* 2016, 23:1481. doi:10.1007/s10570-016-0926-x
- [7] Baets J, Plastria D, Ivens J, Verpoest I. Determination of the optimal flax fibre preparation for use in unidirectional flax-epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2014;33: 493-02.
- [8] Bensadoun F, Vallons KAM, Lessard LB, Verpoest I, Van Vuure AW. Fatigue behaviour assessment of flax-epoxy composites. *Composites Part A* 2016; 82:253-66.
- [9] Goutianos S, T. Peijs, The optimization of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites. *Adv Compos Lett* 2003;13:199-15.
- [10] Shah DU, Schubel PJ, Clifford MJ. Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites. *Journal of Composite Materials*. 2013;47(4):425-36
- [11] Martin N, Davies P, Baley C. Comparison of the properties of scutched flax and flax tow for composite material reinforcement. *Industrial Crops and Products* 2014;61:284-92.
- [12] NF EN ISO 139:2005 : Textiles — Atmosphères normales de conditionnement et d'essai. 2005
- [13] NF EN ISO 2060:1995 : Textiles — Fils sur enroulements — Détermination de la masse linéique (masse par unité de longueur) par la méthode de l'écheveau. 1995
- [14] NF EN ISO 2061:2015 : Textiles — Détermination de la torsion des fils — Méthode par comptage direct. 2015
- [15] NF EN ISO 2062:2010 : Textiles - Fils sur enroulements - Détermination de la force de rupture et de l'allongement à la rupture des fils individuels à l'aide d'un appareil d'essai à vitesse constante d'allongement. 2010
- [16] ISO 13934-1:2013 : Textiles - Propriétés des étoffes en traction - Partie 1 : détermination de la force maximale et de l'allongement à la force maximale par la méthode sur bande. 2013
- [17] NF EN ISO 527-1:2012 : Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 1:principes généraux. 2012
- [18] F. Bensadoun. «In-service behaviour of Flax fibre reinforced composites for high performance applications ». Phd-Thesis of Faculty of Engineering Science, KU Leuven, July 2016.
- [19] L. Zhang, M. Miao. «Commingled natural fibre/polypropylene wrap spun yarns for structured thermoplastic composites». *Journal of Composite Science Technologies* Vol.70, pp.130-135, 2010
- [20] D.U. Shah, R.K Nag, M.J. Clifford. «Why do we observe significant differences between measured and ‘back-calculated’ properties of natural fibres? ». *Cellulose*, 23:1481, 2016