



Pré-imprégnés lin/époxy : influence des paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques

Z E Cherif, Christophe Poilâne, L Momayez, J Chen

► To cite this version:

Z E Cherif, Christophe Poilâne, L Momayez, J Chen. Pré-imprégnés lin/époxy : influence des paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques. *Matériaux et Techniques*, 2012, 100, pp.459 - 466. <10.1051/mat-tech/2012019>. <hal-03347192>

HAL Id: hal-03347192

<https://hal.science/hal-03347192v1>

Submitted on 17 Sep 2021

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

Pré-imprégnés lin/époxy : influence des paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques

Z.E. Cherif¹, C. Poilâne^{1,2}, L. Momayez¹ et J. Chen¹

¹ Université de Caen Basse-Normandie, EA 4257, 14032 Caen
e-mail : christophe.poilane@unicaen.fr

² LAUM UMR CNRS 6613, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France

Mots-clés :

Lin ; Tissu ; traitement textile ;
pré-imprégné ; propriétés
mécaniques

Résumé – Le pré-imprégné lin/époxy testé est constitué de fils de lin torsadés provenant de l'industrie textile. Il est principalement utilisé dans le secteur du sport et loisir. La valeur ajoutée recherchée est la bonne capacité d'amortissement des vibrations. Une première étude a montré que le comportement du lin/époxy n'est pas seulement élastique et que sa résistance n'est pas optimale, on atteint au mieux 350 MPa là où la loi des mélanges laisse espérer le double ! L'objectif à terme du travail consiste à optimiser le pré-imprégné. On étudie l'influence de la torsion des mèches en comparant un *TISSÉ* comportant un fil de trame pour 19 fils de chaîne, avec un *UD*, un *UD COUSU* à 45° et un *MAT* possédant une orientation privilégiée. Le meilleur résultat est obtenu pour le *TISSÉ*. On pense que la filature au mouillé rend optimale la séparation des fibres unitaires. On étudie l'influence du traitement textile en comparant un sergé *2/2 ÉCRU* avec le même tissu *LESSIVÉ*, *BLANCHI* et *MERCERISÉ*. Le meilleur résultat est obtenu pour le tissu *MERCERISÉ*.

Key words:

Flax; fabric; textile processing;
prepreg; mechanical properties

Abstract – Flax/epoxy prepreg: effect of processing parameters on mechanical properties.

The flax/epoxy prepreg being tested is made of twisted flax son from the textile industry. It is mainly used in the field of sports and leisure because its capacity for damping vibrations is high. A first study showed that the behavior of the flax/epoxy composites is not only elastic. Its resistance is not optimal, we achieved the best 350 MPa where the law of mixtures gives hope for the double! We studied the effect of the twist of yarn by comparing four materials. The best result is obtained for a woven. It is thought that wet spinning makes optimal the separation of elementary fibres. Also studied the effect of the textile treatment by comparing four treatments. The best result is obtained for the mercerized fabric. The ultimate goal of the work is to optimize the prepreg.

Reçu le 1 juillet 2011
accepté le 13 mars 2012

L'emploi industriel des fibres végétales en tant que renfort dans les matériaux composites nécessite de répondre à plusieurs exigences. Parmi celles-ci figurent la capacité de la résine à adhérer aux fibres, le contrôle de la reprise d'eau, la facilité d'emploi des semi-produits. Les pré-imprégnés lin/époxy testés, fournis par la société Lineo NV, répondent favorablement à ces trois critères. Ils ont pénétré l'industrie du composite depuis plusieurs années (vélo MUSEEUW, raquette ARTENGO).

Les pré-imprégnés sont constitués de fils de lin de grammage contrôlé et d'une résine époxyde. Les fils comportent une multitude de fibres, d'origine quelconque, tor-

sadées selon les techniques traditionnelles des filatures. Les fibres de lin destinées au textile peuvent subir divers pré-traitement : blanchiment, lessivage, mercerisation. Habituellement, les fils destinés au pré-imprégné proviennent de la filature au mouillé et subissent donc un lessivage. Les tissus subissent ensuite un traitement permettant d'assurer l'adhésion de la résine à la fibre. Cette étape, qui peut être comparée à l'ensimage des fibres de verre, constitue le savoir-faire de l'élaborateur de pré-imprégnés.

Une première étude [1] portant sur des plaques stratifiées à 0° a montré que :

- le comportement du lin/époxy n'est pas linéaire, il comporte une zone élastique

- assez courte puis une zone visco-élastoplastique ;
- les propriétés mécaniques des pré-imprégnés sont proportionnelles au pourcentage de fibres ;
- les propriétés mécaniques des pré-imprégnés sont inversement proportionnelles au titrage des fils ;
- le seuil d'élasticité est fonction du pourcentage de fibres mais indépendant du titrage des fils ;
- la résistance du lin/époxy n'est pas à la hauteur de la résistance des fibres unitaires.

L'objectif du travail consiste à comprendre l'origine du phénomène non élastique et à analyser l'influence des nombreux paramètres entrant en jeu dans l'élaboration des pré-imprégnés lin/époxy pour en améliorer les propriétés. On étudie l'influence de la torsion des mèches en comparant le produit référence, un *TISSÉ* comportant un fil de trame pour 19 fils de chaîne, avec un *UD* comportant des coutures à 45° et un *MAT* possédant une orientation privilégiée. On étudie l'influence du traitement textile en comparant le produit référence, un sergé 2/2 *ÉCRU* constitué de fils élaborés en filature au demi-mouillé avec le même tissu *LESSIVÉ*, *BLANCHI*, *MERCERISÉ* et avec un sergé 2/2 constitué de *FILS LESSIVÉS* en filature au mouillé.

1 Élaboration du matériau

1.1 La fibre de lin

Les fibres utilisées dans l'élaboration des produits testés ne subissent pas de sélection particulière. Il faut noter que certains travaux ont démontré l'utilité, pour le secteur des composites, de sélectionner les variétés de lin et de ne conserver que la partie centrale de la plante [2]. Cette approche, que certains industriels tentent de mettre en pratique, n'est pas celle utilisée ici. L'objectif du fournisseur de pré-imprégné est en effet de pénétrer le marché des composites sans modifier en profondeur la filière lin.

La préparation des fibres de lin est ainsi effectuée selon les quatre étapes habituelles : le rouissage, le teillage, le peignage, et le doublage/étirage. Le rouissage est une action

naturelle effectuée grâce au climat. Après arrachage, on laisse les tiges de la plante sur le sol, sous forme d'andains, subir l'action de micro-organismes naturels. La dégradation des ciments pectiques, favorisée par l'alternance de chaleur et d'humidité, permet d'obtenir une première séparation des fibres et du bois. Le teillage consiste à extraire les fibres contenues dans les tiges par broyage et battage des pailles. Les actions mécaniques exercées sur les fibres sont du tri, du battage, du broyage entre deux rouleaux cannelés, de l'étirage par laminage différentiel. Le peignage consiste à carder les mèches de fibres dans une succession de peignes de plus en plus fins. Le doublage/étirage du lin permet de conglomerer entre elles les fibres de sorte à obtenir un ruban de plusieurs mètres exploitable par les filatures. Les rubans sont uniformisés par mélange de fibres de différentes provenances.

Dans le monde des fibres végétales, les fibres de lin offrent des performances haut de gamme. On pondère souvent les propriétés des fibres par leur densité pour comparer le lin et les fibres conventionnelles. Eu égard à la provenance du produit testé, nous retenons pour le lin, dans le tableau 1, des valeurs moyennes trouvées dans la littérature [3] et non les propriétés des fibres les plus performantes [2]. On constate que la résistance et la rigidité spécifiques de la fibre unitaire de lin sont meilleures que celles de la fibre de verre *E*.

1.2 Les pré-imprégnés

Les pré-imprégnés testés sont détaillés dans les tableaux 2 et 3. Ce sont :

- un *UD* issu de rubans de teillage (fibres longues au sens textile du terme) ;
- un *UD* cousu à 45° issu de rubans de teillage que nous nommons *COUSU* ;
- un *MAT* issu d'étoupes de teillage agglomérées au jet d'eau, comportant une direction préférentielle ;
- un *TISSÉ* comportant 1 fil de trame pour 19 fils de chaîne provenant de la filière textile ;
- un sergé 2/2 ayant éventuellement subi un lessivage, un blanchiment ou une mercerisation.

Tableau 1. Propriétés des fibres de lin comparées à celles des fibres courantes.*Table 1. Properties of flax fibers compared to those of common fibers.*

	Lin	Verre E	Aramide	Carbone HR
densité D (s.u)	1,53	2,54	1,45	1,94
module de Young E (GPa)	58	72	135	588
contrainte à rupture σ_R (MPa)	1340	2200	3000	3920
déformation à rupture ε_R (%)	3,3	3	4,5	0,7
E/D (GPa)	38	28	93	303
σ_R/D (MPa)	875	866	2100	2020

Tableau 2. Produits utilisés pour tester l'influence de la torsion des mèches, le matériau de référence est le TISSÉ.*Table 2. Fabrics used to test the effect of twist of the yarns, the reference material is the woven.*

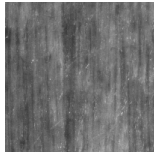
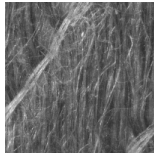
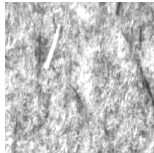
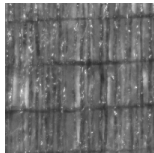
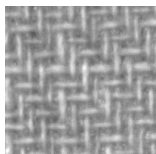
Nom	Grammage du (g/m ²)	Type de fibres	Traitement textile	Rapport trame sur chaîne	Aspect
UD	78	Fibres longues	néant	néant	
COUSU	125	Fibres longues	néant	négligeable	
MAT	151	Fibres courtes	néant	néant	
TISSÉ	117	Fibres longues	lessivage des fils avant tissage	1/19	

Tableau 3. Sergé 2/2 pré-imprégnés utilisés pour tester l'influence du traitement textile, la référence est le sergé ÉCRU.*Table 3. Prepreg of 2/2 twill used to test the effect of textile treatments, the reference material is the "gray good".*

Nom	Grammage du lin (g/m ²)	Type de fibres	Traitement textile	Rapport trame sur chaîne	Aspect
ÉCRU	300	Fibres longues	néant	1	
FILS LESSIVÉS	300	Fibres courtes	lessivage des fils avant tissage	1	idem
LESSIVÉ	300	Fibres longues	lessivage du tissu	1	idem
MERCERISÉ	300	Fibres longues	mercerisation du tissu	1	idem
BLANCHI	300	Fibres longues	blanchiment du tissu	1	idem

La transformation des fibres de lin en pré-imprégné lin/époxy peut comporter plusieurs étapes :

1. filature ;
2. tissage ;
3. pré-traitement (ou traitement textile) ;
4. traitement (que l'on peut comparer à l'ensimage pour les fibres conventionnelles) ;
5. imprégnation.

L'étape 1 peut être effectuée dans une filature au demi-mouillé ou dans une filature au mouillé. Les fils provenant de la filature au demi-mouillé subissent seulement un tamponnage à l'eau, nous les considérons comme non traités. Les fils provenant de la filature au mouillé sont lessivés. Le *MAT*, l'*UD* et le *COUSU*, ne subissent ni l'étape 1 ni l'étape 2. L'étape 3 n'est pas nécessaire à l'élaboration d'un pré-imprégné. Un tissu non traité est nommé *ÉCRU*. Il est nommé *FILS LESSIVÉS* si les fils constitutifs proviennent de la filature au mouillé. Les étapes 4 et 5 sont effectuées sur tous les produits analysés dans notre étude. Les paramètres d'élaboration internes à ces étapes sont fixés et ne représentent donc pas des variables de l'étude.

1.3 Élaboration des éprouvettes

Des plaques sont stratifiées en pressage à chaud en moule ouvert à l'aide d'une matrice et d'une contre-matrice selon les étapes suivantes :

- découpage de plis de 200 mm × 110 mm selon l'orientation choisie ;
- cirage de la matrice et de la contre-matrice ;
- empilement des plis dans la matrice ;
- pose de cales ajustées permettant de choisir l'entrefer du moule ;
- pose et serrage par vis de la contre-matrice ;
- réticulation en enceinte thermostatée à pression atmosphérique ;
- démoulage de la plaque composite après retour à température ambiante.

Le rapport nombre de plis/épaisseur des cales permet d'agir légèrement sur le pourcentage de fibres. L'excédent de résine est en

conséquence plus ou moins important selon ce rapport. La cuisson est conforme au cycle du fournisseur : un palier de 30 min à 80 °C suivi d'un palier de 60 min à 130 °C.

Les plaques stratifiées sont découpées à la scie diamantée refroidie à l'eau puis séchées en étuve. Le bord de coupe est ensuite poli. Les échantillons destinés à la traction sont équipés de 4 talons en aluminium. Les échantillons destinés à la microscopie optique sont préparés selon le protocole habituel des métallurgistes. Les échantillons destinés à la microscopie électronique reçoivent un dépôt d'or.

2 Essais et résultats

Les mesures effectuées sont cinq essais de traction par produit complétés par des observations au microscope optique et au microscope électronique.

2.1 Influence de la torsion des mèches

Les quatre pré-imprégnés comparés, un *UD*, un *MAT*, un *COUSU*, un *TISSÉ*, sont destinés au renfort unidirectionnel. Les propriétés et les résultats en traction sont donnés dans le tableau 4 et représentés par des essais moyens dans la figure 1. On note d'emblée que le comportement du *COUSU* est singulier. La couture génère une forte ondulation des mèches de fibres dans le plan du pré-imprégné. Le produit est très difficile à manipuler sans déformation à cause de la couture à 45°. Une autre cause non identifiée affecte peut-être aussi le comportement !

Le comportement du *MAT* et celui du *TISSÉ* sont similaires. Ils sont conformes au comportement habituellement observé pour le lin/époxy dans la direction des fils : une déformation élastique assez courte suivie d'une déformation non élastique. Le comportement de l'*UD* montre par contre clairement une reprise de rigidité dans la dernière partie de l'essai. Ceci est visible sur la courbe rigidité/déformation de la figure 1 dans laquelle on suit l'évolution du module sécant. La résistance n'atteint toutefois pas celle du *TISSÉ*.

2.2 Influence du traitement textile

Les 5 sergés testés, un *ÉCRU*, un *LESSIVÉ*, un *FILS LESSIVÉS*, un *MERCERISÉ* et un

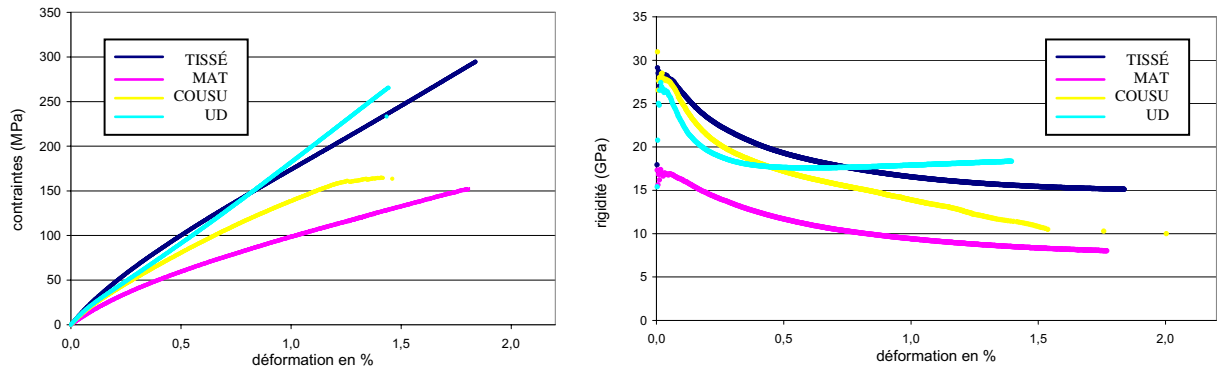


Fig. 1. Influence de la torsion des mèches (essais moyens), contrainte/déformation à gauche, évolution du module sécant à droite.

Fig. 1. Effect of twist the yarns: stress/strain (left) and evolution of the secant modulus (right).

Tableau 4. Influence de la torsion des mèches, propriétés et résultats.

Table 4. Effect of twist ribbons: properties and results.

type/propriétés	UD	TISSÉ	COUSU	MAT
grammage des fibres G_F (g/m ²)	78	125	151	117
nombre de plis N	14	11	10	12
pourcentage volumique de fibres V_F (%)	44	50	56	49
densité D	1,27	1,28	1,3	1,28
module de Young E (GPa)	26,3	28	27,9	16
module sécant à rupture E_R (MPa)	19,5	14,1	–	6,4
contrainte à rupture σ_R (MPa)	259	311	156	146
déformation à rupture ε_R (%)	1,4	2	1,2	1,7

BLANCHI, possèdent un même pourcentage volumique de fibres. Les résultats sont donnés dans le tableau 5, les essais moyens sont représentés dans la figure 2.

Le comportement du tissu en traction est quasiment conservé quel que soit le traitement. La perte de rigidité du *BLANCHI* est toutefois moindre sans que l'on ait actuellement d'explication à fournir. On note, concernant la rupture, que l'augmentation de la résistance s'accompagne d'une diminution de la déformation. Les traitements améliorent globalement la rigidité et la résistance du lin/époxy. Un cas particulier est obtenu avec le tissu élaboré avec des fils lessivés. Les propriétés finales y sont moins bonnes que celles du tissu non traité! On rappelle qu'il est constitué de fibres courtes filées au mouillé.

3 Discussion

Le comparatif *TISSÉ*, *MAT*, *COUSU*, *UD*, confirme le comportement non linéaire du lin/époxy. Les propriétés de la résine seule ne

sont pas en cause car il s'agit d'une formulation standard pour pré-imprégnés. Cette résine est par ailleurs utilisée dans des pré-imprégnés verre E/époxy dont le comportement est élastique linéaire. Ce phénomène provient donc des fibres de lin.

La reprise de rigidité observée pour l'*UD* nous offre une information capitale. Elle nous permet de corréler le comportement du composite à celui de la fibre unitaire de lin. Les résultats de la littérature montrent en effet qu'une reprise de rigidité est observée pour certaines fibres de lin. La figure 3 à gauche, tirée de la thèse de Charlet [4], montre un comportement en trois zones. Le phénomène est attribué à une réorientation des fibrilles de la paroi secondaire de la fibre initialement orientées en moyenne à environ 9° [3]. Ce résultat nous permet de proposer que le comportement général du lin/époxy comporte trois zones, plus ou moins marquées selon l'arrangement et la qualité du renfort [5] :

- une déformation élastique linéaire ;

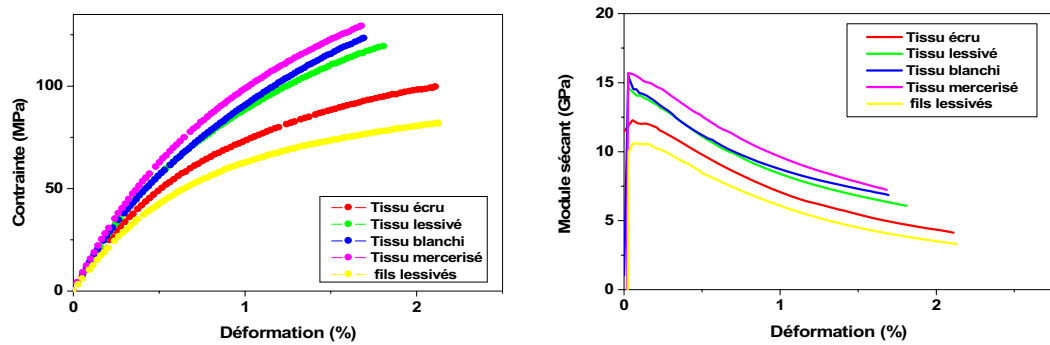


Fig. 2. Influence du traitement (essais moyens), courbe contrainte/déformation à gauche, évolution du module sécant à droite.

Fig. 2. Effect of textile treatments: stress/strain curve (left) and evolution of the secant modulus (right).

Tableau 5. Influence du traitement, propriétés et résultats.

Table 5. Effect of textile treatments: properties and results.

type/propriétés	ÉCRU	LESSIVÉ	BLANCHI	MERCERISÉ	FILS LESSIVÉS
grammage des fibres G_F (g/m ²)	300	300	300	300	300
nombre de plis N	7	7	7	7	7
épaisseur e (mm)	2,66	2,61	2,65	2,65	2,72
pourcentage volumique de fibres V_F (%)	63	63	66	66	67
module de Young E (GPa)	12,4	14,2	14,1	14,3	10,8
module sécant à rupture E_R (MPa)	4,19	6,14	6,85	7,24	3,52
contrainte à rupture σ_R (MPa)	98	117	124	127	81
déformation à rupture ε_R (%)	2,05	1,75	1,7	1,64	1,98

- une déformation irréversible, probablement visco-élastoplastique, due à la réorientation collective des fibrilles de la paroi secondaire des fibres de lin ;
- une reprise de charge.

Les trois zones sont identifiables sur la figure 3 à droite où l'on reporte le comportement de l'UD, à comparer avec celui de la fibre unitaire donné dans la figure 3 à gauche. La troisième zone est rarement rencontrée dans la pratique. L'état actuel de nos connaissances ne nous permet pas de savoir si elle est élastique ou non.

L'influence de la torsion des mèches n'est pas aussi néfaste que ce que nous pouvions attendre. Le TISSÉ, qui est le seul produit du comparatif 2.1. comportant des fils de lin torsadés, donne en effet les meilleurs résultats. On pense que la cause principale provient d'une bonne séparation entre les fibres unitaires de lin favorisée par la filature au mouillé. Dans la plante, les fibres de lin sont en effet regroupées en faisceaux nommés « fibre techniques » par les professionnels du lin. Les liens chimiques qui relient les fibres entre elles, assurés par les pectines, sont difficiles à rompre. Ceci affecte la qualité de l'in-

terface fibre/résine en limitant l'accès de la résine aux parois des fibres unitaires. Notre hypothèse sur les contre-performances de l'UD est que les fibres unitaires sont peu séparées et qu'il reste trop de fibres techniques. Ceci est confirmé par les observations de la figure 4 obtenues sur les faciès de rupture du TISSÉ et de l'UD. Le fil torsadé montre des fibres unitaires bien séparées et enrobées de résine. L'UD montre par contre des fibres techniques bien enrobées de résine mais au sein desquelles la résine ne peut pas pénétrer. Il convient donc, dans tous les cas, de faciliter l'accès de la résine aux parois extérieures des fibres unitaires. C'est l'objet du comparatif entre les traitements textiles.

Les trois traitements testés, le lessivage, le blanchiment et la mercerisation, améliorent globalement les propriétés du composite. C'est la mercerisation, déjà connu pour améliorer l'interface fibres de lin/résine [6], qui offre les meilleures performances. Les traitements textiles sont utilisés pour faciliter l'ennoblissement, comme la teinture par exemple. Leur rôle est de favoriser la pénétration des produits d'ennoblissement en supprimant les pectines qui

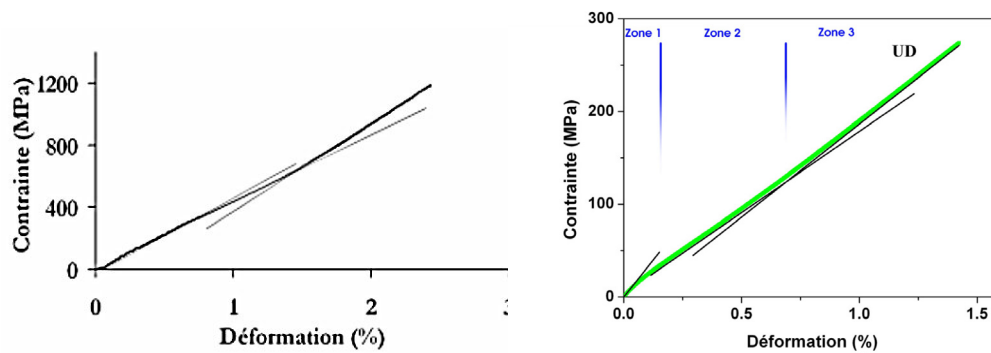


Fig. 3. Comportement en traction, fibre unitaire de lin à gauche, UD lin/époxy à droite.

Fig. 3. Tensile behavior: elementary fiber of flax (left), UD flax/epoxy composite (right).



Fig. 4. Observation sur le faciès de rupture, un fil du TISSÉ à gauche, une fibre technique de l'UD à droite.

Fig. 4. SEM image of fractured edge: a yarn of woven (left), a bundle of UD (right).

ont un effet hydrophobe. Par ailleurs, les chaînes celluliques sont aussi attaquées par ces traitements. Une optimisation des paramètres pertinents, adaptée à chaque traitement, est donc nécessaire pour séparer les fibres unitaires sans les dégrader. La comparaison entre les propriétés du LESSIVÉ, qui sont supérieures de 20 % à celles de l'ÉCRU, et du FILS LESSIVÉS, qui lui sont inférieures de 20 %, permet de confirmer cette idée de compromis. Le lessivage des fils a permis de séparer les fibres unitaires, on peut l'observer sur la figure 5, mais celui-ci a été trop agressif. Il faut ajouter, pour être complet, que le FILS LESSIVÉS est constitué de fibres courtes, c'est à dire d'étoques de peignage, et que rien ne nous garanti que les propriétés de ces fibres sont statistiquement identiques aux propriétés des fibres longues utilisées dans les autres produits.

On peut observer par ailleurs sur la photo de droite une zone sèche au niveau d'un fil de trame. Ce phénomène est présent dans

tous les sergés étudiés et ne semble pas corrélé avec les propriétés mécaniques obtenues. Toutefois, les zones sèches, de même que les cavités, constituent un indicateur de performance de l'imprégnation et de l'élaboration des plaques stratifiées. Nous ne sommes pas en mesure actuellement de dire si les traitements des tissus agissent sur le nombre de cavités au sein du composite. C'est une piste à étudier assurément.

4 Conclusion

L'objectif du travail consiste à comprendre l'origine du phénomène non élastique observé dans le comportement de pré-imprégnés lin/époxy et à analyser l'influence des nombreux paramètres entrant en jeu dans leur élaboration. Les produits testés sont élaborés et traités industriellement.

On étudie l'influence de la torsion des mèches en comparant le produit référence, un TISSÉ, avec un UD, un COUSU et

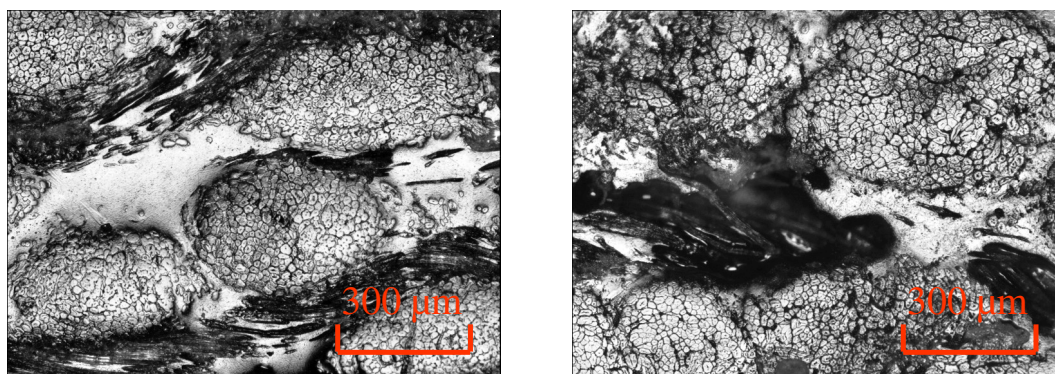


Fig. 5. Observation d’une section d’éprouvette après traction, LESSIVÉ à gauche, FILS LESSIVÉS à droite.

Fig. 5. Optic image of a section of specimen after tensile: leached fabric (left), leached yarn fabric (right).

un MAT possédant une orientation privilégiée. Ces quatre produits sont destinés au renfort unidirectionnel. L’étude confirme le comportement non élastique du composite lin/époxy. Nous proposons de généraliser ce comportement en trois zones : une déformation élastique linéaire, une déformation non élastique associée à une perte de charge, une reprise de charge. Le TISSÉ offre les meilleurs résultats. Nous postulons que l’élimination des pectines, facilitée par la filature au mouillé, permet malgré la morphologie du renfort en mèches torsadées, une meilleure efficacité de l’interface fibres/résine que pour les autres produits testés.

On étudie l’influence du traitement textile en comparant le produit référence, un sergé 2/2 ÉCRU constitué de fils élaborés en filature au demi-mouillé avec le même tissu LESSIVÉ, BLANCHI, MERCERISÉ et avec un sergé 2/2 constitué de FILS LESSIVÉS. Le MERCERISÉ offre les meilleures performances et le FILS LESSIVÉS présente des performances inférieures au tissu non traité. Nous pensons que au delà de l’action physico-chimique du traitement, l’important est d’optimiser les multiples paramètres en jeu dans les traitements (dosage, température, durée, confinement. . .). Un compromis

est à trouver entre l’élimination des ciments pectiques, qui gênent l’imprégnation de la résine, et l’attaque de la cellulose, qui altère les performances intrinsèques des fibres unitaires. Un traitement enzymatique à la pectinase va être mis en oeuvre pour confirmer cette hypothèse. Ce traitement cible essentiellement les pectines sans attaquer la cellulose.

Références

- [1] C. Poilâne, A. Vivet, L. Momayez, A. Ben Doudou, M. Ayachi, J. Chen, Propriétés mécaniques de préimprégnés lin/époxyde, Compte rendu des JNC16, Toulouse, 2009
- [2] K. Charlet et al., *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* **38** (2007) 1912-1921
- [3] C. Baley, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* **33** (2002) 939-948
- [4] K. Charlet, Contribution à l’étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2006
- [5] Z.E. Cherif, C. Poilâne, L. Momayez, J. Chen, *Revue des Composites et des Matériaux Avancés* **21** (2011) 119-128
- [6] I. Van de Weyenberg, Flax fibres as reinforcement for epoxy composites, Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2005