
Comportement mécanique d'un polymère époxy renforcé par fibres de lin longues stratifié au contact pour le renforcement externe de structures en béton armé.

Anne Hallonet¹, Laurent Michel¹, Emmanuel Ferrier¹

¹ LMC2-LGCIE Site Bohr, Université Claude Bernard Lyon 1, 82 Boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne Cedex, France. (anne.hallonet@univ-lyon1.fr)

RÉSUMÉ. Parmi les différentes méthodes de réparation et de renforcement, le collage de renforts composites avec des fibres de verres ou de carbone sont maintenant une méthode approuvée et couramment employée. Des fibres de lin technique ont été testées comme une alternative plus écologique aux fibres de verre pour le renforcement. Le composite a été mis en œuvre manuellement, par stratification au contact, avec des résines époxy bi-composants durcissant à température ambiante. Les propriétés mécaniques et la cohésion du matériau ont été testées par des tests de traction. Il s'en dégage un comportement non linéaire régulièrement observé pour les fibres naturelles. L'adhérence sur le support béton a été évaluée par des tests de cisaillement à double recouvrement. Les propriétés mécaniques élevées du composite et une bonne adhérence avec le béton conduisent à des défaillances dans le béton plutôt que dans le composite ou à l'interface. Ces résultats prouvent que les fibres de lin représentent une alternative prometteuse aux fibres synthétiques pour la consolidation de béton armé.

ABSTRACT. Reinforced concrete structures can be strengthened by externally bonded carbon or glass fiber reinforced polymer composites. Flax fiber reinforced polymer (FFRP) have been tested as an alternative more environmentally friendly reinforcement. The FFRP was laid up on site by hand with ambient temperature curing epoxy resins. The composites' mechanical properties and cohesion were determined through tensile loading. The non-linear tensile behavior confirms the previous studies with natural fibers. The adhesion on concrete substrate was evaluated through double lap shear tests. The high mechanical properties and good concrete/FFRP bonding, leading to failures in concrete rather than in the composite or at the interface, prove flax fibers to be a promising alternative to synthetic fibers.

MOTS-CLÉS: renforcement béton armé ; polymère renforcé par fibres de lin ; FFRP ; composite lin

KEY WORDS: RC strengthening, Flax Fibre Reinforced Polymer, Flax composite.

1. Introduction

En raison d'une mauvaise conception, de modifications des conditions d'utilisation ou de dégradations dues au vieillissement, de nombreuses structures en béton nécessitent une réhabilitation et un renforcement afin de garantir la sécurité. La technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles pré-consolidées à base de fibres de carbone ou de verre est aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue en France et dans le monde entier [HAM 12] [HOL 03]. En dépit de leurs propriétés mécaniques inférieures, les fibres de verre sont plus fréquemment utilisées que les fibres de carbone [SHA 13]. Cependant des considérations écologiques justifient de considérer la substitution de ces fibres de verre synthétiques à des alternatives plus respectueuses de l'environnement comme des fibres végétales [LED 14] [JOS 04].

Parmi les fibres végétales, les fibres libériennes contenue sous l'écorce de plantes comme la ramie, le jute, ou le lin, ont les propriétés mécaniques les plus élevées. Le lin présente la meilleure combinaison de poids léger, faible coût, et propriétés mécaniques spécifiques élevées, comparables aux fibres de verre [DIT 12]. De nombreuses tentatives d'utilisation de lin comme substitution des fibres de verre peuvent être trouvées dans la littérature [YAN 14] [BLE 99], mais aucune comme renfort externe de structures béton. Les performances du matériau de consolidation dépendent directement des propriétés des différents constituants et de sa capacité à transmettre les contraintes provenant du béton aux fibres de renfort. Outre une bonne résistance aux conditions environnementales et des propriétés mécaniques élevées, la résine doit donc avoir une bonne adhérence au béton et avec les fibres de renfort. Cependant le caractère hydrophile des fibres de lin conduit généralement à une mauvaise compatibilité avec les matrices polymères hydrophobes. De plus les fibres de lin ne sont pas tout à fait des fibres longues, mais plutôt des fibres individuelles de 10 mm à 80 mm de long agrégées [CHA 10], ce qui conduit à des propriétés mécaniques réduites.

Le but de cet article est de présenter le développement d'un nouveau matériau polymère renforcé par fibres de lin longues pour la consolidation externe des structures en béton à l'aide de la technique de drapage en dépit de ces difficultés inhérentes. Les propriétés mécaniques de matériaux composites ont été déterminées par des essais de traction. L'adhérence au support en béton et par conséquent son aptitude comme matériau de renforcement a été évaluée par des tests de cisaillement à double recouvrement.

2. Matériaux et méthode

2.1 Matériaux

Le lin et les tissus de lin utilisés dans cette étude ont été cultivés et produits en France selon les normes ISO et NF T 25-501 XP de qualité et de traçabilité spécifiques aux fibres de lin techniques. Les fibres de lin ont subi les quatre étapes habituelles de préparation du lin textile: arrachage, rouissage, teillage et peignage en rubans. Les fibres n'ont pas été filées afin de préserver leur qualité mécanique. La qualité du ruban final est standardisée par mélange de différentes années de production et de variétés de lin. Les tissus utilisés sont bidirectionnels tissés en sergé 3/3 offrant des propriétés équilibrées dans les deux directions 0/90°.

Les deux résines époxy choisies sont des résines bi-composantes durcissant à température ambiante et couramment utilisés dans le renforcement de béton. Les fibres de lin ont été imprégnées avec une première résine époxy A de faible viscosité et posées sur une résine B plus visqueuse, permettant le collage du composite sur le support béton. Les deux composants des résines époxy ont été mélangés selon les rapports spécifiés 33:17 pour A et 7: 3 pour B.

2.2 Densité et taux volumique de fibres

La densité des échantillons de drapage humide a été mesurée par pesée hydrostatique dans l'eau avec une balance 573 Kern, et la densité a été calculée suivant l'équation [1].

$$\rho_{comp} = \rho_{air} + \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{liq}} \cdot (\rho_{liq} - \rho_{air}) \quad [1]$$

avec M_{air} et M_{liq} la masse mesurée du composite respectivement dans l'air et dans le liquide. La fraction volumique de la porosité a été déterminée en utilisant l'équation suivante [2] adaptée de [SCI 13].

$$v_p = 1 - \frac{\rho_{comp}}{\rho_m} + \frac{n^p \cdot \rho_f^s}{h^p} \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_f} \right) \quad [2]$$

[2]

où ρ_{comp} , ρ_m et ρ_f sont respectivement la densité de la masse du composite, de la matrice et des fibres sèches; ρ_f^s est la densité surfacique du tissu sec; et n^p est le nombre de couches. La valeur de la densité des fibres de lin utilisée est celle mesurée par Baley, $\rho_f = 1,540 \text{ kg.m}^{-3}$ [BAL 02].

Tableau 1. Caractéristiques des résines époxydiques.

Résine	ρ (kg.dm ⁻³)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ε_u (%)
Epoxy A	1.06		35	1.35
Epoxy B	1.25	2.3	27	1.7

Tableau 2. Caractéristiques des tissus de lin.

Tissu	m ^s (g/m ²)	Tex	Tissage	E (GPa)	σ_u (MPa)	ε_u (%)
S350	350	1300				
S600	600	2900	Twill 3/3	32	550	1.7

3. Caractérisation mécanique

3.1 Essai de caractérisation en traction

Les fibres sont imprégnées couche par couche au pinceau de résine époxydique bi-composants liquide A et déposées sur une sous-couche de résine époxydique bi-composante plus visqueuse B, qui servirait de colle sur le support béton, sur une plaque de bois cirée. Le composite est marouflé à la spatule afin d'éliminer la résine excessive et les bulles d'air tant bien que possible. Les plaques composites fabriquées font 26 cm de long et de 20 cm de large. Les propriétés mécaniques sont testées après 10 jours à température ambiante $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

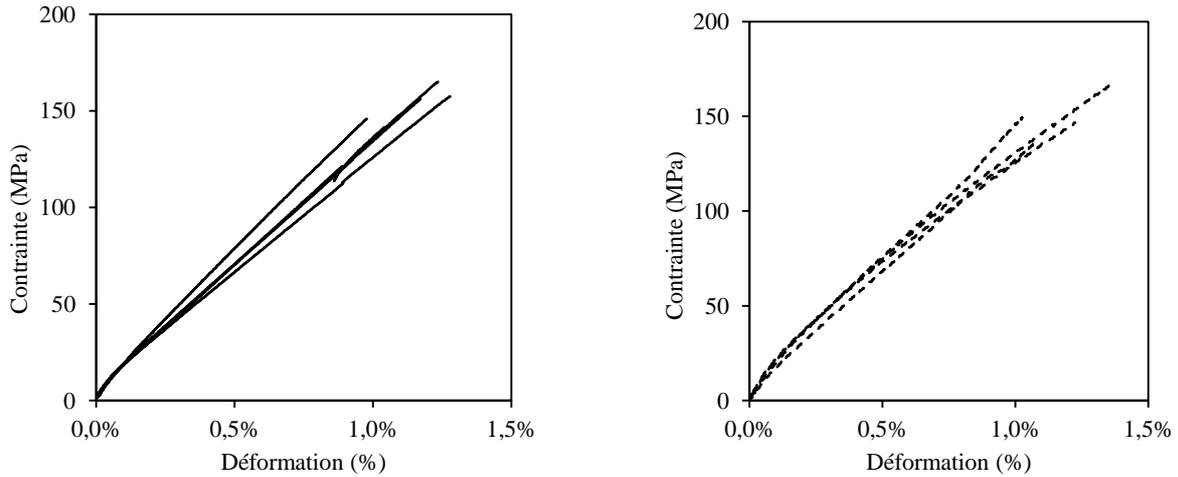
Les éprouvettes, 25 mm x 250 mm, sont découpés dans des plaques composites à l'aide d'une scie circulaire refroidie avec un système à eau selon les normes ISO 527-5 et ISO 2818. Les éprouvettes sont testées dans des conditions normales d'humidité et de température ($\sim 20^\circ\text{C}$, $\sim 50\%$ HR) sur une machine d'essai de traction universelle Zwick / 1475 à une vitesse de traverse de 1 mm/min jusqu'à rupture de l'échantillon selon la norme ISO 527-1. La force de traction a été déterminée par capteur de force et la déformation longitudinale par des jauges de déformation de 10 mm de longueur de grille (120 Ω) collées à la surface des spécimens.

Les éprouvettes présentant une rupture dans les mors sont éliminées. La valeur de la contrainte f_f est déterminée selon $f_f = F/S$ avec S étant la surface de section de l'éprouvette et F la force appliquée. La surface de section est calculée selon $S = l \cdot e_p$ avec l la largeur de l'éprouvette et e_p l'épaisseur théorique des fibres calculée comme l'épaisseur des fibres sèches multipliée par le nombre de plis, tel que présenté par l'American Concrete Institute [ACI 08]. Cette valeur sous-estime la section réelle de l'éprouvette mais permet de s'affranchir de la quantité variable de résine et correspond aux usages du domaine des composites pour le renfort extérieur de structure béton. En effet les fibres sont imprégnées avec un excès de résine, afin d'imprégner les faisceaux de fibres à cœur. De la sorte, ce procédé ne permet pas de fixer le pourcentage volumique de fibres (V_f^f), ni l'épaisseur du composite, qui peuvent varier. Afin de s'affranchir de la variation d'épaisseur du composite, la contrainte par largeur (ξ_u) en kN/cm a aussi été calculée.

3.2 Résultats de la caractérisation en traction

Deux séries de composite avec les deux tissus S350 et S600 ont été testé en faisant varier le nombre de plis de 1 à 3 pour S350 et de 1 à 4 pour S600. La figure 1 représente les résultats des essais de traction obtenus pour S600 et S350. Les courbes sont légèrement dispersées, avec un écart type de la contrainte à rupture de l'ordre de 5% et du module de l'ordre de 15%. Cela pourrait être un signe pour une certaine hétérogénéité dans le matériau. Les courbes de traction présentent deux régions de pentes différentes. Baley et al. (2012) ont proposé un modèle de courbe contrainte-déformation de leur composite lin/époxy avec une région non linéaire initiale qui rejoint

ensuite une asymptote linéaire de pente plus faible [BAL 12]. Ce phénomène initial correspondrait à une réorientation des micro-fibrilles des fibres de lin [SCI 13]. Poilâne et al. (2014) décrit les courbes contrainte-déformation de ses composites époxy/lin comme «bilineaires» avec une première phase élastique et introduit un «module apparent» mesuré à partir de la première région. Nous avons décidé cependant de mesurer le module dans la deuxième région des courbes considérant que celle-ci correspond plus à la gamme de travail du composite. Le composite présente une contrainte de rupture d'environ 150 MPa comparables à ceux de composites à fibres de verre commercialisés pour le renforcement de béton ($E_G \geq 20$ GPa; $\sigma_G \geq 150$ MPa), mais avec un module de 10 GPa.



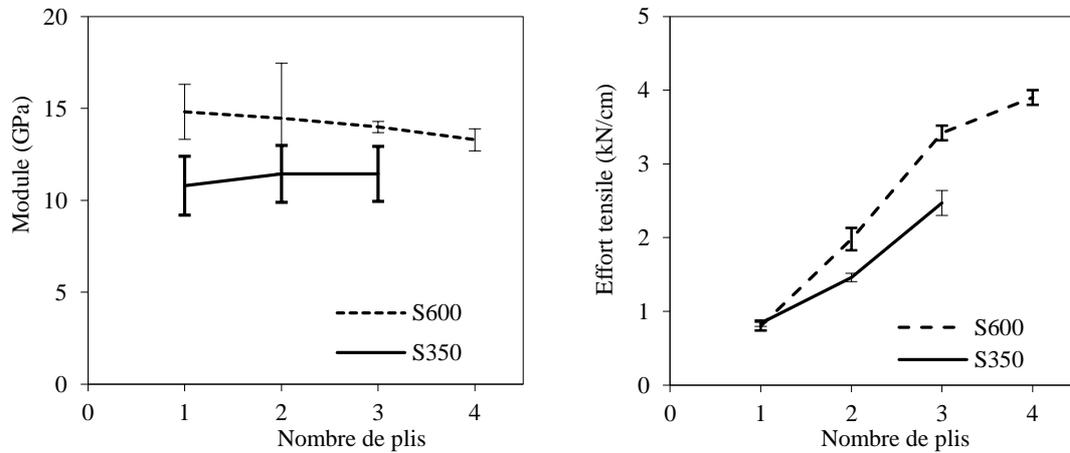
1.a. Composite lin S600 (x4) avec résines époxy.

1.b. Composite lin S350 (x3) avec résines époxy.

Figure 1. Courbes de contrainte/déformation typique des composites lin-époxy testés.**Tableau 3.** Résultats des tests de traction des composites lin-époxy.

Tissu	Nb plis	V^f (%)	V^p (%)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ξ_u (kN/cm)	ϵ_u (%)
S350	1	10	6	9.9 ± 1.0	172 ± 9	0.84 ± 0.05	1.00 ± 0.12
	2	14	9	11.4 ± 1.5	150 ± 6	1.46 ± 0.06	1.17 ± 0.08
	3	16	11	11.4 ± 1.5	168 ± 12	2.47 ± 0.17	1.27 ± 0.03
S600	1	16	4	12.4 ± 3.5	130 ± 8	0.82 ± 0.05	0.97 ± 0.15
	2	19	10	16.0 ± 4.0	157 ± 12	1.98 ± 0.15	1.06 ± 0.19
	3	21	9	14.0 ± 0.9	181 ± 6	3.42 ± 0.11	1.17 ± 0.17
	4	27	10	12.9 ± 0.7	155 ± 4	3.90 ± 0.10	1.16 ± 0.06

L'influence du nombre de plis sur les propriétés des composites a été analysée. Le pourcentage volumique de fibres augmente avec le nombre de plis, ainsi que le pourcentage de porosité. La proportion de la couche de liaison de résine B diminue par rapport à l'ensemble du composite avec l'augmentation du nombre de plis. Cette évolution parallèle soutient l'hypothèse que la porosité du composite est principalement concentrée dans les faisceaux et les fibres elles-mêmes. Il ne semble pas y avoir de relation proportionnelle entre le pourcentage volumique de fibres et la contrainte à rupture ou le module apparent contrairement diverses publications sur le sujet [COR 13] [POI 14]. Cette différence peut être due à la méthode de calcul de la surface nette. Néanmoins la déformation à rupture semble augmenter avec le taux volumique de fibre, ie avec le nombre de plis, jusqu'au troisième pli. Comme illustré sur la figure 2, le module semble relativement constant tandis que la force par largeur augmente avec le nombre de plis de composite de manière quasi-proportionnelle. Les composites S600 présentent un pourcentage de fibres plus élevé V^f et un module supérieur. Ces observations incitent à utiliser des grammages plus importants, qui permettent de plus de minimiser le nombre de plis.



1.a. Evolution du module avec le nombre de plis.

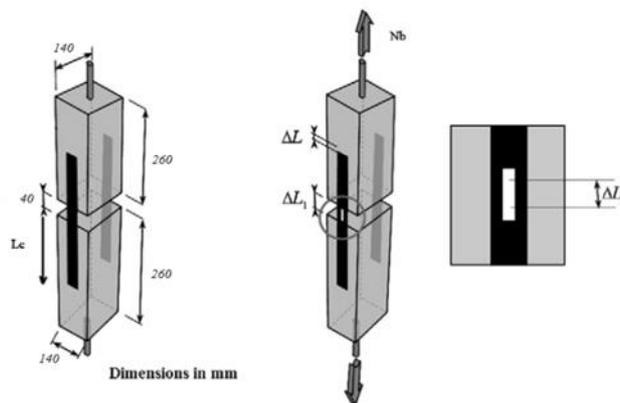
1.b. Evolution de l'effort repris par largeur de composite avec le nombre de plis.

Figure 2. Evolution du module et de l'effort par largeur de composite avec le nombre de plis.

4. Caractérisation de l'adhésion

4.1. Essai de cisaillement à double recouvrement

Des études antérieures ont montré que la compréhension du phénomène de cisaillement à l'interface entre le composite et le béton est la clé pour comprendre les mécanismes de défaillance du renfort composite [MES 09] [MEA 11]. L'adhésion a donc été testée avec le test de cisaillement à double recouvrement proposée par l'Institut japonais de béton [JCI 98] comme décrit par Ferrier et al. (2011) [FER 11]. Deux blocs de béton (140 mm x 140 mm x 250 mm) sont fixés par deux bandes parallèles de composite collées de part et d'autre des blocs, voir figure 3. Les bandes de tissus de lin S600 de 460 mm x 60 mm sont imprégnées une à une à la main avec la résine époxy A et collées à la surface de béton avec de l'époxy B. Les composites sont marouflés avec une spatule pour éliminer la résine excessive et les bulles d'air tant que possible, et sont laissés à durcir dans les conditions atmosphériques à 20 °C pendant 7 jours.

**Figure 3.** Principes du test de cisaillement à double recouvrement.

Une charge de traction est appliquée aux blocs de béton, induisant la contrainte de cisaillement le long du joint de colle. Les éprouvettes sont testées dans des conditions normales d'humidité et de température (~20°C, ~50% HR) sur une machine d'essai de traction universelle Zwick / 1475 à une vitesse de traverse de 1 mm/min jusqu'à rupture de l'échantillon. Des jauges de déformation ohmique de 120 Ω de résistance collées sur la surface du composite permettent de mesurer la déformation de la partie centrale de chaque bande et le long de l'axe central de l'une d'elle. Deux capteurs de déplacement LVDT (10⁻⁴ mm de précision) mesurent la distance entre les blocs à chaque côté de l'intervalle (ΔL₁). L'augmentation de cette distance est due à l'allongement composite (ΔL₂) et le glissement entre le composite et le support béton, voir figure 3. Le glissement moyen (γ) des deux joints de

recouvrement est calculé à partir de l'équation [4], en divisant le déplacement de glissement par l'épaisseur (s) du joint de colle.

$$\gamma = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{s} \quad [3]$$

La contrainte de cisaillement moyenne (τ_{ave}) est calculée en divisant la force appliquée (F) par la surface de la zone collée (A_{adh}); et le module de cisaillement global (G) suivant l'équation [4]:

$$G = \frac{\tau_{ave}}{\gamma} = \frac{F/A_{adh}}{\gamma} \quad [4]$$

4.2 Résultats des essais de cisaillement à double recouvrement

Des tests préliminaires avec le composite S350 ont été effectués avec un nombre croissant de plis. Il apparaît que 4 plis sont nécessaires pour obtenir une rupture des éprouvettes dans le béton et non dans le composite.

Par conséquent pour les essais avec le tissu S600, le composite a été préparé avec 3 plis. Quatre essais ont été effectués et ont tous les quatre conduit à une défaillance du support, avec rupture franche d'un cône de béton. Les essais ont montré une bonne reproductibilité des résultats avec une rupture systématique béton. Le matériau composite lin-époxy présente donc des propriétés mécaniques suffisantes pour être utilisé pour le renforcement du béton.

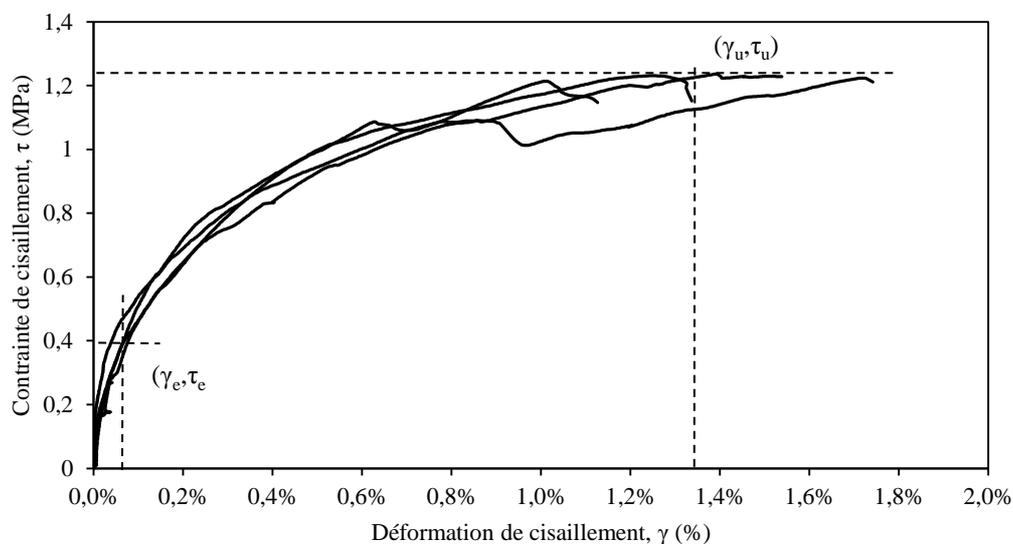


Figure 4. Comportement mécanique en cisaillement de l'interface entre le composite lin-époxy et le support béton (avec l'exemple du composite S600(x3)).

Le comportement en cisaillement de l'interface composite/béton se caractérise par une loi non linéaire avec un domaine initial linéaire élastique, voir figure 4. Le premier point (γ_e , τ_e) marque la limite du comportement élastique. Le deuxième point (γ_u , τ_u) correspond à la rupture de l'échantillon. Entre ces points, le joint adhésif suit un comportement non-linéaire complexe.

Tableau 4. Résultats des tests de cisaillement à double recouvrement S600 (x3). (Moyenne sur 4 spécimens).

	Contrainte de cisaillement à rupture τ_u (MPa)	Déformation de cisaillement à rupture γ_u (%)	Contrainte de cisaillement à limite élastique τ_e (MPa)	Déformation de cisaillement à limite élastique γ_e (%)	Module de cisaillement élastique G_e (GPa)
Composite S600(x3)	1.22 ± 0.1	1.43 ± 0.25	0.36 ± 0.09	0.03 ± 0.01	1.23 ± 0.30

Selon Meaud et al. (2011), la partie de contrainte de cisaillement linéaire dépendrait principalement des propriétés de la matrice polymère et par conséquent de la température d'essai [MEA 11]. En effet, les limites de cisaillement élastiques (γ_e, τ_e) sont similaires à celles obtenues par Ferrier et al. (2011) avec des composites de renfort à fibres de carbone [FER 11]. Avec une défaillance dans le béton, et non pas dans le composite, la contrainte de cisaillement à rupture τ_u dépend par contre directement des propriétés du béton. La déformation de cisaillement à rupture ($\gamma_e = 1,1 - 1,7\%$) semble cependant être au moins trois fois plus élevée que pour des composites à fibres de carbone. Cela est dû à la haute déformabilité des fibres de lin par rapport aux fibres de carbone.

5. Conclusion

Cette étude visait à évaluer la possibilité d'utiliser la fibre de lin naturel comme une alternative écologique aux fibres de verre pour le renforcement externe des structures en béton armé. Le composite époxy renforcé par des fibres de lin a été posé à la main dans un processus de drapage humide. Une première caractérisation mécanique en traction des composites a montré des propriétés mécaniques comparables à certains composites à fibres de verre utilisées pour le renforcement du béton. Toutefois, le comportement non-linéaire doit être examiné plus en avant afin de comprendre le transfert de force aux fibres de lin. La dispersion des valeurs est un problème typique quand on travaille avec des fibres naturelles. Dans une deuxième étape, le comportement en cisaillement mécanique de l'interface béton / composite lin a été étudié par des essais de cisaillement à double recouvrement. Quatre échantillons ont été testés et les essais ont montré une bonne reproductibilité avec une rupture systématique béton. Le matériau présente donc des propriétés mécaniques appropriées pour être utilisé pour le renforcement du béton.

Ces premiers résultats sont encourageants et incitent à continuer d'examiner le potentiel des fibres de lin pour le renforcement de structure en béton. Des analyses plus complètes sur le matériau et des essais de cisaillement supplémentaires sont à venir pour compléter ces premiers résultats. Des séries de tests de vieillissement accélérés dans des conditions climatiques difficiles sont attendus pour confirmer le potentiel de ce matériau au cours du temps.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le soutien financier du projet FIABILIN ainsi que le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les auteurs souhaitent également remercier la société DEHONDT pour avoir fourni les tissus de lin; ainsi que la société FREYSSINET pour les résines.

7. Bibliographie

- [AME 08] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, rapport ACI 440.2R-08, 2008.
- [BAL 02] BALEY C., Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A*, vol. 33, 2002, p. 939-948.
- [BAL 12] BALEY C., LE DUIGOU A., BOURMAUD A., DAVIES P., Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites. *Composites Part A – Applied Sciences*, vol. 43, n° 8 ; 2012, p.1226-33.
- [BLE 99] BLEDZKI A.K., GASSAN J., Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, vol. 24, n° 2, 1999, p.221-274.
- [CHA 10] CHARLET K., JERNOT J-P., BRÉARD J., GOMINA M., Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres. *Industrial Crop Production*, vol. 32, 2010, p. 220-224.
- [COR 13] COROLLER G., LEFEUVRE A., LE DUIGOU A., BOURMAUD A., AUSIAS G., Effect of flax individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite. *Composites : Part A*, vol. 51, 2013, p. 62-70.
- [DIT 12] DITTENBER D.B., H.V.S. GANGARAO, Critical review of recent publication in use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, n° 8, 2012, p. 1419-1429.
- [FER 01] FERRIER E., MICHEL L., JURKIEWIEZ B., HAMELIN P., Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures. *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2001, p. 461-467.
- [HAM 02] HAMELIN P., Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. *Techniques de l'Ingénieur*, n° AM5615, 2002.

- [HOL 03] HOLLAWAY L.C., The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, vol. 17, 2003, p.365-378.
- [JCI 98] JAPANESE CONCRETE INSTITUTE, Report II of research committee on continuous fiber-reinforced concrete, vol. 5, 1998.
- [JOS 04] JOSHI S.V., DRZAL L.T., MOHANTY A.K., ARORA S., Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites: Part A*, vol. 35, 2004, p.371-376.
- [LED 14] LEDUIGOU A., Eco-conception et analyse de cycle de vie: comparative entre un composite synthétique et un composite renforcé par des fibres végétales. 2014. *Colloque National MECAMAT*, Aussois, 20-24 janvier 2014.
- [MEA 11] MEAUD C., JURKIEWIEZ B., FERRIER E., Investigation of creep effects in strengthened RC structures through double lap shear testing. *Composites: Part B*, vol. 42, 2011, p. 359-366.
- [MES 09] MESHGIN P., CHOI K.-K., REDA TAHA M.M., Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete-FRP interfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, n° 1, 2009, p.56-66.
- [POI 14] POILÂNE C., CHERIF Z.E., RICHARD F., VIVET A., BEN DOUDOU B., Polymer reinforced by flax fibers as a viscoelastoplastic material. *Composite Structures*, vol. 112, 2014, p.100-112.
- [SCI 13] SCIDA D., ASSARAR M., POILÂNE C., AYAD R., Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite. *Composites: Part B*, vol.48, 2013, p.51-58.
- [SHA 13] SHAH D.U., Developing plant fibre composites for structural applications by optimizing composite parameters: a critical review. *Journal of Material Science*, vol. 48, 2013, p. 6083-6107.
- [YAN 14] YAN L., CHOUW N., JAYARAMAN K., Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, 2014, p. 296-317.