# Murs BA renforcés par FRP naturels dans les applications sismiques

# Laurent MICHEL<sup>1</sup>, Emmanuel FERRIER<sup>1</sup>, Giovanni DI LUCCIO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMC<sup>2</sup> Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction – Université Lyon1 Site Villeurbanne DOUA, 82 boulevard Niels BOHR, 69622 VILLEURBANNE cedex Email : <u>laurent.michel@univ-lyon1.fr</u>, <u>emmanuel.ferrier@univ-lyon1.fr</u>

## RÉSUMÉ.

Plusieurs études de la littérature montrent une bonne efficacité de l'utilisation des fibres naturelles dans le renforcement externe par FRP des structures en béton armé courantes. L'étude présentée traite du comportement de voiles béton armé renforcés par des matériaux composites naturels (fibres de lin) en flexion composée. Le chargement représentant les charges de plancher est constant et le chargement horizontal représentant la sollicitation sismique est appliqué selon un train de cycle alterné prédéfini. Des voiles BA de grande échelle sont étudiés : 6 voiles dits « élancés » pour l'étude de l'effet de la flexion. L'objectif principal de l'étude est de montrer la faisabilité de l'utilisation de matériaux composites naturels (fibres longues de lin) pour le renforcement sismique. L'étude a consisté en une partie expérimentale et une partie analyse. Les solutions de renforcement par fibres naturelles sont ensuite comparées à des murs élancés référence et également à des voiles béton armé renforcés par des matériaux composites généralement appliqués (fibres de carbone).

## ABSTRACT.

Several studies in the literature show good efficacy of the use of natural fibers in the external reinforcement of FRP in common reinforced concrete structures. The present study deals with reinforced concrete walls behavior reinforced by natural composite materials (flax) in combined bending. Loading representing the floor loads is constant and the horizontal loading representing the seismic stress is applied in a predefined alternating cycle train. Large-scale of RC walls are studied: 6 slender wall for the study of the bending effect. The main objective of the study is to demonstrate the feasibility of using natural composites (long flax fibers) for seismic strengthening. The study consisted of an experimental part and an analyse part. By the natural fiber reinforcement solutions are then compared with slender walls and reference also to reinforced concrete walls reinforced by composite materials generally applied (carbon fibers).

MOTS-CLÉS: voile BA, renforcement, fibres naturelles, fibre de lin, renforcement sismique. KEY WORDS: RC wall, reinforcement, naturel fibers, flax fiber, seismic reinforcement.

# 1. Introduction

Les réglementations parasismiques dans le domaine du bâtiment ont évolué au fur et à mesure de l'approfondissement des connaissances scientifiques. Il y a quelques décennies, les ouvrages étaient dimensionnés en capacité (résistance) [ANT 05] et [BRU 02], ce qui conduit à des structures résistantes mais particulièrement fragile. Néanmoins, de nombreux éléments de structure ne sont plus conformes aux exigences actuelles.

La technique de renforcement par matériaux composites (PRFC) s'est particulièrement développée ces dernières années de façon à augmenter la ductilité de ces éléments et leur résistance si nécessaire.

Dans cet article nous allons présenter les résultats expérimentaux de voiles en béton armé renforcés par des composites naturels de type lin-époxy (PRFL).

Six voiles sont réalisés pour l'étude. Un voile non renforcé et cinq voiles renforcés ont été testés sous sollicitations cycliques, d'amplitudes croissantes jusqu'à rupture. Les résultats obtenus vis-à-vis des renforcements avec fibres naturelles sont ensuite comparés à des composites époxy à base de fibres de carbone. L'exploitation des résultats permet d'obtenir des courbes d'hystérésis des structures renforcées et non renforcées. Au-delà de l'évaluation des gains de charges et de déplacement, l'exploitation des résultats permet d'évaluer le niveau d'endommagement du voile en fonction du déplacement imposé rapporté à la hauteur du voile (drift). Un modèle décrivant cette fonction d'endommagement est proposé.

## 2. Descriptif expérimental

#### 2.1. Description des essais

Le type de mur retenu est celui déjà étudié par Greifenhagen [GRE 05]. Les essais que nous allons conduire vont mettre en évidence l'apport du renfort par matériaux composites sur des voiles élancés (H / L > 2).

Le rapport hauteur sur largueur est supérieur à deux, (H/L > 2), il s'agit donc bien d'un voile élancé (Figure 1). Les dimensions du voile permettent d'obtenir un mur modèle à une échelle de 1/3 d'un mur réel.



Figure 1. Représentation des voiles testés et disposition du ferraillage métallique.

Le ferraillage du voile est conforme aux recommandations minimales de l'Eurocode. Les géométries générales des voiles, les ferraillages et les caractéristiques des matériaux (béton et acier) sont similaires pour tous les corps d'épreuve. Par conséquent, seul le renforcement composite permet de les différentier (Tableau 1).

		Nb de couche	Disposition		Système d'ancrage		
nom	Type de renfort		Largeur de bande [mm]		Voile-fondation [Nombre de brins]		traversant
			Centre	Extérieur	Centre	Extérieur	
SL3	Aucun	-	-	-			-
SLR4	Carbone bidirectionnel	one bidirectionnel 1 50		50	26	26	-
SLR6	Carbone unidirectionnel	1	50	75	44 60		4
FRSL1	Lin unidirectionnel	3	-	100	$4 \times [44]$ répartis Carbone		-
FRSL2	Lin unidirectionnel	4	-	100	$4 \times [44]$ répartis Carbone		-
FRSL3	Lin unidirectionnel + tissu verre	2 + 2	-	100	$4 \times [100]$ répartis Verre		-

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des configurations de renforcement.

Le premier voile sera alors en béton armé sans renfort composite servant de référence. Il est noté SL3 (Figure 2). Les deux voiles suivants sont renforcés par des bandes de composite carbone (SLR4 et SLR6) (Figure 2). Il s'agit d'un composite carbone époxy stratifié au contact. Le tissu de carbone haute résistance est bidirectionnel ou unidirectionnel. La matrice utilisée est de type époxy dont la cure est effectuée à froid (température ambiante 20 °C). Les propriétés mécaniques du composite carbone sont les suivantes un module d'élasticité 105000 MPa, une résistance 820 MPa pour une épaisseur nominale de 1 mm. Les trois derniers voiles (FRSL1, FRSL2 et FRSL3) sont renforcés à l'aide de composites naturels à base de fibres de lin (Figure 2). Les propriétés mécaniques du composite lin unidirectionnel sont les suivantes un module d'élasticité 14000 MPa, une résistance 120 MPa. La configuration 3 comprend également un tissu de verre bidirectionnel dont les caractéristiques sont les suivantes : module élastique 9000 MPa et résistance 135 MPa. Le béton est identique pour l'ensemble des voiles à savoir une résistance moyenne à la compression égale à 30 MPa.



Figure 2. Différentes configurations de renforcement par matériaux composites (carbone ou lin)

# 2.2. Instrumentation et protocole expérimental

Les voiles sont soumis à un chargement horizontal cyclique. Un chargement vertical, représentant les masses de plancher, constant est appliqué tout au long de l'essai à une valeur de 90 kN (chargement contrôlé en effort). Le chargement horizontal, représentant la sollicitation sismique est imposé en déplacement à une vitesse de 30mm/min. La forme du chargement cyclique retenu de la littérature [INO 97] et [ILE 00] est croissant de 1 mm tous les trois cycles (Figure 3). Nous avons mis en place 4 LVDT, afin de vérifier le non-glissement et évaluer le risque de soulèvement entre le voile et la semelle inférieure et supérieure. Enfin, 2 LDVT ont été positionnés suivant les diagonales afin de vérifier les variations de longueurs selon la phase de fonctionnement (bielles

tendues ou comprimées). Enfin une série de jauges de déformations a été collée sur le treillis soudé et sur le renfort composite afin de mesure localement le taux de déformations des armatures métalliques et du renfort composite.



Figure 3. Description des cycles de chargement

# 3. Résultats

# 3.1. Evaluation des gains de résistance et de ductilité

Le tableau 2 suivant regroupe les résultats d'essais sur l'ensemble des corps d'épreuve. Pour chaque configuration les courbes charge-déplacement sont tracées (Figure 4). Les représentations graphiques permettent de mettre en évidence les courbes d'hystérésis de chaque configuration. Cette analyse est utile dans la détermination d'indice d'endommagement permettant une classification des typologies de renforcement.



Figure 4. Exemple de tracés charge-déplacement pour les configurations SL3 et SLR6

Pour une meilleure visualisation du comportement de chaque configuration, les maximums de charge et de déplacement sont définis pour chaque train de cycles et représentés sur un graphique commun (Figure 5).



Figure 5. Tracés des courbes enveloppes charge-déplacement pour chaque configuration de renforcement

Nom	Fu [kN]	[%]	δ <sub>u</sub> <sup>-</sup> [mm]	[%]	F <sub>u</sub> + [kN]	[%]	δ <sub>u</sub> + [mm]	[%]
SL3	27,75	-	20,56	-	27,43	-	19,91	-
SLR4	36,01	+ 30	20,52	- 1	42,25	+ 54	21,08	+ 6
SLR6	47,24	+ 70	14,57	- 30	52,23	+ 90	13,47	- 27
FRSL1	55,25	+ 99	18,82	- 8	50,37	+ 84	22,40	+ 13
FRSL2	54,00	+ 94	22,92	+ 11	45,06	+ 64	21,78	+ 9
FRSL3	68,50	+ 147	26,86	+31	56,75	+ 107	23,11	+ 16

Tableau 2. Récapitulatif des charges et déplacements maximums mesurés.

 $X_u^-$ : valeur maximale en poussée,  $X_u^+$ : valeur maximale en traction

Les essais montrent clairement l'efficacité du renforcement composite sur les résistances maximales obtenues. Quelle que soit la configuration, le renforcement permet une augmentation de 30% de la charge à rupture. Les configurations de lin sont encore plus efficaces puisque l'augmentation des résistances est de l'ordre de 100% voire 140% dans le cas de la configuration FRSL3. Outre l'intérêt du renforcement sur la résistance des voiles, le critère de ductilité est très important dans le domaine du renforcement parasismique. Vis-à-vis de ce critère, on constate deux typologies de résultat. Les voiles renforcés par les composites FRP à base de fibres de carbone ont vu un déplacement limite plus faible que la configuration de référence non renforcée. Les configurations de renforcement par fibres de lin ont quant à elles vu une augmentation de leur déplacement limites allant jusqu'à 30% pour la configuration FRSL3. Du point de vue parasismique, la configuration de renforcement par matériaux composites de lin et verre est une configuration intéressante puisqu'elle permet à la fois d'augmenter la résistance et également le déplacement maximal. Le positionnement du tissu de verre permet de ponter les fissures qui se produisent entre les bandes de renfort longitudinales en lin.

Du point de vue rupture, les configurations en carbone ont eu une rupture par décollement des composites du support béton (SLR6) ou par traction d'une mèche extérieure (SLR4). Les analyses sur les déformations des composites montrent un taux de travail des bandes carbone de l'ordre de 30%. Par contre dans le cas du renforcement par matériaux composites naturels, les déformations enregistrées montrent une pleine utilisation du composite provoquant la rupture de celui-ci en traction durant l'essai.



SLR4



FRSL1

FRSL3

Figure 6. Modes de ruine des voiles renforcés

# 3.2. Analyse sur la raideur

Avec l'augmentation des déplacements et du nombre de cycles, les boucles d'hystérésis tendent à s'incliner. Cette modification correspond à une dégradation de la raideur. Cette caractéristique permet de quantifier l'endommagement. En effet, les conditions aux limites imposées (bi-encastrées), permettent l'évaluation de la raideur par l'équation [1] :

$$K = \frac{\frac{6EI}{L^3}}{[1]}$$

FRSL2

E et I sont respectivement le module et l'inertie, L étant sa longueur. Lors de l'endommagement des spécimens, les propriétés mécaniques des matériaux diminuent. La fissuration du béton amène une perte de monolithisme de la structure qui se traduit d'un point de vue mécanique par une chute de l'inertie de la section. L'étude de la variation de la raideur revient à faire celle du produit  $E \times I$ . Nous avons calculé la raideur moyenne des trois boucles d'hystérésis obtenues pour un pas de déplacement imposé. Puis pour un même drift, nous en avons fait la moyenne. La figure 7 présente l'évolution de la raideur des trois voiles renforcés par fibres de lin en fonction du déplacement imposé. Les raideurs chutent très rapidement pour les voiles renforcés par fibres de lin et pour le voile non renforcé. Néanmoins au niveau du déplacement maximal enregistré pour le voile non renforcé, la raideur des voiles renforcés est multipliée par trois.



Figure 7. Evolution de la raideur des voiles renforcés par fibres de lin et non renforcé

# 3.1. Analyse de l'énergie dissipée

Pour chaque configuration, les énergies élastiques ou dissipées peuvent être définies à l'aide des courbes d'hystérésis. Les essais montrent que les structures renforcées ont une énergie élastique cumulative beaucoup plus importante que la structure non renforcée (Figure 8).



Figure 8. Evolution de l'énergie élastique cumulative des voiles renforcés par fibres de lin et non renforcé

La comparaison entre les deux matériaux de renforcement à savoir carbone et lin montre que l'énergie dissipée dans le cadre d'un renforcement de voile par matériau lin est plus importante que dans le cas d'un renforcement par matériau carbone avec une plus grande augmentation de l'énergie élastique dissipée (Figure 9 et Figure 10).



Figure 9. Evolution de l'énergie dissipée des voiles renforcés par fibres de lin FSLR3 et carbone SLR4



Figure 10. Evolution de l'énergie élastique cumulative des voiles renforcés par fibres de lin FSLR3 et carbone SLR4

# 4. Conclusion

L'étude expérimentale présentée traite du renforcement parasismique de voiles béton armé renforcés à l'aide de matériaux composites FRP constitués de fibres naturelles de lin. L'étude montre également une comparaison des résultats avec des renforcements FRP utilisant des matériaux plus usuels dans le domaine du renforcement (carbone). Les résultats montrent que l'utilisation de matériaux composites naturels dans ce cadre de

renforcement est une alternative très efficace. En effet, les configurations avec fibres de lin ont montrées des augmentations de résistance pouvant atteindre 150% et des gains de ductilité proche de 30%. Les essais montrent également que les configurations en lin permettent de dissiper plus d'énergie que leurs homologues carbone, critère important dans le cadre de renforcement parasismique.

# 5. Bibliographie

[ANT 05] Antoniades K.K., Salonikios T.N., Kappos A.J., Test on seismically damaged reinforced concrete walls repaired and strengthened using fiber reinforced polymers, Journal of composites for construction © ASCE, 2005, p.236-246.

[BRU 02] Brun M., Contribution à l'étude des effets endommageant des séismes proches et lointains sur des voiles en béton armé : Approche simplifiée couplant la dégradation des caractéristiques dynamiques avec un indicateur de dommage, Thèse INSA de Lyon, 2002, 223 pages.

[GRE 05] Greifenhagen C., Lestuzzi P., Static cyclic test on lightly reinforced concrete shear walls, Elsevier Science Ltd., 2005, p.1703-1712.

[INO 97] Inoue N., Yang K., Shibata A., Dynamic non-linear analysis of reinforced concrete shear wall by finite element method with explicit analytical procedure, John Wiley & Sons, Ltd., 1997, p.967-986.

[ILE 00] Ile N., Contribution à la compréhension du fonctionnement des voiles en béton armé sous sollicitation sismique: apport de l'expérimentation et de la modélisation à la conception, *Thèses INSA de Lyon*, 2000, 262 pages.