Efficiency of strengthening concrete beams using FRP

Efficacité du renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites

N. Attari¹ S, Amziane² M et Chemrouk³ M

¹EPAU. Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, Alger, Algérie.

²Université Blaise Pascal, LMI, BP10448, 63000 Clermont-Ferrand, France.

³Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Alger, Algérie.

Abstract : To reduce the cost and to ensure a behavior relatively more ductile for concrete strengthening elements, the addition of glass fibers could be regarded as solution of replacement, since they are relatively more deformable and cheaper than carbon fiber. In this sense, current work aims at evaluating the effectiveness of the external reinforcement on the beams strengthened by fabric of FRP (glass - carbon). Seven concrete beams reinforced were strengthening in bending and shearing, and were testing under four point cyclic static. The fields of the stresses and deformation were controlled by a numerical system of camera «Gom-Aramis». The results were analyzing in term of resistance, rigidity, ductility and mode of failure

Résumé : Pour réduire le coût et assurer un comportement relativement plus ductile pour des éléments en béton armés renforcés, l'addition des fibres de verre pourrait être considérée comme solution de rechange, puisqu'elles sont relativement plus déformables et meilleur marché que la fibre de carbone. Dans ce sens, le travail actuel vise à évaluer l'efficacité du renfort externe sur les poutres renforcées par le tissu de FRP (verre - carbone). Un total de sept poutres en béton armé a été renforcé en flexion et en cisaillement, et testé sous un chargement quatre points cyclique statique. Les champs des contraintes et de déformation ont été contrôlés par un système de caméra numérique "Gom-Aramis". Les résultats ont été analysés en termes de résistance, rigidité, ductilité et mode de rupture.

1 Introduction :

La technique des armatures collées en matériaux composites acquiert une importance croissante dans le domaine du renforcement des structures. Elle s'avère notamment intéressante pour le renforcement et la réparation des structures en béton, en charpente ou en maçonnerie. Cependant hormis les avantages qu'elle procure, la technique de renforcement par les matériaux composites, engendre une diminution dans la ductilité des éléments renforcés en flexion et sans confinement notable. Sachant que la ductilité est un élément désirable.

Triantafillou et Plevris, [1], ont démontré que le renforcement des facettes de poutres en béton armé par des fibres de verre ou d'aramides, améliore leur résistance au cisaillement et leur ductilité. Et récemment Guido Camata et al, [2] ont montré expérimentalement et analytiquement l'efficacité de la surface de contact du renfort composite sur la ductilité. Dans ce sens la présente étude évalue l'influence et l'efficacité du renforcement externe des poutres en béton armé, par un renfort en fibre de verre et de carbone, et cela par une configuration de renforcement appropriée. Différentes solutions sont expérimentées, Elles combinent l'usage séparé de fibres de carbone et de verre unidirectionnel avec un ancrage en U. Dans les mêmes conditions un tissu hybride bidirectionnel verre-carbone est testé. Et dans ce sens et pour réduire le coût et assurer un comportement relativement plus ductile pour les éléments en béton armé renforcé, l'addition des fibres de verre pourrait être considérée comme solution de rechange, Attari et al, [4], puisqu'elles sont relativement plus déformable et meilleur marché que la fibre de carbone.

2 Objectif de l'étude

L'étude ici présentée avait pour objectif de faire une comparaison qualitative entre les différentes configurations de renforcement et particulièrement sur leurs ductilités.

2.1 Aspects expérimentaux :

2.1.1 Dispositif expérimental :

Fig.1. Dispositif d'essai

Fig.2. Détails des Poutres (dimensions en mm)

Les essais ont été réalisés sur un dispositif de flexion quatre points d'une capacité de 250kN « Figure.1 », la charge appliquée était du type cyclique statique avec une vitesse de 0,02mm/s.

2.2 Caractéristiques des poutres.

Un total de sept poutres rectangulaires ont été fabriquées pour les besoins de cette étude, Toutes les poutres sont identiques, elles ont une section de $100 \times 160 \text{ mm}^2$ et une longueur de 1500mm, elles sont armées de deux barres de HA10 inférieures et de deux barres HA8 supérieures, 13 cadres HA6 espacés de 12cm ont été utilisés pour le renforcement à l'effort tranchant et pour éviter une rupture prématurée à l'effort tranchant « Figure.2 ».

On distingue deux séries de configuration de renforcement, la série A où les poutres sont renforcées par un renfort de fibre unidirectionnel en forme de U, la série B comprend le renfort avec un tissu de fibre bidirectionnel hybride verre carbone (Table 2).

2.3 Caractéristiques des matériaux.

Les caractéristiques des fibres utilisées sont données par le fournisseur (Tab1) comme suit :

Tableau1.Caractéristiques des fibres

Matériau	Module E GPa	Résistance MPa	Orientation des Fibres	Epaisseur mm	Elongation	Masse g/m^2
FibreCFRP (SikaWrap230C)	238	3650	Unidirectionnel	0.13	1.7%	225
Fibre GFRP SikaWrap430G	76	2200	Unidirectionnel	0.17	2.8%	430
Fibre hybride	Non Disponible					

Tableau.2 : Configuration des poutres testées.

	Poutre	Configuration	Type de Renfort
	Pc		Poutre Témoin
SÉRIE A	PA1		Tissu carbone CFRP 1 Couche U à 0° et 1 Couche U à 90°
	PA2		Tissu Verre GFRP 2 Couches U à 0° et 1 Couche à 90°
	PA3		Mélange CFRP+GFRP 1 Couche C FRP 0° 1 Couche GFRP 0°
SÉRIE B	PB4		3 Couches HFRP en U
	PB5		2 Couches HFRP en U
	PB6		3 Couches HFRP

Les matrices utilisées dans cette étude sont composées de résines époxydiques et d'un durcisseur. Pour accéder aux caractéristiques mécaniques de chaque renfort composite il était nécessaire de réaliser des éprouvettes (Fig.3) pour des essais en traction et cela suivant la norme (NF T 51-034). Les caractéristiques mécaniques sont données au Tableau (3).

Tableau 3.Caractéristiques des composites.

Matériaux	Module E GPa	Résistance MPa	Charge ultime kN/mm	épaisseur mm	Elongation%
CFRP	43.5	403	0.644(1couche)	1.6	0.95
GFRP	19.2	325	0.650(2couche)	2	1,7
CFRP+GFRP	28	400	0.640(2couche)	1.6	1.45
Tissu hybrid	27	218	-	2	0.85

Lors de cette étude, la valeur de la résistance souhaitée du béton a été prise égale à 30 MPa. Les armatures longitudinales et transversales utilisées sont en acier à haute adhérence ayant un module d'Young de 200 GPa, et une valeur moyenne de 500 MPa comme limite élastique.

Fig 3. Essai de traction sur éprouvette composite

Fig 4. Comparaison entre les mesures de la caméra et les LVDT

2.4 Instrumentation

Plusieurs types de mesures ont été effectués : mesures des déplacements du corps d'éprouve et les mesures des déformations des Aciers du Béton ainsi que celui du renfort Composite.

Les capteurs de déplacements type (LVDT) ont été utilisés pour les mesures de flèches, fixé à un support rigide, ces capteurs venaient palper des cibles métalliques collées sur la surface du béton. D'un autre côté, les déplacements ont été mesurés par la traverse de la machine d'essais.

Les champs cinématiques classiques sont perturbés par l'existence des fissures, ce qui nécessite une approche quasi continue plutôt que l'approche discrète classique. Ainsi, notre étude s'est orientée vers l'utilisation de méthodes optiques de mesures de champs cinématiques, qui permettent de caractériser avec une précision maîtrisée un champ de déplacement ou de déformation. C'est ainsi que le champ des déformations des surfaces externes, soit celui du béton ou du renfort composite ont fait l'objet de mesures optiques à l'aide d'une caméra de marque Gom-Aramis. Et afin de juger sur la pertinence des résultats de la caméra gom-aramis, une comparaison a été établie entre les résultats des mesures traditionnelles des déplacements par LVDT, ainsi on remarque une parfaite corrélation entre les deux mesures (Fig.4).

3 Résultats et discussion

3.1 Réponse et mode de rupture

Série A : Dans cette série on a utilisé uniquement les fibres unidirectionnelles verre ou carbone, mais il était question de choisir une configuration similaire au renforcement de carbone et qui nous donne la même réponse structurale mais avec un coût moins élevé.

Tout en se basant sur les essais de caractérisation du matériau, ou on a obtenu une certaine charge Ultime équivalente similaire pour chaque choix (voir Tableau 3).

Fig 5. Courbes de déflexion en fonction de la charge pour la **série A**

Fig 6. Courbes de déflexion en fonction de la charge pour la **série B**

Les courbes de la série A (Figure.5) montrent qu'il existe une certaine équivalence entre les trois configurations de renforcement à savoir PA1, PA2, et PA3. Ceci est dû principalement à l'équivalence de la charge ultime de rupture des trois renforts, comme cela a été mentionné ci-dessus au tableau(3). Mais comparativement à la poutre témoin Pc, on a observé une augmentation de la charge maximale de près de 120% pour les trois poutres renforcées. D'un autre côté une diminution de leurs déflexions, qui est dû principalement à une augmentation de leurs rigidités. Ces valeurs relatives sont des exemples de ce que l'on peut obtenir par l'application d'un matériau composite comme renfort en flexion. En effet, les courbes de la série A nous montrent un léger plus pour la poutre PA3 et surtout une meilleure déflexion. Ceci est dû à la configuration propre du renfort, qui est un mélange entre des fibres de carbone avec un module d'élasticité et une résistance à la traction élevés, et un tissu de fibre de verre plus déformable avec un module d'élasticité nettement plus faible. Ce qui donne à ce mélange hybride une meilleure performance avec un coût inférieur à celui de la configuration carbone de la poutre PA1.

Série B : Cette série comprend trois poutres renforcées par un tissu hybride bidirectionnel *HFRP* Verre-Carbone, cette configuration a été choisie de manière à étudier l'effet d'un tissu hybride bidirectionnel sur le comportement de nos poutres. Les remarques qu'on peut faire sur la réponse des poutres de la série B (Figure.6), est que le renforcement d'une poutre augmente d'une manière substantielle la charge de rupture, avec augmentation de la rigidité et réduction de la déflexion, néanmoins pour cette série on remarque une certaine rupture prématurée du composite qui est due principalement aux propriétés du renfort hybride vu sa faible elongation à la rupture et sa faible résistance à la traction. Si on fait une comparaison entre la poutre PB4 et PB5, on remarque que le gain apporté avec le rajout d'une couche hybride était d'environ de 12%, ce qui n'est pas énorme, d'autant plus que leurs déflexion est presque identique. Cela suppose, qu'il y a une limite dans la dimension du renfort comme c'est le cas avec le renforcement des aciers, et qu'au-delà d'une certaine limite le renfort n'apporte pas grand-chose. Par contre une comparaison entre les poutres PB4 et PB6 ou toutes les deux sont renforcées avec trois couches en traction avec la différence du renfort en U pour la PB4. On remarque que le mode de rupture a changé pour la poutre PB4 passant du pivot A (utilisation maximale de l'acier) au pivot B (rupture du béton) mais n'a pas changé pour la poutre PB6 malgré l'épaisseur qui est identique en traction. L'augmentation de la charge de rupture était de 114% pour la PB4 et de 51% pour la PB6 et de la déflexion qui passe de 16,8 à 10,3 mm. On peut déduire de cette situation, que les ancrages ainsi que l'augmentation de la surface du renfort augmente considérablement les caractéristiques mécaniques de la poutre et évitera par la même toute rupture fragile et brutale du composite.

Fig 6. Mode de rupture de la série A

Fig 7. Mode de rupture de la série B

3.2 Relation moment courbure

La courbure d'une section est un paramètre particulièrement important pour la compréhension du comportement de poutres renforcées par un matériau composite puisqu'il concerne directement sa ductilité. Le comportement fragile des renforts posait un véritable problème, on considère qu'un élément en béton armé présente un comportement fragile s'il est difficile de prévoir correctement sa rupture. En particulier pour le cas d'éléments renforcés. Habituellement, la ductilité de courbure s'est avérée plus variable comme elle dépend des mesures de jauges, qui sont influencées par les fissures du béton et du composite FRP; mais dans notre cas, avec l'aide de la caméra, ces inconvénients sont évités, et la rupture des poutres peut être soigneusement et complètement suivie. Pour la mesure des déformations sur la hauteur de la facette centrale, et à l'aide de la caméra Aramis, on choisit un certain nombre de points et on mesure la distance d_i qui les sépare, et la déformation de chaque position et de chaque charge est déduite comme suit (Fig 8) :

Fig.8 Détermination des déformations sur la facette Aramis

$$\phi = \frac{|\varepsilon_2| + |\varepsilon_1|}{h}$$

L'étude des courbes charges - flèche des poutres renforcées peut donner une première idée du comportement de celle-ci. Cependant, c'est plutôt la mesure de la courbure qui va permettre d'évaluer la capacité de rotation et la déformation de cette section, et donc de nous renseigner davantage sur la ductilité.

Série A. On remarque de ces courbes (Fig. 9) une nette amélioration des rigidités des poutres renforcées par rapport à la poutre témoin, on peut voir aussi que la courbure évolue de manière lente et graduelle et maintient la linéarité jusqu'à la plastification des aciers et l'amorce des fissures, après cela on remarque une évolution rapide de la courbure due à la fissuration du béton. Il est à noter que les courbes moment-courbure de cette série ont une certaine équivalence, la poutre PA3 renforcée par un mélange hybride se distingue légèrement par rapport aux autres.

Fig 9. Courbes Moment Courbure de la Série A

Fig 10. Courbes Moment Courbure de la Série B

Série B. Même constat que précédemment, sauf que pour cette série la courbure ultime est limitée par rapport à la courbure de la poutre témoin (Fig.10). Il faut noter aussi que la poutre PB6 avec une courbure très faible a eu une rupture fragile du fait que les faces latérales de la poutre n'ont pas été renforcées et que le renfort ne contient aucun ancrage.

3.2 Indice de ductilité des poutres.

La ductilité est une propriété importante dans le dimensionnement des structures. Pour la quantifier, on utilise par exemple un indice de déformation qui est égal au rapport du déplacement ou de la courbure ultime au déplacement ou à la courbure marquant la limite élastique (début de la plastification).

Fig 11. Définition de l'indice de ductilité en termes d'énergie

Pour les poutres renforcées, Thomson H et al. [3] ainsi que de nombreux auteurs préfèrent utiliser la notion de ductilité basée sur les énergies, ils définissent l'indice comme étant le rapport entre l'énergie ultime à la rupture et l'énergie à la limite élastique, sachant que l'énergie est calculée comme la surface sous la courbe de déplacement (Fig.11)

$$\mu_E = E_u / E_\gamma$$

Les résultats de calcul des indices de ductilités de la série A et B sont données par les figures (11a&b).

Fig 11a. Indice de ductilité d'énergie de la série A

Fig 11b. Indice de ductilité d'énergie de la série B

4 Conclusion.

1. Le comportement de la majeure partie des poutres renforcées, s'est accompagné d'une amélioration significative de la rigidité.
2. Les poutres de la série A ont eu un meilleur comportement et une meilleure déformabilité, ceci est dû à l'utilisation d'un tissu en fibre de verre ayant une grande élongation à la rupture.
3. Les poutres de la série B n'ont pas donné les résultats escomptés, du fait qu'elles n'ont pas eu un comportement ductile. Cela est dû au type de renfort qui possède une faible élongation à la rupture, ainsi le tissu hybride bidirectionnel ou la direction des fibres perpendiculaire à l'axe de la poutre n'a pas amélioré le comportement des poutres.
4. Les poutres de la série A ont eu une ductilité très proche de celle de la poutre de référence. ces résultats contredisent ce qui par le passé a été largement cru, qui en raison de la haute rigidité de la plupart des renforts composites, la ductilité des poutres renforcées est réduite, causant la rupture fragile et soudaine.

Références :

1. Triantafillou, T. C. "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy- Bonded FRP Composites" ACI Structural Journal, V.95, N°2, Mar-Apr (1998), PP.107-115.
2. Guido Camata; Enrico Spacone.Roko Zarnic "Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams Strengthened with FRP plates. Composites: Part B 38(2007)277-288.
3. Thomsen H,Spacone E,Limkatanyu S;Camata G. Failure mode analyses of reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with externally bonded Fiber- Reinforced Polymers. Journal of Composites for Construction, ASCE, Volume 8, Issue 2, pp. 123-131(March/April 2004).
4. Attari N, Amziane S, Chemrouk M. "Efficiency of Beam-Column Joint Strengthened by FRP Laminates" Advanced Composite Materials Journal (ACM), Vol: 19 (2010), P 171-183. Brill Publication (2010).