

Réhabilitation des Poutres en Béton Armé Rompues au Cisaillement à l'aide des Matériaux Composites

M. BOUMAAZA^a, A. BEZAZI^b, H. BOUCHELAGHEM^{b,c},
N. ZANACHE^a, S. AMZIANE^d, F. SCARPA^e

a. Laboratoire de Génie Civil & Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945 Guelma, BP 401 Guelma 24000, Algérie. messaoudabeb@yahoo.fr zanachenaziha@yahoo.fr

b. Laboratoire de Mécanique appliquée et des nouveaux matériaux (LMANM), Université 8 Mai 1945 Guelma, BP 401 Guelma 24000, Algérie
ar_bezazi@yahoo.com bouchelaghem_h@yahoo.fr

c. Département de Génie Mécanique, Université de Constantine 1, Algérie.

d. Clermont University, University Blaise Pascal, UMR 6602, Institut Pascal BP 206, 63174 Aubière, France.5 sofiane.amziane@univ-bpclermont.fr

e. Advanced Composites Centre for innovation and Science (ACCIS), University of Bristol, BSB 1 TR Bristol, UK. f.scarpa@bristol.ac.uk

Résumé :

L'objectif de cette étude est de développer une nouvelle technique d'approche pour la réparation des poutres en béton armé chargées en flexion 4-points et rompues par cisaillement. Cette technique utilise des matériaux composites dans la zone critique de la poutre. Pour ce faire un programme d'essais a été entrepris afin d'en juger la faisabilité, les performances, le comportement et la rupture de poutres en béton armé. De plus, les résultats obtenus par cette méthode ont montré une supériorité dans la capacité de charge et un changement du mode de rupture du cisaillement à la flexion comparativement avec des travaux antérieurs des auteurs qui consistaient à faire des réparations des poutres par collage de composites en forme de U.

Abstract :

The objective of this study is to develop a new approach technique for the repair of reinforced concrete beams loaded under 4-points bending failed by shear. This technique uses the composite materials in the critical zone of the beam. To do a test program was undertaken in order to assess the feasibility, performance, behavior and rupture of reinforced concrete beams. Also, the results obtained by this method showed superiority in load capacity and a change in the mode of failure of the shear at flexion compared with previous work of the authors who were to make repairs beams by bonding of composite with U-shaped.

Mots clefs : Réparation, poutres en béton armé, flexion 4-points, fibres de verre

1 Introduction

Le renforcement et la réhabilitation des éléments en béton armé est un enjeu de plus en plus important, c'est un outil permettant d'assurer une vie plus longue à des ouvrages vieillissant ou changeant d'utilisation. De nombreuses raisons peuvent justifier des renforcements/réparations: des

modifications structurelles, des changements d'utilisation ou même des réparations après des séismes. Initialement des plaques d'acier collées sous les éléments en béton étaient utilisées comme éléments de renforcement, mais elles ont été remplacées progressivement par les matériaux composites, qui sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art. Comme le coût d'une réparation d'ouvrage par matériaux composites à base de fibres de carbone n'est pas dérisoire l'application industrielle de la technique de réparation par matériaux composites à base de fibre de verre est très compétitive. Attari *et al.* [1] ont constaté que 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. Récemment Tara *et al.* [2] ont montré que l'utilisation des composites à base de fibres de carbone (PRFC), verre (PRFV) et bio tissé à base de jute (PRFJ) sur toute la longueur ou en bandes est très efficace dans le cas du renforcement des poutres au cisaillement. Cette problématique, qui est à l'origine de ce travail, cependant des investigations ont été menées afin d'examiner la faisabilité de cette technique pour le renforcement en cisaillement des poutres en béton armé (BA). Le comportement des poutres en BA renforcées au cisaillement est aussi un sujet d'intérêt, de par la complexité qui caractérise le comportement à l'effort tranchant des poutres, a fait l'objet d'un plus faible effort de recherche qui reste encore à être exploré. Il faut dire que le comportement en cisaillement des poutres en BA, à lui seul, est déjà complexe: une foule de paramètres, souvent interdépendants, influencent ce comportement (type de poutre profondes ou élancées, taux d'acier longitudinal, taille des poutres, le taux des armatures transversales ... etc); différents modes de rupture y sont observés [3, 4, 5 et 6]. La rupture par cisaillement a des caractères différents par rapport à une rupture en flexion, dans lequel le premier est plus fragile et se produit sans avertissement préalable. Parmi toutes les investigations menées, la problématique du cisaillement s'est révélée être la plus tenace. Plusieurs méthodes de renforcement ont été utilisées, le collage externe des tissus en FRP (EB) [7, 8 et 9], la méthode NSMR (Near Surface Mounted Rebar) [10 et 11] qui consiste à coller des barres en FRP près de la surface et la méthode ETS (*Embedded Through Section*) celle développée par [12 et 13] qui utilise un adhésif pour lier les tiges en FRP avec le béton a montré des résultats pleinement satisfaisants. Les différents renforcements ont été disposés de façon à intercepter les fissures diagonales le plus précisément possible. Le bilan des tests des poutres renforcées par la méthode ETS en particulier, quand celles-ci ne comportaient pas d'aciers transversaux est donc très positif avec une nette augmentation de la résistance au cisaillement. Des travaux de (Boumaaza *et al.* [15]) ont porté sur l'amélioration du mode de rupture fragile du béton en lui conférant une plus grande ductilité par l'utilisation de la technique du chemisage (2/3h) par le tissu en PRFV mais le mode de rupture des poutres était toujours le cisaillement.

La présente étude vise à compléter les travaux effectués antérieurement par les mêmes auteurs dans le but de résoudre le problème de la rupture en cisaillement. La méthode de réhabilitation proposée consiste à placer des renforts en matériaux composites de manière à croiser les fissures d'effort tranchant. Ce procédé utilise le collage de composites constitués par des fibres de verre unidirectionnelles imprégnées dans une matrice polymère thermdurcissable (résine polyester). Contrairement à la solution traditionnelle utilisant des méthodes classiques, cette technique de renfort à l'aide des bandes en zone critique SCR (Strips of Critical Region) est une alternative innovante conduisant au mode de rupture par flexion au lieu du cisaillement.

2 Protocole expérimental

2.1 Préparation des éprouvettes et conditions d'essais

Des investigations expérimentales, conduites sur des poutres de type profond de telle sorte que la rupture par cisaillement soit prédominante, sont donc nécessaires afin d'étudier profondément en termes de gain, la contribution du PRFV. Les essais ont été réalisés sur un dispositif de flexion quatre

points d'une capacité de 150 kN conformément à la norme ASTM C78-00 [14], la charge appliquée au un tiers de la portée était du type statique avec une vitesse de 200 mm/s. La fabrication des poutres a été réalisée au laboratoire du département génie civil de l'université de Guelma, ainsi que la confection des éprouvettes de contrôle pour des essais de caractérisation. Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées des moules puis conservées dans des bacs d'eau à la température ambiante jusqu'à 28 jours. Pour cette étude, sept poutres en béton armé identiques ont été réalisées. Les trois premières sont des poutres de référence, les deux autres poutres sont préchargées à 40% puis chargées jusqu'à la rupture et renforcées par collage de tissu en PRFV sous forme de U suivant une orientation 30/60 adoptée d'après des études antérieures [15] et deux poutres renforcées au cœur de l'âme de la poutre.

Les poutres ont 730 mm de portée et $100 \times 180 \text{ mm}^2$ de section, elles sont armées par deux barres HA8 dans la partie tendue et par deux barres HA 6 dans la partie comprimée de la poutre. Pour les aciers verticaux (cadres en acier), on a utilisé un acier doux lisse de diamètre 6 mm, ils sont espacés de 110 mm (Fig.1).

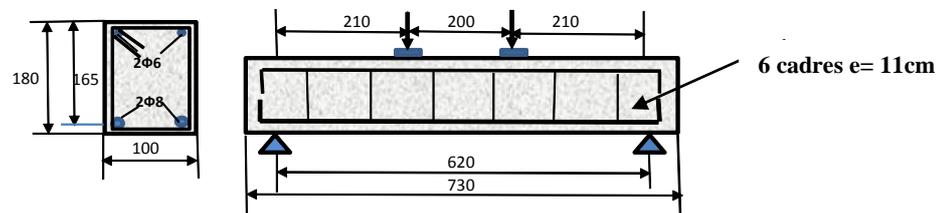


Figure 1 : Disposition de l'éprouvette sur le banc d'essai conformément à la norme ASTM C78.

La méthode de renforcement utilisée dans cette étude est celle développée par l'équipe est illustrée en figure 2c. Après perçage des trous (figure 2b) une réparation des poutres endommagées à l'aide du mortier en béton a été effectuée. Les différents renforcements ont été disposés de façon à intercepter les fissures diagonales le plus précisément possible. Afin de faciliter l'implantation du tissu unidirectionnel avec la résine dans ces trous, celles-ci sont entrelacés en pointe pour qu'elles se centrent naturellement dans le trou. Il faut que ces trous soient très propres avant d'injecter la résine. Deux méthodes de réhabilitation sont utilisées dans cette étude, on distingue deux séries de configuration de renforcement, la série A où les poutres sont renforcées par un renfort de fibres bidirectionnelles (figure 2a) en forme de U [15], la série B concerne le travail actuel comprend le renfort avec des torons en fibres de verre (figure 2c).



Figure 2 : Modes de réhabilitation : a) en forme de U ; b) perçage des poutres ; c) Méthode SCR.

2.2 Caractéristiques des matériaux

2.2.1 Fibres de verre

Les matériaux composites utilisés dans cette étude sont deux types :

- ✚ Le premier est un composite STV1 constitué d'un bidirectionnel en fibres de verre suivant l'orientation 30/60 (Figure 1) ;
- ✚ Le deuxième type de composites est le STV2 constitué de 15 torons en fibres de verre de longueur 1300 mm dont la masse totale du renfort est de 39,7 g et d'une résine polyester.

2.2.2 Béton et l'acier

Afin de limiter la dispersion des résultats l'ensemble des poutres est issue de la même gâchée. La résistance en compression du béton à 28 jours établie, conformément à la norme ASTM C39-96, sur la base de 3 corps d'épreuves est de 28 MPa. Les résultats de ces essais donnent une résistance à la compression variant entre 26 et 31 MPa. L'acier employé est de nuance 500.

2.3 Résultats et Interprétation

2.3.1 Influence du nombre de couches de renfort sur le gain en rigidité et en résistance

Série A : Le comportement charge/temps des poutres préchargées à 40% de leur charge ultime puis chargées jusqu'à la rupture présenté dans la figure 3 montre l'influence du nombre de couches du tissu bidirectionnel en fibres de verre E sur le comportement structural des poutres confinées, comparé à celui du béton de contrôle (témoin) sollicitées en flexion 4-points jusqu'à la rupture. Le comportement des poutres préchargées puis réparées sont similaires à celles des poutres témoins. La réhabilitation des poutres à l'aide des matériaux composites en forme de U (EP_40%_2plis_STV1 et EP_40%_3plis_STV1) a rénové la capacité portante, cependant cette amélioration reste environs 14 et 10% respectivement plus faibles qu'une poutre témoin ayant été sollicitée dans les mêmes conditions.

Série B : l'analyse des résultats des poutres réhabilitées par la nouvelle technique SCR (EP1_STV2 et EP2_STV2) a permis une augmentation de la capacité de charge de 10% comparativement à une poutre en béton armé saine. Ce système de réhabilitation en cisaillement est donc plus efficace que le renforcement en forme de U en assurant une meilleure performance en termes de charge et de ductilités (Fig. 3).

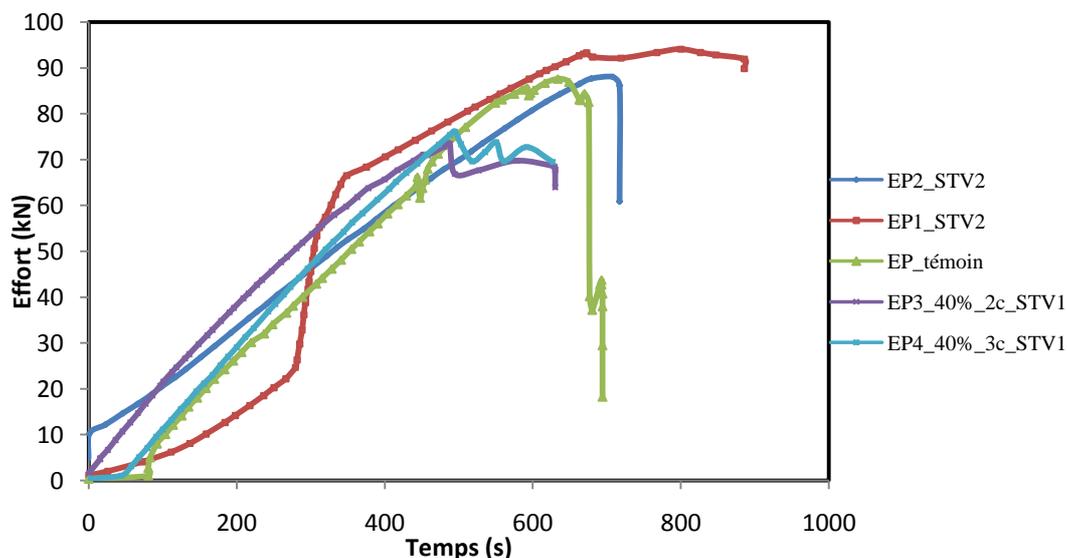


Figure 3 : Courbes charge / temps des poutres préchargées à 40%, réparées en forme de U (EP3_40%2c_STV1 et EP4_40%2c_STV1) et par SCR.(EP1_STV2 et EP2_STV2)

Le tableau 2 présente les charges atteintes à la rupture, l'utilisation du composite, le gain ou perte de la capacité portante en raison du PRFV, définie comme $[1 - (\text{charge après réparation} / \text{charge du béton témoin})] * 100\%$. Les éprouvettes réhabilitées avec du composite en forme de U par deux et trois plis utilisent respectivement -5% et +38% de composites par rapport à la nouvelle méthode de réparation. Le bilan des tests est donc très positif avec une nette augmentation de la résistance au cisaillement des poutres réhabilitées par la méthode SCR qui est de l'ordre de 25% et 21 % de plus par rapport à l'utilisation du composite en forme de U respectivement pour deux et trois plis. Donc cette nouvelle technique reste un moyen de renforcement adéquat.

Type de poutres	(U/SCR)*	Type de renforcement	Charge ultime (kN)	Gain ou perte (%)	Mode de rupture
EP_témoin	---	---	85	---	Cisaillement
EP3_40%_2plis_STV1	0,95	Ancrage en U	73,52	-14	Cisaillement+décollement
EP4_40%_3plis_STV1	1,38	Ancrage en U	76,17	-10	Cisaillement+décollement
EP1_STV2 et EP2_STV2	1	Bandes en SCR	94,33	11	Flexion

* Quantité du composite utilisé/composite SCR.

2.3.2 Faciès et modes de rupture des poutres

Série A : La figure 4 illustre que les poutres testées ont été toutes rompues en cisaillement. La rupture en cisaillement se manifestait par une progression d'une large fissure. Toutes les poutres réhabilitées avec du PRFV en U ont subi un décollement (Fig. 4b et 4c). Pour les poutres témoins (EP_témoin) les deux fissures obliques et parallèles reliant la zone d'appui à la zone de chargement augmentent au fur à mesure que la charge augmente, l'angle développé par ces fissures est de l'ordre de 41 degrés (Fig. 4a). Quand aux poutres réhabilitées par deux et trois plis (EP3_40%_2plis_STV1 et EP4_40%_3plis_STV1), les fissures ne peuvent être observées que dans la phase finale où elles se manifestent près de la zone de chargement (zone de compression), elles progressent très vite jusqu'à la rupture finale. Des résultats similaires ont été observés par Bousselham *et al.* [18].

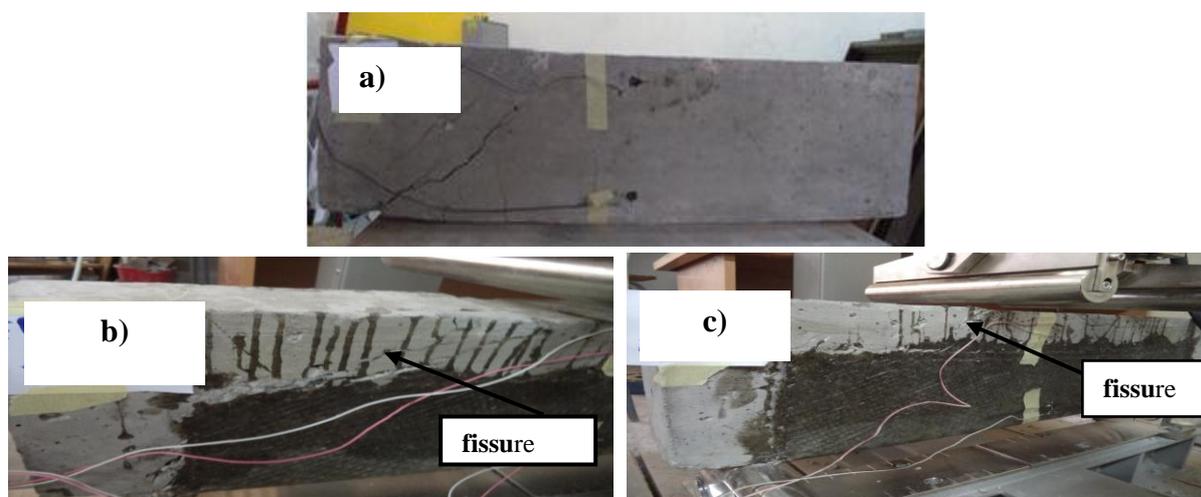


Figure 4 : Modes de rupture : a) EP_témoin; b) EP_40%_2plis_STV1 et EP_40%_3plis_STV1.

Série B : Il convient de mentionner que pour la poutre de la série B (EP1_STV2), la rupture par flexion a eu lieu après avoir empêché la fissure de l'effort tranchant d'apparaître de se développer (Fig. 5). Le composite a donc contribué efficacement à la résistance aux efforts tranchants. Les résultats expérimentaux obtenus des éprouvettes réhabilitées par la méthode SCR ont donc montré une rupture dans le mode souhaité par flexion. Des résultats similaires ont été observés par des chercheurs dans des investigations antérieures sur des poutres en BA renforcées avec des matériaux composites par une autre méthode ETS à l'aide des barres en PRF introduites dans la poutre [12, 13 et 19].

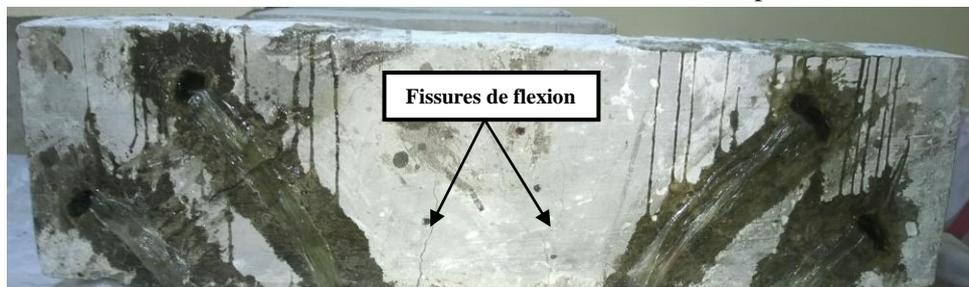


Figure 5 : Mode de rupture de la poutre EP1_STV2.

Par conséquent la réparation des poutres par collage du tissu continu en forme de U ne permet pas de "coudre" les fissures. Ceci s'explique par le fait que dans la série B le composite est sollicité jusqu'à la rupture et que dans la série A on a assisté au décollement du composite.

Le renforcement à l'aide du tissu unidirectionnel par la nouvelle méthode a changé le mode de défaillance d'une rupture par cisaillement fragile à une rupture par flexion. En définitive, la méthode SCR est plus efficace que la méthode EB. Ce nouveau système de renforcement structurel a montré des résultats pleinement satisfaisants.

2.4 Conclusion

Cette étude a porté sur le comportement mécanique en flexion 4-points des poutres, en béton armé réhabilitées par collage d'un tissu bidirectionnel en fibres de verre E (PRFV) appliqué en continu suivant la configuration en U (EB) et par des bandes en tissu de fibres de verre unidirectionnelles (SCR). Un intérêt particulier est porté sur des poutres en béton armé de type profond, présentant de défaut, tel qu'un sous dimensionnement des aciers transversaux. Des matériaux composites sont utilisés pour restaurer et augmenter la capacité portante des poutres à l'effort tranchant. Les principales conclusions sont récapitulées comme suit :

- Le comportement d'une poutre réhabilitée est influencé par plusieurs facteurs, en particulier, la présence des armatures transversales, le taux de renforcement des armatures tendues, la géométrie de la poutre (rapport a/d) et la quantité du composite ;
- On constate que pour les poutres réhabilitées à l'aide du composite en forme de U, les ruptures observées sont principalement provoquées par les fissures d'efforts tranchants, le tissu longitudinal n'améliore quasiment pas la résistance à l'effort tranchant. Un apport en rigidité à travers les poutres renforcées reste insuffisant pour rigidifier les poutres renforcées par 2 et 3 plis.
- La réhabilitation des poutres par la nouvelle technique SCR a permis des augmentations respectivement de l'ordre de 25, 21 et 11% par rapport aux poutres réhabilitées par PRFV en forme de U par deux et trois plis et la poutre en béton témoin. De plus, cette technique a permis aussi de changer le mode de rupture d'une rupture par cisaillement fragile à une rupture par flexion béton en lui conférant une plus grande ductilité. Suite aux résultats obtenus, la technique nouvelle SCR reste un moyen de réhabilitation pleinement satisfaisant.

Références

- [1] N. Attari, S. Amziane, M. Chemrouk, Efficiency of Beam Column joint Strengthened by FRP Laminates, *Advanced Composite Materials*, 19 (2010) 171- 183.
- [2] T. Sen, H.N. Jagannatha Reddy, Efficacy of bio derived jute FRP composite based technique for shear strength retrofitting of reinforced concrete beams and its comparative analysis with carbon and glass FRP shear retrofitting schemes, *Sustainable Cities and Society*, 13 (2014) 105–124.
- [3] O. Chaallal, M. Shahawy, M. Hassan, Performance of reinforced concrete Tgirders strengthened in shear with CFRP fabrics. *ACI Struct. J.* 99, (2002) 335–343.
- [4] MJ. Chajes, T.A. Thomson, TF. Januszka, Jr. Finch, Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials, *Construction and Building Materials* 8 (1994) 191–201.
- [5] C. Diagana, A. Li, B. Gedalia, Y. Delmas, Shear Strengthening Effectiveness with CFRP Strips, *Engineering Structures*, Elsevier, 25 (2003) 507-516.
- [6] Z. Zhang, C. Hsu, J. Moren, Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates, *J. Compos Constr*, 8 (2004) 403–414.
- [7] [DON 13] J Dong, Wang Q, Guan Z. Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural–shear strengthening by FRP sheets, *Composites: Part B*, vol 44, (2013) 604–612,.
- [8] D. Baggio, K. Soudki, M. Noël, Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 634–644.
- [9] A. Mofidi, O. Chaallal, M. ASCE, Shear Strengthening of RC Beams with EB FRP: Influencing Factors and Conceptual Debonding Model, *Composites For Construction*. Asce/January/February, 15 (2011).62–74.
- [10] L. Rizzo, De Lorenzis, Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1555–1567.
- [11] J.A.O. Barros, S.J.E. Dias, Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams, *Cement Concrete. Composite*, 28 (2006).289–94.
- [12] O. Chaallal, A. Mofidi, B. Benmokrane, K. Neale, Embedded Through-Section FRP Rod Method for Shear Strengthening of RC Beams: Performance and Comparison with Existing Techniques. *Composites for Construction, American Society of Civil Engineering (ASCE)*, Vol. 15 (2011b) 374-383
- [13] M. Breveglieri, A. Aprile, J.A.O. Barros, Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars, *Engineering Structures*, 81 (2014) 76–87
- [14] American Society for testing and Materials, Annual book of ASTM standards, *ASTM Publications, Danvers, USA*, 2004
- [15] M. Boumaaza, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, N. Zanache, S. Amziane, F. Scarpa, Renforcement de poutres fissurées et non fissurées en béton armé par collage de matériaux composites, *Congrès Matériaux 2014, Montpellier, France*, 2014
- [16] H. Bouchelaghem, A. Bezazi, F. Scarpa, Compressive behaviour of concrete cylindrical FRP-confined columns subjected to a new sequential loading technique, *Composites: Part B*, 42 (2011) 1987–1993
- [17] H. Bouchelaghem, A. Bezazi, F. Scarpa, Strength of concrete columns externally wrapped with composites under compressive static loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30 (2011) 1671–1688
- [18] A. Bousselham, O. Challal, Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP, *Composites Part B: Engineering*, 37 (2006) 37-46

- [19] A. Mofidi, O. Chaallal, Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8, No.2, (2014) 117–128.