

Modèle d'optimisation du volume des plaques en HFRP par MEF dans les structures renforcées en béton armé

Z. SEREIR^a, M. L. BENNEGADI^a, S. AMZIANE^b

- a. Laboratoire Structures de Composites et Matériaux Innovants, Faculté de Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie.
b. Polytech Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal – Campus des Cézeaux, 24, Avenue des Landais - BP 20206 – 63174, Aubière Cedex, France.

Résumé :

Par la présente étude, un modèle numérique par éléments finis sous ANSYS a été développé pour l'optimisation du renforcement externe, par plaque en polymères renforcés de fibres hybride HFRP, des poutres en béton armé. Pour atteindre cet objectif, des éléments finis (EF) en 3D adaptés à la non-linéarité du matériau et de la géométrie a été développé pour étudier le comportement des poutres en béton avec et sans renforcement. Pour validation, les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus expérimentalement, où une bonne concordance a été observée (courbes charge/flèche et charge/déformation à mi-portée de la poutre en flexion). Par la suite, une étude paramétrique a été effectuée pour évaluer les effets simultanés de l'épaisseur et de la longueur de la plaque FRP sur le comportement de la poutre. Afin d'avoir d'alléger a structure renforcée (réduire le volume), une optimisation a été faite dans le but d'optimiser le volume de la plaque HFRP prévue pour le renforcement. La fonction objective qui le volume du patch est conditionnée par les variables de conception géométriques (l'épaisseur et de la longueur de la plaque HFRP) ainsi que les variables d'état (les contraintes d'interface normales et de cisaillement au bord du renfort).

Abstract :

In this study, a numerical model by the commercial software ANSYS has been developed for the optimization of the external reinforcement of concrete beams by Hybrid Fiber Reinforced Polymer (HFRP) plate. To achieve this aim, a 3D nonlinear Finite-Element (FE) model is developed to study the behavior of concrete beams and plates with and without external reinforcement by HFRP. Calibration and validation of the obtained results is compared to those given experimentally for different conditions from research. Comparisons made for load-deflection and load-strain curves at mid-span show a good agreement between numerical and experimental results. Parametric study is made to evaluate both effects of thickness and length of the HFRP plate on the retrofitted beam. Next, our model is used to optimize the volume of the HFRP plate which is bonded externally to the concrete beam. The parameters relate for optimization are the design geometric variables (the thickness and the length of the HFRP plate) and state variables (the interface constraints to normal and shear at edge of the reinforcement).

Mots clefs: Optimisation, modèle EF, FRP, béton armé, contrainte d'interface

1 Introduction

L'utilisation de polymères renforcés de fibres (FRP) en tant que dispositifs de renforcement pour les poutres en béton armé sollicitées en flexion peut engendrer une augmentation remarquable de la capacité portante et la rigidité de la structure renforcée, comme en témoigne de nombreux travaux théoriques et expérimentaux publiés dans ces dernières décennies. De nombreux auteurs ont étudié les propriétés mécaniques fondamentales des composites développés pour l'application des FRP comme renfort structurel des bâtiments et des ponts en béton où ces propriétés ont été jugées généralement acceptables à partir de tests de laboratoire. Le processus de l'introduction de ces matériaux a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier.

Toutefois, l'utilisation de la réhabilitation par matériaux composites des structures en béton par collage extérieur du renfort (EBR : external bonded reinforcement) peut poser quelques problèmes dues à la nature fragile du mode de défaillance locale de la poutre renforcée produite par le décollement de la plaque en composite et la poutre [1,2]. L'interruption brutale du rendement de la plaque peut se traduire par une forte

concentration des contraintes normales et de cisaillement qui provoquent le décollement de la plaque en FRP vers le centre de la poutre [3,4]. Le décollement se produit soudainement et de manière fragile et se produit généralement par délaminage de l'enrobage, car il est moins résistant que la plaque en FRP et l'adhésif. Par conséquent, le comportement à la rupture des poutres en béton renforcées est fortement dépendant du transfert des contraintes d'adhérence entre la plaque et la poutre.

Afin de cerner ce problème, on a présenté une simulation numérique du comportement structurel global des poutres renforcées par plaque en HFRP vis-à-vis des sollicitations de flexion, tout en indiquant les paramètres gouvernant l'efficacité et l'optimisation du volume du renfort. En premier temps, on a tenté d'établir un modèle numérique qui reproduit les principaux résultats d'une étude expérimentale réalisés sur des poutres en béton armé (BA) renforcées par la technique EBR [5,6], soumises aux sollicitations en flexion. Notre modèle par éléments finis (EF) sous environnement ANSYS, nous a donné une bonne concordance avec les résultats de N. Attari, concernant les réponses charges-déplacements. Cette modélisation nous a permis aussi de déterminer les contraintes d'interface (normales et de cisaillement) aux extrémités de la plaque HFRP. Pour obtenir un volume optimal de la plaque HFRP, deux méthodes d'optimisation sont proposées (méthode d'approximation d'ordre zéro et la méthode du premier ordre). Pour parfaire cette optimisation, trois types de variables qui caractérisent le processus de conception doivent être mises en valeur; il s'agit des variables de conception (variables géométriques), des variables d'état (contraintes ultimes) et la fonction objective (Volume de la plaque HFRP). Sous ANSYS ces variables sont représentées par des scalaires, où les variables de conception sont la longueur et l'épaisseur de la plaque HFRP et les variables d'état sont les valeurs ultimes des contraintes d'interface normales et de cisaillement.

2 Validation du modèle numérique

2.1 Modèle par éléments finis

Avant d'établir l'optimisation du volume de la plaque HFRP, il est nécessaire de développer un modèle numérique de la poutre en béton renforcée par plaque en FRP et le valider par des essais expérimentaux, afin de vérifier la qualité des résultats obtenus. Dans la littérature [1-5], plusieurs tests expérimentaux ont été largement utilisés comme un moyen d'analyse des éléments structuraux et les effets de la résistance du béton sous différents types chargements. Bien que ce soit une méthode qui donne une réponse réelle des états de services de la structure, l'utilisation de l'approche expérimentale est avéré très coûteuse qui demande extrêmement de temps et de matière première. A l'apparition des logicielles modernes par EF, la modélisation de ces éléments structuraux est devenue beaucoup plus rapide et très rentable. Dans la présente étude, l'élément Solid65 a été utilisé pour modéliser le béton selon un comportement multilinéaire [7]. Élément Solid45 a été utilisé pour modéliser la plaque HFRP ainsi que les plaques d'acier considérées comme des appuis en se servant d'une loi isotrope linéaire [8]. Puisque le béton est un matériau quasi fragile et il a un comportement très différent en compression et en traction [7,9]. Les résultats des rapports entre la compression ultime du béton, la contrainte de traction f_r et le module d'élasticité du béton (E_c) sont présentées ci-dessous [10,11] et leurs valeurs sont données dans le tableau. 1 [5,6].

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$f_r = 0.632\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

avec

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad ; \quad f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 2 \frac{f'_c}{E_c}$$

Tableau. 1 – Propriétés mécaniques du béton

Module de Young E_c (MPa)	Coefficient de Poisson ν_c	Contrainte Ultime de traction f_r (MPa)	Contrainte Ultime de Compression f'_c (MPa)
29 545	0,2	3,95	39,1

L'élément Link8 a été utilisé pour discrétiser l'armature en acier à comportement parfaitement élasto-plastique (tableau. 2). La plaque HFRP est modélisée par l'élément Solid45 avec un comportement élastique et dans le but de calibrer notre modèle, seul le module d'élasticité équivalent qui est donnée par Attari [5,6] (tableau. 3).

Tableau. 2 – Propriétés mécaniques des barres d'acier

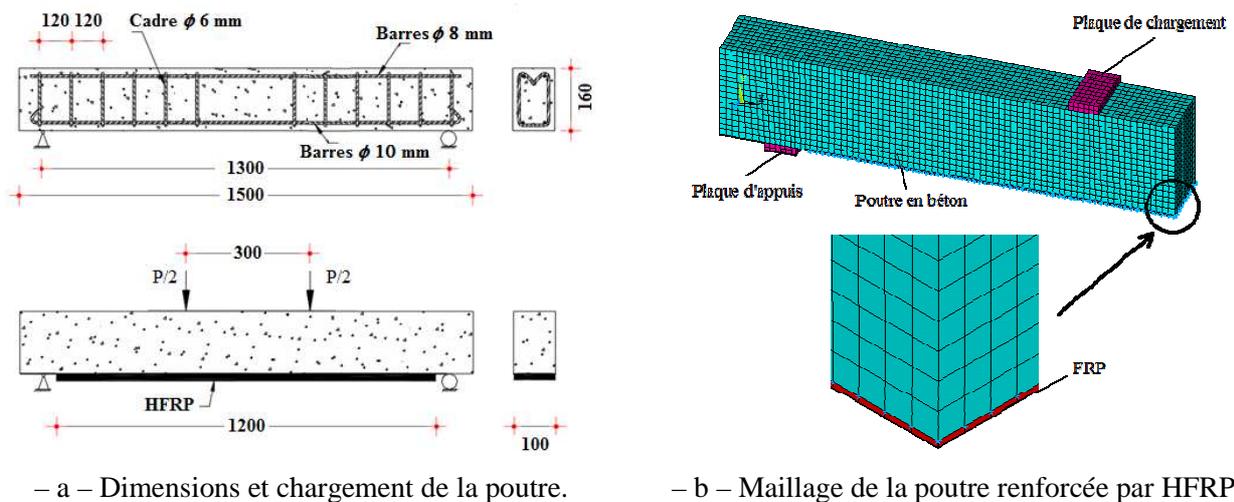
Module de Young E_s (MPa)	Coefficient de Poisson ν_s	Limite élastique (MPa)	Module Tangent
200 000	0,3	550	0

Tableau. 3 – Propriétés mécaniques de la plaque HFRP

Module de Young E_{HFRP} (MPa)	Coefficient de Poisson ν_{HFRP}	Limite élastique (MPa)	Module Tangent
27 000	0,24	218	0

2.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Par la présente étude, un total de deux modèles EF sont développées et les solutions numériques ont été mis en corrélation avec les résultats expérimentaux de Attari. [5,6]. Les caractéristiques géométriques, les propriétés mécaniques ainsi que les conditions de limites et de chargement sont similaires aux échantillons de l'approche expérimentale (poutre simplement appuyée en flexion quatre points (figure.1.a)). En raison de la symétrie géométrique, de charges et des conditions aux limites, seulement une demi-longueur de la poutre est modélisée. Le maillage du modèle par FE a été généré automatiquement tout en donnant la taille des éléments selon le modèle discret aboutissant à une compatibilité des éléments béton et aciers (figure. 1.b).



– a – Dimensions et chargement de la poutre.

– b – Maillage de la poutre renforcée par HFRP.

FIG. 1 – Détails des échantillons poutres.

A la figure 2, le déplacement et la déformation à mi porté des deux poutres témoin et renforcée sont présentés en fonction du chargement imposé. Dans la figure. 2.a, les deux courbes charge/déplacement épousent la même forme avec un léger décalage par rapport à la poutre témoin. Le modèle numérique simule seulement la partie de durcissement, avec une courbe croissante jusqu'à le point de la charge ultime, par contre la courbe expérimentale continue jusqu'à le point de rupture totale. Une lecture des résultats numériques, nous montre que la charge ultime est estimée à 34.57 kN pour un déplacement ultime à mi-porté de 19.49 mm. En présence du renforcement, cette charge ultime augmente pour atteindre 56.57 kN pour un déplacement ultime de 10.31 mm. A la figure 2.b, les courbes charge/déformation issues des résultats expérimentaux et numériques de la poutre témoin et la poutre renforcée sont représentées. Il est notable que les déformations deviennent plus importantes en présence du renforcement. Ceci est traduit par le fait que l'on peut en déduire que plus la déformation du composite est grande, plus on obtient une meilleure ductilité.

De ces deux figures 2.a et 2.b, nous concluons que toutes les courbes de l'analyse par EF sont un bon accord avec les résultats expérimentaux. De plus, les poutres du modèle EF sont plus rigides que la poutre testé au

laboratoire, cela est dû aux considérations de la parfaite adhérence (pas de glissement ou des micros cavités) entre le béton et l'armature en acier.

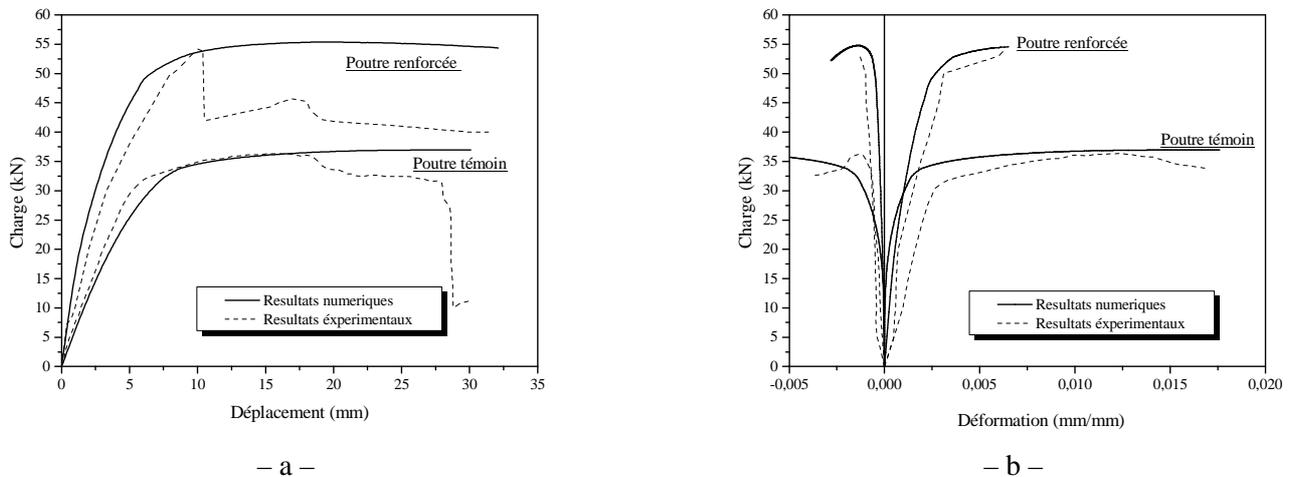


FIG. 2 – Comparaison des résultats numériques et expérimentaux à mi-portée de la poutre avec et sans patch
 – a – Déplacement – b – Déformation

Pour une meilleure estimation du volume de la plaque FRP, il est nécessaire d'évaluer les paramètres influents du point de vue comportement globale et locale de la poutre renforcée. De nombreux travaux ont été publiés dans ce sens, où ils ont remarqué une très grande sensibilité de la qualité de renforcement, aux paramètres géométriques et mécaniques des constituants de la structure renforcée.

Aux figures 3.a et 3.b, la contrainte normale et la contrainte de cisaillement ont été respectivement évaluée en fonction de la charge appliquée pour une variation graduelle de la longueur de la plaque HFRP ($L_{\text{HFRP}} = 600, 900$ et 1200 mm). Il est notable que la variation de la longueur de la plaque HFRP a un effet significatif sur les valeurs des deux contraintes surtout avec l'augmentation de la charge appliquée.

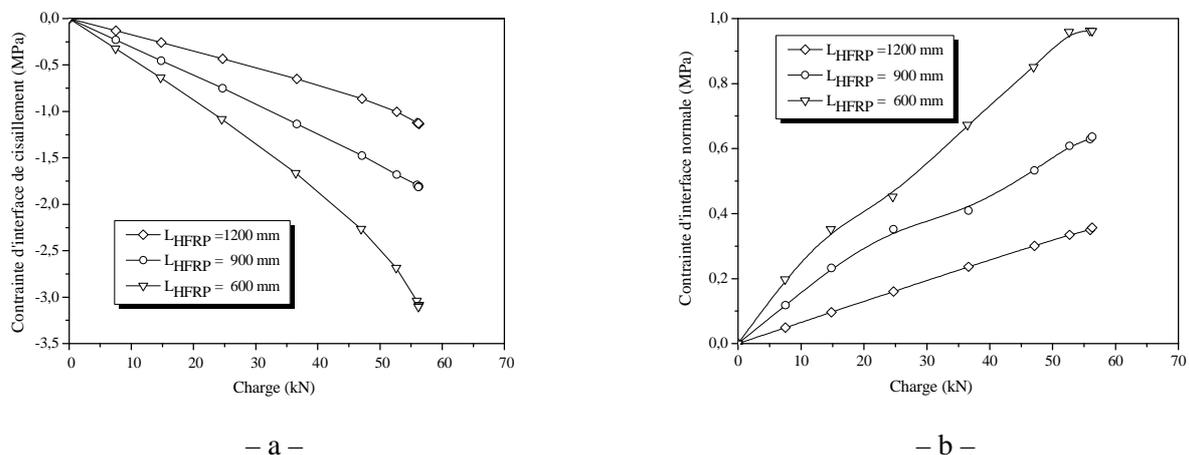


FIG. 3 – Contraintes d'interfaces au bord de la plaque en HFRP selon la charge
 – a – Contrainte de cisaillement – b – Contrainte normale

3 Optimisation de la géométrie de la plaque FRP

L'approche traditionnelle d'optimisation des structures est basée sur la minimisation du poids de la structure. Mais de nos jours, les méthodes numériques d'optimisation sont devenues un outil fiable pour la conception des structures complexes (géométrie, comportement mécanique, etc.). Les diverses méthodes d'optimisation proposées dans la littérature [12-15] nous permettent de trouver la forme optimale de la structure à faible coût à des conditions de service appropriés. Le concept de l'optimisation est basé sur les formulations et la modélisation paramétrique de la fonction objective, qui peut être le poids, la surface, le volume, les

contraintes, le coût, ou d'autres facteurs. Dans le présent modèle, les fondements de la technique d'optimisation sont présentées et illustrées dans le contexte de renforcement de structure.

Pour les deux méthodes d'optimisation utilisée par ANSYS (la méthode d'approximation d'ordre zéro et la méthode du premier ordre [13]), il est indispensable d'introduire les trois variables caractérisant le processus d'optimisation, qui sont les variables de conception (DV), les variables d'état (SV) et la fonction objective (OBJ) de la forme :

minimiser

$$\text{Fonction Objective (OBJ) :} \quad f = f(x) = L_{HFRP} \cdot b_{HFRP} \cdot e_{HFRP} \quad (3)$$

objet :

$$\text{Variables d'état (SV) :} \quad g_i \leq g_i(x) \leq \bar{g}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m_1 \quad (4)$$

$$\text{avec } g_i(x) = (U_y, \sigma_y, \tau_{xy})^T$$

$$\text{Variables de conception (DV) :} \quad w_i \leq w_i(x) \leq \bar{w}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m_2 \quad (5)$$

$$\text{avec } w_i(x) = (L_{HFRP}, e_{HFRP})^T$$

où: m_1, m_2 : nombre de variables d'état et de conception.

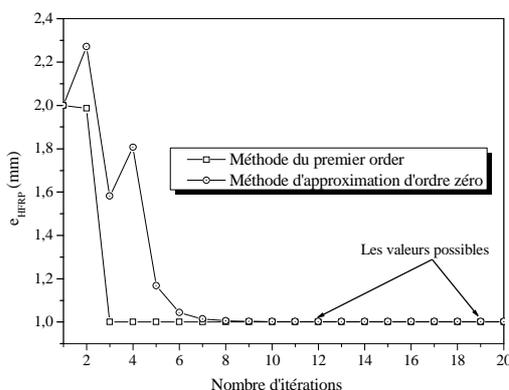
Afin de minimiser le volume, il est nécessaire de respecter les conditions imposées par les variables d'Etat: déplacement à mi-portée de la poutre, la contrainte normale et la contrainte de cisaillement aux bords de la plaque HFRP (tableau. 4). Ces paramètres sont évalués en fonction des limites supérieures et inférieures des variables de conception (la longueur L_{HFRP} et l'épaisseur e_{HFRP} de la plaque FRP) donnés dans le tableau 5.

Tableau. 4 – Les limites supérieures et inférieures des variables d'état

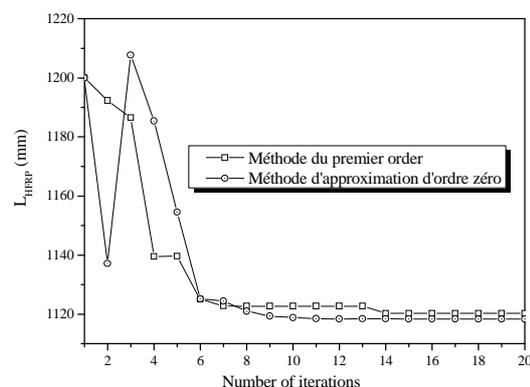
U_y (mm)		σ_y (MPa)		τ_{xy} (MPa)	
$U_{y \min}$	$U_{y \max}$	$\sigma_{y \min}$	$\sigma_{y \max}$	$\tau_{xy \min}$	$\tau_{xy \max}$
32.0	35.0	0.2	0.7	-0.8	-1.2

Tableau. 5 – Les limites supérieures et inférieures des variables de conception

L_{HFRP} (mm)		e_{HFRP} (mm)	
L_{\min}	L_{\max}	e_{\min}	e_{\max}
1100	1300	1.0	2.5



– a –



– b –

FIG. 4 – Evolution des paramètres géométrique de la plaque FRP en fonction du nombre d'itérations
– a – L'épaisseur – b – La longueur

La figure 4 montre l'évolution de la longueur et de l'épaisseur optimales de plaque HFRP en fonction du nombre d'itérations et cela pour la méthode d'approximation d'ordre zéro et la méthode du premier ordre. De

cette figure, on distingue trois zones. La première zone qui est située entre la première et la deuxième itération, est caractérisée par des valeurs relativement élevées, proches des valeurs initiales de la longueur et de l'épaisseur ($L_{\text{HFRP}} = 1200$ mm, $e_{\text{HFRP}} = 2.0$ mm). Par la suite, la zone d'incertitude (située entre la 3^{ème} et 10^{ème} itération pour la méthode d'approximation d'ordre zéro et entre la 3^{ème} et 14^{ème} itération pour la méthode du premier d'ordre). Finalement, la zone faisable dans laquelle on a des valeurs stables. Une réduction significative de l'épaisseur de plaque en HFRP est remarquée, initialement de 2 mm à 1.01 mm (Figure. 4.a). Cette réduction est significative est presque de 50%. Par contre, la longueur de la plaque a subit une réduction moins importante (de 1200 mm à 1120 mm), avec un rapport de réduction qui ne dépasse pas 6.7% (Figure. 4.b). Pour avoir une conception optimale, il est donc souhaitable de réduire l'épaisseur, car elle n'a pas un grand effet sur la concentration des contraintes sur les bords de la plaque en FRP.

4 Conclusion

Le comportement général du modèle par éléments finis montre un bon accord avec l'approche expérimentale. La présence du renfort HFRP modifié considérablement la réponse en flexion de la structure comparativement à la poutre témoin (sans renfort). L'optimisation de la plaque FRP conduit à une réduction importante du volume totale de la structure (poutre + renfort). Afin d'avoir un poids approprié et un renforcement acceptable (en volume), la longueur et l'épaisseur de la plaque en composite sont respectivement réduites de 6.7% et 50%. Donc, on peut conclure que le facteur le plus important à minimiser est l'épaisseur de la plaque HFRP. Il n'est donc pas souhaitable de réduire de manière significative la longueur, pour ne pas créer une forte concentration des contraintes aux bords de la plaque en HFRP et ainsi éviter un décollement à l'interface. L'optimisation de la plaque HFRP est très importante car elle nous permet d'avoir la forme optimale de la plaque de renfort à faible coût qui satisfait les conditions de service appropriées.

Références

- [1] Saadatmanesh H., Ehsani MR., RC beams strengthened with GFRP plates. I. Experimental study, *J Struct Eng* 1991; 117(11):3417–33.
- [2] Arduini M., Nanni A., Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets, *J Compos Construct*, ASCE 1997; 1(2):63–70.
- [3] Triantafillou T.C., Deskovic N., Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior, *J Eng Mech*, ASCE 1991; 117(7):1652–72.
- [4] Malek AM., Saadatmanesh H., Ehsani MR., Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, *ACI Struct J*, 1998; 95(1):142–52.
- [5] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M., Efficiency of Beam-Column Joint Strengthened by FRP Laminates, *Advanced Composite Materials*, Volume 19, Number 2, 2010, pp. 171-183(13).
- [6] Attari N. Réhabilitation et Renforcement des Poutres et Nœuds en Béton Armé par des Matériaux Composites, Thèse de Doctorat, Thèse soutenue le : 09/07/ 2010, Université de Bretagne Sud, France.
- [7] Kachlakev, D. and T. Miller, FE Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Final Report SPR 316, Oregon State University, Department of Transportation, May 2001.
- [8] Hu H. T., Lin F. M. and Jan Y. Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, *Composite Structures* 63, 2004, 271–281
- [9] Mac Gregor, J.G., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [10] Bangash, M. Y. H., *Numerical Modeling and Applications*, Concrete and Concrete Structures, 1989.
- [11] Hu H.T, Lin F.M, Jan Y.Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, *Composite Structures* 63, 2004, 271–281
- [12] Ait Yala A., Megueni A. Optimization of composite patches repairs with the design of experiments method, *Materials and Design* 30, 2009, 200–205.
- [13] ANSYS. User manual - version 12. Canonsburg, (PA, USA).
- [14] Chen H.C, Yeh M.K. Optimum structural design of composite xylophone bars.16th international conference on composite materials.2007.
- [15] YAN Y. Design of Structure Optimization with APDL, *Journal of East China Jiaotong University*; 2004-04.