

Structures

RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BÉTON ARMÉ PAR PRF ET CHEMISAGE EN BÉTON

REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH FRP AND CONCRETE JACKETING

Rafik MADI, Mohamed GUENFOUD

Laboratoire LGCH, Université 8 mai 45, B.P. 401, Guelma, Algérie
madirafik2000@yahoo.fr, GUE2905M@yahoo.fr

CONTEXTE

De nombreux bâtiments existants ne possèdent pas la résistance suffisante pour assurer la sécurité de leurs occupants, et pourraient sérieusement compromettre leur sécurité. Ils sont caractérisés par des travaux de construction non conformes, tel que l'insuffisance de la résistance des poteaux aux différentes charges appliquées, ce qui nécessite des travaux de renforcement. Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et/ou de la résistance d'un élément de structure pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul.

Les causes principales qui conduisent aux renforcements des éléments structuraux sont aussi nombreuses que le nombre de types de structures. Les plus fréquentes sont : l'accroissement des charges qui sollicitent la structure, les défauts dans la conception ou dans l'exécution, la rénovation parfois malheureuse des structures anciennes, le changement de forme de la structure, les dégâts dans la structure, la nécessité d'améliorer les conditions en ser-

vice, etc. De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter. Parmi les techniques de renforcement, les plus courantes : le chemisage en béton et le confinement par PRF (Photos : 1 et 2).

Les résultats de la présente recherche constituent une aide à la décision des intervenants dans le secteur du bâtiment, surtout les ingénieurs et les techniciens des bureaux d'études, les maîtres d'ouvrages et les pouvoirs publics dans le choix des méthodes de renforcement, en tenant compte du but recherché, à savoir l'augmentation de la résistance, de la ductilité ou des deux simultanément.

1. INTRODUCTION

Le suivi et le contrôle des ouvrages ont mis en évidence soit des erreurs de conception initiales, soit des erreurs de réalisation, soit des vieillissements et endommagements



Photo 1 : Confinement par TFC.

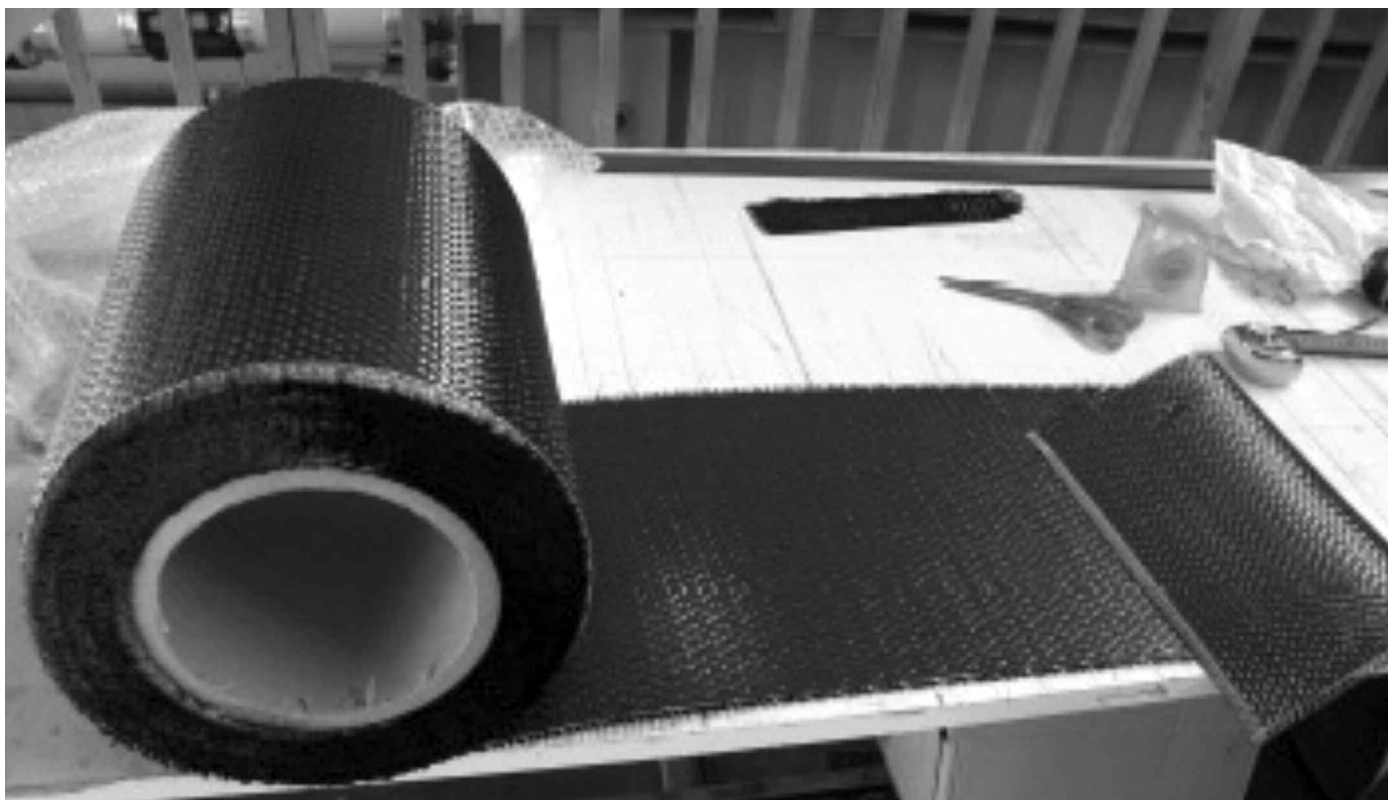


Photo 2 : Tissu en fibres de carbone.

évolutifs [1] qui donnent des structures incapables de répondre aux exigences voulues en terme de résistance, rigidité et ductilité. Ces anomalies nécessitent des méthodes de réparation ou de renforcement qui constituent assurément l'un des problèmes que rencontre actuel-

lement le domaine de la construction. Avant de s'engager dans la réhabilitation de structures présentant des dégradations, il est indispensable de procéder à un diagnostic pour en déterminer les causes. Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement et des matériaux à mettre

en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés en tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies. Les méthodes de réhabilitation des poteaux en béton armé comprennent le gainage métallique [2], le gainage en béton [3] et le confinement en PRF [4, 5 et 6]. L'épaisseur du renfort est pourtant limitée car au-delà de certain nombre de couches la ductilité du renfort se trouve affectée et il sera alors moins performant car moins apte à se déformer pour confiner le béton [7]. Plusieurs chercheurs ont développé, sur la base de modèles physiques ou d'études expérimentales, des formules de dimensionnement de colonnes confinées [8, 9, 10, 11, 12]. Le confinement par PRF est préféré quand la ductilité est recherchée.

2. MODÈLE POUR BÉTON CONFINÉ PAR PRF

Le modèle proposé de contrainte-déformation pour un béton confiné par PRF dépend des caractéristiques du béton : module d'élasticité E_c , déformation ε_c et résistance

caractéristique $f'_{c0} = f_{c28}$ donné par les expressions suivantes [13, 14], (Figure 1) :

Pour la première partie parabolique ($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t$) :

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f'_{c0}} \varepsilon_c^2 \quad (1)$$

Pour la deuxième partie linéaire ($\varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$) :

$$f_c = f'_{c0} + E_2 \varepsilon_c \quad (2)$$

La première partie parabolique rencontre la deuxième partie linéaire à un point de transition dont la déformation ε_t est donnée par :

$$\varepsilon_t = \frac{2 f'_{c0}}{E_c - E_2} \quad (3)$$

Le module E_2 représente la pente de la seconde partie linéaire. Il est donné par :

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{c0}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

La déformation axiale ultime ε_{cc} est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1,92 + 24,45 \frac{f_l}{f'_{c0}} \quad (5)$$

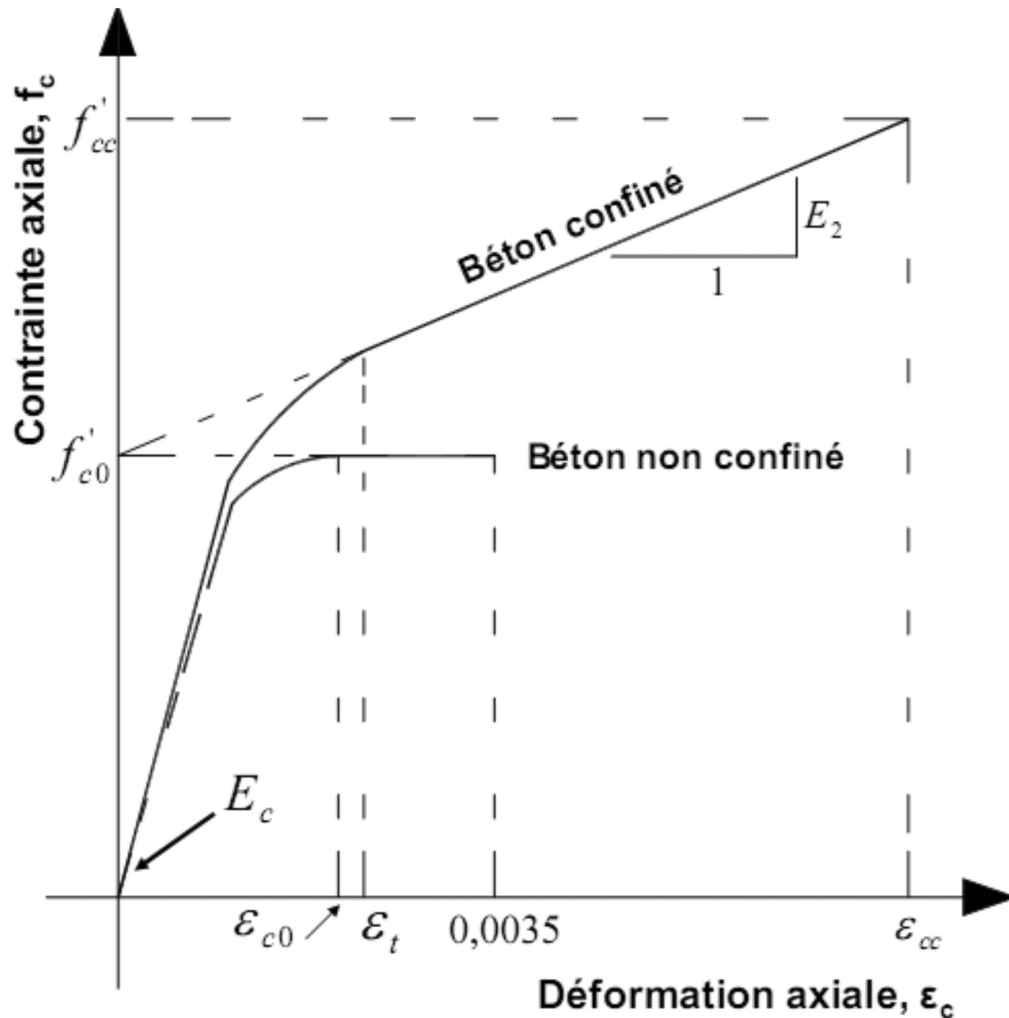


Figure 1 : Relation contrainte-déformation pour un béton confiné par PRF.

3. DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE D'UNE COLONNE CONFINÉE PAR PRF

L'effet du confinement est d'augmenter la résistance à la compression et la déformation ultime du béton. La résistance à la rupture (coefficient de sécurité égal à 1) d'une colonne renforcée uniquement par des armatures N_u est définie par :

$$N_u = N_{cu} + N_{su} \quad (6)$$

$$N_{su} = f'_s A_s = f'_{y,s} A_s \quad (7)$$

avec N_{cu} : charge reprise par la section du béton, N_{su} : charge reprise par l'armature verticale, $f'_{y,s}$: limite d'élasticité de l'armature verticale, f'_s : résistance à la compression de l'armature verticale ($f'_s \leq f_{sy}$), A_s : section totale des armatures longitudinales, et A_c : section brute du béton.

Pour un béton non confiné :

$$N_{cu} = (0,85 f'_{c0}) A_c = (0,85 f'_{c0}) b h \quad (8)$$

La capacité portante de la colonne non confinée N_u est :

$$N_u = 0,85 f'_{c0} A_c + f'_{y,s} A_s \quad (9)$$

$$f_l = \frac{2 f_{prf} t_{prf}}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (10)$$

La résistance du béton confiné est :

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 k_s f_l \quad (11)$$

Pour un poteau rectangulaire, les facteurs de formes k_1 et k_s sont donnés par:

$$k_1 = 2 \text{ et } k_s = \frac{b A_e}{h A_c} \quad (12)$$

avec :

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[(b/h)(b - 2R_c)^2 + (h/b)(h - 2R_c)^2 \right] / (3 A_g) - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (13)$$

$$A_g = b h - (4 - \pi) R_c^2 \quad (14)$$

$$\rho_{sc} = \frac{A_l}{b h} \quad (15)$$

où A_g : Aire de l'ensemble des surfaces délimitées par le confinement en PRF, A_e : surface de la zone de béton qui est influencée par le renforcement externe en PRF, R_c : rayon de congé et A_l : Section totale des armatures longitudinales.

3.1. Poteau rectangulaire

Lorsque une colonne confinée par PRF (figure 2) est soumise à un effort axial, le béton s'étend latéralement et cette expansion est limitée par le PRF (Figure 3). La contrainte latérale de confinement f_l en fonction de la limite d'élasticité f_{prf} et de l'épaisseur t_{prf} du matériau composite est définie par :

3.2. Calcul de la capacité de la colonne confinée

La contrainte dans la zone comprimée du béton peut être déterminée par les contraintes de chacune des trois zones d'influence : Le béton, l'armature transversale et le PRF. Comme la surface d'influence des étriers diverge très peu de celle du renforcement en PRF, elle n'est généralement pas prise en compte séparément pour le calcul de la résistance.

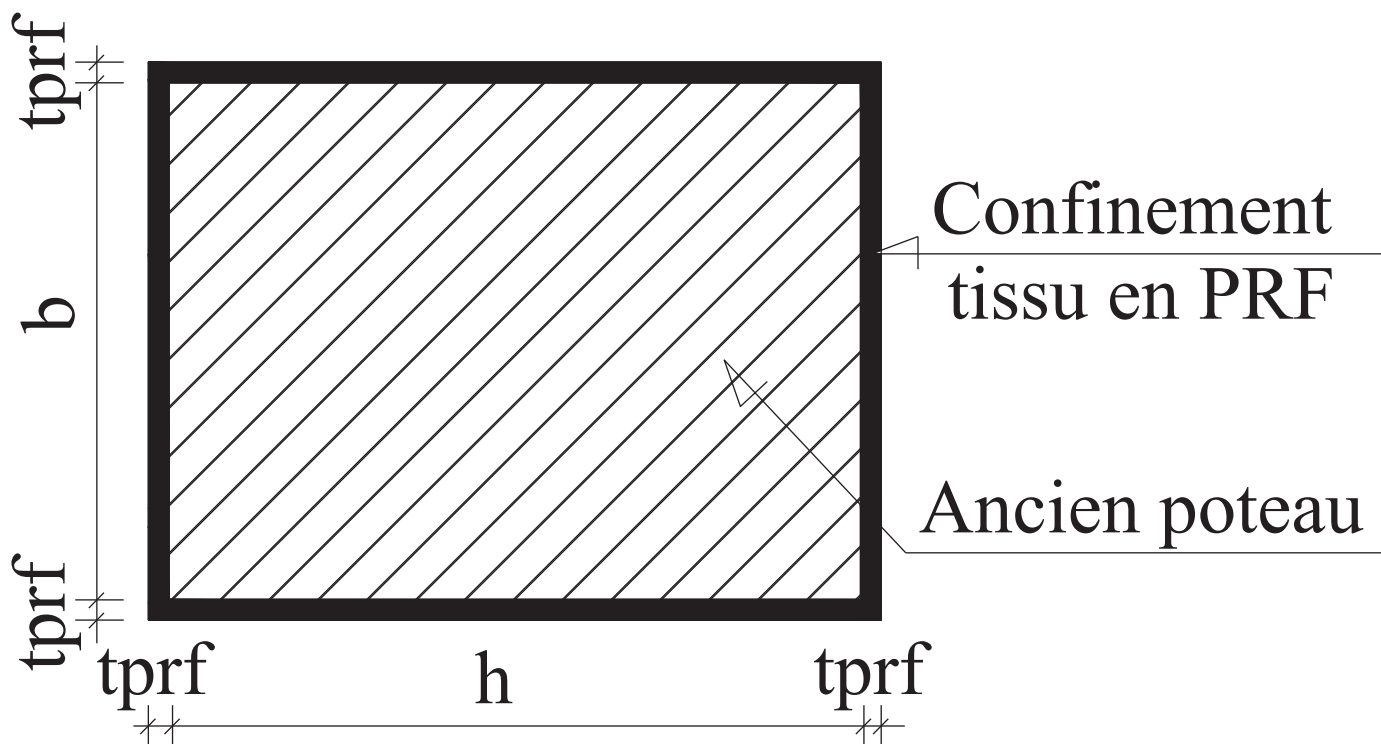


Figure 2 : Confinement par PRF.

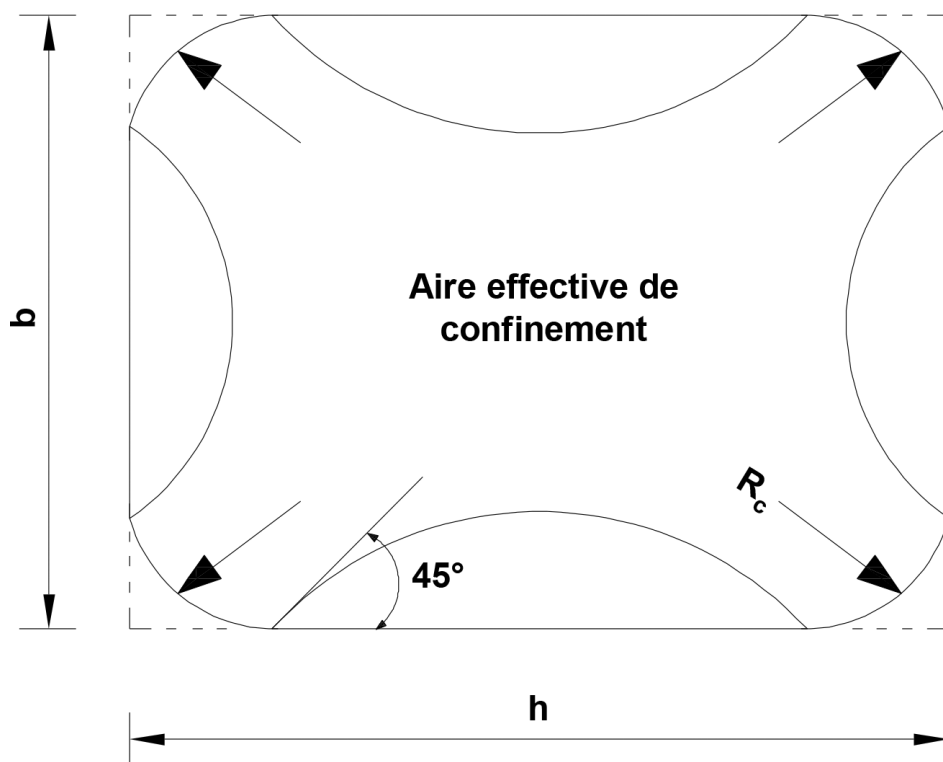


Figure 3 : Action du confinement pour un poteau rectangulaire.

La capacité portante de la colonne confinée par PRF $N_{u,prf}$ est :

$$N_{u,prf} = (0,85 f'_{c0} + k_1 k_s f_l) A_c + f_{y,s} A_s \quad (16)$$

$$N_{u,ch} = (0,85 f'_{c0} A_c + f_{y,s} A_s) + (0,85 f'_{c0,ch} A_{c,ch} + f_{y,s,ch} A_{s,ch}) \quad (17)$$

4. DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE D'UNE COLONNE CHEMISÉE PAR DU BÉTON

Dans ce cas la capacité portante de la colonne chemisée $N_{u,ch}$ est donnée par (figure 4) :

avec $f'_{c0,ch}$: résistance du béton de chemisage à 28 jours, $A_{c,ch}$: section du béton de chemisage, $f_{y,s,ch}$: limite d'élasticité de l'armature verticale de chemisage, et $A_{s,ch}$: section des armatures de chemisage.

$$A_{c,ch} = 2 h_1 B + 2 b_1 h \quad (18)$$

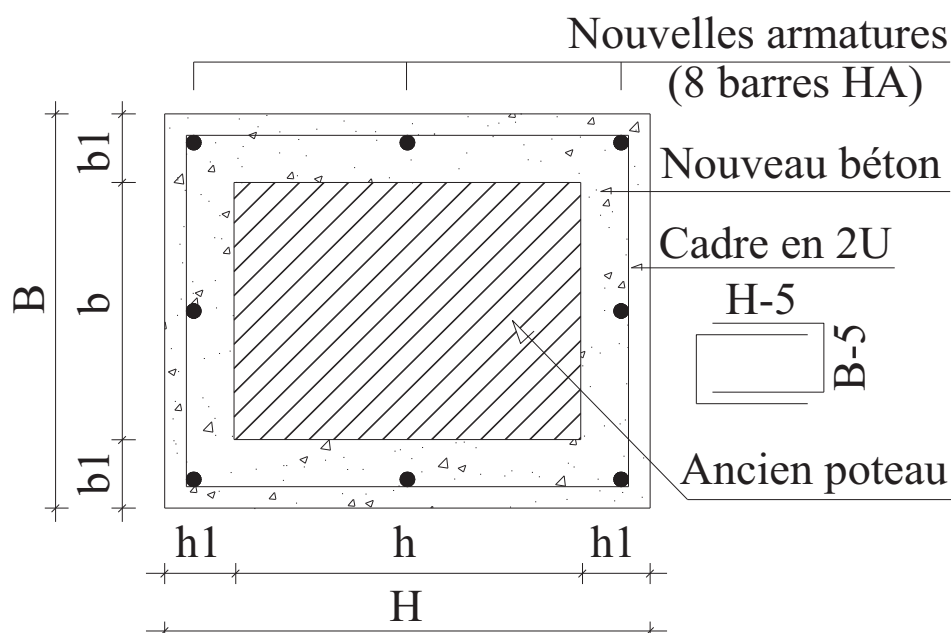


Figure 4 : Chemisage d'un poteau rectangulaire.

5. ÉTUDE D'UN POTEAU DE SECTION RECTANGULAIRE

Pour cette étude nous considérons un poteau rectangulaire de dimensions (30x40) cm armé initialement de 8HA16 (figure 5). Pour le chemisage en béton, le même poteau est armé par 8HA14 supplémentaire (figure 6). Le confinement par tissu en fibre de carbone *TFC* est représenté sur la figure 7. La résistance caractéristique du béton initial et du béton de chemisage est $f'_{c0}=f'_{c28}=25 \text{ MPa}$.

5.1. Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des différents matériaux sont mentionnées sur le tableau 1.

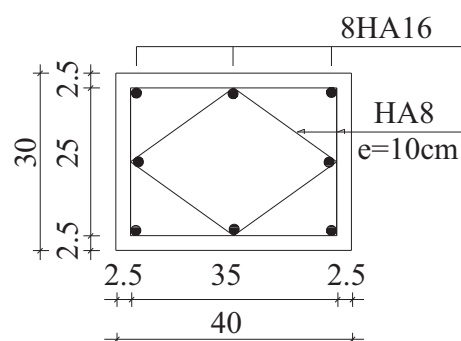


Figure 5 : Section de référence.

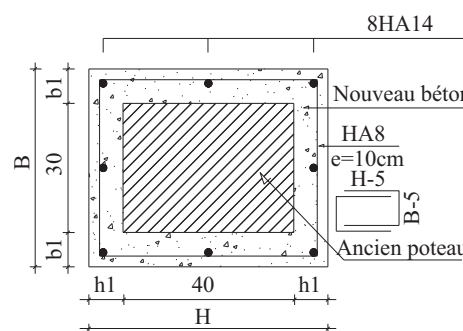


Figure 6 : Section chemisée en béton.

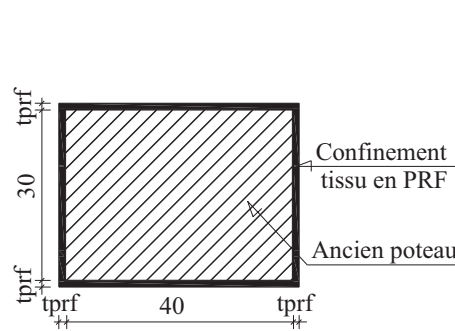


Figure 7 : Confinement par TFC.

Béton	Armature longitudinale FeE400	Armature transversale FeE235	Composite Tissu Sikawrap 230C
$E_c = 32164 \text{ MPa}$ $E_{c,ch} = 32164 \text{ MPa}$ $f'_{c0} = 25 \text{ MPa}$ $f'_{c0,ch} = 25 \text{ MPa}$ $\gamma_c : 2500 \text{ kg/m}^3$	$E_s = E_{s,ch} 200000 \text{ MPa}$ $f_{ys} : f_{ys,ch} : 400 \text{ MPa}$ $A_s = 8HA16 = 16 \text{ cm}^2$ $A_{s,ch} = 8HA14 = 12,32 \text{ cm}^2$	$E_s = 200000 \text{ MPa}$ $f_{ys} = 235 \text{ MPa}$ $A_s = 4HA8 = 2 \text{ cm}^2$	$E_{prf} = 238889 \text{ MPa}$ $\epsilon_{prf,u} = 0,018$ $t_{prf} = 0,13 \text{ mm}$ $f_{prf,u} = 4300 \text{ MPa}$ $\gamma_{prf} = 2000 \text{ kg/m}^3$

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux.

Épaisseur t_{prf} (mm)	f'_{c0} (MPa)	f_l (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	$N_{u,prf}$ (tf)	$\frac{N_{u,prf}}{319}$
0	25,00	0	25	0,0035	319,00	1,00
0,13 (1 couche)	25,00	3,66	28,15	0,011	356,77	1,12
0,26 (2 couches)	25,00	7,32	31,29	0,018	394,54	1,24
0,39 (3 couches)	25,00	10,98	34,44	0,025	432,31	1,35
0,52 (4 couches)	25,00	14,63	37,58	0,032	469,98	1,47
0,65 (5 couches)	25,00	18,29	40,73	0,037	507,75	1,59
0,78 (6 couches)	25,00	21,95	43,88	0,047	545,52	1,71

Tableau 2 : Résistance du béton confiné par PRF.

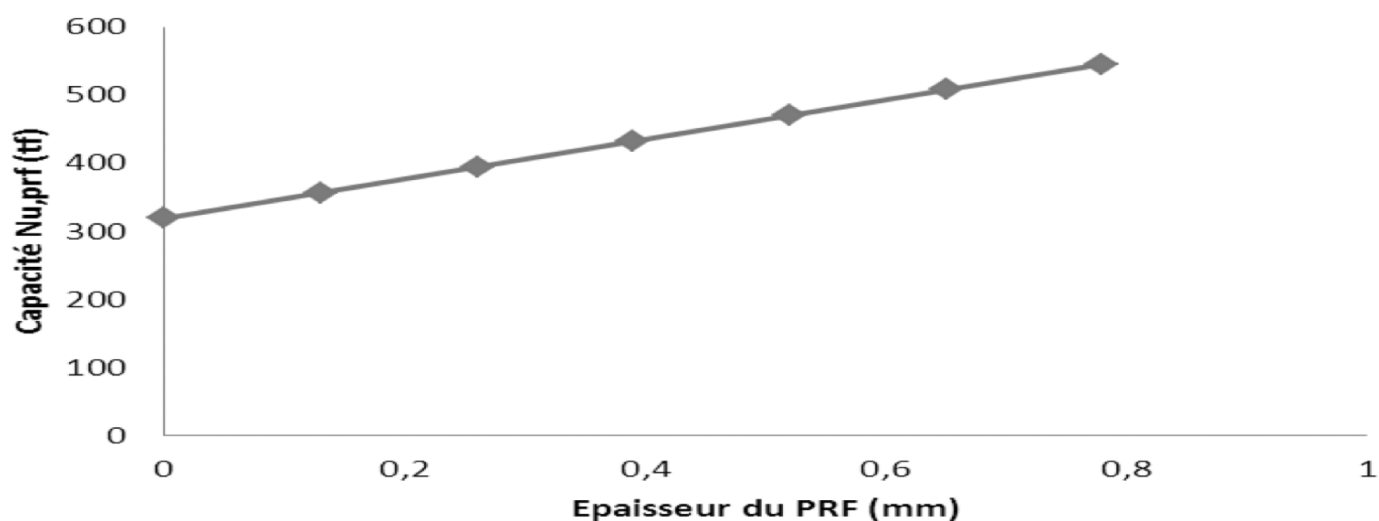


Figure 8 : Relation entre capacité et l'épaisseur du PRF.

Le rapport entre déformations maximales ε_{cc} du béton confiné par PRF et $\varepsilon_c=0,0035$ pour un béton non confiné est mentionné dans le tableau 3. La capacité en déformation augmente avec l'augmentation de l'épaisseur des couches du PRF.

5.2.2. Influence du poids du PRF

Le poids P pour 1 mètre linéaire du poteau et le rapport R entre le poids de l'élément confiné et l'élément initial sont mentionnés dans le tableau 4.

On remarque que l'influence du poids supplémentaire du confinement est négligeable.

5.2.3. Influence du nombre de couches sur la ductilité

Les valeurs des courbures et des moments (courbe moment-courbure idéalisée) : φ_y à la phase élastique, φ_u à la phase ultime et le moment plastique M_p [15] ainsi que la ductilité en courbure μ_φ en fonction de l'épaisseur du TFC sont mentionnées dans le tableau 5.

Épaisseur t_{prf} (mm)	f'_{c0} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ε_{cc}	ε_c	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_c$
0	25,00	25	0,0035	0,0035	1
0,13 (1 couche)	25,00	28,15	0,011	0,0035	3,14
0,26 (2 couches)	25,00	31,29	0,018	0,0035	5,14
0,39 (3 couches)	25,00	34,44	0,025	0,0035	7,14
0,52 (4 couches)	25,00	37,58	0,032	0,0035	9,14
0,65 (5 couches)	25,00	40,73	0,037	0,0035	10,57
0,78 (6 couches)	25,00	43,88	0,047	0,0035	13,43

Tableau 3 : Comparaison des déformations.

Épaisseur t_{prf} (mm)	A_c (m ²)	$A_{prf} \cdot 10^3$ (m ²)	P (kg/m)	$R = \frac{P}{300}$
0	0,12	0	300	1,00
0,13 (1 couche)	0,12	0,18	300,36	1,00
0,26 (2 couches)	0,12	0,36	300,72	1,00
0,39 (3 couches)	0,12	0,55	301,10	1,00
0,52 (4 couches)	0,12	0,73	301,46	1,01
0,65 (5 couches)	0,12	0,91	301,82	1,01
0,78 (6 couches)	0,12	1,1	302,2	1,01

Tableau 4 : Influence du poids du PRF.

Section	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
M, φ	$t_{prf}=0$ (mm)	$t_{prf}=0,13$	$t_{prf}=0,26$	$t_{prf}=0,39$	$t_{prf}=0,52$	$t_{prf}=0,65$	$t_{prf}=0,78$
φ_y (m ⁻¹)	0,0075	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0078	0,0084
φ_u (m ⁻¹)	0,2460	0,2953	0,2866	0,2849	0,2839	0,2831	0,2999
M_p (tf.m)	8,6350	9,2963	9,5317	9,5699	9,6453	9,6854	8,9961
$\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$	32,80	38,35	37,22	37,00	36,87	36,29	35,70
$\mu_\varphi / 32,80$	1.00	1,17	1,13	1,13	1,12	1,11	1,10

Tableau 5 : Moments et courbures des sections.

La ductilité en courbure des sections confinées par *TFC* est supérieure à celle de la section initiale. Elle est presque constante à partir de $t_{prf}=0,52$ mm. Elle diminue avec l'augmentation du nombre des couches. La relation moment-courbure (SAP2000, section Designer), est représentée sur la figure 9. Au-delà de 3 couches le moment ultime est presque constant, ainsi que la ductilité en courbure.

5.3. Calcul de la capacité du poteau chemise par du béton

5.3.1. Calcul de la capacité

La capacité du poteau $N_{u, ch}$ en fonction de l'épaisseur de la chemise est mentionnée dans le tableau 6.

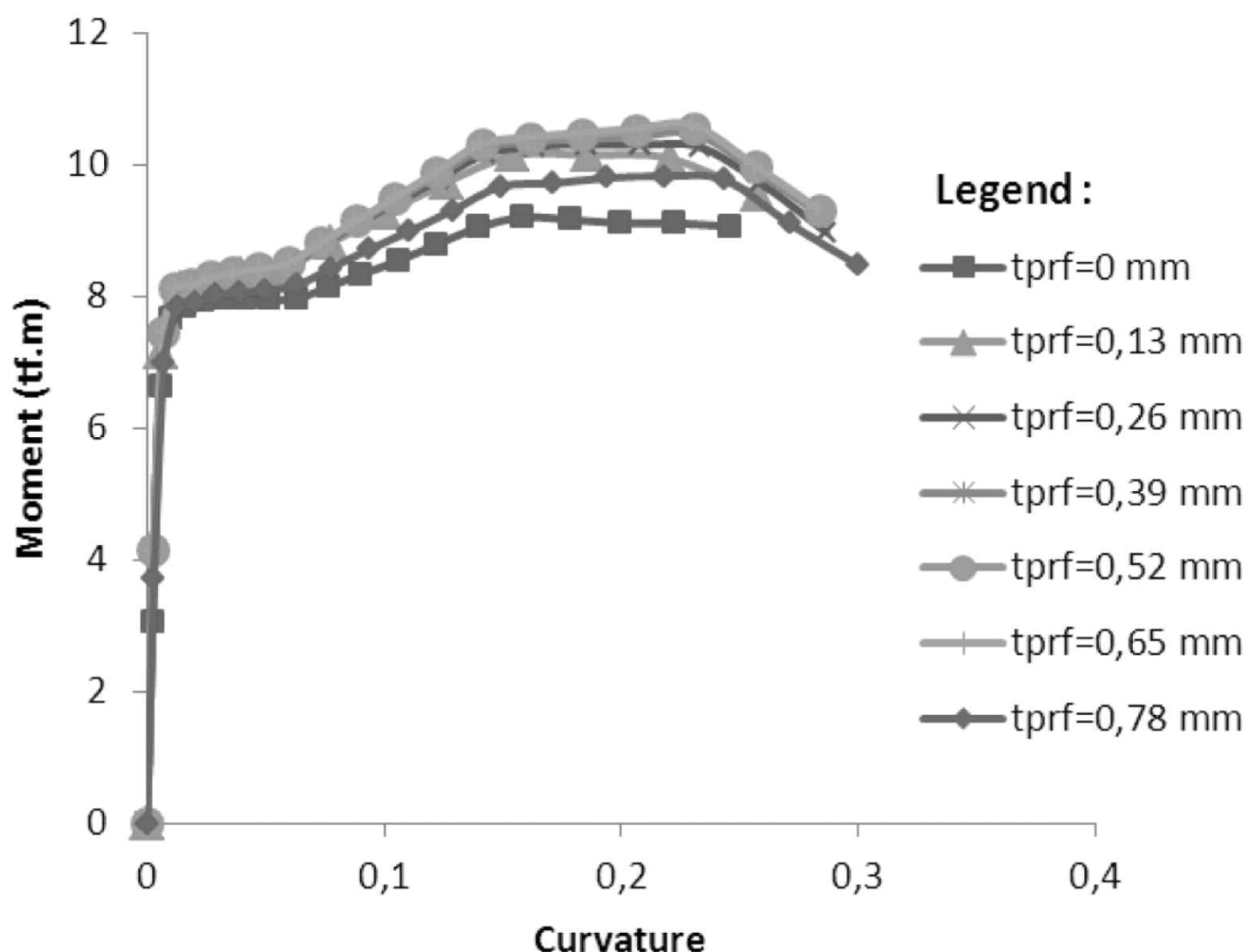


Figure 9 : Relation moment-courbure des sections renforcées par TFC.

$b_1 = h_1$ (cm)	A_s (cm ²)	$A_{s,ch}$ (cm ²)	f'_{c0} (MPa)	$f'_{c0,ch}$ (MPa)	$N_{u,ch}$ (tf)	$\frac{N_{u,ch}}{319}$
0	16	0	25	0	319,00	1,00
7	16	12,32	25	25	618,18	2,06
10	16	12,32	25	25	750,78	2,50
15	16	12,32	25	25	1005,78	3,35
20	16	12,32	25	25	1303,28	4,34
25	16	12,32	25	25	1643,28	5,48
30	16	12,32	25	25	2025,78	6,75
35	16	12,32	25	25	2450,78	8,17
40	16	12,32	25	25	2918,28	9,73

Tableau 6 : Résistance du poteau chemisé par du béton.

La capacité en résistance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du chemisage (figure 10). Une chemise en béton armé correctement exécutée augmente considérablement la résistance. Le ferrailage additionnel doit être longitudinal et transversal. En tête du poteau, il est nécessaire d'avoir une continuité physique entre le renfort et le nœud (poutre-poteau). Il est donc recommandé de couler séparément la partie supérieure du support (sur 30 cm environ). Afin de garantir la transmission des efforts transversaux, il est nécessaire d'apporter une grande vigilance à l'exécution de la liaison entre le béton de la chemise et celui du support.

5.3.2. Influence du poids de la chemise

Le poids P pour 1 mètre linéaire de poteau et le rapport R entre le poids de l'élément chemisé et l'élément initial sont mentionnés dans le tableau 7. On remarque que l'influence du poids supplémentaire de la chemise est importante. Pour un chemisage de 7 cm, le poids de l'élément chemisé est égal au double du poids de l'élément initial.

L'influence du poids supplémentaire est importante. L'épaisseur recommandée de la gaine est donc de 7 cm, dans le but de ne pas modifier les caractéristiques de la structure initiale.

$b_1 = h_1$ (cm)	A_c (m ²)	P (kg/m)	$R = \frac{P}{300}$
0	0,12	300	1,00
7	0,24	600	2,00
10	0,30	750	2,50
15	0,42	1050	3,50
20	0,56	1400	4,67
25	0,72	1800	6,00
30	0,90	2250	7,50

Tableau 7 : Influence du poids de chemisage.

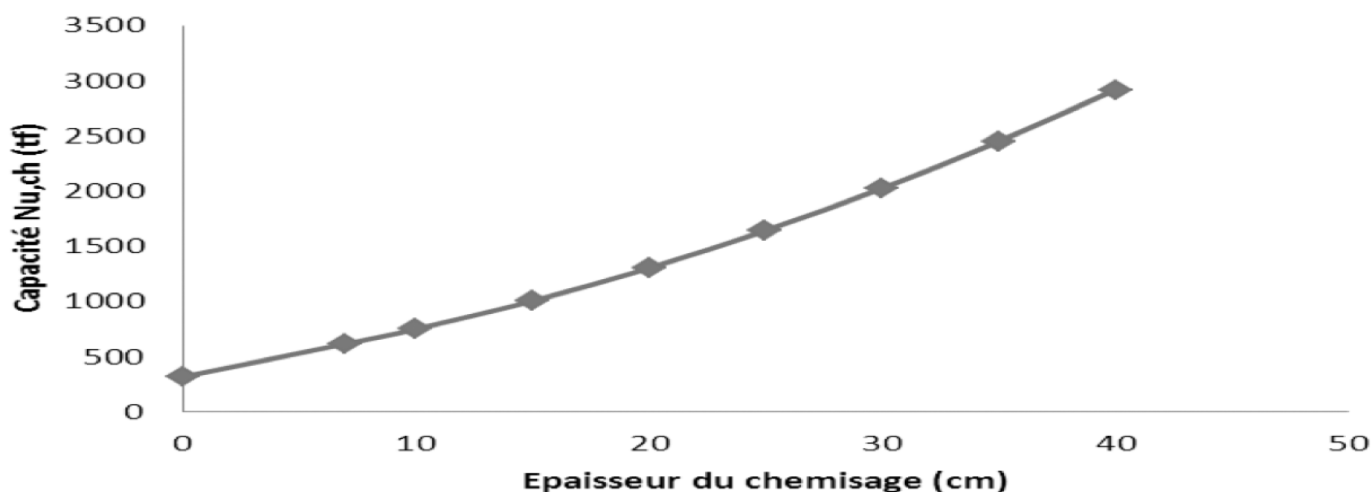


Figure 10 : Relation entre capacité et l'épaisseur du chemisage.

5.3.3. Influence de l'épaisseur de la chemise sur la ductilité

Les valeurs des courbures φ_y , φ_u et le moment M_p ainsi que la ductilité μ_φ en fonction de l'épaisseur du chemisage $e_{ch}=b_1=h_1$ sont mentionnées dans le tableau 8.

La ductilité en courbure des sections dont l'épaisseur de la chemise est de 7, 10 et 15 cm est inférieure à celle de la section initiale. Elle est presque constante à partir de $e_{ch}=20$ cm. La relation moment-courbure est représentée sur la figure 11.

Le palier plastique présent dans les sections S_1 et S_8 est absent dans les autres sections.

CONCLUSION

La technologie du renforcement par PRF est une des techniques les plus efficaces d'accroissement de la résistance des poteaux. Son application est relativement simple, très

peu dérangeante pour les occupants des bâtiments et peu exigeante en main-d'œuvre. Les caractéristiques non corrosives des PRF et leur résistance à la plupart des substances chimiques donnent à ce système une durée de vie plus longue que celle des matériaux conventionnels comme l'acier. Le confinement du béton par PRF augmente la résistance du béton et la ductilité des éléments comprimés. Le renforcement d'un élément par gainage en béton consiste à augmenter la section initiale par ajout de béton et d'armatures. Ce procédé augmente considérablement la capacité de résistance de l'élément chemisé en lui conférant un comportement faiblement ductile. Avec l'augmentation de l'épaisseur du chemisage, la rigidité de l'élément gainé augmente ce qui diminue considérablement la capacité de déplacement de la structure. L'augmentation de la section crée une différence de masse et de rigidité entre les différents étages ainsi qu'une excentricité considérable entre le centre de masse et le centre de torsion. Dans ce cas il est préférable d'uniformiser les étages entre eux, ce qui

Section	S1	S8	S9	S10	S11	S12	S13
M, φ	$e_{ch}=0$ (cm)	$e_{ch}=7$	$e_{ch}=10$	$e_{ch}=15$	$e_{ch}=20$	$e_{ch}=25$	$e_{ch}=30$
φ_y (m^{-1})	0,0075	0,0050	0,0047	0,0044	0,0041	0,0036	0,0032
φ_u (m^{-1})	0,2460	0,1477	0,1247	0,1343	0,1446	0,1223	0,1080
M_p (tf.m)	8,6350	18,9676	21,7374	27,2497	32,6243	37,9206	42,3828
$\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$	32,80	29,54	26,53	30,52	35,27	33,97	33,75
$\mu_\varphi / 32,80$	1,00	0,90	0,81	0,93	1,07	1,03	1,03

Tableau 8 : Moments et courbures des sections.

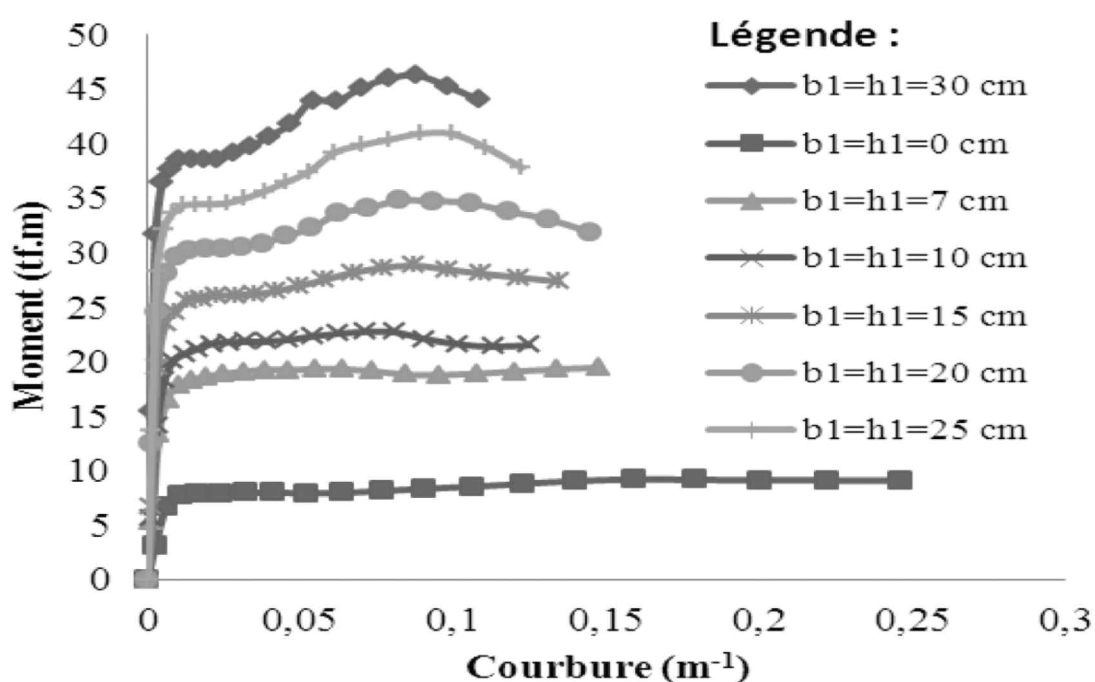


Figure 11 : Relation moment-courbure des sections renforcées par chemisage.

augmente la descente de charges de la structure et nécessite un redimensionnement des fondations. En conclusion l'application des PRF est une alternative intéressante par rapport aux méthodes traditionnelles de réhabilitation. C'est pour cette raison que le choix de réhabilitation par matériaux composites est jugé favorable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structures, rencontres scientifiques, SOCOTEC-CTC, 2002.
- [2] Azizinamini, A., Corley, G. W., Johal, P.L.S. (1992) *Effects of Transverse Reinforcement on Seismic Performance of Columns*, ACI Structural J., Vol. 89, n° 4, pp.442-450.
- [3] Aboutaha, R.S., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O., Kreger, M.E. (1999), *Rehabilitation of Shear Critical Concrete Columns by Use of Rectangular Steel Jackets*, ACI Structural J, Vol. 96, n° 1.
- [4] Priestley, M.J.N., Seible, F., Fyfe, E. (1994) *Column Seismic Retrofit Using Fiber Glass / Epoxy Jackets*, in *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, K.W. Neale, P. Labossiere, Editors; Canadian Society for Civil Engineering, pp. 287-297.
- [5] Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A., Lorenzis, L. (1999) *Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement*, Concrete International, ACI, Vol. 21, n° 10, pp. 49-54.
- [6] Khalifa, A., Nanni, A., De Lorenzis, L. (2001) *Shear Performance of RC Beams Strengthened with FRP*, The International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications, Cairo, Egypt, pp. 217-230.
- [7] Rochette P., Labossiere P. (2000), "Axial testing of rectangular columns models confined with composites", *Journal of composite Construction*, ASCE, Vol. 4, Issue 3, p. 129-136.
- [8] Teng, G. J., Chen, J. F., Smith, S. T., Lam, L. (2001) *FRP Strengthened RC Structures*, England, John Wiley and Sons.
- [9] Madi R., Guenfoud M. (2011) *Renforcement des poteaux en béton armé*, Congrès Algérien de mécanique CAM2011, 14-17 Novembre 2011, Université 08 mai 45, Guelma, Algérie.
- [10] Madi R. Guenfoud M. (2011) *Etude de vulnérabilité vis-à-vis du séisme*, 1^{er} congrès international : le génie civil et le développement durable, 17-19 Octobre 2011, Université de Tebessa, Tebessa, Algérie.
- [11] Madi R. Guenfoud M. 2013, "Renforcement par PRF des poteaux rectangulaires en béton armé", 11^e congrès de mécanique, AFM, 23-26 Avril 2013, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc.
- [12] Madi R. Guenfoud M. 2013, "Renforcement des poteaux en béton armé par PRF et chemisage en béton", Congrès Algérien de mécanique CAM2013, 25-28 Novembre 2013, Université de Mascara, Mascara, Algérie.
- [13] Lam, L., Teng, G., J. (2003) *Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined concrete*, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.
- [14] Priestley M. J. N., Seible F., Calvi G. M. (1996) *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [15] CSI. SAP2000 V-11, Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual, Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc, section designer, 2007.