
Performances des colonnes en béton confiné avec des enveloppes externes en composites « PRFC »

Riad Benzaid ^{1*}, Habib Mesbah ², Nasr eddine Chikh ³

¹ LGG., Université de Jijel. BP. 98 Ouled Issa, Jijel - 18000, Algérie.

² LGCGM., INSA de Rennes – France.

³ LMDC., Université Mentouri- Constantine, Algérie.

* benzaid_riad @ yahoo. fr

RÉSUMÉ. Un programme expérimental comprenant des essais sur 30 cylindres 160x320 mm a été mené en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité du béton confiné par collage externe de tissu de polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC). Les variables étudiées sont la résistance à la compression du béton non confiné f_{co} , le niveau de confinement, exprimé par le nombre de plis de PRFC appliqué aux éprouvettes. La déformation circonférentielle à la rupture du composite PRF et l'effet de la pression de confinement latérale effective de l'enveloppe composite ont été également étudiés. Pour l'ensemble des spécimens testés, l'augmentation de la rigidité du confinement entraîne à la fois une augmentation significative de la résistance à la compression axiale et de la ductilité des spécimens en béton confiné avec des PRFC par rapport aux spécimens en béton non confiné. Basé sur les résultats expérimentaux, un modèle de confinement « type résistance » est proposé pour prédire la résistance à la compression maximale (f_{cc}) du béton confiné avec des matériaux composites et la déformation correspondante (ϵ_{cc}).

ABSTRACT. The present paper deals with the analysis of experimental results, in terms of load carrying capacity and strains, obtained from tests on plain- and reinforced-concrete (RC) cylinder, strengthened with external carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP). The parameters considered are the number of composite layers, the compressive strength of unconfined concrete. The effective circumferential FRP failure strain and the effect of the effective lateral confining pressure were investigated. Totally 30 cylinders were subjected to axial compression which includes control specimens. All the test specimens were loaded to failure in axial compression and the behaviour of the specimens in the axial and transverse directions was investigated. Test results shown that CFRP wrap increases the strength and ductility of plain- and reinforced-concrete cylinders, significantly. A simple model is presented to predict the compressive strength and axial strain of FRP-confined columns.

MOTS-CLÉS : Confinement, renforcement, réhabilitation, PRFC, modèle de confinement.

KEYWORDS: Confinement, reinforcement, rehabilitation, PRFC, strength model.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

1. Introduction

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à améliorer le comportement mécanique des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage externe d'une enveloppe en matériaux composites.

2. Caractérisation expérimentale

Au total, 30 cylindres Ø160 x 320 mm ont été fabriqués à l'aide de trois mélanges de béton de différentes résistances à la compression (26, 50 et 62 MPa). Concernant le ferrailage des éprouvettes en béton armé, nous avons utilisé 4HA12 mm pour les armatures longitudinales et 3Ø8 mm pour les armatures transversales avec un espacement de 140 mm. La surface de béton est par la suite séchée et brossée, ceci a permis d'obtenir une surface de béton rugueuse et propre. Le composite en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) utilisé pour le renforcement est mis en œuvre par stratification directe de 1 ou 3 plis de tissu de fibres de carbone unidirectionnels. Le composite PRFC (SikaWrap-230C/45 + Sikadur-330) a un module d'élasticité en traction (E_{prfc}) de 34 GPa, une résistance à la traction f_{prfc} de 450 MPa et une déformation longitudinale à la rupture ε_{fu} de 14 ‰.

3. Béton confiné avec des composites PRF

Lorsqu'une colonne en béton confiné avec des composites PRF est soumise à une compression axiale, le béton s'étend latéralement et cette expansion sera empêchée par l'enveloppe en PRF. Pour les sections circulaires (figure 1), le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression maximale de confinement fournie par le PRF est en rapport direct avec l'épaisseur et la résistance à la traction du composite PRF ainsi que le diamètre de la section du béton confiné (Purba et Mufti 1999, Thériault et Neale 2000, Teng *et al.*, 2002, Lam et Teng 2003, Berthet *et al.*, 2006, Benzaid *et al.*, 2010). Cette pression de confinement se calcule pour les sections circulaires par la relation suivante:

$$f_l = \frac{2 f_{prf} t_{prf}}{d} \quad [1]$$

Où f_l est la pression de confinement latérale due au PRF, f_{prf} la résistance à la traction du composite PRF (égale à $E_{prf} \cdot \varepsilon_{fu}$), t_{prf} l'épaisseur totale du PRF, d le

Colonnes en béton confiné avec des composites « PRFC »

diamètre de la section du béton, E_{prf} le module d'élasticité du composite PRF, ε_{fu} la déformation ultime de traction du composite PRF.

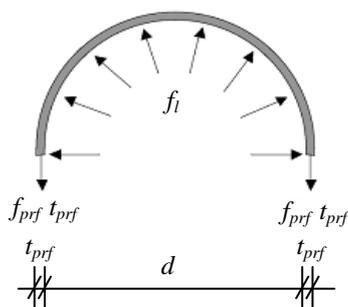


Figure 1. Action de confinement d'un composite PRF (Benzaid et al., 2010)

4. Résultats expérimentaux et discussion

Les résultats des essais de laboratoire sont présentés graphiquement sous forme de courbes contrainte-déformation (figure 2). Sur ces courbes, les déformations (axiale et radiale) sont tracées en fonction de la contrainte axiale appliquée.

4. 1. Courbes contrainte-déformation

Les courbes contraintes-déformations du béton de faible résistance (26 MPa) confiné par PRFC sont bi-linéaires avec une zone de transition. Cette dernière se produit juste après le pic de la charge de rupture du béton non confiné. Les pentes de la première branche sont similaires pour le béton ordinaire et confiné, gouverné presque entièrement par les propriétés du béton du noyau. Tandis que, la pente dans la zone plastique dépend du niveau de confinement, défini par le nombre de couches PRFC, voir les figures 2a et 2b.

Pour le béton de haute résistance (50 et 62 MPa) confiné par PRFC, les courbes contrainte-déformation restent bi-linéaires pour les éprouvettes hautement confinées (3 plis PRFC). Par contre, dans le cas des cylindres faiblement confinés (1 pli PRFC), les courbes tendent vers des paliers après le pic de la résistance maximale du béton non confiné (f'_{co}) comme le montre les figures 2c et 2d. Ce cas de figure représente la limite entre les éléments efficacement confinés par le composite PRFC et ceux insuffisamment confinés.

5. Déformation circonférentielle à la rupture du composite PRF

Selon les résultats obtenus, la rupture des spécimens s'est produite prématurément avant que les composites PRFC n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes ε_{fu} (voir tableau 1). Cette déformation de rupture ε_r est appelée « la déformation circonférentielle effective du composite ». Ce phénomène affecte considérablement la précision des modèles existants pour le béton confiné

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

avec des matériaux composites. Les rapports entre la déformation radiale de rupture (ε_r) et la déformation ultime du composite PRFC (ε_{fu}) sont regroupés dans le tableau 1. En se basant sur les résultats expérimentaux, le coefficient de déformation effective du composite PRFC noté « η » représentant le rapport ($\varepsilon_r/\varepsilon_{fu}$) a une valeur moyenne de 0,73. Cependant, la pression de confinement latérale effective due au composite sera comme suit:

$$f_{l,eff} = \frac{2 t_{prf} E_{prf} \varepsilon_r}{d} = \frac{2 t_{prf} E_{prf} \eta \varepsilon_{fu}}{d} = \eta f_l \quad [2]$$

Tableau 1. Valeurs du coefficient de déformation effective des spécimens testés

Série de béton	Code spécimens	ε_{fu} (‰)	ε_r (‰)	$\varepsilon_r/\varepsilon_{fu}$
I (26 MPa)	Cy.160-BA26-1P ₁	14	13,15	0,939
	Cy.160-BA26-1P ₂	14	13,16	0,940
	Cy.160-BA26-3P ₁	14	14,06	1,004
	Cy.160-BA26-3P ₂	14	12,42	0,887
	Cy.160-B26-1P ₁	14	13,12	0,937
	Cy.160-B26-3P ₁	14	13,18	0,941
II (50 MPa)	Cy.160-BA26-1P ₁	14	13,17	0,940
	Cy.160-BA26-1P ₂	14	13,16	0,940
	Cy.160-BA26-3P ₁	14	13,20	0,942
	Cy.160-BA26-3P ₂	14	13,17	0,940
	Cy.160-B26-1P ₁	14	2,90	0,207
	Cy.160-B26-3P ₁	14	13,15	0,939
III (62 MPa)	Cy.160-BA26-1P ₁	14	7,79	0,556
	Cy.160-BA26-1P ₂	14	2,61	0,186
	Cy.160-BA26-3P ₁	14	4,10	0,292
	Cy.160-BA26-3P ₂	14	7,15	0,510
	Cy.160-B26-1P ₁	14	2,46	0,175
	Cy.160-B26-3P ₁	14	12,89	0,920

6. Modèle empirique proposé pour les sections circulaires confinées avec PRFC

6.1. Résistance à la compression axiale maximale « f'_{cc} »

Basé sur la régression des résultats expérimentaux des cylindres Ø160x320 mm des trois séries de béton : 26, 50 et 62 MPa (tableau 2), une équation simple est proposée pour prédire la résistance à la compression axiale maximale du béton confiné avec des composites PRF. La figure 3 montre la relation entre le rapport de confinement actuel $f_{l,eff}/f'_{co}$ et le rapport de résistance f'_{cc}/f'_{co} . On remarque que la relation peut être approchée par une fonction linéaire donnée par l'équation suivante:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2,20 \frac{f_{l,eff}}{f'_{co}} \quad [3]$$

Colonnes en béton confiné avec des composites « PRFC »

En introduisant le coefficient de déformation effective « $\eta = 0,73$ » avec le remplacement de $f_{l,eff}$ par f_l dans l'équation [3], la résistance à la compression axiale du béton confiné avec des composites PRF aura la forme suite:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1,60 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad [4]$$

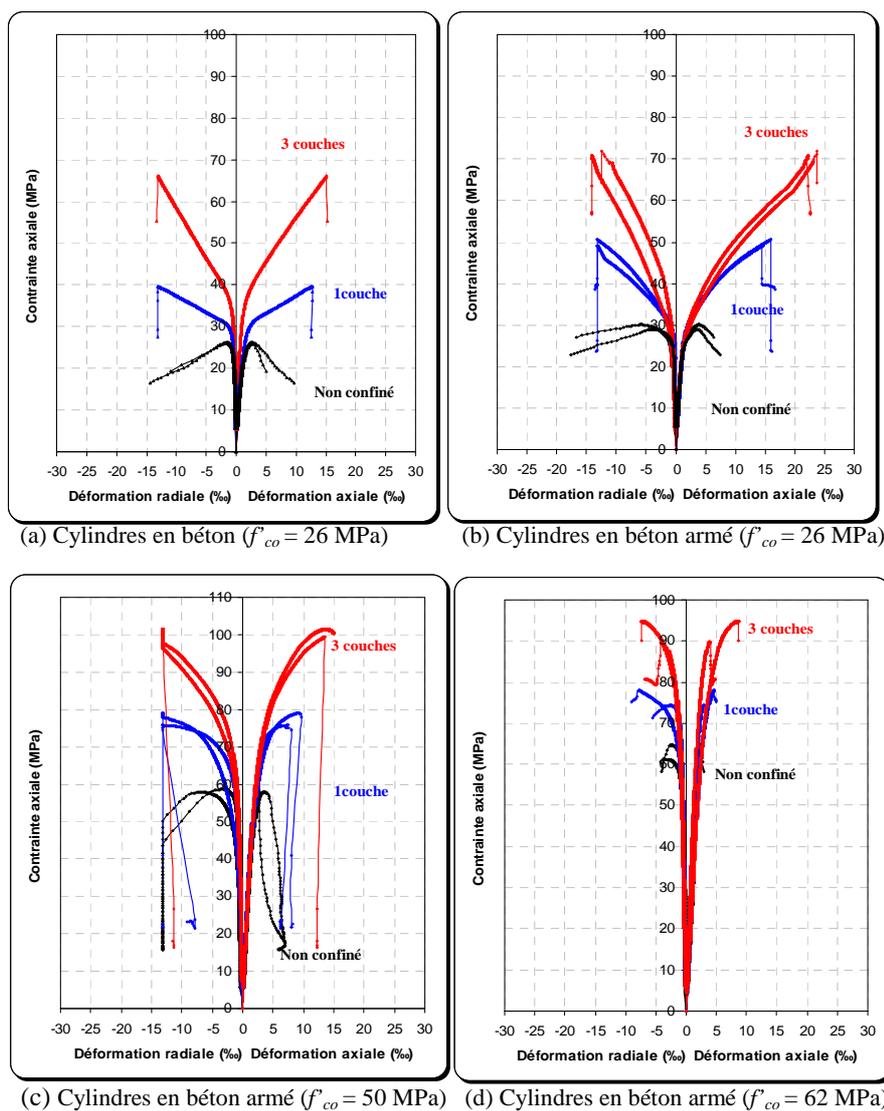


Figure 2. Courbes contrainte-déformation (Benzaid 2010)

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

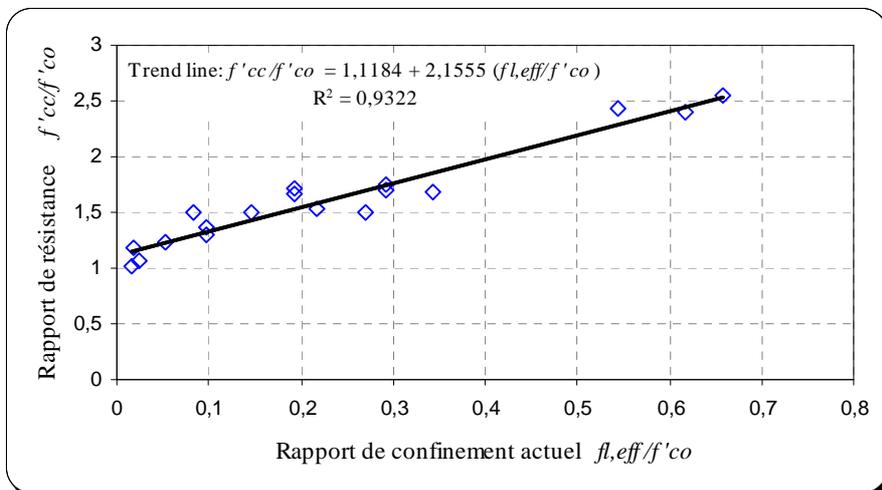


Figure 3. Le modèle en fonction de la pression de confinement latérale effective

Par contre, la figure 4 présente le rapport de résistance f'_{cc}/f'_{co} en fonction du rapport de confinement f_l/f'_{co} . On peut constater que le coefficient d'efficacité moyen ($k_l=2,25$) est un peu élevé. Cela est attribué à l'effet de la pression de confinement latérale effective de l'enveloppe composite. Cette dernière est négligée dans la plupart des modèles de confinement existants, ce qui affecte leurs précisions.

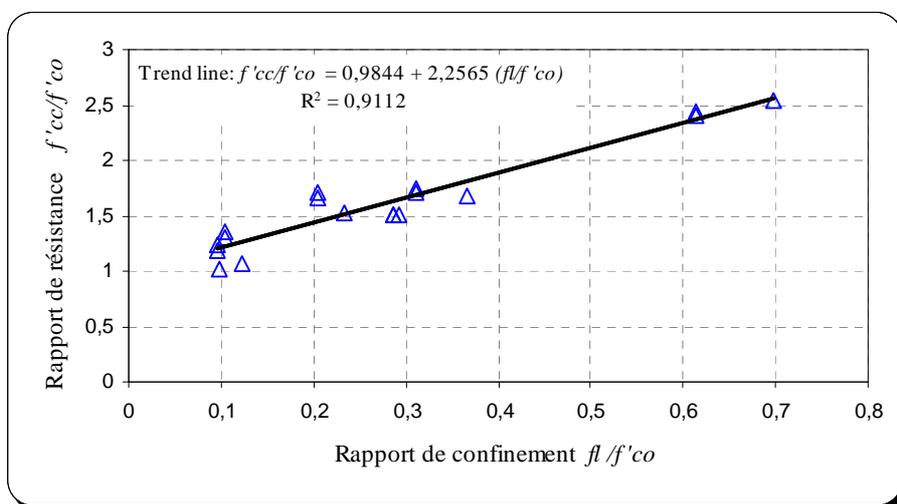


Figure 4. Effet de la négligence de « $f_{l,eff}$ » sur la précision du modèle

Colonnes en béton confiné avec des composites « PRFC »

6.2. Déformation axiale maximale « ε_{cc} »

La figure 5 montre la relation entre le rapport de déformation et celui de confinement actuel. Cette figure indique que la déformation axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites peut être liée de façon linéaire au rapport de confinement actuel. Basée sur la régression des résultats expérimentaux du tableau 2, la déformation axiale maximale du béton confiné avec des composites PRFC peut être exprimée à partir de l'expression suivante:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 7,50 \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}} \right) \quad [5]$$

En remplaçant $f_{l,eff}$ par f_l dans l'équation [5] nous obtiendrons la relation suivante:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 5,48 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad [6]$$

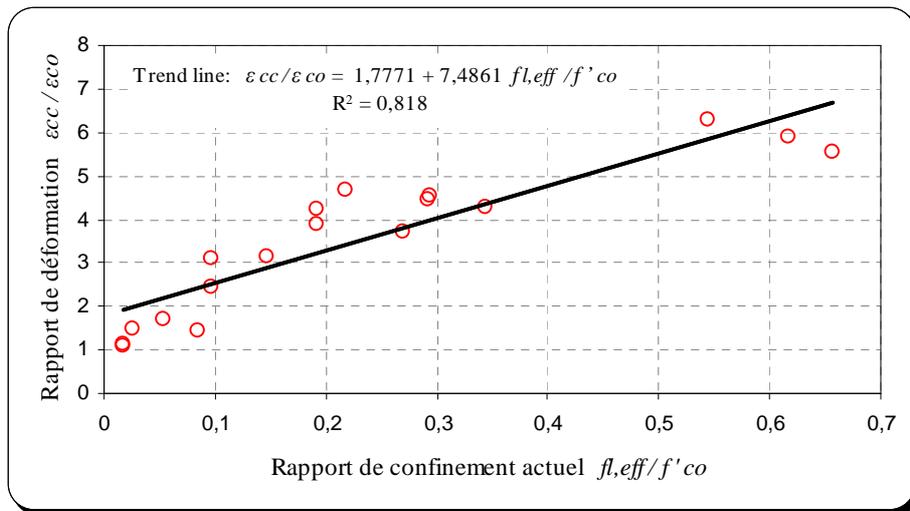


Figure 5. Relation entre le rapport de déformation et celui de confinement actuel

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.**Tableau 2. Données et résultats des cylindres confinés avec des «PRFC»**

Code des spécimens	f'_{co} (MPa)	t (mm)	E_{prf} (Gpa)	\square_{fu} (%)	$\square_{r.rup.}$ (%)	d (mm)	$f_{l,eff}$ (MPa)	f_l (MPa)
Cy.160-BA26-1P ₁	29,51	1	34,5	14	13,15	160	5,67	6,04
Cy.160-BA26-1P ₂	29,51	1	34,5	14	13,16	160	5,68	6,04
Cy.160-BA26-3P ₁	29,51	3	34,5	14	14,06	160	18,19	18,11
Cy.160-BA26-3P ₂	29,51	3	34,50	14	12,42	160	16,07	18,11
Cy.160-B26-1P ₁	25,93	1	34,5	14	13,12	160	5,66	6,04
Cy.160-B26-3P ₁	25,93	3	34,5	14	13,18	160	17,05	18,11
Cy.160-BA50-1P ₁	58,24	1	34,5	14	13,17	160	5,68	6,04
Cy.160-BA50-1P ₂	58,24	1	34,5	14	13,16	160	5,68	6,04
Cy.160-BA50-3P ₁	58,24	3	34,5	14	13,20	160	17,08	18,11
Cy.160-BA50-3P ₂	58,24	3	34,5	14	13,17	160	17,04	18,11
Cy.160-B50-1P ₁	49,46	1	34,5	14	2,90	160	1,25	6,04
Cy.160-B50-3P ₁	49,46	3	34,5	14	13,15	160	17,01	18,11
Cy.160-BA62-1P ₁	63,01	1	34,5	14	7,79	160	3,36	6,04
Cy.160-BA62-1P ₂	63,01	1	34,5	14	2,61	160	1,13	6,04
Cy.160-BA62-3P ₁	63,01	3	34,5	14	4,10	160	5,30	18,11
Cy.160-BA62-3P ₂	63,01	3	34,5	14	7,15	160	9,25	18,11
Cy.160-B62-1P ₁	61,81	1	34,5	14	2,46	160	1,06	6,04
Cy.160-B62-3P ₁	61,81	3	34,5	14	12,89	160	16,68	18,11

f_l/f'_{co}	$f_{l,eff}/f'_{co}$	f'_{cc} (MPa)	f'_{cc}/f'_{co}	\square_{co} (%)	\square_{cc} (%)	$\square_{cc}/\square_{co}$
0,20	0,19	50,59	1,71	3,77	15,93	4,22
0,20	0,19	49,17	1,67	3,77	14,75	3,91
0,61	0,62	70,83	2,40	3,77	22,22	5,89
0,61	0,54	71,88	2,44	3,77	23,74	6,29
0,23	0,22	39,63	1,53	2,73	12,78	4,68
0,70	0,66	66,14	2,55	2,73	15,16	5,55
0,10	0,10	75,84	1,30	3,02	7,37	2,44
0,10	0,10	79,18	1,36	3,02	9,35	3,09
0,31	0,29	101,48	1,74	3,02	13,72	4,54
0,31	0,29	99,35	1,71	3,02	13,44	4,45
0,12	0,03	52,75	1,07	1,69	2,52	1,49
0,37	0,34	82,91	1,68	1,69	7,27	4,30
0,10	0,05	77,99	1,24	2,69	4,59	1,70
0,10	0,02	74,43	1,18	2,69	2,91	1,08
0,29	0,08	94,92	1,51	2,69	3,87	1,43
0,29	0,15	94,71	1,50	2,69	8,49	3,15
0,10	0,02	62,68	1,01	2,84	3,27	1,15
0,29	0,27	93,19	1,51	2,84	10,54	3,71 ⁶⁸

Colonnes en béton confiné avec des composites « PRFC »

7. Validation du modèle proposé

Il aurait été possible de réaliser un modèle théorique correspondant bien aux résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation. Par contre, le modèle théorique alors développé n'aurait été valable que pour décrire une expérience avec des matériaux, un environnement, des conditions de chargement identiques à ceux utilisés lors de cette expérience. Un échantillonnage différent de celui de la présente étude est nécessaire pour caler le modèle théorique proposé afin qu'il décrit d'avantage la réalité.

En utilisant le modèle proposé, la résistance à la compression axiale (f'_{cc}) et la déformation correspondante (ϵ_{cc}) des spécimens en béton confiné avec des matériaux composites collectés de la bibliographie (travaux de : Matthys *et al.* 2005, Ilki *et al.* 2003, Lam *et al.* 2006 Jiang et Teng 2007) ont été prédites, comme indiqué dans les figures 3 et 4. Ces figures montrent clairement qu'il existe une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par le modèle proposé.

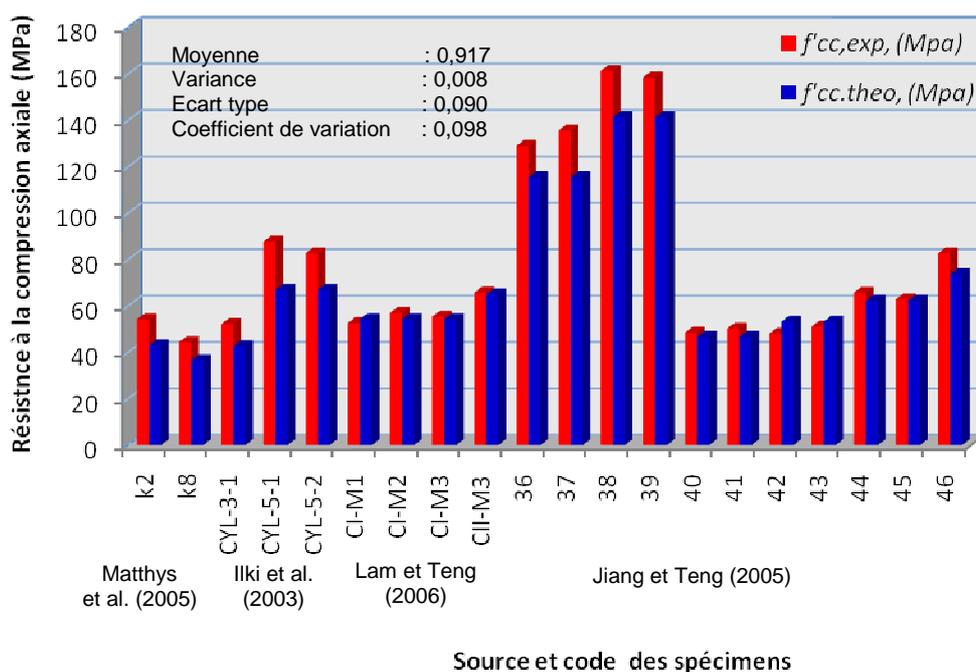


Figure 3. Comparaison des valeurs des résistances à la compression axiale prédites par le modèle avec l'expérimentation

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

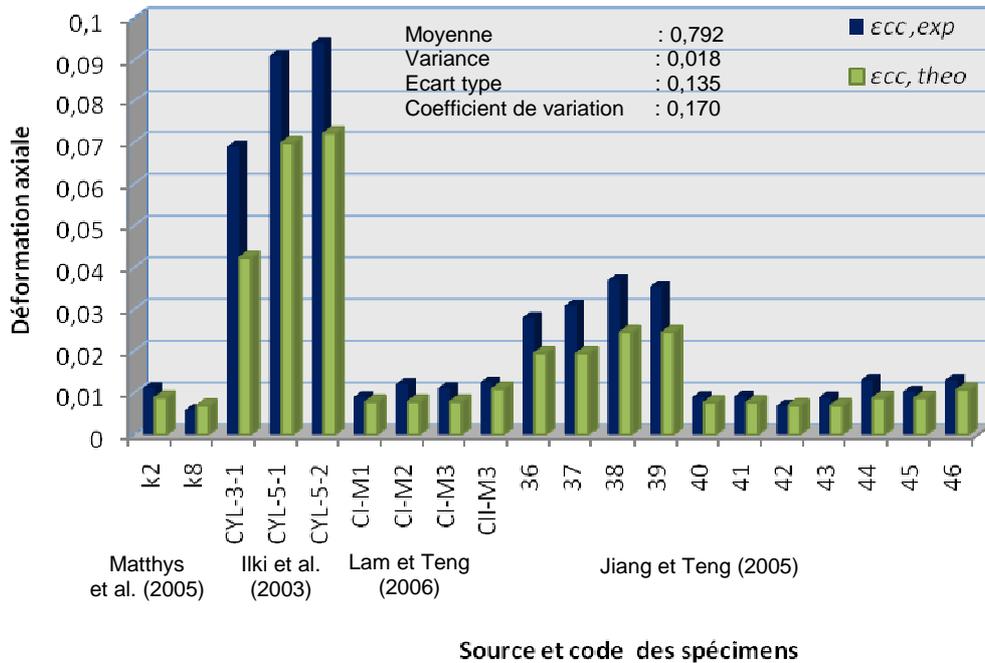


Figure 4. Comparaison des valeurs des déformations axiales prédites par le modèle avec l'expérimentation

8. Conclusion

La présente étude porte sur l'évaluation du comportement mécanique en compression axiale des cylindres en béton confiné par des enveloppes en matériaux composites PRFC collées en surface. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- L'utilisation des composites PRF donne une résistance aux déformations dues aux charges axiales, qui résulte d'un confinement des contraintes développées dans le béton, ce qui améliore à la fois la contrainte de compression ultime et la ductilité du béton.
- Les forces ultimes et les déformations augmentent avec le nombre de plis du composite.
- L'augmentation du niveau de confinement a peu d'effet sur la pente de la portion initiale (zone élastique) de la relation contrainte-déformation, mais a un effet significatif sur la pente de la seconde portion (zone plastique).
- Plus la résistance initiale du béton (f'_{co}) est élevée, moins le gain procuré par le confinement est important.

Colonnes en béton confiné avec des composites « PRFC »

- Pour un béton de haute résistance confiné par PRFC, une amélioration significative de résistance et de ductilité ne peut être observée que si le rapport de confinement (f_l / f_{co}) est supérieur à 0,095.
- La rupture des cylindres confinés est marquée par une rupture des fibres de carbone. Elle se produit prématurément, pour un niveau de contrainte inférieur à la résistance ultime du composite PRFC.
- Le modèle de type résistance offre des prédictions satisfaisantes en ce qui concerne la contrainte et la déformation du béton confiné avec des composites PRF.

Remerciements: les auteurs adressent des remerciements à la société Sika France S.A (Saint-Grégoire, Rennes- France), qui a fournie les matériaux composites utilisés dans les essais.

9. Bibliographie

- Berthet J.F., Ferrier E., Hamelin P., « Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets Part A: experimental study », *Construction and Building Materials*, vol. 19, 2005, p. 223-232.
- Benzaid R., Mesbah H., Chikh N-E., « FRP-confined concrete cylinders: Axial compression experiments and strength model », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No.16, 2010, p 2469-2488.
- Benzaid R., Contribution a l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton, thèse de doctorat, INSA de Rennes – France, 2010, 280 p.
- Ilki A., Kumbasar N., Koç V., « Low and medium strength concrete members confined by fiber reinforced polymer jackets », *ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University*, Vol. 53, No.1, 2003, p. 118-123.
- Jiang T., Teng J.G., « Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete », *Engineering Structures*, Vol. 29, 2007, p. 2968-2986.
- Lam L., Teng J. G., « Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete », *Construction and Building Materials*, Vol. 17, 2003, p. 471-489.
- Lam L., Teng J.G., Cheung CH., Xiao Y., « FRP-confined concrete under axial cyclic compression », *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, p. 979-958.
- Matthys S., Toutanji H., Audenaert K., Taerwe L., « Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites », *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 2, 2005, p. 258-267.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Purba B. K., Mufti A. A., « Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets », *Canadian Journal of civil Engineering*, Vol. 26, 1999, p. 590-596.

Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L., *FRP strengthened RC structures*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2002, 245p.

Thériault M., Neale K.W., « Design equations for axially-loaded reinforced concrete columns strengthened with FRP wraps », *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 5, 2000, p. 1011-1020.