

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : Génie Civil

Par

**BERRADIA MOHAMMED**

Thème :

---

## **ANALYSE DE L'EFFET DU CONFINEMENT TRANSVERSAL SUR LES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX AVEC MATÉRIAUX COMPOSITES**

---

Soutenue le 05/10/2017, devant le jury composé de :

MAKHOUL Ali	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
KASSOUL Amar	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur
BENZAID Riad	MCA	Université de Jijel	Examineur
SI YOUCEF Youcef	MCA	EPAU Alger	Examineur
HASSAINE DAOUADJI Tahar	Professeur	Université de Tiaret	Examineur
EZZIANE Karim	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examineur

## REMERCIEMENTS

Louange et le grand remerciement a Allah qui nous a donnés la santé, la sagesse et le pouvoir de faire cette thèse de doctorat.

Et bien sûr, je tiens à adresser mes remerciements et exprimer mes reconnaissances à Monsieur, Amar KASSOUL Professeur à l'Université Hassiba Ben Bouali d'e Chlef, pour avoir accepté encadrer le présent travail de thèse, pour leur confiance, leur accompagnement et leur encouragement.

Je remercie également le Dr Riad BENZAID de l'Université de Jijel et le Dr SI YUCEF Youcef de l'EPAU d'Alger, le Pr Tahar HASSAINE DAOUADJI de l'Université de Tiaret, le Pr Karim EZZIANE de l'Université de Chlef, pour le temps qu'ils ont bien voulu accorder à l'examen du présent travail de thèse, ainsi que le Pr Ali MAKHLOUF de l'Université de Chlef pour l'avoir présidé.

Mes profonds remerciements et gratitudes à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère, symbole de tendresse, d'amour et de courage,

Mon cher père que j'aime très fort,

Ma femme symbole d'amour,

Mes enfants Abd eljalil et Abd elbarie,

Mes chères sœurs et chers frères,

Tous les membres de la famille BERRADIA et surtout mon  
copin Omar.

## Résumé

L'utilisation de l'enveloppe externe en polymères renforcés de fibres de carbone est l'une des techniques les plus efficaces existante, pour le confinement des colonnes circulaires en béton armé. L'objectif de ce travail consiste à proposer deux nouveaux modèles contrainte-déformation, pour prédire le comportement des colonnes circulaires confinées par des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) sans aciers transversaux (RAT) et sous l'effet combiné de l'enveloppe PRFC externe et des aciers transversaux interne, sur la base d'une analyse de régression de plus de 340 de données expérimentales. Deux indicateurs statistiques sont utilisés, pour illustrer la performance, à savoir : le coefficient de détermination  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE. D'après ces deux indicateurs les deux nouveaux modèles proposés présentent une bonne performance comparés aux modèles existants. De plus, la comparaison des deux modèles proposés avec les résultats expérimentaux a montré une bonne concordance par rapport aux modèles existants. En outre, les expressions d'estimations de la résistance ultime et la déformation correspondante sont simples et concises qui les rendent plus facile à utiliser pour des applications de conception. Enfin, une étude paramétrique des facteurs, à savoir le diamètre de la colonne, l'épaisseur, la résistance en traction du PRFC, la limite élastique et le pourcentage volumique des aciers transversaux influençant le confinement par PRFC a été réalisé. Cette analyse a montré la variation de l'effet propice du confinement par PRFC que par l'effet combiné PRFC-RAT.

Mots clés : béton armé ; modèle; confinement ; polymères, fibres de carbone; aciers transversaux; colonnes circulaires.

**Abstract**

The use of external carbon-fiber-reinforced polymer wraps is one of the most effective techniques existing for the confinement of the circular reinforced concrete columns. This work presents the development of a stress-strain models for the axial behavior of circular concrete columns confined by carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) without transverse steel reinforcement (TSR) and under the combined effect of external CFRP wraps-and-internal TSR (hoops or spirals) based on the regression analysis of more than 340 existing experimental data. Based on the two various indicators, the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the Root Mean Square Error (RMSE), the two proposed models present a good performance compared to the existing models suggested to show a good performance compared to the existing models. Moreover, the comparison between the two proposed model and the experimental results show a good agreement comparing to the existing models. In addition, the expressions of estimation of the ultimate strength and the corresponding strain are simple and precise, which make it easy to use in the design applications. Finally, a parametric study of factors, namely the column diameter, FRP wrap thickness and strength, transversal steel yield strength and volumetric ratio affecting the CFRP confinement is studied. This analysis shows the variation of the favorable effect for CFRP confinement that CFRP and TSR combined effect.

Keywords: reinforced concrete; model; confinement; carbon-fiber; polymer; transverse steel; circular columns.

## ملخص

إن استخدام الغلاف الخارجي للدائن المركبة المعززة بألياف الكربون هو واحدة من أكثر الطرق فعالية القائمة من أجل حصر الأعمدة الدائرية المصنوعة من الخرسانة المسلحة. الهدف من هذه الدراسة هو تطوير نموذجان جديان من نوع إجهاد تشوه من أجل دراسة معرفة سلوك الأعمدة الدائرية المحصورة بالدائن المركبة المعززة بألياف الكربون (PRFC) دون تقوية حديدية عرضية (RAT) و تحت التأثير المشترك للدائن المركبة المعززة بألياف الكربون الخارجية و تقوية حديدية عرضية داخلية على أساس تحليل الانحدار لأكثر من 340 من البيانات التجريبية. استنادا إلى المؤشرين المختلفين معامل التقرير ( $R^2$ ) و الجذر التربيعي للمربع المتوسط للبقايا (RMSE)، النموذجان الجديان المقترجان يظهران أداء جيد مقارنة مع النماذج الموجودة. و بالإضافة إلى ذلك، المقارنة بين النموذجين المقترحين مع النتائج التجريبية تظهر اتفاق جيد بالمقارنة مع النماذج القائمة، و علاوة على ذلك، عبارات تقدير المقاومة القصوى و التشوه الموافق لها بسيطة و موجزة مما يسهل استخدامها في تطبيقات التصميم. و أخيرا، تم إجراء دراسة حدودي من العوامل و هي قطر العمود، سماكة أو عدد طبقات مغلف و قوة الشد ل (PRFC) بالإضافة إلى حد المرونة و الحجم النسبي للتسليح العرضي المؤثرة على الحصر ب (PRFC) قد تم انجازها. و يبين هذا التحليل تباين التأثير الايجابي للحصر بال (PRFC) من التأثير المشترك (PRFC-RAT).

**الكلمات الرئيسية:** الخرسانة المسلحة، نموذج، الحصر، ألياف الكربون، الدائن، تسليح عرضي، الأعمدة الدائرية.

## TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
TABLE DES MATIÈRES .....	vi
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xviii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

## CHAPITRE 1 : IMPORTANCE DES MATÉRIAUX COMPOSITES DANS LA RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

1.1. INTRODUCTION.....	6
1.2. NÉCESSITE DE LA RÉHABILITATION.....	6
1.3. NOTIONS SUR LES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT CLASSIQUES.....	7
1.3.1. Réparation par injection de résine.....	7
1.3.2. Réparation par la méthode de la section équivalente.....	8
1.3.3. Renforcement par chemisage en béton armé.....	9
1.3.4. Renforcement par collage de plaques en acier.....	10
1.3.5. Renforcement par l'ajout voiles en béton armé.....	11
1.3.6. Renforcement par l'ajout des contreventements métalliques.....	13
1.3.7. Discussion .....	13
1.4. TECHNIQUES DE RÉHABILITATION MODERNES.....	14
1.4.1. Renforcement par chemisage en acier.....	14

1.4.2. Renforcement par précontrainte transversale.....	16
1.4.3. Renforcement par matériaux composites.....	18
1.4.3.1. Généralité sur l'utilisation des matériaux composites.....	18
1.4.3.2. Techniques de renforcement par PRF de carbone.....	19
1.4.3.3. Réhabilitation des colonnes par PRF de carbone.....	19
1.4.4. Discussion.....	27
1.5. CONCLUSION.....	27

## CHAPITRE 2 : COMPORTEMENT DES COLONNES CONFINÉES PAR LES POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE CARBONE (PRFC)

2.1. INTRODUCTION.....	29
2.2. NOTIONS SUR LES POLYMÈRES RENFORCÉES DE FIBRES DE CARBONE (PRFC) ...	29
2.2.1. Définition d'un matériau composite.....	29
2.2.2. Matrices .....	30
2.2.3. Résines .....	30
2.2.4. Renforts.....	30
2.2.5. Fibres de carbone.....	31
2.2.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites PRF.....	33
2.2.6.1. Avantages.....	33
2.2.6.2. Inconvénients.....	34
2.3. NOTIONS SUR LE CONFINEMENT DES COLONNES.....	34
2.3.1. Notions sur le confinement.....	34
2.3.2. Confinement des colonnes par aciers transversaux.....	35
2.3.2.1. Confinement actif des colonnes.....	35
2.3.2.2. Confinement passive des colonnes.....	35
2.3.2.3. Comportement du béton confiné par aciers transversaux.....	36

2.3.2.4. Pression de confinement latérale.....	36
2.4. PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE CONFINEMENT PAR PRFC.....	38
2.4.1. Effet de la dimension du spécimen.....	38
2.4.2. Effet de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ).....	40
2.4.3. Effet de nombre de couches du PRFC.....	41
2.4.4. Effet de la résistance à la traction du PRFC ( $f_{prf}$ ).....	43
2.4.5. Effet de pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ).....	43
2.4.6. Effet de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ).....	44
2.5. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT CLASSIQUES.....	45
2.6. CONFINEMENT DES COLONNES PAR MATERIAUX COMPOSITES (PRFC).....	49
2.6.1. Confinement externe par PRFC.....	49
2.6.2. Comportement du béton confiné par PRFC.....	49
2.6.3. Pression de confinement latérale.....	50
2.7. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR PRFC.....	51
2.8. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR LA COMBINAISON PRFC-RAT.....	56
2.9. CONCLUSION.....	58

## CHAPITRE 3 : ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE QUELQUES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR PRFC

3.1. INTRODUCTION.....	60
3.2. METHODE DE REGRESSION MATHEMATIQUE.....	60
3.2.1. Coefficient de détermination $R^2$ .....	61
3.2.2. Racine carrée du carré moyen des résidus RMSE.....	62
3.2.3. Pourquoi RMSE ?.....	63
3.3. DONNEES EXPERIMENTAUX DES COLONNES EN BETON CONFINE PAR PRFC.....	64
3.3.1. Critères de sélection de la base de données.....	64
3.3.2. Construction de la base de données.....	64

3.4. PERFORMANCE DE QUELQUES MODELES DE CONFINEMENT PAR PRFC SANS RAT....	72
3.4.1. Modèle de Lam et Teng (2003).....	72
3.4.2. Modèle d’Ilki et al. (2004).....	74
3.4.3. Modèle de Jiang et Teng (2007).....	76
3.4.4. Modèle de Youssef et al. (2007).....	78
3.4.5. Modèle de Teng et al. (2009).....	80
3.4.6. Modèle de Benzaid et al. (2010).....	82
3.4.7. Modèle de Fahmy et Wu (2010).....	84
3.4.8. Modèle d’Ozbakkaloglu et Lim (2013).....	86
3.5. PERFORMANCE DE QUELQUES MODELES DE CONFINEMENT PAR PRFC ET RAT...	88
3.5.1. Données expérimentaux .....	88
3.5.2. Modèle de Lee et al. (2010).....	91
3.5.3. Modèle proposé par Chastre et Silva (2010).....	93
3.5.4. Modèle proposé par Wang et al. (2012).....	95
3.5.5. Modèle proposé par Hu et Seracino (2013).....	97
3.5.6. Modèle proposé par Teng et al. (2014).....	99
3.6. CONCLUSION.....	101

## CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT DE DEUX NOUVEAUX MODÈLES DE CONFINEMENT PAR POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE CARBONE

4.1. INTRODUCTION.....	103
4.2. DEVELOPPEMENT DE MODÈLE ANALYTIQUE DE CONFINEMENT PAR PRFC.....	103
4.2.1. Pression de confinement latérale.....	103
4.2.2. Modèle contrainte déformation.....	104
4.2.3. Expression du modèle de résistance en compression ultime proposé.....	105
4.2.4. Expression du modèle de déformation ultime proposé.....	107

4.2.5. Performance du modèle développé.....	108
4.2.5.1. Performance de l'expression de la résistance ultime.....	109
4.2.5.2. Performance de l'expression de la déformation ultime proposée.....	111
4.2.6. Validation du modèle proposé.....	113
4.3. DEVELOPPEMENT DE MODELES EMPIRIQUES DE CONFINEMENT PAR PRFC-RAT.....	118
4.3.1. Pression de confinement latérale.....	118
4.3.2. Modèle contrainte-déformation.....	119
4.3.3. Expression du modèle de résistance ultime proposé.....	120
4.3.4. Expression du modèle de déformation ultime proposé.....	121
4.3.5. Performance du modèle développé pour l'effet combiné PRFC-RAT.....	123
4.3.5.1. Performance de l'expression de la résistance ultime.....	123
4.3.5.2. Performance de l'expression de la déformation ultime.....	125
4.3.6. Comparaison du modèle proposé avec des modèles existants.....	127
4.4. CONCLUSION.....	132

## CHAPITRE 5 : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES FACTEURS INFLUENÇANT LE CONFINEMENT DES COLONNES CIRCULAIRES PAR PRFC

5.1. INTRODUCTION.....	134
5.2. EFFET DU DIAMÈTRE DE LA COLONNE (D).....	135
5.3. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU PRFC ( $t_{prf}$ ).....	139
5.4. EFFET DE LA RÉSISTANCE EN TRACTION DU PRFC ( $f_{prf}$ ).....	143
5.5. EFFET DE LA LIMITE ÉLASTIQUE DES ACIERS TRANSVERSAUX ( $f_{ys}$ ).....	146
5.6. EFFET DU POURCENTAGE VOLUMIQUE DES ACIERS TRANSVERSAUX ( $\rho_{vt}$ ).....	149
5.7. CONCLUSION.....	165
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES.....	166
BIBLIOGRAPHIE.....	169

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1** : Diagramme H- $\delta$  du poteau original et celui du même poteau réparé par l'injection de la résine (Penelis et Kappos 1997).
- Figure 1.2** : Méthode de la section équivalente (Penelis et Kappos, 1997).
- Figure 1.3** : Renforcement par chemisage en béton (Khuong 2015).
- Figure 1.4** : Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermitte (Hamelin 2002).
- Figure 1.5** : Renforcement des structures par l'ajout des voiles en béton armé.
- Figure 1.6** : Renforcement des structures par l'ajout des contreventements métalliques (Fardis 2009).
- Figure 1.7** : Poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier (Priestley *et al.* 1996).
- Figure 1.8** : Chemisage en acier des poteaux à section rectangulaire (Priestley *et al.* 1996).
- Figure 1.9** : Courbes force-déplacement d'un poteau non renforcé (a) et d'un poteau renforcé par chemisage en acier (b) (Chai *et al.* 1991).
- Figure 1.10** : Renforcement d'un poteau avec la précontrainte transversale (Saatcioglu *et al.* 2000).
- Figure 1.11** : Réponse d'un déplacement latéral de charge des poteaux circulaires à état de flexion dominant (Saatcioglu *et al.* 2000).
- Figure 1.12** : Confinement des colonnes en béton armé par matériaux composites PRFC (a) enveloppée totalement, (b) partiellement enveloppée (Benzaid 2010).
- Figure 1.13** : Charge-déplacement latéral d'un poteau non modifié et d'un poteau renforcé, en cas de Flexion (Seible *et al.* 1997).
- Figure 1.14** : Charge-déplacement latéral d'un poteau non modifié et d'un poteau renforcé, en cas de cisaillement (Seible *et al.* 1997).
- Figure 1.15** : Charge-déplacement latéral d'un poteau renforcé, en cas de fixation des barres de recouvrement (Seible *et al.* 1997).
- Figure 1.16** : Courbes moments-courbures pour les corps d'épreuve renforcés par (a) 1 couche, (b) 2 couches et (c) 3 couches de PRFC dans la zone de rotule plastique (Iacobucci *et al.* 2003).
- Figure 1.17** : Technique de renforcement en flexion pour les colonnes RC (Barros *et al.* 2008).
- Figure 1.18** : Technique hybride - Détails de la disposition des plats PRFC (Perrone *et al.* 2009).
- Figure 1.19** : Dimension des spécimens et deux techniques de renforcement (ElGawady *et al.* 2010).
- Figure 2.1** : Constituants d'un matériau composite PRF.
- Figure 2.2** : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice.
- Figure 2.3** : Organigramme schématisant les principaux matériaux de renfort.

- Figure 2.4** : Polymère renforcé de fibres de carbone à base de tissu (Raphaëlle 2012).
- Figure 2.5** : Confinement de colonne par enveloppe en PRFC a base de tissu (Pantelides *et al.* 2002).
- Figure 2.6** : Exemple de confinement d'un poteau (Penelis et Kappos 1997).
- Figure 2.7** : Courbe contrainte-déformation du béton confiné avec aciers transversaux.
- Figure 2.8** : Influence de la pression latérale de confinement sur la résistance du béton et la propagation des fissures (Wu 2000).
- Figure 2.9** : Action de confinement des aciers transversaux (Hu et Seracino 2013)
- Figure 2.10** : Influence de la dimension du spécimen sur (a) la résistance en compression maximale et (b) la déformation axiale ultime (Yeh et Chang 2004).
- Figure 2.11** : Influence du diamètre des spécimens sur (a) le rapport de résistance et (b) de déformation du béton confiné par PRF Sadeghian et Fam (2015).
- Figure 2.12** : Courbes contraintes-déformations expérimentales pour différentes résistances en compression (Eid *et al.* 2009).
- Figure 2.13** : L'effet du nombre de couches sur le comportement contrainte-déformation axiale des spécimens cylindriques en béton armé confinés par enveloppe en PRFC (Eid *et al.* 2009).
- Figure 2.14** : Effet du nombre de couches du PRFC sur la résistance et la déformation ultime des spécimens cylindriques en béton confinés par PRFC (Cui 2009).
- Figure 2.15** : Effet du nombre de couche des bandes de PRF sur la résistance à la compression du béton confiné (Park *et al.* 2008).
- Figure 2.16** : Influence de la résistance à la traction du PRF sur (a) la résistance en compression ultime et (b) la déformation ultime du béton confiné Sadeghian et Fam (2015).
- Figure 2.17** : Effet du pourcentage volumique du RAT sur le comportement des spécimens de colonnes en béton armé confiné par enveloppe en PRF Eid *et al.* (2009).
- Figure 2.18** : Effet de la résistance élastique de RAT sur le comportement des spécimens en béton armé confiné par enveloppe en PRF Eid *et al.* (2009).
- Figure 2.19** : Noyau de béton confiné dans les colonnes de section rectangulaires (Paultre and Légeron 2008).
- Figure 2.20** : Modèle contrainte déformation pour chargement monotone du béton confiné (Mander *et al.* 1988).
- Figure 2.21** : Développement de la pression de confinement dans le béton confiné par PRF (Girgin et Girgin 2015).
- Figure 2.22** : Diagramme contrainte-déformation pour le confinement par PRFC (Lam et Teng 2003).
- Figure 2.23** : Action de confinement du PRFC
- Figure 2.24** : Action de confinement par la combinaison FRPC et aciers transversaux.
- Figure 3.1** : Corrélation entre les valeurs prédites et expérimentales.
- Figure 3.2** : Corrélation entre les valeurs prédites et expérimentales.

- Figure 3.3** : Performance du modèle de Lam et Teng (2003).
- Figure 3.4** : Performance du modèle d'Ilki *et al.* (2004).
- Figure 3.5** : Performance du modèle de résistance de Jiang et Teng (2007).
- Figure 3.6** : Performance du modèle de résistance de Youssef *et al.* (2007).
- Figure 3.7** : Performance du modèle de Teng *et al.* (2009).
- Figure 3.8** : Performance du modèle de résistance de Benzaid *et al.* (2010).
- Figure 3.9** : Performance du modèle de résistance de Fahmy et Wu (2010).
- Figure 3.10** : Performance du modèle de résistance d'Ozbakkaloglu et Lim (2013).
- Figure 3.11** : Performance du modèle de résistance Lee *et al.* (2010).
- Figure 3.12** : Performance du modèle de résistance Chastre et Silva (2010).
- Figure 3.13** : Performance du modèle de résistance Wang *et al.* (2012).
- Figure 3.14** : Performance du modèle de résistance Hu et Seracino (2013).
- Figure 3.15** : Performance du modèle de résistance Teng *et al.* (2014).
- Figure 4.1** : Mécanisme de confinement par PRFC.
- Figure 4.2** : Courbe contrainte-déformation proposée pour le béton confiné par PRFC.
- Figure 4.3** : Comparaison entre la résistance ultime expérimentale et proposée.
- Figure 4.4** : Comparaison entre la déformation ultime expérimentale et proposée.
- Figure 4.5** : Performance du nouveau modèle de résistance pour le confinement par PRFC.
- Figure 4.6** : Comparaison entre les indicateurs de performance du modèle de résistance pour le confinement par PRFC développé et les autres modèles existants
- Figure 4.7** : Performance du nouveau modèle de déformation pour le confinement par PRFC
- Figure 4.8** : Comparaison entre les indicateurs de performance du modèle de déformation pour le confinement par PRFC développé et les autres modèles existants
- Figure 4.9** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n°54 de (Xiao et Wu 2000).
- Figure 4.10** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n°47 de (Xiao et Wu 2000).
- Figure 4.11** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 188 de (Lam *et al.* 2009).
- Figure 4.12** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 167 de (Berthet *et al.* 2005).
- Figure 4.13** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 156 de (Berthet *et al.* 2005).
- Figure 4.14** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 199 de (Jiang et Teng 2007).
- Figure 4.15** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 204 de (Jiang et Teng 2007).

- Figure 4.16** : Mécanisme de confinement pour le béton confiné par PRFC-RAT.
- Figure 4.17** : Courbe contrainte-déformation proposée pour le béton confiné par PRFC-RAT.
- Figure 4.18** : Comparaison entre la résistance ultime expérimentale et proposée.
- Figure 4.19** : Comparaison entre la déformation ultime expérimentale et proposée.
- Figure 4.20** : Performance du nouveau modèle de résistance proposé PRFC-RAT
- Figure 4.21** : Comparaison des indicateurs de performance entre le modèle de résistance proposé et les modèles existants pour le confinement par PRFC-RAT
- Figure 4.22** : Performance du nouveau modèle de déformation proposé (PRFC-RAT).
- Figure 4.23** : Comparaison des indicateurs de performance entre le modèle de déformation proposé et les modèles existants pour le confinement par PRFC-RAT.
- Figure 4.24** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S2F2 (Lee *et al.*2010).
- Figure 4.25** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S2F3 (Lee *et al.*2010).
- Figure 4.26** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S4F2 (Lee *et al.*2010).
- Figure 4.27** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H1L1C (Wang *et al.*2012).
- Figure 4.28** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H1L2M (Wang *et al.*2012).
- Figure 4.29** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H2L1M (Wang *et al.*2012).
- Figure 4.30** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C2H2L1M (Wang *et al.*2012).
- Figure 4.31** : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C2H2L2M (Wang *et al.*2012).
- Figure 5.1** : Influence du diamètre de la colonne ( $D$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa.
- Figure 5.2** : Influence du diamètre de la colonne ( $D$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vf} = 0,77$  %, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.3** : Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du diamètre de la colonne ( $D$ ) pour les modèles par PRFC et par PRFC-RAT, Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vf} = 0,77$  %.
- Figure 5.4** : Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 40$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vf} = 0,77$  %, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.5** : Influence de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $D = 400$  mm,  $f_{prf} = 2500$

MPa.

- Figure 5.6** : Influence de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D= 400$  mm,  $f_{prf}= 2500$  MPa,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.
- Figure 5.7** : Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) pour les deux types de confinement (par PRFC et par PRFC-RAT), Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.
- Figure 5.8** : Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D= 400$  mm,  $f_{co}= 40$  MPa,  $t_{prf}= 1,5$  mm,  $f_{prf}= 2500$  MPa,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.
- Figure 5.9** : Influence de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $D= 400$  mm,  $t_{prf}= 0,5$  mm.
- Figure 5.10** : Influence de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D= 400$  mm,  $t_{prf}= 0,5$  mm,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.
- Figure 5.11** : Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) pour les deux types de confinement (par PRFC et par PRFC-RAT), Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.
- Figure 5.12** : Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D= 400$  mm,  $f_{co}= 40$  MPa,  $t_{prf}= 0,5$  mm,  $f_{prf}= 3000$  MPa,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.
- Figure 5.13** : Influence de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.
- Figure 5.14** : Comparaison du gain de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $f_{co} = 30$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.
- Figure 5.15** : Influence de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vt} = 0,77$  %.
- Figure 5.16** : Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.17** : Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC+RAT proposé. Avec  $D = 300$ mm,  $f_{co} = 30$  MPa.
- Figure 5.18** : Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 600$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.19** : Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 800$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.

- Figure 5.20 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC+RAT, Avec  $D = 300$  mm,  $D = 600$  mm, et  $D = 800$  mm.
- Figure 5.21 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.22 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT Pour  $D = 600$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.23 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT Pour  $D = 800$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.24 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.25 :** Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $f_{ys} = 400$  MPa,  $f_{co} = 30$  MPa.
- Figure 5.26 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 600$  MPa.
- Figure 5.27 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 800$  MPa.
- Figure 5.28 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC-RAT, Avec  $f_{ys} = 400$ MPa,  $f_{ys} = 600$ MPa, et  $f_{ys} = 800$ MPa.
- Figure 5.29 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.30 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 600$  MPa.
- Figure 5.31 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 800$  MPa.
- Figure 5.32 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.33 :** Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa.

- Figure 5.34 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 1$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.35 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 1,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.36 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC-RAT, Avec  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $t_{prf} = 1$  mm, et  $t_{prf} = 1,5$  mm.
- Figure 5.37 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.38 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 1$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.
- Figure 5.39 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 1,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.

## LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 2.1 :** Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de verre E, d'aramide (Kevlar 49 et Kevlar 149) et de bore (Berthelot 2010).
- Tableau 2.2 :** Modèles existants pour des colonnes circulaires en béton confinées par PRFC.
- Tableau 2.3 :** Modèles de confinement pour des colonnes circulaires confinées par la combinaison PRFC et RAT.
- Tableau 3.1 :** Données expérimentaux du confinement par PRFC.
- Tableau 3.2 :** Données expérimentaux de 34 spécimens en béton confiné sous l'effet combiné du PRFC – RAT.
- Tableau 5.1 :** Différents paramètres traités et les quantités utilisés.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1. Problématique

Le diagnostic des constructions, après chaque séisme destructeur en Algérie, a montré la nécessité de réhabilitation de certains édifices importants, comme les ponts, et les bâtiments stratégiques afin de prolonger leurs durées de vie. Diverses techniques existent actuellement pour assurer une mise en conformité de ces structures, notamment les matériaux traditionnels tels que le béton et l'acier (Rodriguez et Park 1994, Attari et Si Youcef 2003 et Chemrouk *et al.* 2005), qui ont approuvé leurs limites durant leurs applications. Par ailleurs, l'utilisation des matériaux avancés a connu des progrès énormes dans le monde ces dernières années (Fanggi et Ozbakkaloglu 2015). Ces matériaux sont donc une solution de renforcement prometteuse, ayant connu des étapes très avancées, car ils possèdent des propriétés mécaniques importantes et une maniabilité durant leurs mises en œuvre (Morsy et Mahmoud 2013, Ozbakkaloglu 2013). Dans ce contexte, les matériaux composites utilisés comme moyens de renforcement ont commencé progressivement à partir des années 90 ; et plus particulièrement en Europe, au Japon et en Amérique du Nord. Les polymères renforcés de fibres (PRF) associés à des fibres de résistances élevées dans une matrice, dans laquelle ils sont noyés. Ces fibres fournissent la résistance et la rigidité au matériau composite (Lu *et al.* 2015).

Dans cette optique, plusieurs études ont été menées sur le comportement de colonnes circulaires en béton confinées par les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) (Lam et Teng 2003, Youssef *et al.* 2007, Fahmy et Wu 2010, Si Youcef *et al.* (2010), Si Youcef *et al.* (2015) et Sadeghian and Fam 2015). En conséquence, plusieurs modèles contraintes-déformations pour prédire leurs comportements sont proposés. L'une des premières études du modèle pour le béton confiné par le PRF a été mise en œuvre par Fardis et Khalili (1982). Vu l'utilisation très large des PRFC dans le renforcement des colonnes, plusieurs chercheurs (Saadatmanesh *et al.* 1994, Xiao et Wu 2000, Lam et Tang 2003, Illki *et al.* 2004, Youssef *et al.* 2007, Benzaid *et al.* 2010, Wei et Wu 2012, Ozbakkaloglu *et al.* 2013) ont développé des modèles de confinement par PRFC. D'autres travaux sont parues récemment qui considèrent explicitement l'effet de confinement par l'enveloppe des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) et le renforcement par armatures transversales (Harajli *et al.* (2006), Eid et Paultre (2008), Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Hu et Seracino (2013), Shirmohammadi *et al.* (2015)). Bien que ces modèles aient un degré de performance un peu raisonnable, leur mise en évidence apparaît très sollicitée avec une large base de données actualisées. Par conséquent, la prédiction d'autres modèles s'avère nécessaire.

## 2. Objectifs de la recherche

L'objectif général assigné dans ce travail est de traiter le comportement des éléments structuraux en particulier les colonnes circulaires confinées par matériaux composites. Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- Vu que la plupart des modèles de confinement par des polymères renforcés de fibres carbone (PRFC) pour les colonnes circulaires en béton ont été développées en fonction d'une base de données expérimentale limitée. Il est donc préférable de faire regrouper une large base de données expérimentale pour le béton de section circulaire confiné par PRFC, et de calibrer ces résultats expérimentaux sur la base d'une analyse de régression, afin de développer un nouveau modèle de confinement par PRFC pour les colonnes circulaires en béton ;
- Actuellement peu de travaux existent sur le comportement des colonnes circulaires, renforcées à la fois par des polymères renforcés de fibres carbone (PRFC) et par des aciers transversaux (RAT). En plus, les expressions des modèles proposés, pour prédire la résistance ultime et la déformation correspondante, sont complexes. Il est donc essentiel de s'occuper davantage de cet effet combiné et de faire calibrer les données expérimentales existantes avec une analyse approfondie, afin de développer un nouveau modèle contrainte-déformation de confinement sous l'effet combiné de PRFC et RAT, pour prédire le comportement axial monotone d'une manière plus simple et précise ;
- Enfin, on réalise une étude comparative entre ces deux modèles à travers une investigation paramétrique des facteurs influençant le confinement par des polymères renforcés de fibres de carbone, et on quantifie les gains de résistance et de déformation du béton confiné de ces deux modèles.

## 3. Plan de travail

Afin de mener ces objectifs décrits précédemment, cette thèse sera structurée en cinq chapitres.

Pour entamer les objectifs déclarés, il est nécessaire de connaître l'importance des matériaux composites dans la réhabilitation des ouvrages en béton armé. Le premier chapitre de cette thèse illustre les différentes techniques et les méthodes classiques et modernes employées dans les travaux de renforcement ou de réparation des structures en béton armé. Dans ce contexte, Nous avons essayé de rassembler les techniques modernes de renforcement des colonnes en béton, mettant en œuvre de nouveaux matériaux de familles polymères renforcés de fibres (PRF), afin de montrer l'importance des matériaux composites dans ce travail.

Dans le deuxième chapitre, on présentera des notions sur les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC), tout en précisant leurs avantages et leurs inconvénients dans le domaine du génie civil. Ensuite, nous présentons les paramètres influents sur le confinement par matériaux composites. Dans le même chapitre, un aperçu sur le confinement par des aciers transversaux est présenté ainsi qu'une revue de la littérature des modèles développés pour les colonnes circulaires confinées par PRFC sans considérer les aciers transversaux. Ensuite, on présentera le cas du confinement sous l'effet combiné du PRFC et aciers transversaux, et les modèles développés dans le sujet.

Le chapitre 3 sera consacré totalement à l'analyse de la performance de quelques modèles de confinement par PRFC sans et avec RAT. Cette performance sera réalisée sur une base de données qui regroupe plus 340 résultats expérimentaux tirés de la bibliographie. Deux indicateurs de performance sont utilisés à savoir : le coefficient de détermination ou le carré du coefficient de corrélation  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE. D'abord, l'analyse sera effectuée pour quelques modèles de confinement par PRFC sans tenir en compte l'effet des aciers transversaux. Dans un second lieu, elle sera menée pour quelques modèles de confinement qui tient en compte l'effet des aciers transversaux.

Comme réponse sur les objectifs de la thèse, le chapitre 4 sera réservé pour le développement de deux nouveaux modèles de confinement par PRFC, sur une large base de données expérimentales. Le premier modèle sera développé pour les colonnes circulaires en béton confinées avec PRFC seulement. Par la suite, un deuxième modèle analytique de confinement sous l'effet combiné du PRFC et acier transversaux pour les colonnes circulaires en béton sera proposé. Dans ce contexte, l'analyse de la performance des deux modèles développés par rapport aux modèles existants sera réalisée, ainsi que les courbes contrainte-déformation des modèles développés et les modèles existants seront confrontés aux courbes contraintes-déformations expérimentales pour différents chercheurs.

Les facteurs influençant le confinement par matériaux PRFC, à savoir : la résistance en compression du béton non confiné, le diamètre de la colonne, l'épaisseur des polymères renforcés de fibres de carbone et leurs résistances à la traction ainsi que la limite élastique des aciers transversaux et leurs pourcentages volumiques seront mis en évidence, à travers une étude paramétrique dans le cinquième chapitre. Dans ce contexte, une comparaison entre la pertinence de gain de résistances de ces deux modèles sera réalisée.

Enfin, la conclusion générale offre la réponse sur les objectifs déclarés, et dresse quelques perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE 1  
IMPORTANCE DES MATÉRIAUX COMPOSITES  
DANS LA RÉHABILITATION DES OUVRAGES  
EN BÉTON ARMÉ

## 1.1. INTRODUCTION

Plusieurs bâtiments existants, construits selon des codes plus anciens, ne possèdent pas la résistance aux séismes nécessaire et pourraient sérieusement compromettre la sécurité des personnes lors d'un mouvement sismique sévère.

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'importance de la réhabilitation des ouvrages en béton armé, particulièrement l'utilisation des matériaux composites durant ces dernières années. Dans un premier lieu, on décrit quelques techniques classiques de renforcement des ouvrages, en l'occurrence : chemisage en béton armé, collage par des plaques en acier, l'ajout des voiles en béton armé et l'ajout des contreventements métalliques. Ensuite, on essaye d'exposer quelques techniques de réhabilitation modernes, comme les renforcements par chemisage en acier, précontrainte transversale et par matériaux composites. À partir de cette dernière technique, on vise à présenter l'importance des matériaux composites dans le sujet de la thèse traitée.

## 1.2. NÉCESSITE DE LA RÉHABILITATION

La réhabilitation des ouvrages en béton armé est appliquée pour des opérations de réparation ou de renforcement. La réparation vise à retrouver la performance initiale d'une structure endommagée avec des interventions du type locale. Par ailleurs, le renforcement signifie l'augmentation de la résistance sismique de la structure endommagée ou non avec des interventions au-delà de la réparation, de sorte que la résistance sismique disponible dépasse la résistance requise, pour répondre à de nouveaux objectifs de remise en conformité structurale. Les objectifs du renforcement parasismique peuvent être de différentes natures : augmenter la résistance aux efforts latéraux, augmenter la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes (Raphaëlle 2012). Parmi les divers facteurs qui mènent à la réhabilitation structurale, on cite (Benzaid *et al.* 2013) :

- 1- Endommagement partiel de la structure dû aux séismes ;
- 2- Dégâts dans la structure dus à d'autres agents hors le séisme comme la corrosion, la diminution de la section des armatures dans le béton et les incendies ;
- 3- Défaillance dans la réalisation de la structure, comme les armatures insuffisantes ou males placées, mauvaise qualité des matériaux utilisés ou bien les dimensions des éléments structurels insuffisants ;
- 4- Rénovations des structures anciennes dans le cas du vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales ;

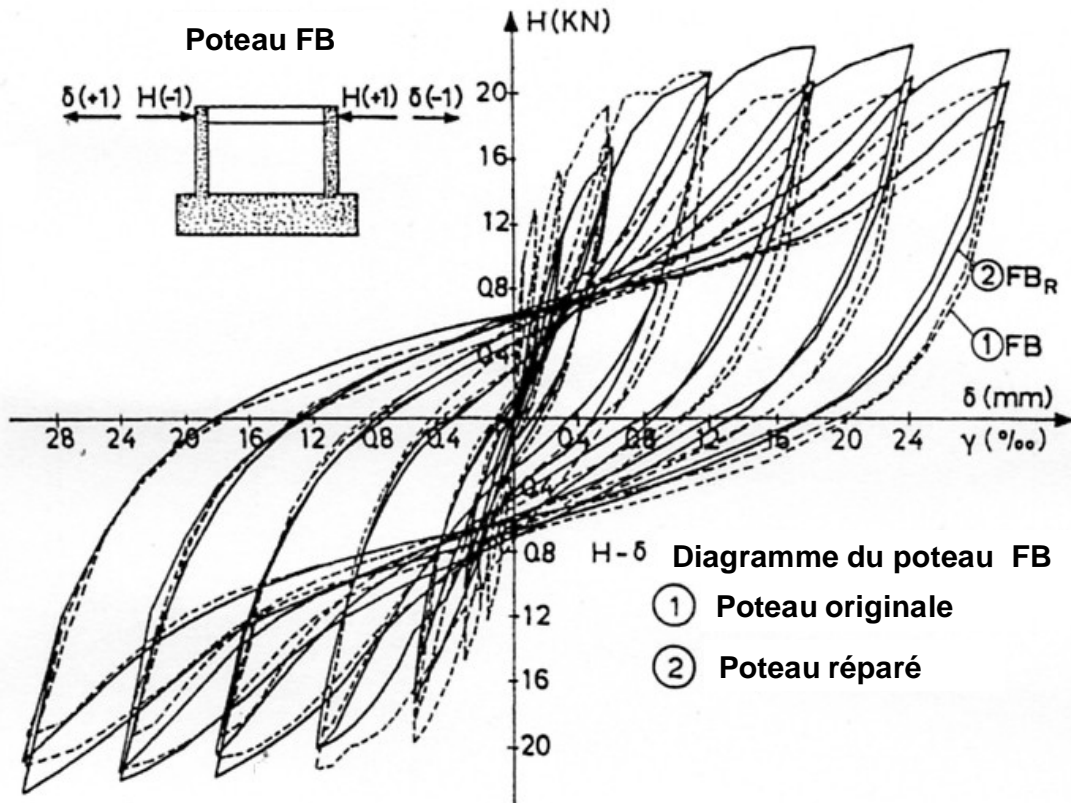
- 5- Changements de la forme de la structure dans le cas d'une suppression de poteaux, de murs porteurs, ou l'ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs ;
- 6- Augmentations des charges qui sollicitent la structure due au changement d'usage de l'ouvrage;
- 7- Demande d'amélioration des conditions en service, à savoir : la diminution des déformations, des flèches et des ouvertures des fissures ainsi que la réduction des contraintes sur les armatures.

### 1.3. NOTIONS SUR LES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT CLASSIQUES

L'importance de conservation des constructions, la nécessité d'entreprendre des réparations et des restaurations ainsi que le renforcement des structures ont permis de développer de nombreuses techniques de réhabilitations. Les techniques plus anciennes seront appelées techniques traditionnels ou classiques telles que : l'injection de résine, remplacement des pièces endommagées et le chemisage en béton armé (Laclau 2008). Dans ce paragraphe, on essaye d'exposer quelques notions sur les procédés classiques.

#### 1.3.1. Réparation par injection de résine

L'injection de résine et les mortiers de résine est appliquée seulement pour la réparation des poteaux avec de petites fissures ou écaillages sans écrasement du béton ou le flambement des armatures. Le degré de modification peut-être vérifié en comparant les courbes force déplacement ( $H-\delta$ ) du poteau original et du poteau réparé avec la résine époxyde (Figure 1.1). Les résultats de ces comparaisons encouragent davantage, en ce qui concerne l'efficacité de la réparation par injection de résine (Penelis et Kappos 1997).



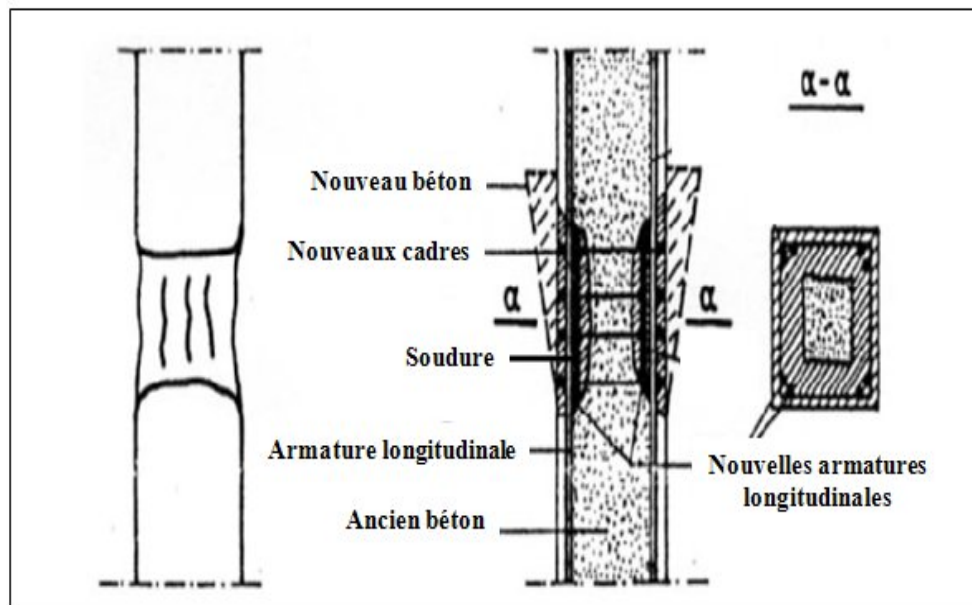
**Figure 1.1 :** Diagramme H- $\delta$  du poteau original et celui du même poteau réparé par l'injection de la résine (Penelis et Kappos 1997).

Les résultats expérimentaux récents concernant le calcul des dimensions des poteaux réparés avec des injections de résine ont montré que le rapport de résistance de l'élément réparé ( $R_{d,rep}$ ) à celui de l'élément original ( $R_{d,orig}$ ) est environ 1 ( $\frac{R_{d,rep}}{R_{d,orig}} \cong 1$ ). En général, les fissures réparées par époxydes ne rouvrent pas dans les essais ; les nouvelles fissures tendent à se développer à côté de celles réparées. La rigidité du poteau réparé ( $K_{rep}$ ) semble excéder 85% celle du poteau original ( $K_{orig}$ ) ( $\frac{K_{rep}}{K_{orig}} \cong 0.85$ ), et la même se produit avec la capacité de dissipation d'énergie E ( $\frac{E_{rep}}{E_{orig}} \cong 0.85$ ). L'adhérence entre les armatures et le béton semble également être reconstituée, même pour les rotations d'inter - étage élevées excédant 4 % (Penelis et Kappos 1997).

### 1.3.2. Réparation par la méthode de la section équivalente

La méthode de la section équivalente où l'enlèvement et le remplacement est appliquée sur les poteaux avec un degré élevé de dommages, c.-à-d., écrasement du béton, rupture des

cadres et flambement des armatures longitudinales. Naturellement, un système provisoire d'appui est nécessaire pour supporter les charges du poteau dégradé. Puis, si l'écrasement du béton est seulement superficiel, l'enlèvement pratique et la réparation sont effectués (Figure 1.2) ; autrement, si c'est un écrasement total il y a un enlèvement complet des matériaux, le placement de la nouvelle armature longitudinal avec la soudure, placement de nouveaux cadres étroitement espacés et le bétonnage (Penelis et Kappos 1997).



**Figure 1.2 :** Méthode de la section équivalente (Penelis et Kappos, 1997).

### 1.3.3. Renforcement par chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé est la technique de renforcement la plus utilisée pour le renforcement des éléments de structure endommagés telle que : les poteaux et les poutres. Cette technique de renforcement consiste à gratter en premier lieu les faces du poteau de la couche d'enrobage, ensuite placer autour du poteau une nouvelle armature longitudinale et transversale en acier, couler le béton dans un coffrage comme le montre la Figure 1.3. Dans les cas habituels de chemisages sur le périmètre, l'action composée de l'ancien et du nouveau béton est assurée seulement par la liaison naturelle des deux matériaux, qui peuvent être renforcés avec la rugosité de l'ancienne surface, et parfois, ils sont renforcés en soudant quelques barres repliées vers le haut entre les armatures longitudinales existants et le nouveau (Attari et Si Youcef 2003, Chemrouk *et al.* 2005, Si Youcef 2010). Avec cette technique de renforcement, la rigidité et la résistance à la flexion sont améliorées par l'augmentation de la section transversale et le renfort longitudinal supplémentaire. L'ajout des armatures transversales contribue à augmenter la résistance au cisaillement, la capacité de déformation et la résistance de l'ancrage. Le béton ajouté permet d'augmenter les dimensions de la section

chemisée et de fournir une zone de liaison plus longue. Comme, il améliore donc la résistance au cisaillement (Khuong 2015).



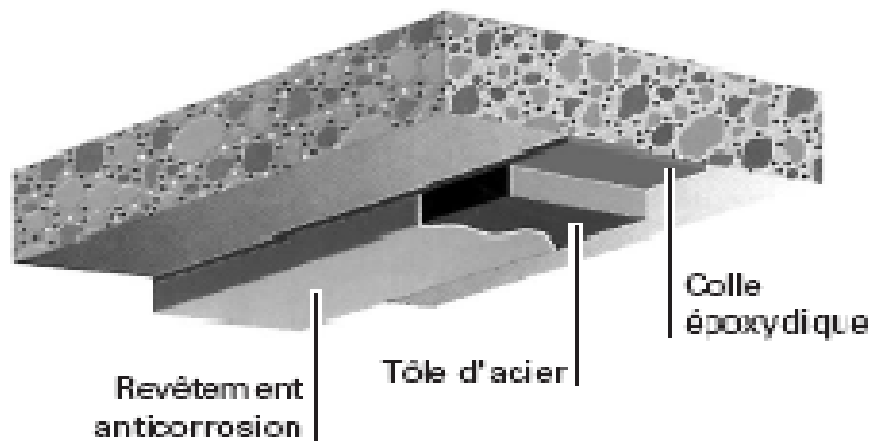
**Figure 1.3 :** Renforcement par chemisage en béton (Khuong 2015).

Pour justifier l'efficacité de cette technique de renforcement, une étude expérimentale a été réalisée par Rodriguez et Park (1994) afin de recueillir des données précises sur la résistance, la raideur et encore la ductilité obtenues en renforçant des poteaux endommagés ou non, par un chemisage en béton armé. Dans cette étude, les chercheurs ont montré que les poteaux chemisés et testés présentent une nette amélioration de la résistance et de la raideur par rapport au poteau non renforcé. Ils ont montré également que lors de l'application de cycles quasi-statiques de chargement latéral, avec des ductilités imposées allant jusqu'à 6, il est possible d'observer une très bonne dissipation d'énergie et seulement une très légère diminution de la résistance. Par ailleurs, très peu de différences de comportement peuvent être constatées entre les poteaux testés, réparés puis testés à nouveau et les poteaux renforcés avant toute sollicitation puis testés.

#### 1.3.4. Renforcement par collage de plaques en acier

Les plaques en acier sont souvent utilisées pour renforcer des éléments en béton armé comme des dalles et des poutres afin d'améliorer la résistance à la flexion, la rigidité, la capacité de déformation, et la ductilité (FEMA 273 1997), comme indiquées dans la Figure 1.4. Dans le cas des poutres, l'augmentation de la résistance au cisaillement est obtenue par l'adhérence des stratifiés métalliques sur les deux côtés opposés de l'élément avec l'application du chemisage en forme de U ou fermé. Les plaques d'acier sont considérées comme des armatures extérieures. La connexion complète entre les plaques et le béton est utilisée. Les

couches appliquées sur les plaques sont déterminées par le mode de rupture souhaité, selon lequel le matériau de réparation atteint sa déformation ultime classique, alors que la déformation du béton finale dans la zone de compression ne dépasse pas  $\varepsilon_c = 0.0035$ . Selon EN 1998-3 (2005), la valeur de calcul de la tension effective de la nouvelle armature est évaluée, sur la base de la contrainte ou de la déformation critique du matériau de réparation, ce qui dépend du type de mode de rupture. Afin d'éviter le décollement des bords du stratifié, en raison des contraintes de cisaillement et des contraintes de traction verticales qui se concentrent à l'interface, une longueur d'ancrage suffisante doit être prévue. Lorsque des plaques d'acier épaisses sont nécessaires, il est conseillé de préférer plusieurs couches minces, afin de minimiser les contraintes de cisaillement d'interface. Une bonne compréhension, à la fois à court terme et à long terme du comportement de l'adhésif utilisé, est nécessaire (Benzaid 2010, Benzaid *et al.* 2013, Khuong 2015).



**Figure 1.4 :** Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite (Hamelin 2002).

Un programme expérimental mené par (Vanek 1985) et (Vanek 1986) a eu comme objectif d'étudier le comportement des poutres en béton armé, renforcées à la flexion et à l'effort tranchant par la mise en place de renforcement extérieur en acier. Deux possibilités de fixation des tôles ont été utilisées : des goujons filetés et le collage avec une résine époxyde. L'augmentation de la capacité portante était plus importante pour les poutres dans lesquelles les tôles sont collées. La conclusion tirée est que les goujons augmentent considérablement la durée de vie de la structure en béton armé renforcée par collage de plaques en acier.

### 1.3.5. Renforcement par l'ajout des voiles en béton armé

Le renforcement par des voiles en béton armé se réalise sur la périphérie de la structure. La technique de renforcement par voile en béton armé est la plus utilisée en Algérie surtout après le séisme de Boumerdes en 2003. La bonne disposition de refends réduit considérablement les

effets de torsion de l'ensemble de la structure même si celle-ci présente une forme irrégulière. Ceci est dû à l'efficacité du système de contreventement par la reprise des efforts résultant d'une action sismique. En plus, l'intégration des voiles de contreventement à la périphérie de la construction est une opération relativement simple et non coûteuse. Cette technique de renforcement peut être réalisée pour augmenter la résistance latérale ainsi que la bonne disposition des renforts réduit considérablement les effets de torsion de l'ensemble de la structure (Figure 1.5). Par ailleurs, l'application de cette méthode a besoin de nouveaux systèmes de fondation qui permettent de relier les murs de contrefort avec la structure existante (Khuong 2015). Les inconvénients de cette technique sont :

- La stabilité des contreforts est critique, car le mur ajouté n'est pas réellement chargé verticalement vers le bas de la même manière que la structure. Dans la phase de réalisation, l'action verticale sur le contrefort est seulement due à son propre poids. Cela augmente la possibilité de soulèvement des fondations,
- Les liens entre les contreforts d'une part et le bâtiment de l'autre sont loin d'être simples. Pour assurer une interaction totale et le partage des charges lorsque la structure est soumise à des actions latérales, le contrefort doit être connecté aux étages et aux colonnes à tous les niveaux. La zone de raccordement sera soumise à des niveaux inhabituels de contraintes qui nécessitent une attention particulière (Khuong 2015).



**Figure 1.5 :** Renforcement des structures par l'ajout des voiles en béton armé.

### 1.3.6. Renforcement par l'ajout des contreventements métalliques

De même que les structures en béton armé, les structures en charpente métalliques endommagées peuvent être renforcées par l'ajout des contreventements métalliques de formes différentes à savoir en V, en X ou en K. comme illustré dans la Figure 1.6. Ce type de renforcement est très efficace pour le renforcement global des structures, car il présente l'avantage de permettre des ouvertures, et de n'ajouter qu'un poids faible à la structure. En plus, dans la phase de mise en œuvre, ce système ne perturbe pas le fonctionnement de l'immeuble et les occupants. Pour un étage ouvert au sol, les entretoises peuvent être placées dans des compartiments tout en conservant la fonctionnalité et l'utilisation du bâtiment. La connexion entre les entretoises et les cadres existants est un élément important de cette stratégie (FIB 2003). Les entretoises sont reliées principalement aux cadres aux niveaux des joints poutre-poteau. Les forces dans les entretoises sont transférées aux joints sous la forme de forces axiales, à la fois en compression et en traction. Ce système de contreventement fourni une augmentation significative de la capacité de la structure horizontale. Il est étudié pour la réhabilitation des bâtiments non-ductiles par de nombreux chercheurs (Badoux et Jirsa 1990 ; Masri et Goel 1996 ; Pincheira et Jirsa 1995). L'utilisation de cette méthode pour la réhabilitation des structures en béton armé est de plus en plus adoptée.



**Figure 1.6 :** Renforcement des structures par l'ajout des contreventements métalliques (Fardis 2009).

### 1.3.7. Discussion

Ces méthodes restent très contraignantes durant la réalisation, vu le volume de modification important apporté sur les poteaux, l'architecture initiale de la construction modifiée et le temps nécessaire à la réalisation considérable. D'ici vient l'importance de rechercher d'autres méthodes plus performantes pour la réhabilitation structurale. Quelques techniques de renforcement modernes seront l'objet de la partie suivante (Si Youcef 2010).

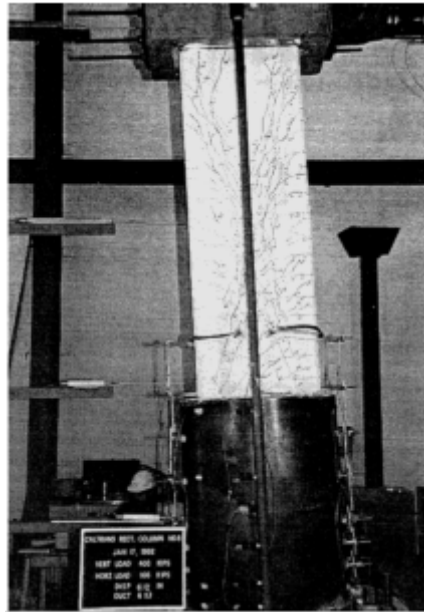
## 1.4. TECHNIQUES DE RÉHABILITATION MODERNES

Actuellement, il existe des techniques ultramodernes pour la réhabilitation des bâtiments. Un aperçu sur quelques techniques destinées au renforcement des colonnes en béton armé sera exposé, afin de montrer l'ampleur de ces méthodes.

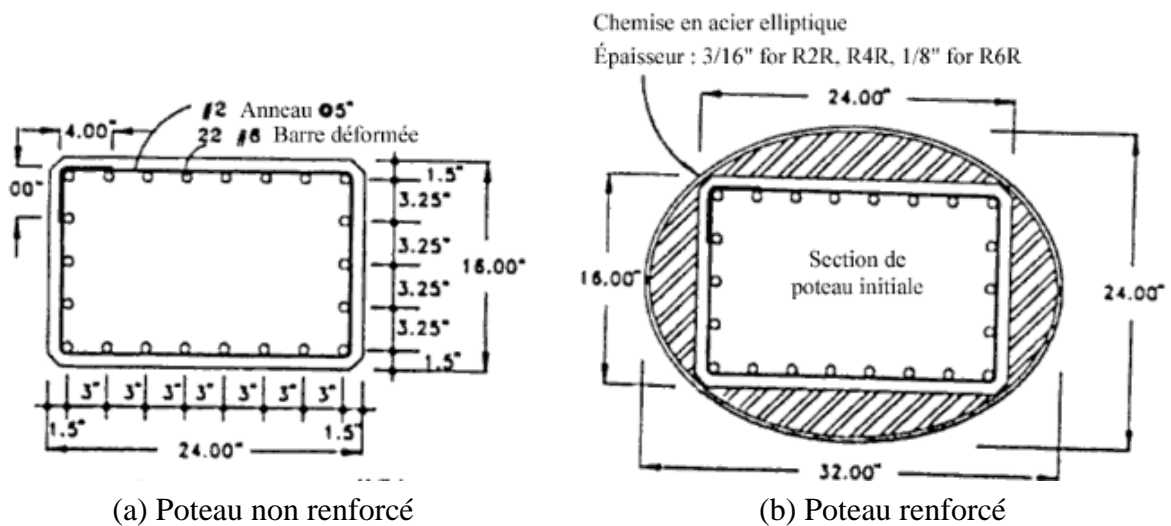
### 1.4.1. Renforcement par chemisage en acier

Le chemisage en acier est plus utilisé pour le renforcement des éléments structuraux endommagés malgré leur coût élevé par rapport au béton armé. Cette technique présente plusieurs avantages comme la simplicité et la facilité de mise en œuvre. Elle reste toujours une technique de choix pour les cas d'urgences après un séisme, afin d'éviter l'effondrement de bâtiments fortement endommagés, ou d'utiliser des structures modérément endommagées pendant la période d'attente de la décision de renforcement par une autre méthode. Les chemisages en acier peuvent être incorporés dans un chemisage en béton. En général, on utilise cette technique pour la réhabilitation des poteaux (Foo et al. 2001).

Pour les poteaux de section circulaire, cette technique consiste, à positionner deux demi-coques en acier (d'un rayon supérieur de 12 à 25 mm au rayon de la section initiale du poteau) autour du poteau, puis de les souder sur place de manière à former un tube continu. Le faible espace annulaire formé entre le tube d'acier et la colonne est alors comblé avec un coulis de ciment. Tandis que, pour les poteaux de section rectangulaire, la technique de mise en place est identique, mais il est recommandé d'utiliser des chemisages elliptiques, comme illustré dans les Figures 1.7 et 1.8. Ceux-ci présentent l'inconvénient d'être assez encombrants et peuvent par exemple gêner le trafic en réduisant la largeur des voies de circulation ; des chemisages rectangulaires ont été également développés. Cependant, même si les chemisages rectangulaires s'avèrent efficaces pour un renforcement au cisaillement, les performances en termes de confinement et d'amélioration de la ductilité en flexion sont beaucoup moins bonnes que celles obtenues par des chemisages elliptiques (Sun *et al.* 1993).



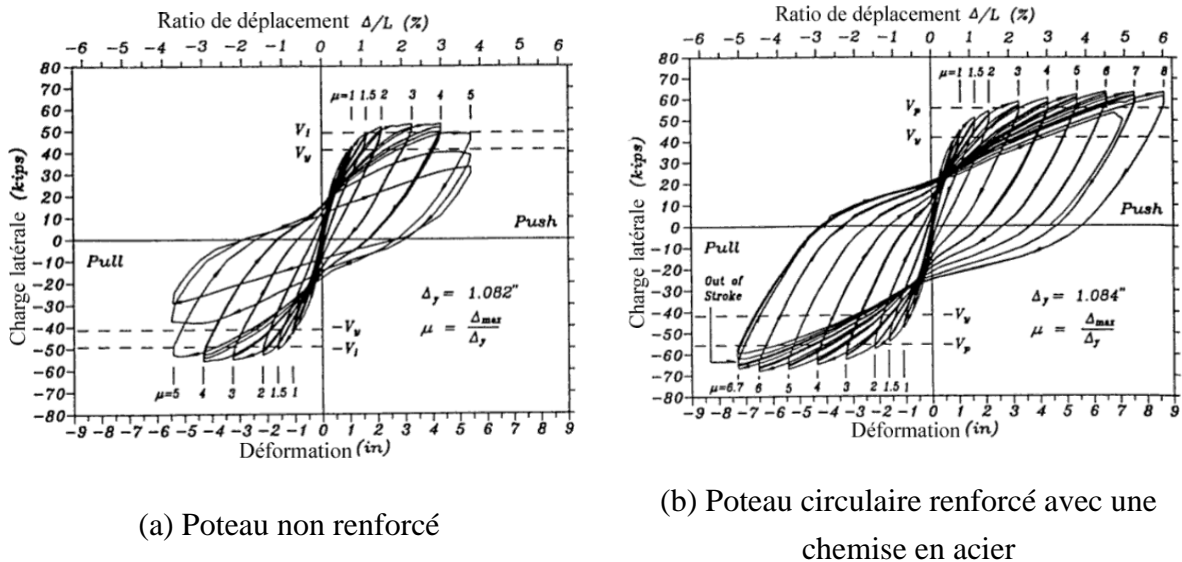
**Figure 1.7 :** Poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier (Priestley *et al.* 1996).



**Figure 1.8 :** Chemisage en acier des poteaux à section rectangulaire (Priestley *et al.* 1996).

L'efficacité des chemises en acier a été clairement démontrée, à la fois par les travaux de recherches expérimentales menés par Chai *et al.* (1991) sur des poteaux circulaires à l'Université de Californie, San Diego. Les chercheurs ont montré que la technique du chemisage en acier offre un comportement ductile en flexion aux poteaux confinés, en permettant une dissipation satisfaisante de l'énergie. La Figure 1.9 présente les courbes d'évolution du déplacement lors de cycles d'application d'un effort de flexion, mesurés sur des poteaux non confinés par chemisage comme présenté dans la Figure 1.9(a) puis confinés par chemisage comme illustré dans la Figure 1.9(b). Durant ces essais, l'effort est appliqué latéralement au sommet de chaque poteau et suit une évolution cyclique alternée. Sur la

Figure 1.9b, il est possible de constater que le chemisage en acier offre une très grande capacité de dissipation d'énergie. En revanche, si l'on teste un poteau endommagé puis réparé par un chemisage en acier, les performances alors obtenues sur celui-ci ne sont pas aussi importantes que pour le poteau renforcé initialement, même si l'amélioration reste considérable par rapport au poteau de référence non confiné. Par ailleurs, le chemisage en acier a permis d'augmenter la raideur de 10 à 15% (Chai *et al.* 1991).



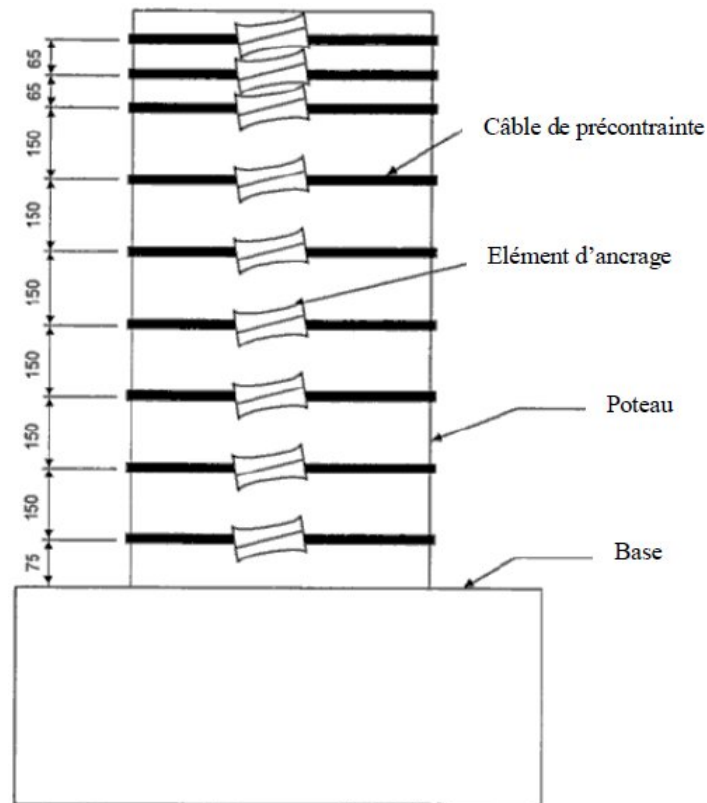
**Figure 1.9 :** Courbes force-déplacement d'un poteau non renforcé (a) et d'un poteau renforcé par chemisage en acier (b) (Chai *et al.* 1991).

#### 1.4.2. Renforcement par précontrainte transversale

La réhabilitation des structures fissurées par des pièces métalliques rapportées passives (cerces, boulons, tirants) est un procédé très ancien. Une nouvelle technique de renforcement par précontrainte transversale, qui présente certains points communs avec ce principe, a été trouvée, un développement rapide et remarquable dans le domaine de la réparation des ouvrages. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capable de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation (Benzaid *et al.* 2013).

Cette technique mise au point à l'université d'Ottawa et appelée Retro-belt (Saatcioglu *et al.* 2000), utilise des poteaux en béton précontraint obtenus au moyen de bandes d'acier à haute résistance placées autour des poteaux. Les bandes d'acier, faites de torons en acier à sept fils et d'éléments d'ancrage spécialement conçus, sont placées autour du poteau en respectant des espacements particuliers et sont précontraintes à un niveau de contrainte prédéterminé (Figure 1.10). Les éléments d'ancrage, placés sur la surface du poteau, assurent un ancrage adéquat des deux extrémités du toron. Bien que le toron en acier agisse comme

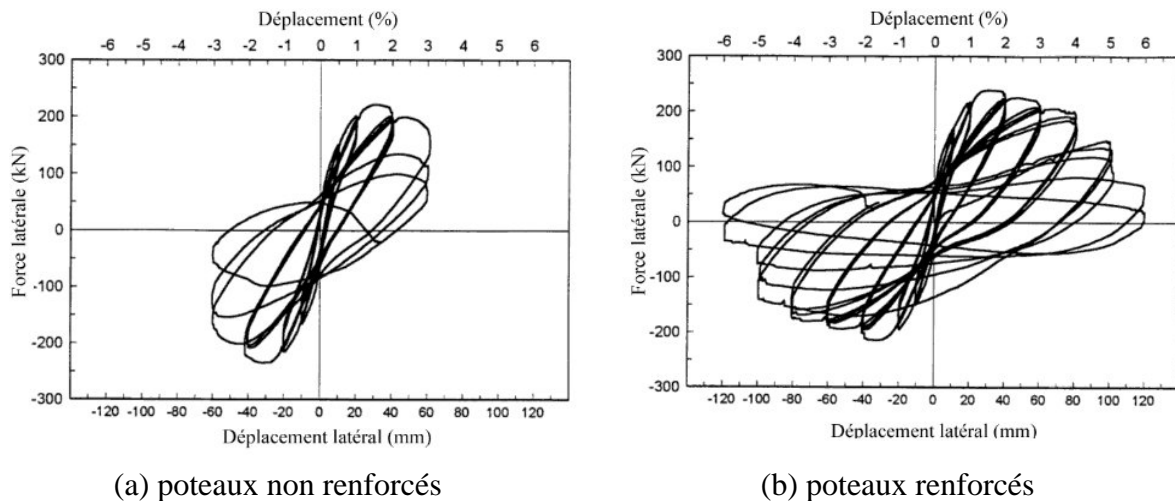
une armature supplémentaire contre le cisaillement, la pression latérale active améliore le confinement du béton, augmentant la résistance au cisaillement et à la flexion (Benzaid *et al.* 2013).



**Figure 1.10 :** Renforcement d'un poteau avec la précontrainte transversale (Saatcioglu *et al.* 2000).

Le programme de recherches expérimentales portait sur 19 poteaux de soutènement de pont de grandeur réelle, avec des sections carrés et circulaires, testés dans des conditions simulées de charge sismique. La Figure 1.11 (a et b) montre le comportement du poteau avant et après renforcement par précontrainte, à état de flexion dominant. La comparaison des deux parties de cette figure illustre, que le rendement des poteaux renforcés est supérieur à celui des poteaux non renforcé.

Cette méthode de renforcement des poteaux de bâtiment est prometteuse. Elle est efficace et peut être nettement plus économique que l'utilisation de chemises d'acier. L'installation d'un tel système occasionne une gêne moindre pour les occupants des bâtiments. Cette technique a été mise au point à la fin des années 1990 et son application potentielle dans le secteur des bâtiments n'a pas encore été réalisée.



**Figure 1.11** : Réponse d'un déplacement latéral de charge des poteaux circulaires à état de flexion dominant (Saatcioglu *et al.* 2000).

### 1.4.3. Renforcement par matériaux composites

#### 1.4.3.1. Généralité sur l'utilisation des matériaux composites

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité du bâti (l'accroissement de surcharges d'exploitation). La détérioration au cours du temps des matériaux, notamment du béton armé, ou la modification structurelle des bâtiments impliquent un besoin de développer des technologies de renforcement efficaces (Raphaëlle 2012). Les critères prépondérants dans l'évaluation de ces technologies sont les suivants :

- ✓ La diminution des contraintes de mise en œuvre et du coût de la solution de renforcement ;
- ✓ La durabilité de la solution technologique.

Actuellement, les matériaux composites appartenant à la famille des polymères renforcés de fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la réhabilitation des constructions. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux. Cette technique est plus efficace pour l'augmentation de la résistance des éléments structuraux. Son application est relativement simple, très peu dérangeante pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu exigeante en main-d'œuvre. Les caractéristiques non-corrosives des fibres de carbone et leur résistance à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement une durée de vie plus longue que celle des matériaux conventionnels tels que l'acier (Raphaëlle 2012).

Les matériaux composites offrent de multiples possibilités dans le domaine de la construction ; où ils se sont développés progressivement à partir des années 90. On peut ainsi

noter les progrès de leur utilisation en Europe, au Japon et en Amérique du Nord (Luyckx, 1999). En effet, dans les années 1990 au Japon, de nombreux ponts en béton ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion des aciers. Les renforts ont été appliqués sur les piles ou sur les surfaces inférieures des tabliers en utilisant des tissus pré-imprégnés à base de fibres de carbone mis en œuvre suivant la méthode de « stratification directe ». Aux États-Unis, les recherches concernant le renforcement des structures en génie civil par matériaux composites ont été initiées suite au séisme de Loma Priéta (Californie) survenu en octobre 1989 (Luyckx, 1999). En Europe, les principales applications en réhabilitation de structures en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996. En 1996, la société Freyssinet a renforcé le premier pont autoroutier français en remplaçant les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydes.

#### **1.4.3.2. Techniques de renforcement par PRF de carbone**

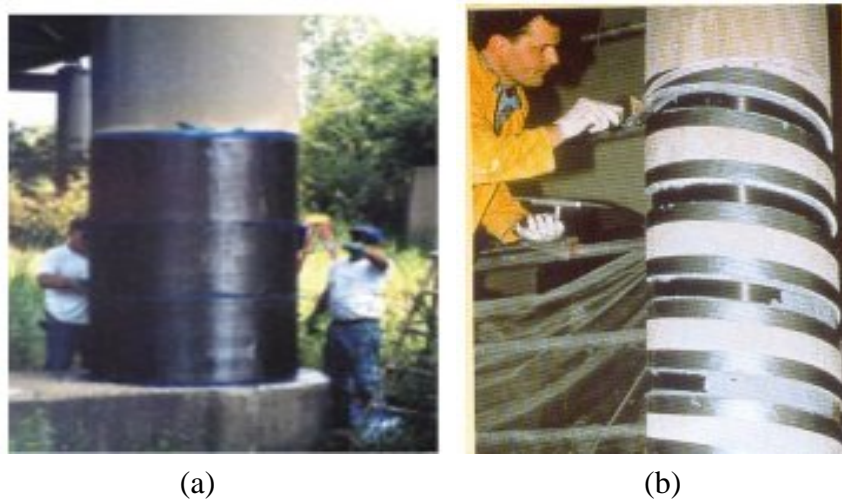
L'installation du système de renforcement avec des matériaux composites varie d'un fabricant à un autre, par ailleurs, le processus passe généralement par les étapes suivantes (Benzaid *et al* 2013) :

- ✓ Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer ;
- ✓ Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy ;
- ✓ Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat ;
- ✓ Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres ;
- ✓ Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation ;
- ✓ Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint ;
- ✓ Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure ;
- ✓ Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.

#### **1.4.3.3. Réhabilitation des colonnes par PRF de carbone**

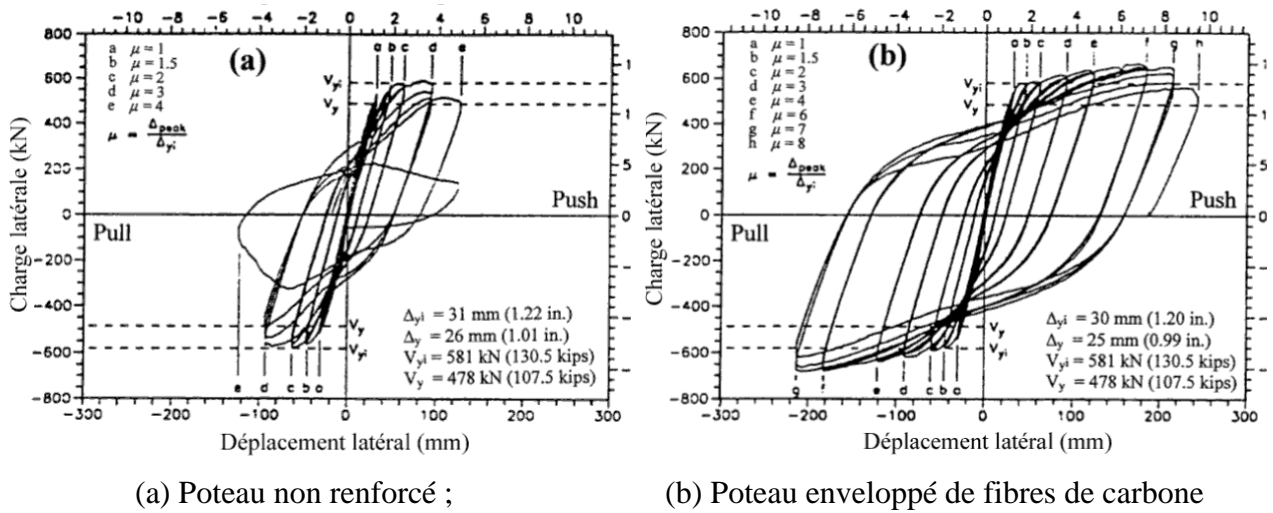
La technique de renforcement largement employé consiste à confiner les colonnes en béton armé (Figure 1.12), en appliquant des feuilles de PRF sur le périmètre des colonnes (fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la colonne). Ainsi, lorsqu'un chargement axial est appliqué à la colonne, le béton se dilate latéralement, créant des contraintes de traction dans le PRF qui s'oppose à l'augmentation de section de la colonne, induisant ainsi un état de contrainte tridimensionnel dans le béton. Il en résulte une augmentation de la capacité portante et de la ductilité de la structure (Berthet *et al.* 2005 et Hadi 2007). Cette méthode

peut aussi servir à augmenter la résistance de certaines structures situées dans des zones sismiques très actives.



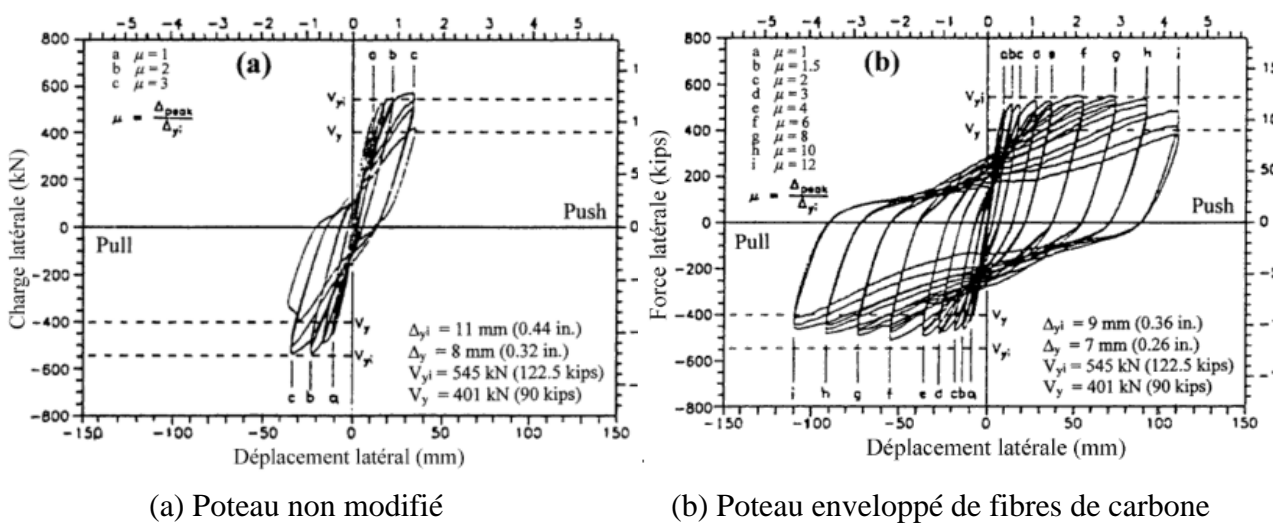
**Figure 1.12 :** Confinement des colonnes en béton armé par matériaux composites PRFC  
(a) enveloppée totalement, (b) partiellement enveloppée (Benzaid 2010).

De nombreux travaux de recherches ont été réalisés pour mettre en évidence l'efficacité des chemises en composite de fibres de carbone (Foo *et al.* 2001, Raphaëlle 2012, Benzaid *et al.* 2013, Khuong 2015). La Figure 1.13 décrit le renforcement du poteau à l'aide de chemises de composites de fibres de carbone. En général, les résultats des essais de renforcement des poteaux circulaires avec des chemises en matériaux composites ont démontré une amélioration des paramètres de ductilité et de résistance au cisaillement. Afin d'évaluer l'efficacité des chemises en fibres de carbone pour les trois modes de défaillance possible des poteaux provoqués par une flexion, un cisaillement et un décollement des barres de recouvrement. Dans la suite, on expose un aperçu des travaux réalisés à l'université d'Ottawa par Seible *et al.* 1997. Ces derniers ont validé le dimensionnement d'un chemisage en PRF sur différents corps d'épreuve, en fonction de divers modes de ruptures. La campagne expérimentale a notamment porté sur la vérification des performances des poteaux sollicités en flexion. Les essais ont permis de montrer les performances d'un chemisage par PRFC. En effet, la figure 1.13 montre les courbes Charge - déplacement latéral d'un poteau non renforcé et d'un poteau renforcé, en cas de flexion. Les courbes d'hystérésis des poteaux non modifiés et des poteaux renforcés sont obtenues en appliquant des charges cycliques horizontales sur le sommet des poteaux. La Figure 1.13(b) montre que la chemise de fibres de carbone accroît la capacité ductile des poteaux, où le rapport de la ductilité est doublé dans le poteau modifié comparativement à l'état initial. Concernant les zones enclouonnées par les cycles d'hystérésis, des poteaux non modifiés et des poteaux renforcés, on observe que les chemises de carbone ont nettement amélioré la capacité d'absorption d'énergie du poteau.



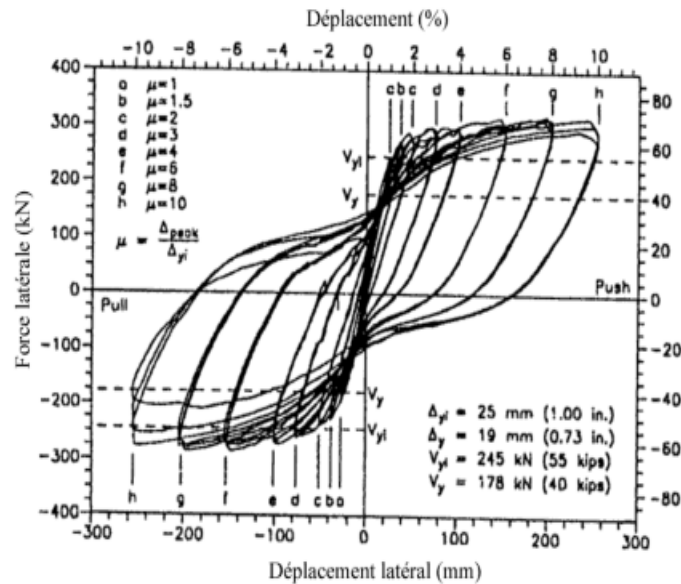
**Figure 1.13 :** Charge-déplacement latéral d'un poteau non modifié et d'un poteau renforcé, en cas de Flexion (Seible *et al.* 1997).

La Figure 1.14 montre les cycles d'hystérésis provenant des essais sur les poteaux non modifiés et les poteaux renforcés par des chemises de fibres de carbone, dans le cas de cisaillement. D'après la Figure 1.14(b), on observe qu'avec la chemise de fibres de carbone la ductilité dépasse quatre fois les poteaux non renforcés, sans que cela ne cause de diminution de la résistance au cisaillement. Même que, la forme des cycles d'hystérésis des poteaux renforcés indique clairement que la chemise de fibres de carbone a donné une capacité de dissipation d'énergie substantielle au poteau. Ces résultats prouvent que les chemises de fibres de carbone proprement conçues peuvent empêcher les ruptures par cisaillement, et que leur utilisation peut améliorer la ductilité des poteaux renforcés.



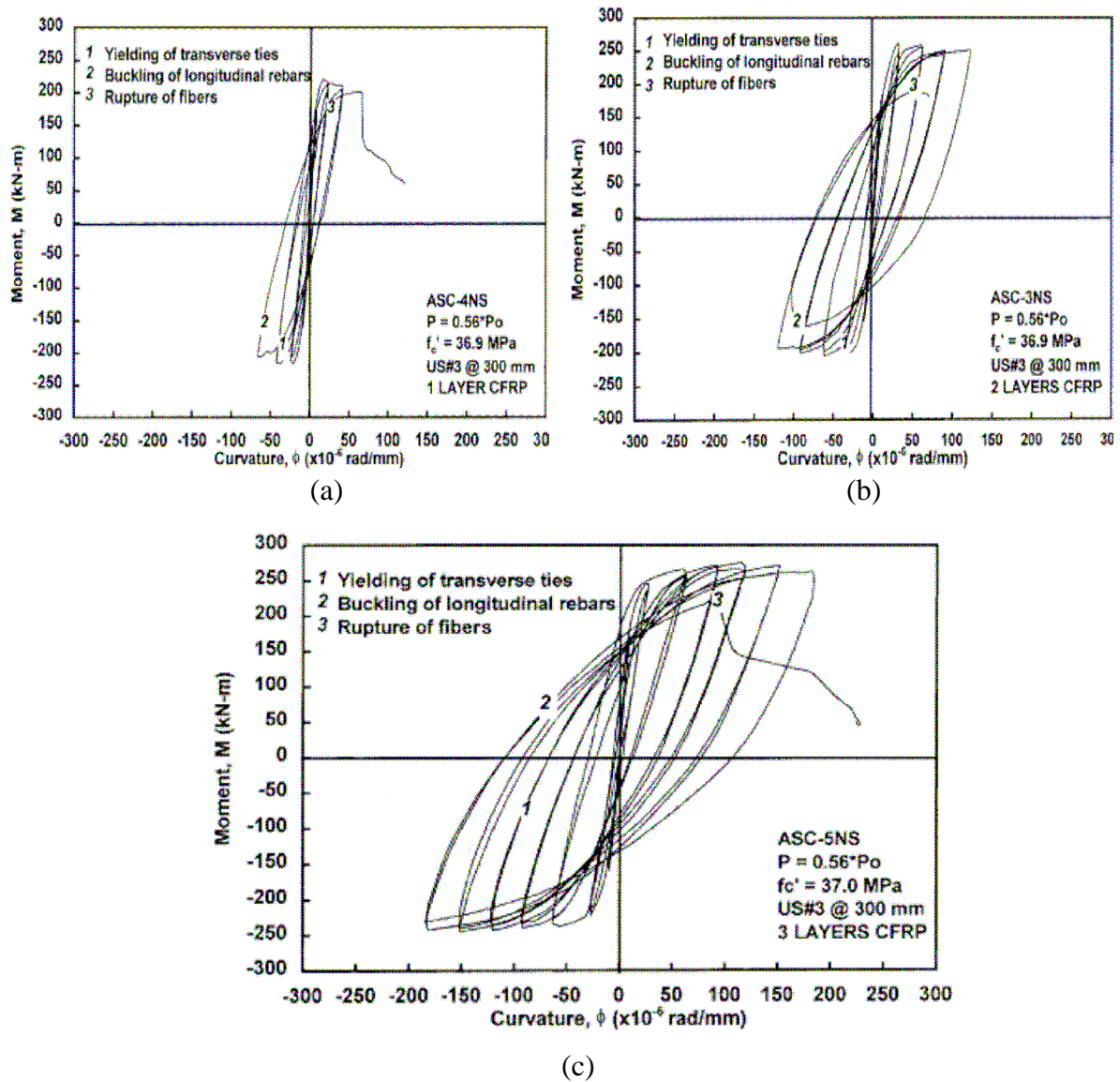
**Figure 1.14 :** Charge-déplacement latéral d'un poteau non modifié et d'un poteau renforcé, en cas de cisaillement (Seible *et al.* 1997).

La figure 1.15 montre les cycles d'hystérésis obtenus lors des essais effectués sur les poteaux renforcés, au niveau de fixation des barres de recouvrement. D'après cette figure, on constate qu'avec des cycles d'hystérésis stables, la chemise de fibres de carbone a généré un rapport de ductilité allant jusqu'à 10, ce qui indique que cette méthode de renforcement est très efficace pour les poteaux munis de barres de recouvrement inadéquates.



**Figure 1.15 :** Charge-déplacement latéral d'un poteau renforcé, en cas de fixation des barres de recouvrement (Seible *et al.* 1997).

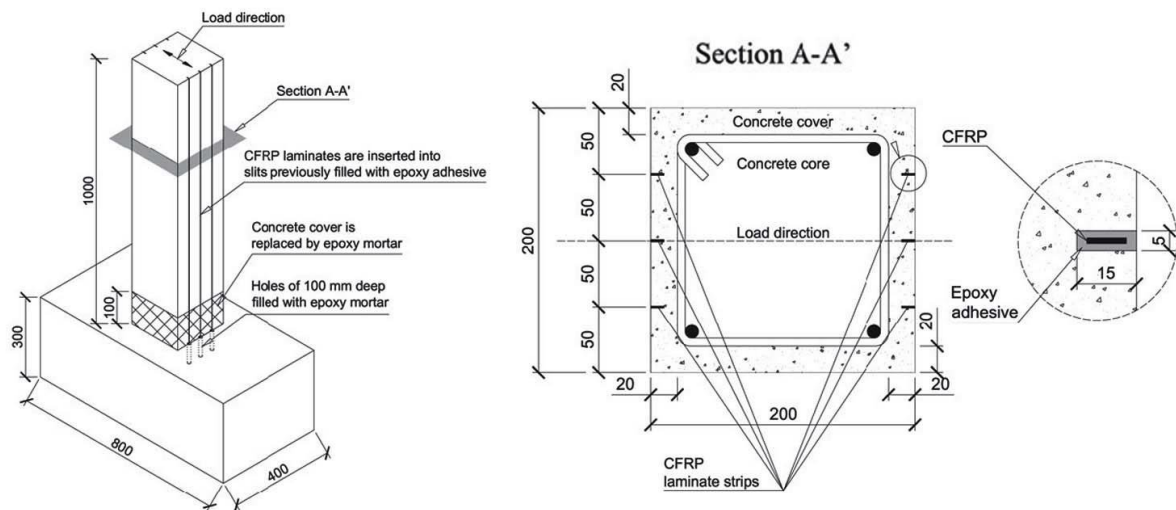
Iacobucci *et al.* (2003), ont effectué des essais expérimentaux sur huit poteaux, représentatifs de poteaux de bâtiments et de ponts construits avant 1971, renforcés par PRFC (fabriqués à base de tissus de fibres de carbone) collés autour de la zone de rotule plastique (sur une hauteur de 610 mm à partir de la base du poteau), et par PRFV (PRF de Verre, fabriqué à base de tissu de fibre de verre) sur le reste de la hauteur du poteau. Le paramètre principal adopté par les chercheurs dans cette étude est le nombre de couches de PRFC dans la zone de rotule plastique. A partir des résultats trouvés, la Figure 1.16 indique clairement que les renforts appliqués permettent bien d'améliorer les performances des corps d'épreuves, en termes de ductilité et de capacité à dissiper l'énergie. Ils permettent également de meilleures capacités à reprendre un moment de flexion par la réponse du spécimen rendue plus ductile. En outre, le comportement cyclique s'améliore avec le nombre de couches de PRFC appliquées. Cependant, des efforts axiaux importants causent plus d'endommagement aux poteaux et sollicitent davantage le chemisage PRFC. Le nombre de couche élevé de PRFC en zone critique est nécessaire en cas de charges axiales importantes (Raphaëlle 2012).



**Figure 1.16 :** Courbes moments-courbures pour les corps d'épreuve renforcés par (a) 1 couche, (b) 2 couches et (c) 3 couches de PRFC dans la zone de rotule plastique (Iacobucci *et al.* 2003).

La performance sismique des colonnes en béton armé dépend de la longueur de recouvrement des aciers longitudinaux à l'encastrement. Dans les codes de conception récents, cette longueur est estimée de 20 à 35 fois le diamètre de l'armature longitudinale. Cette condition permet de transférer tous les efforts aux armatures longitudinales de la fondation. L'objectif du renforcement est d'augmenter la contrainte ultime d'adhérence entre les aciers et le béton de recouvrement et de maintenir le niveau de contrainte ultime en zone critique de grande rotation. Le chemisage par FRP peut alors être une solution intéressante (Khuong 2015).

Barros *et al.* (2008) ont testé une technique consistant à insérer des plats PRFC dans des rainures pré-creusées sur les faces du poteau. Ces lamelles sont ancrées dans la semelle sur une profondeur d'environ 100 mm, et en pied de poteau le béton d'enrobage est détruit, et remplacé par un mortier époxy (Figure 1.17). L'étude réalisée sur 8 poteaux et 12 essais : 4 poteaux sont non renforcés. Ensuite, ils sont renforcés puis testés à nouveau. Les poteaux sont testés en flexion composée avec un effort latéral alterné et d'amplitude croissante. Les poteaux renforcés ont montré un gain en résistance à la flexion (par rapport aux poteaux non renforcés) de 92 % pour les poteaux présentant des aciers de 10 mm et de 34 % pour les poteaux présentant des aciers de 12 mm. Aucun phénomène de décollement des lamelles n'est observé. Cette technique constitue donc une très bonne solution pour l'amélioration de la résistance en flexion des poteaux. Cependant, l'effet de confinement n'est pas pris en compte et la capacité à dissiper l'énergie du poteau n'est pas augmentée (Raphaëlle 2012, Khuong 2015).



**Figure 1.17 :** Technique de renforcement en flexion pour les colonnes RC  
(Barros *et al.* 2008).

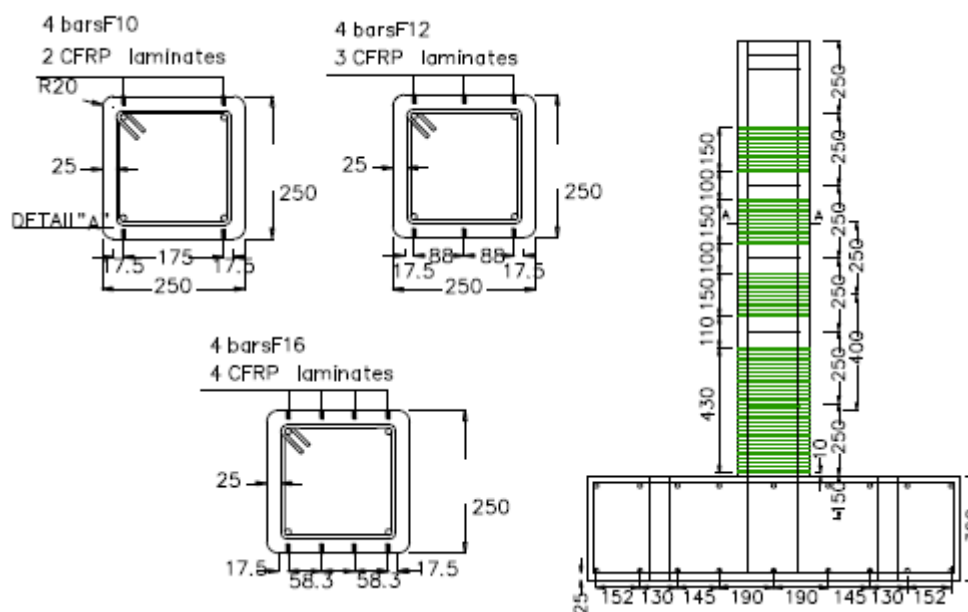
Rousakis et Karabinis (2008), ont mené une étude sur le confinement des polymères renforcés de fibres (PRF) dans l'amélioration de la ductilité et la résistance des éléments en béton armé soumis à une compression axiale monotone. Un programme expérimental a été réalisé pour traiter le comportement des bétons dans les éléments de structure ancienne de section carrée, ayant une très faible résistance à la compression, et des armatures longitudinales ayant subi un flambement. Les spécimens en béton armé ont été renforcés avec des enveloppes PRF en fibres de carbone ou de verre. D'autres spécimens en béton confinés avec des matériaux composites PRF ont été réalisés et testés pour évaluer les effets de confinement des étriers en acier, des composites PRF, ou le double confinement (étriers en acier plus PRF). D'après les résultats, les auteurs ont montré que le confinement avec des

matériaux composites PRF peut améliorer considérablement la résistance à la compression, la ductilité ainsi que la capacité d'absorption d'énergie du béton de faible résistance. Dans le cas de confinement avec des étriers en acier avec un faible rapport volumétrique de confinement mécanique, le comportement de la colonne est régi principalement par la déformation de l'enveloppe PRF, ce qui contribue de manière significative à la résistance et la ductilité du béton. Dans les échantillons avec un espacement de 200 mm entre les étriers, dans lesquels le flambement des bars d'armatures a été prévu, l'enveloppe PRF additionnelle a procurée une restriction latérale suffisante pour retarder ou même empêcher le flambement prématurée des armatures longitudinales. Selon les résultats expérimentaux de Rousakis et Karabinis, la ductilité des spécimens en béton armé confiné avec des matériaux composites PRF a été presque du même niveau que celle des spécimens en béton confinés seulement avec des matériaux composites PRF (Kheloui 2012, Benzaid et al. 2013).

Roy *et al.* (2009), qui ont testé le comportement de 3 poteaux de section circulaire avec un diamètre de 300mm et une hauteur de 2.15m. Le premier poteau n'était pas renforcé, le deuxième était renforcé par 2 couches de PRFC (selon un dimensionnement visant un niveau de performance en déplacement) et le troisième était renforcé par 4 couches de PRFC (selon un dimensionnement de type classique, c'est-à-dire visant une capacité de reprise d'effort), et soumis à une charge axiale constante avec une sollicitation cyclique alternée. Les résultats de Roy *et al.* (2009), ont montrés que le poteau non renforcé et le poteau renforcé par 2 couches de PRFC présentent une ductilité de comportement significativement différente (ductilité 3,4 pour le poteau non renforcé et de 5 pour le poteau renforcé par 2 couches de PRFC). Cependant, cette campagne expérimentale indique que le renforcement par 4 couches de PRFC résulte un confinement trop important, ce dernier peut introduire des dommages supplémentaires concentrés dans les régions proches de la zone confinée (Raphaëlle 2012, Khuong 2015).

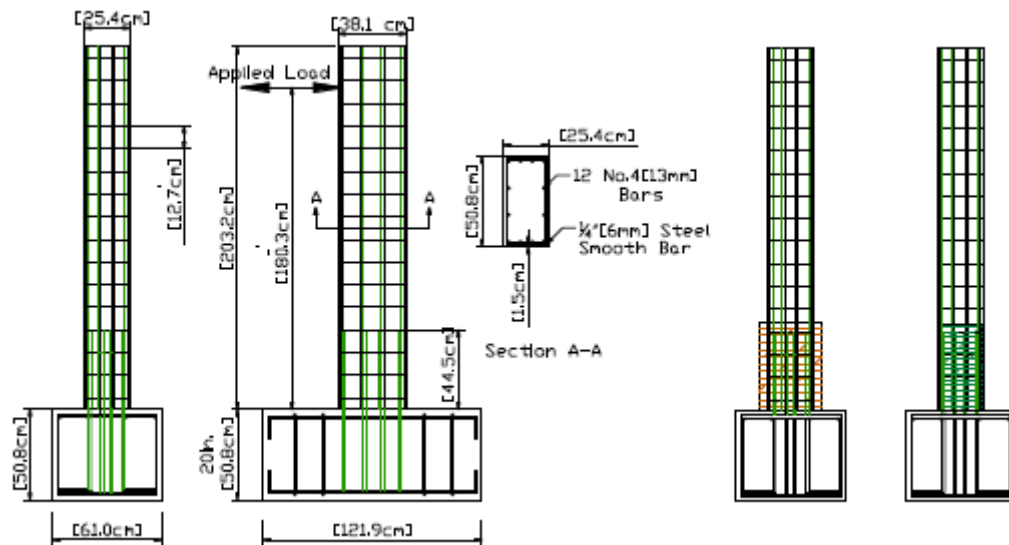
Perrone *et al.* (2009) ont étudié le comportement de poteaux en béton armé renforcés par des matériaux composites selon une technique dite hybride. Cette technique combine l'action de chemisage de PRFC et de plats PRFC insérés dans des rainures pré-creusées sur les faces de poteau (Figure 1.18). Les lamelles sont ancrées dans la semelle (profondeur de 120 à 150 mm) et ont pour objectif d'améliorer la résistance en flexion des poteaux (Figure 1.18). Des chemisages de FRP sont ensuite appliqués (430 mm en pied de poteau, puis 150mm entre les cadres existants) pour améliorer le confinement du béton, la résistance au cisaillement, éviter tout décollement des plats PRFC et améliorer la liaison entre les aciers de recouvrement à la jonction poteau-semelle. Cette technique a été testée sur huit spécimens avec des paramètres tels que la résistance en compression du béton, le nombre de couches de tissus et le taux d'aciers longitudinaux, dans l'objectif d'analyser les performances en termes de résistance (effort ultime) et de dissipation d'énergie. Les corps d'épreuve sont soumis à un effort axial

constant de 120 KN et des chargements cycliques d'amplitude croissante. Les résultats obtenus montrent une augmentation de 67 % de la capacité portante des poteaux renforcés (par rapport aux poteaux de référence) et de 56 % de sa capacité à dissiper l'énergie. Cette capacité à dissiper l'énergie passe même à 109 % pour le poteau ayant une résistance en compression de 29 MPa (par rapport aux autres corps d'épreuve, présentant une résistance en compression de 8 MPa). En outre, l'énergie dissipée par les poteaux renforcés augmente avec le taux d'aciers longitudinaux ainsi qu'avec le nombre de bandes PRFC. Cette technique hybride permet de répondre aux critères de la conception sismique comme la capacité portante et une importante capacité à dissiper l'énergie (Raphaëlle 2012, Khuong 2015).



**Figure 1.18 :** Technique hybride - Détails de la disposition des plats PRFC (Perrone *et al.* 2009).

El Gawady *et al.* (2010) ont réalisé une étude sur huit poteaux soumis à un chargement de flexion composée de type sismique dont 2 spécimens de référence, 5 renforcés par un chemisage en PRFC et 1 renforcé par un chemisage en acier (Figure 1.19). Tous présentent un recouvrement des aciers en pied de poteau. Les résultats de ces tests montrent que les chemisages en acier ou PRFC permettent de passer d'une rupture par glissement des aciers de recouvrement sur les poteaux non renforcés, à une rupture par plastification (due aux cycles de chargement) des aciers longitudinaux. Les dommages dans tous les spécimens renforcés sont concentrés dans l'espace entre le chemisage et la base du poteau. Le renforcement par PRFC ne change pas la raideur initiale des spécimens, tout en permettant d'augmenter leur résistance en fonction du taux de PRFC appliqué (Raphaëlle 2012, Khuong 2015).



**Figure 1.19 :** Dimension des spécimens et deux techniques de renforcement (ElGawady *et al.* 2010).

#### 1.4.4. Discussion

A l'issue de ces notions sur les techniques de renforcements modernes, notamment le renforcement par matériaux composites en polymères renforcés de fibres (PRF), on peut déduire que l'utilisation de ces nouvelles techniques procure, aux éléments structuraux soumises à différents chargement (monotone ou sismique), une amélioration significative de la performance en terme de résistance et ductilité. Cette amélioration est plus importante par rapport au cas d'utilisation des techniques classiques. Cet effet très propice de matériaux composites en polymères renforcé de fibres sera mis en évidence dans les chapitres suivants.

#### 1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a essayé de montrer l'efficacité des techniques de réhabilitation modernes, particulièrement les matériaux composites, dans le renforcement des éléments des ouvrages en béton armé comparativement aux techniques de renforcement classiques. Dans ce contexte, on a exposé quelques techniques de renforcement classiques, comme les renforcements par chemisage en béton armé, par collage de plaques en acier, par l'ajout des voiles en béton armé et des contreventements métalliques. Ensuite, on a initié avec les techniques de réhabilitations modernes des structures, à savoir : le chemisage en acier, la précontrainte transversale et les matériaux composites PRF. Afin d'illustrer leurs importances dans la réhabilitation, on a exposé quelques travaux menés récemment sur le renforcement par polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Le confinement avec ces matériaux composites renforcés de fibres de carbone (PRFC), sera fait l'objet dans la présente thèse.

CHAPITRE 2 :  
COMPORTEMENT DES COLONNES CONFINÉES  
PAR LES POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES  
DE CARBONE (PRFC)

## 2.1 INTRODUCTION

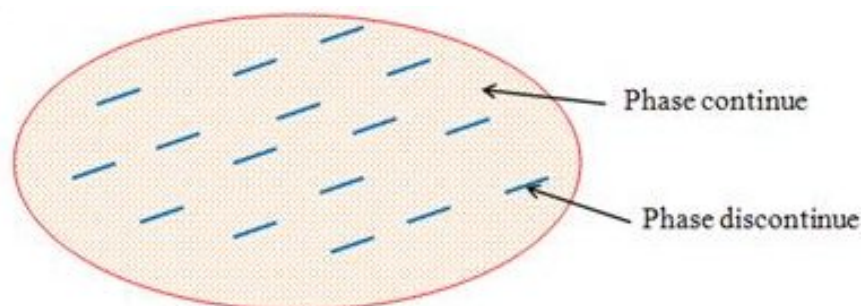
Dans ce chapitre, on essaye d'exposer une revue générale sur le comportement des colonnes confinées par les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Dans un premier lieu, on va faire un rappel de quelques notions sur les polymères renforcés par les fibres. Ensuite, on illustre les différents paramètres influençant le comportement des colonnes confinées par PRFC. Afin de visualiser l'ampleur du confinement, on présente l'aspect qualitatif du confinement classique avec des armatures transversales des colonnes en béton armé. Dans ce contexte, on montre la différence entre les confinements actifs et passifs des colonnes ainsi que leurs pressions latérales. Par la suite, on établit un bilan général sur les lois de comportements développées pour le confinement des colonnes circulaires par PRFC. En fin, on visualise un état détaillé sur les modèles de confinement par la combinaison des polymères renforcés de fibres de carbone et les armatures transversales.

## 2.2. NOTIONS SUR LES POLYMÈRES RENFORCÉES DE FIBRES DE CARBONE (PRFC)

### 2.2.1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, différents par leurs natures, leurs formes et leurs fonctions, leurs assemblages finals obtenus présente des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. En outre, un matériau composite consiste, dans le cas général, d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée « la matrice », la phase discontinue est appelée « le renfort » (Figure 2.1). En générale, les constituants principaux d'un matériau composite sont :

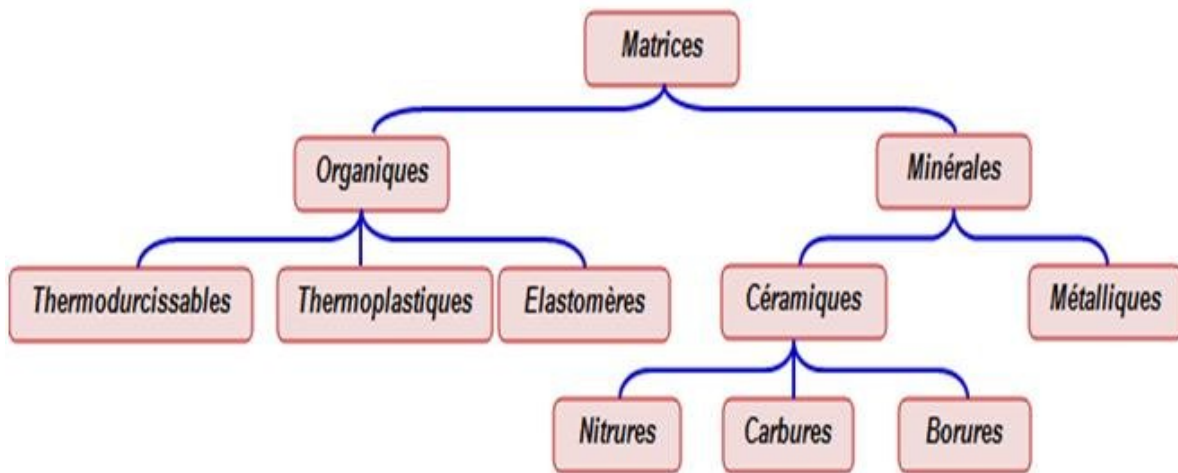
- le renfort, qui joue le rôle d'ossature et assure la tenue mécanique ;
- la matrice qui à un rôle de liant, et qui permet ainsi la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.



**Figure 2.1** : Constituants d'un matériau composite PRF.

### 2.2.2. Matrices

Les matrices sont des matériaux isotropes, leurs utilisations dans les composites permettent de coller des fibres entre elles, de transmettre les efforts aux fibres, d'assurer une protection des fibres et les isolants de l'humidité ainsi que l'oxydation et des agressions chimiques. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion chimique (Wu 2004 et Seyni 2008). Les différentes familles de matrices sont résumées dans l'organigramme de la Figure 2.2.



**Figure 2.2** : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice.

### 2.2.3. Résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvants, les résines sont livrées en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

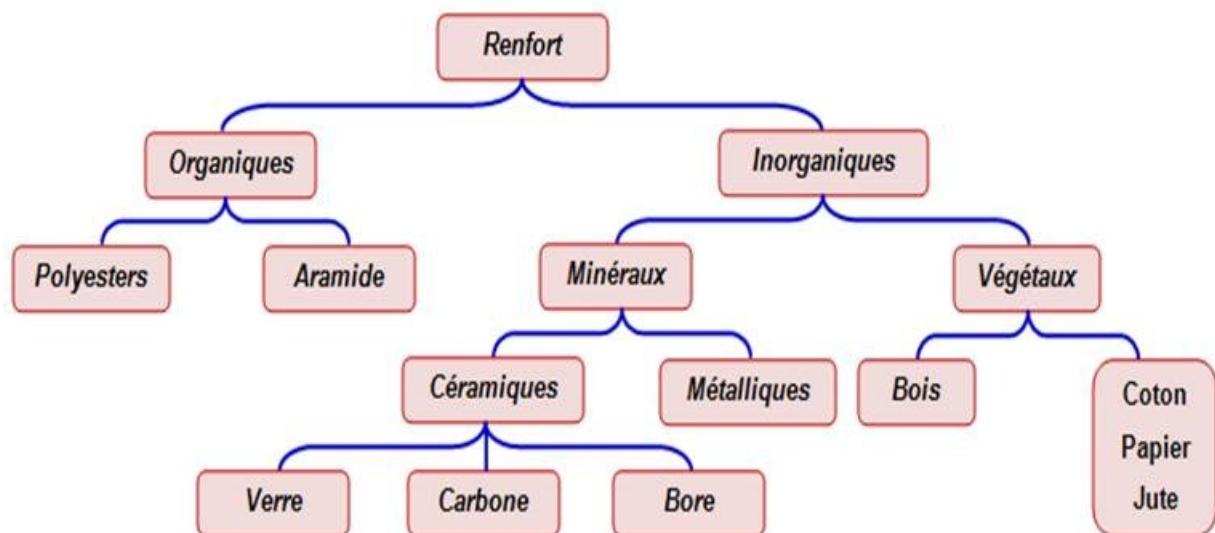
### 2.2.4. Renforts

Les renforts contribuent à l'amélioration de la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentant sous forme filamentaire, allant de la particule de forme

allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif (Berreur *et al.* 2002). Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des renforts (Teng *et al.* 2002 et Carolin 2003). Ils sont caractérisés par :

- ✓ La nature de renfort : minérale ou organique ;
- ✓ L'architecture de renfort : unidirectionnel ou bidirectionnel ;
- ✓ Principaux matériaux de renfort.

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres. Il existe deux types de fibres : fibres courtes et fibres longues. Parmi les renforts (fibres) les plus connus en génie civil, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistance mécanique importants à la fatigue), le verre (résistance moyenne, très utilisée pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances). Les différents types de renfort sont résumés dans l'organigramme de la Figure 2.3.



**Figure 2.3** : Organigramme schématisant les principaux matériaux de renfort.

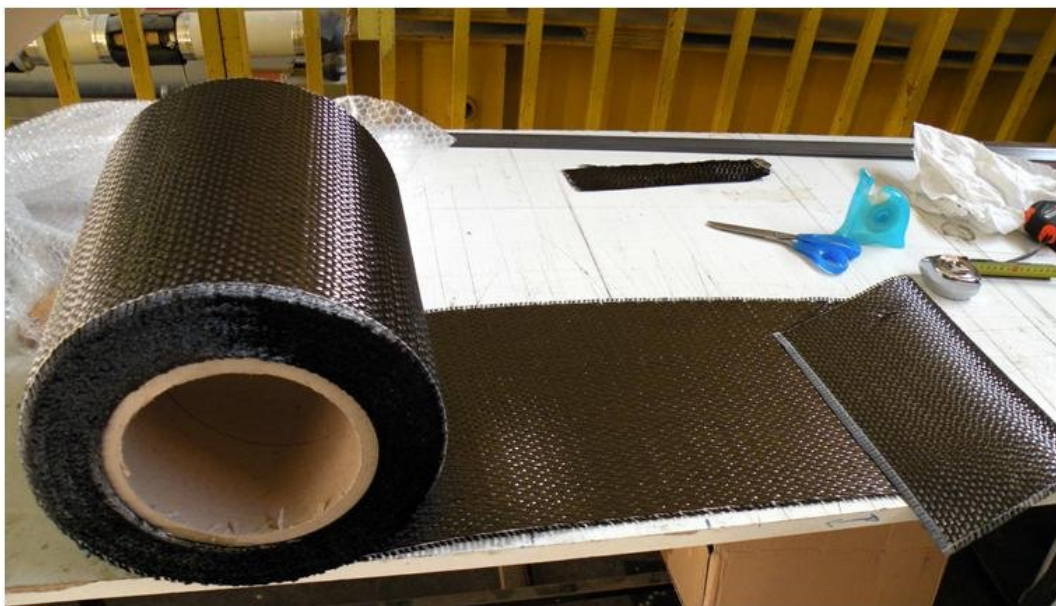
### 2.2.5. Fibres de carbone

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2 000 kg/m<sup>3</sup>). Le Tableau 2.1 compare les caractéristiques des fibres de carbone à celles des fibres de verre E, des fibres d'aramide (Kevlar 49 et Kevlar 149), et des fibres de bore. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température. Elles n'absorbent pas l'eau, et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent aussi une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés

par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à Haute Résistance » HR et des fibres dites « à Haut Module » HM ou même « à Très Haut Module » THM. (Berthelot 2010 et Chatain 2001).

**Tableau 2.1** : Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de verre E, d'aramide (Kevlar 49 et Kevlar 149) et de bore (Berthelot 2010).

Caractéristiques	Verre E	Carbone HR	Carbone HM	Carbone THM	Kevlar 49	Kevlar 149	Bore
Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2600	1750	1810	1950	1450	1470	2600
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	10 à 20	5 à 7	5 à 7	5 à 7	12	12	100-150
Module d'Young $E_f$ (GPa)	73	230	400	600	120	160	430
Module spécifique $E_f/\rho$ (MNm/kg)	28	130	210	310	83	110	165
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3400	3000-4000	2800	2000	3000	2400	3800
Contrainte spécifique $\sigma_{fu}/\rho$ (KNm/kg)	1300	1710-2290	1550	1030	2070	1630	1460



**Figure 2.4** : Rouleau de tissu de fibre de carbone (Raphaëlle 2012).



**Figure 2.5 :** Confinement de colonne par enveloppe en PRFC a base de tissu  
(Hu 2012).

### 2.2.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites PRF

Il est habituellement reconnu que les matériaux composites présentent des déficiences par rapport aux matériaux ordinaires connus dans la construction des ouvrages en génie civil. Cependant, leur utilisation, présente de nombreux avantages qui permettent d'apporter des réponses favorables à la réhabilitation des ouvrages. Ces avantages sont liés à leurs caractéristiques intrinsèques et aux procédés de leur mise en œuvre (Benzaid 2010).

#### 2.2.6.1. Avantages

- ✓ La résistance mécanique est élevée ;
- ✓ Le poids des matériaux composites PRFC est très légers ;
- ✓ Les bandes des PRFC présentent une large flexibilité qui facilite leur maniabilité ;
- ✓ La durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des plaques d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées ;
- ✓ La conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des plaques d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celles des plaques d'aciers ;
- ✓ La mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène « gel-dégel » ;
- ✓ La maintenance est entretien : le système de renforcement n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les plaques d'acier demande une maintenance périodique continue ;
- ✓ Temps d'exécution et mise en œuvre très réduit.

### 2.2.6.2. Inconvénients

- ✓ Coût de fabrication et très important par rapport aux matériaux traditionnels ;
- ✓ Les PRFC sont très sensibles à tous les impacts ;
- ✓ La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe ;
- ✓ Température d'utilisation limitée (cas des matrices plastiques) ;
- ✓ Vieillessement sous l'effet des rayons UV ;
- ✓ Recyclage impossible (pour la plupart des matériaux).

## 2.3. NOTIONS SUR LE CONFINEMENT DES COLONNES

### 2.3.1. Notions sur le confinement

En pratique, l'état des contraintes en compression triaxiale dans les poteaux en béton armé, est équivalent à la résultante d'une pression hydrostatique lorsque les armatures transversales en forme de cadres fermés ou de spirales continues empêchent le gonflement latéral des matériaux de l'élément soumis à une compression axiale. Le béton subissant cette action favorable des armatures transversales est appelé béton confiné (Mander et *al.* 1988).

Le confinement du béton comprimé peut être réalisé aussi bien par des cadres carrés ou rectangulaires fermés qui produisent une pression latérale aux coins des cadres comme le montre la figure 2.6-a, que par des spirales continues très efficaces grâce à la distribution continue des contraintes latérales du confinement le long de la circonférence entière comme le montre la figure 2.6-b. En outre, il donne une expansion latérale du béton enclos par les cadres en produisant une déflexion en dehors du côté des cadres où les parties résidants dans la section en forme de flèche seront très larges que les sections entre les cadres, comme le montre la Figure 2.6 (Penelis et Kappos 1997).

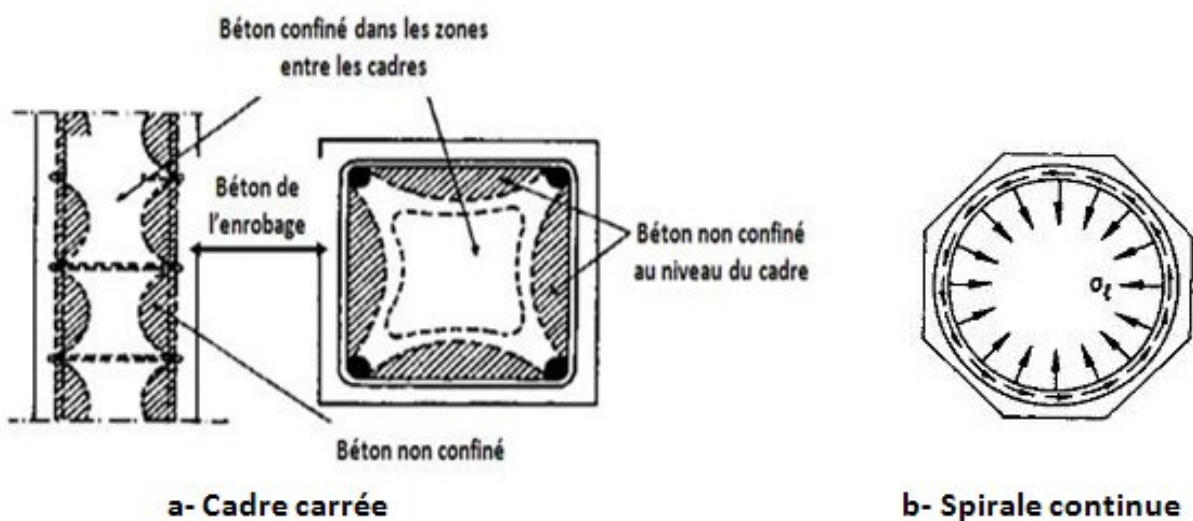


Figure 2.6 : Exemple de confinement d'un poteau (Penelis et Kappos 1997).

## 2.3.2 Confinement des colonnes par les aciers transversaux

### 2.3.2.1 Confinement actif des colonnes

Lorsque la pression latérale est mise en place avant le chargement axial, ce qui retarde considérablement le gonflement du béton, ce type de confinement est dit actif. Les premiers travaux sur le confinement actif par pression hydrostatique ont été réalisés par Richart *et al.* (1928), sur des cylindres de béton de formulations et résistances différentes. L'analyse de leurs résultats avec les développements sur la théorie de Mohr-Coulomb a permis de conclure que le gain en résistance du béton confiné est une fonction linéaire. Il est déterminé par la contrainte principale minimale qui est la pression latérale de confinement, exprimé par la relation suivante :

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (2.1)$$

La constante «  $k_1$  » est une propriété du béton qui doit être déterminée par l'essai triaxial.

Pour la déformation du béton confiné, Richart *et al.* (1928, 1929) ont proposé l'équation suivante :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (2.2)$$

Avec  $f_{cc}$  et  $\varepsilon_{cc}$  désignent respectivement la résistance maximale et la déformation correspondante sous l'action d'une pression hydrostatique latérale ;  $f_{co}$  et  $\varepsilon_{co}$  représentent respectivement la résistance du béton non confiné et la déformation correspondante ; la constante  $k_2$  est égale à  $5k_1$ .

On remarque que lorsque la pression latérale de confinement est élevée, la résistance à la compression du béton sera aussi plus grande.

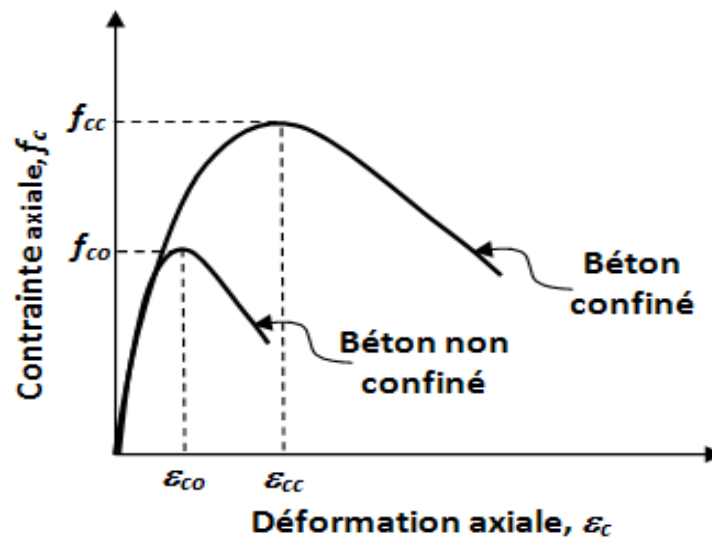
### 2.3.2.2. Confinement passif des colonnes

L'armature transversale des colonnes permet au-delà d'un certain niveau de chargement d'instaurer dans le noyau de béton, par opposition à son gonflement, un état de contrainte triaxial. Ce dernier conduit à une augmentation considérable de la résistance à la compression et de la déformation axiale du béton. Ce type de confinement est dit passif. Il est important de savoir que le confinement passif peut être obtenu par la mise en place d'armatures internes (cerces ou spirales) en acier ou externes (enveloppes ou tubes) en PRFC (Tobbi 2012).

### 2.3.2.3. Comportement du béton confiné par aciers transversaux

La Figure 2.7 présente les courbes typiques contraintes-déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette Figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons. Généralement, le confinement augmente deux caractéristiques du béton : la résistance en compression  $f_{cc} > f_{co}$  et la déformation correspondante  $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_{co}$ , il augmente aussi de façon considérable la possibilité d'absorption d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes (Sheikh et Uzumeri 1982). La courbe contrainte-déformation du béton confiné avec des aciers transversaux est caractérisée par :

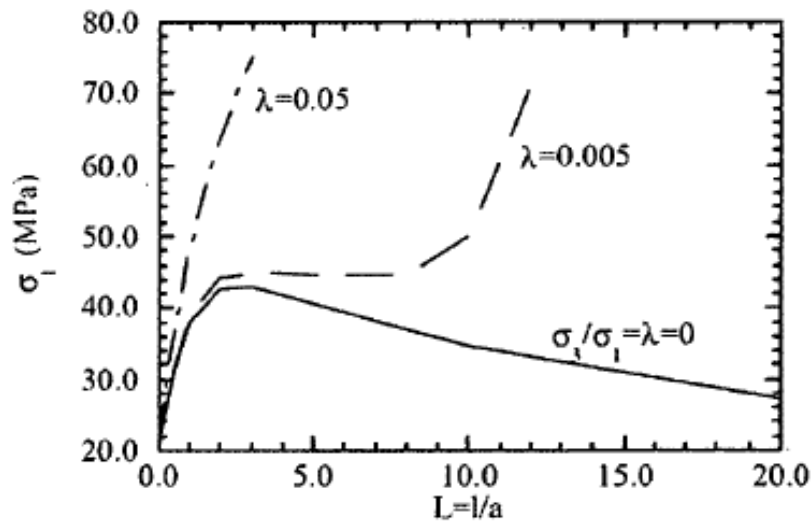
- Une branche ascendante, à concavité vers le bas, admettant un module tangent initial et un extremum ( $f_{cc}$ ,  $\varepsilon_{cc}$ ); à cet extremum de contrainte correspond la résistance en compression maximale ( $f_{cc}$ )
- Au delà de ce maximum, une branche descendante.



**Figure 2.7 :** Courbe contrainte-déformation du béton confiné avec aciers transversaux.

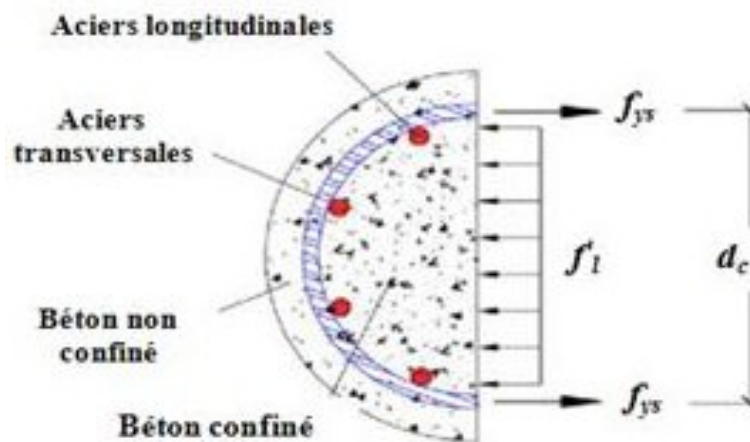
### 2.3.2.4. Pression de confinement latérale

La compréhension du mécanisme d'endommagement, et de rupture du béton en compression uni axiale, nous amène à la déduction, qu'il est possible d'augmenter la résistance à la compression en s'opposant à la dilatation radiale. Donc, de limiter la propagation des fissures et de permettre en conséquence une plus grande déformabilité axiale (ductilité). Ceci peut être atteint en appliquant une pression latérale dont la direction opposée à celle de la dilatation (Tobbi 2012). La Figure 2.8 montre l'effet de la pression latérale de confinement ( $\sigma_3$ ) sur l'augmentation de la résistance à la compression ( $\sigma_1$ ) et le contrôle de la fissuration (avec « a » la demi-longueur de la fissure initiale, et « l » longueur de la fissure propagée) (Wu 2000).



**Figure 2.8 :** Influence de la pression latérale de confinement sur la résistance du béton et la propagation des fissures (Wu 2000).

L'action de confinement exercée par les aciers transversaux sur les colonnes de section circulaire est illustrée dans la Figure 2.9.



**Figure 2.9 :** Action de confinement des aciers transversaux (Hu et Seracino 2013)

Pour les colonnes circulaires, le béton est soumis à un confinement uniforme. La pression maximale de confinement latérale produit par les aciers transversaux est en rapport direct avec la section  $A_{st}$ , l'espacement  $s$ , et la limite élastique  $f_{ys}$  de l'acier transversal utilisé, ainsi que le diamètre de la section du béton noyau confiné  $d_c$  (Mander *et al.* 1988). Cette pression de confinement dans les sections circulaires est exprimée par la formule suivante :

$$f_{ls} = \frac{2 A_{st} f_{ys}}{s \cdot d_c} \quad (2.3)$$

Cette pression latérale de confinement peut être de nature active ou passive.

Pour le cas des aciers en forme (cerces ou spirales), Sheikh et Uzumeri (1982) ont proposé un coefficient d'efficacité du confinement qui tient compte de la géométrie de la section et de la configuration des armatures longitudinales et transversales ( $k_e$ ). Ce coefficient ( $k_e$ ) est exprimé par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{pour les cerces} \\ k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{pour les spirales} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Ou,  $s'$  représente l'espacement entre axe des deux armatures transversales adjacentes.

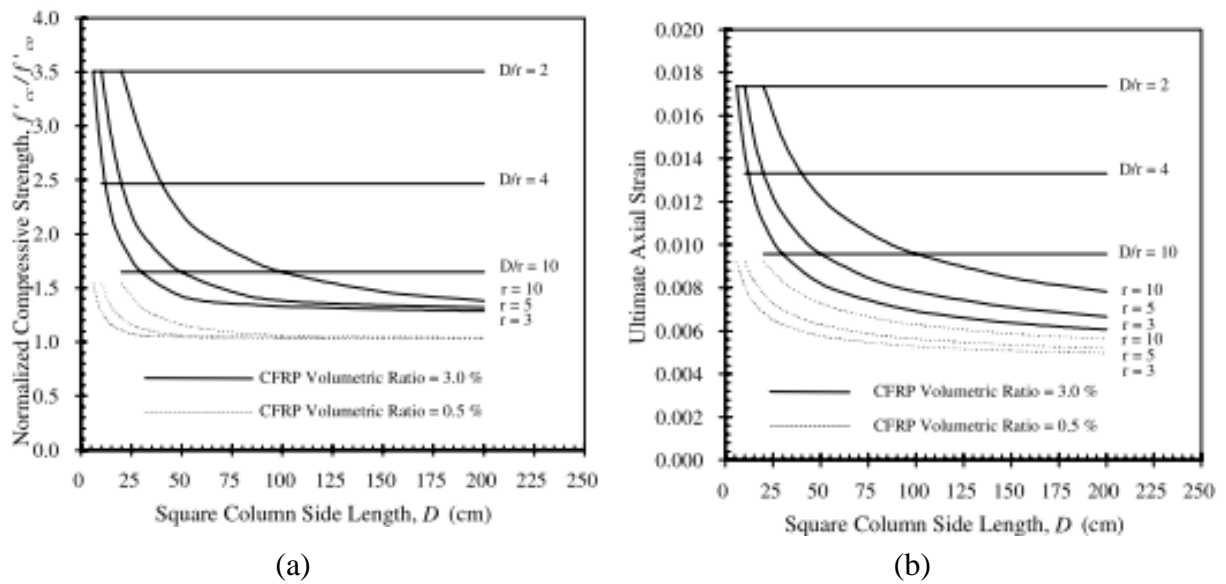
La pression de confinement finale  $f'_{ls}$  est donné par :

$$f'_{ls} = k_e \cdot f_{ls} \quad (2.5)$$

## 2.4. PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE CONFINEMENT PAR PRFC

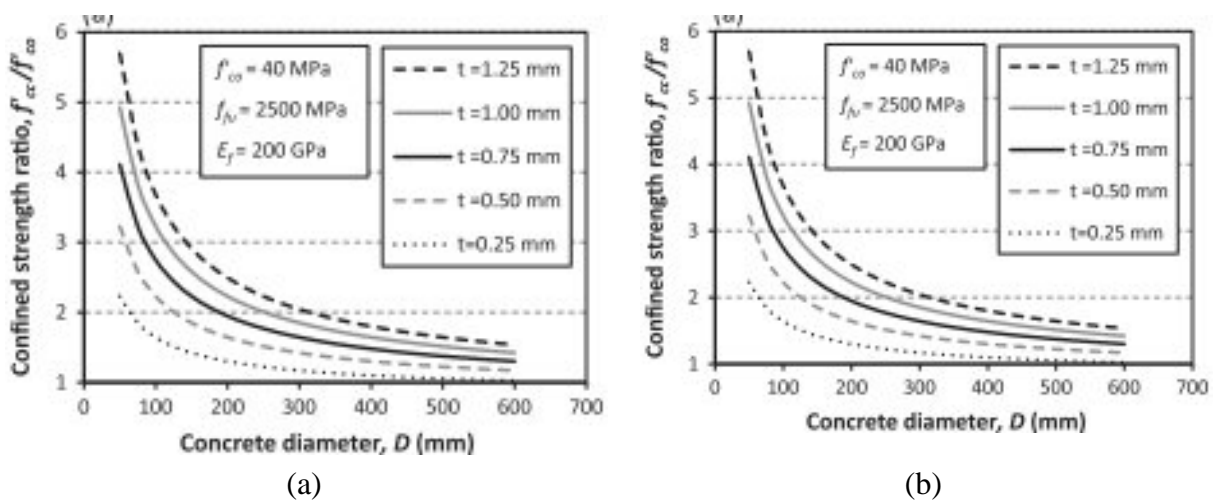
### 2.4.1. Effet de la dimension du spécimen

Pour étudier l'influence de la variation de la dimension du spécimen sur la résistance à la compression maximale ( $f'_{cc}$ ) ainsi que la déformation maximale ( $\epsilon_{cc}$ ) du béton confiné par PRFC, Yeh et Chang (2004), ont effectué une étude paramétrique sur des colonnes carrées de dimensions (150x150x300 mm), (300x300x600 mm), et (450x450x900 mm) confinées par PRFC. La variation du rapport de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et de déformation ( $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ ) en fonction de la variation de la dimension du spécimen pour trois valeurs d'angles arrondis d'un rayon  $r$  ( $r=3, 5$  et  $10$ ) ainsi que pour deux valeurs du pourcentage volumique de PRFC ( $\rho_f = 0,5\%$  et  $3\%$ ) sont présentés dans la Figure 2.10(a) et la Figure 2.10(b), respectivement. D'après ces études, Yeh et Chang (2004) ont montré que l'augmentation de la dimension du spécimen diminue la résistance maximale ( $f'_{cc}$ ) ainsi que la déformation ( $\epsilon_{cc}$ ) correspondante du béton confiné.



**Figure 2.10 :** Influence de la dimension du spécimen sur (a) la résistance en compression maximale et (b) la déformation axiale ultime (Yeh et Chang 2004).

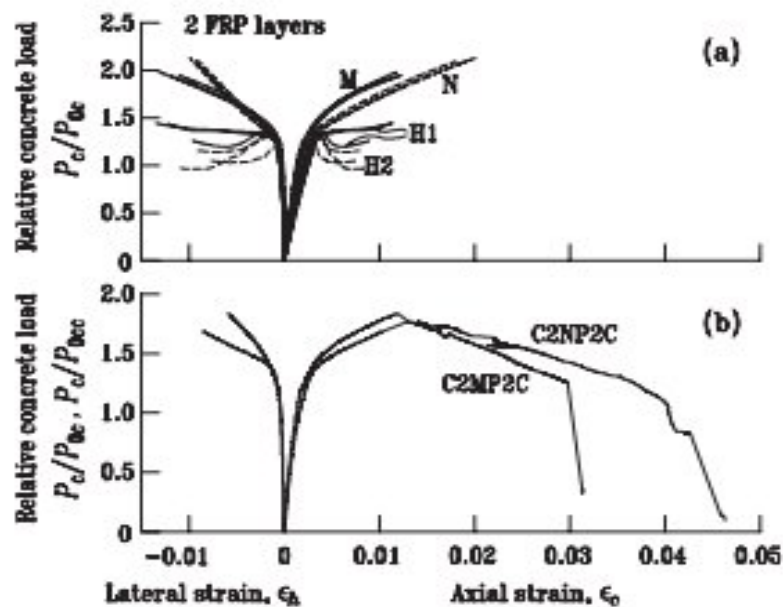
En vue de montrer l'influence du diamètre de spécimen ( $D$ ) sur le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ), et de déformation ( $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ ) du béton confiné, Sadeghian et Fam (2015) ont réalisé une analyse paramétrique, sur leurs modèles de résistance ultime ( $f_{cu}$ ) et de déformation ultime ( $\epsilon_{cu}$ ) développées pour les colonnes circulaires confinées par PRF. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 2.11. D'après cette investigation, ils ont approuvé que l'augmentation du diamètre de spécimen ( $D$ ) conduit à une diminution significative du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) illustré dans la Figure 2.11(a), et le rapport de déformation ( $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ ) schématisé dans la Figure 2.11(b).



**Figure 2.11 :** Influence du diamètre des spécimens sur (a) le rapport de résistance et (b) de déformation du béton confiné par PRF Sadeghian et Fam (2015).

### 2.4.2. Effet de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ )

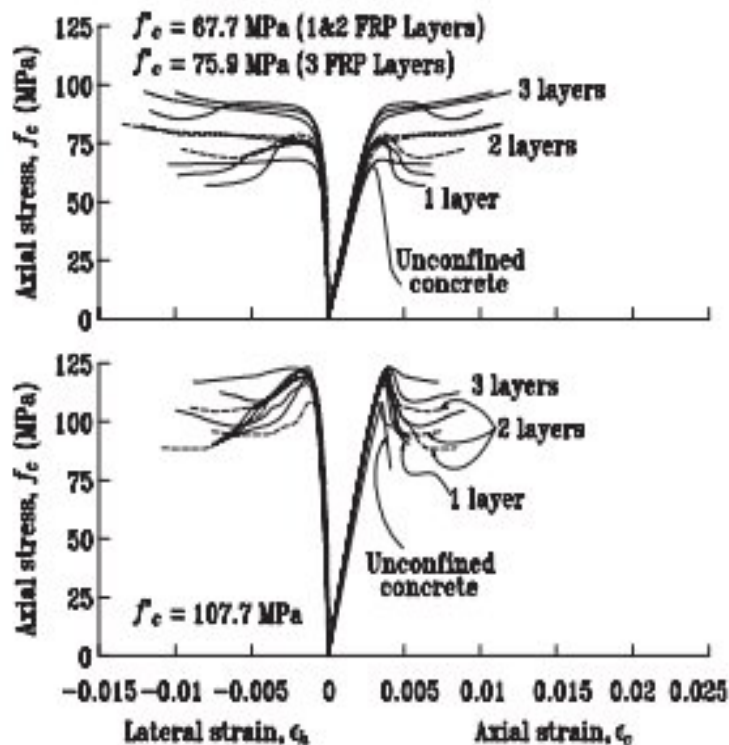
Eid *et al.* (2009) ont étudié le comportement des colonnes circulaires en béton confiné avec des aciers transversaux, de PRFC et de l'effet combiné de PRFC avec aciers transversaux. Un programme expérimental a été effectué pour étudier l'effet de la variation de quelques paramètres sur l'efficacité du confinement. La Figure 2.12 illustre l'effet de la variation de la résistance à la compression du béton non confiné sur la courbe contrainte déformation expérimentale du béton confiné. D'après la Figure 2.12(a), ils ont quantifié pour les spécimens N2, M2, H12, et H22 de dimensions (152x300 mm) en béton confiné avec deux couches de PRFC, les gains de résistance ( $P_c/P_{oc}$ ) sont de 2.11, 1.96, 1.42 et 1.27, et pour la déformation ( $\epsilon_{cu}/\epsilon'_c$ ) de 9.06, 5.01, 3.50 et 2.32 respectivement. Pour la Figure 2.12(b), ils ont montré une faible différence entre le comportement contrainte déformation pour le spécimen C2NP2C ( $f'_{co}= 31.7\text{MPa}$ ) et le spécimen C2MP2C ( $f'_{co}= 50.8\text{MPa}$ ) en béton armé confiné avec deux couches de PRFC, avec le même pourcentage en aciers transversaux. D'après ces résultats expérimentaux, Eid *et al.* (2009) ont conclu, que le gain de résistance ainsi que de la déformation sont observés pour les spécimens confectionnés avec une petite résistance en compression du béton non confiné. Dans le même contexte, Micelli et Modarelli (2013) ont prouvé cette conclusion, avec une étude effectuée sur un programme expérimentale (128 essais).



**Figure 2.12 :** Courbes contraintes-déformations expérimentales pour différentes résistances en compression (Eid *et al.* 2009).

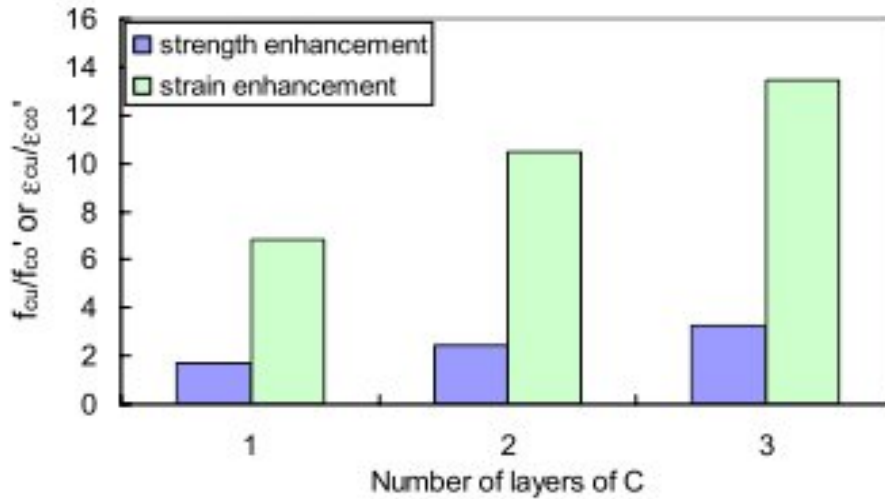
### 2.4.3. Effet du nombre de couches du PRFC

Eid *et al.* (2009) ont traité aussi l'effet de la variation du nombre de couches sur le comportement des colonnes de dimension (152x300 mm) en béton armé confinées par des enveloppes en PRFC. D'après les résultats expérimentaux illustrés dans la Figure 2.13, ils ont déduit que la capacité de résistance ainsi que la ductilité (la déformation ultime) augmentent avec l'augmentation de nombre de couches de PRFC. Micelli et Modarelli (2013) ont confirmé aussi que l'augmentation du nombre de couches du PRF augmente non seulement la résistance du béton confiné, mais également la déformation axiale du béton confiné.



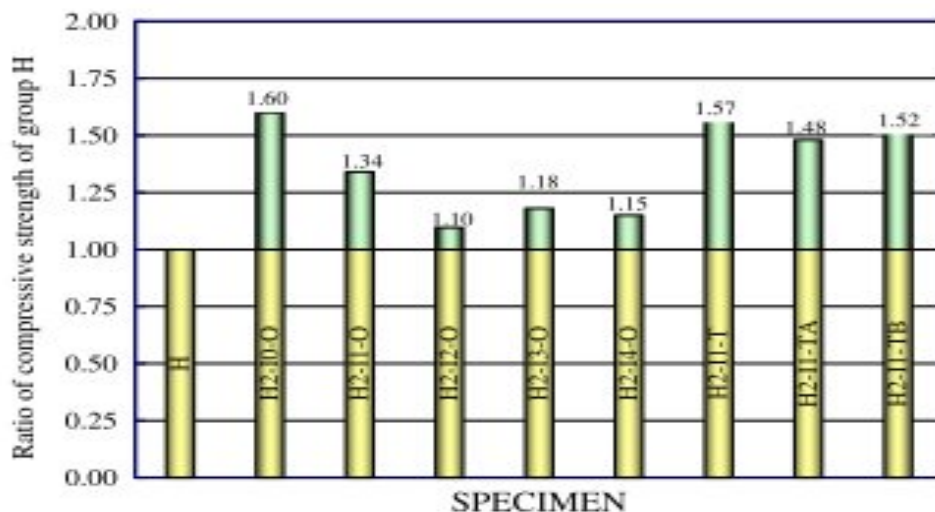
**Figure 2.13 :** L'effet du nombre de couches sur le comportement contrainte-déformation axiale des spécimens cylindriques en béton armé confinés par enveloppe en PRFC (Eid *et al.* 2009).

Dans une étude réalisée par Cui (2009) sur un programme expérimental de 88 spécimens cylindriques de dimensions (152x305 mm) confinés par PRFC. Il a montré que le nombre de couches du PRFC est un paramètre très important pour l'amélioration du comportement de béton confiné (Figure 2.14). Comme, il a illustré que la résistance et la ductilité du béton confiné sont améliorées en fonction de l'augmentation du nombre de couches du PRFC. Néanmoins, l'effet du nombre de couches du PRFC sur la ductilité est beaucoup plus efficace que celui de la résistance. Par exemple, pour le béton confiné par un (1) à trois couches du PRFC, la résistance augmente de 74% à 229% tandis que la déformation correspondante à la résistance maximale est améliorée de 590% à 1250%.



**Figure 2.14 :** Effet du nombre de couches du PRFC sur la résistance et la déformation ultime des spécimens cylindriques en béton confinés par PRFC (Cui 2009).

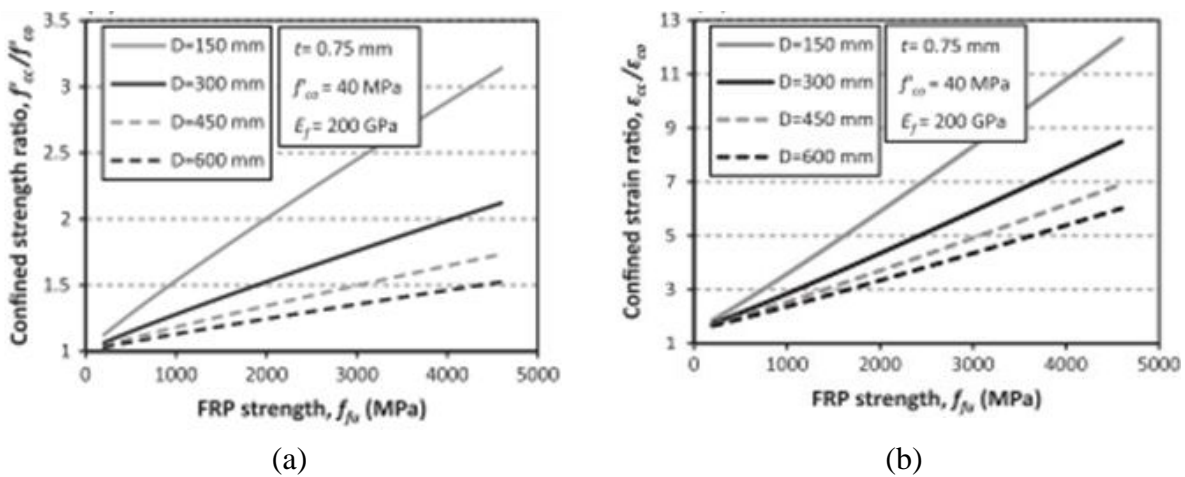
Park *et al.* (2008) ont traité l'effet du nombre de couches de PRFC sur la résistance en compression du béton confiné. D'après la Figure 2.15, ils ont trouvé que pour le cas de spécimen cylindrique H2-I1-O de dimensions (150x600 mm) confinés par une couche de PRF (épaisseur de 0.2mm), le rapport de résistance en compression maximale  $f_{cu}/f_{co}$  égale à 134%, tandis que le rapport  $f_{cu}/f_{co}$  pour le cas d'un spécimen cylindrique H2-I1-T de dimensions (150x600 mm) confiné par deux couches de PRF augmente de 157%. Ils ont conclu que la résistance à la compression du béton confiné ( $f_{cu}$ ) augmente avec l'augmentation du nombre de couches de PRFC.



**Figure 2.15 :** Effet du nombre de couche des bandes de PRF sur la résistance à la compression du béton confiné (Park *et al.* 2008).

#### 2.4.4. Effet de la résistance à la traction du PRFC ( $f_{prf}$ )

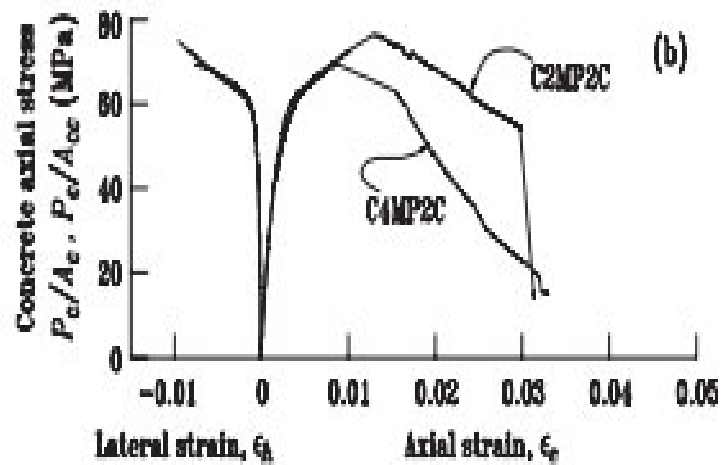
Sadeghian et Fam (2015), ont effectuée une étude paramétrique pour étudier l'influence de la résistance à la traction du PRF ( $f_{prf}$  varie de 200 à 4600 MPa) sur le gain résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) ainsi que de la déformation ( $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ ) du béton confiné par PRF, pour les différents spécimens de dimensions différentes (D varie de 50 à 600mm). Les résultats sont schématisés dans la Figure 2.16 (a et b). D'après ces deux figures, ils ont montré que l'augmentation de la résistance à la traction du PRFC augmente significativement la résistance ultime ( $f_{cu}$ ) et la déformation correspondante ( $\epsilon_{cu}$ ) du béton confiné par PRF. Par conséquent, ils ont montré également que le taux d'augmentation est important pour les spécimens ayant des petits diamètres.



**Figure 2.16 :** Influence de la résistance à la traction du PRF sur (a) la résistance en compression ultime et (b) la déformation ultime du béton confiné Sadeghian et Fam (2015).

#### 2.4.5. Effet de pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ )

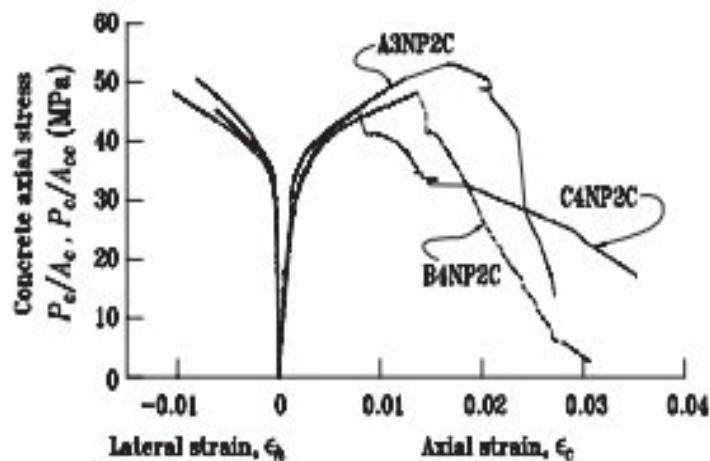
Eid *et al.* (2009) ont étudié l'effet du pourcentage volumique des aciers transversaux sur le comportement axial et latéral des spécimens de colonnes en béton confiné par l'enveloppe en PRF. Les spécimens testés contiennent des valeurs de ( $\rho_{vt}$ ) différentes. Comme exemple, le spécimen C2MP2C de dimensions (303x1200 mm),  $\rho_{vt} = 2.33\%$  et le spécimen C4MP2C de dimensions (303x1200 mm),  $\rho_{vt} = 2.51\%$ , les autres caractéristiques sont les mêmes. D'après les résultats illustrés dans la Figure 2.17, ils ont montré que l'augmentation du pourcentage des aciers transversaux pour des spécimens ayant le même confinement en PRFC résulte une augmentation de la résistance et la déformation ultime.



**Figure 2.17 :** Effet du pourcentage volumique du RAT sur le comportement des spécimens de colonnes en béton armé confiné par enveloppe en PRF Eid *et al.* (2009).

#### 2.4.6. Effet de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ )

Dans la même étude réalisée précédemment par Eid *et al.* (2009), et afin de mettre l'apport de la résistance élastique des aciers transversaux sur le comportement contrainte-déformation du béton confiné par PRF. Pour la comparaison, ils ont testé, comme exemple 602 MPa pour, le spécimen A3NP2C avec  $f_{ys} = 602$  MPa, le spécimen B4NP2C avec  $f_{ys} = 456$  MPa, et le spécimen C4NP2C  $f_{ys} = 456$  MPa. D'après les résultats présentés dans la Figure 2.18, ils ont montré que lorsque résistance élastique ( $f_{ys}$ ) augmente, la résistance et la déformation ultime du béton confiné ainsi que la ductilité augmentent aussi.



**Figure 2.18 :** Effet de la résistance élastique de RAT sur le comportement des spécimens en béton armé confiné par enveloppe en PRF Eid *et al.* (2009).

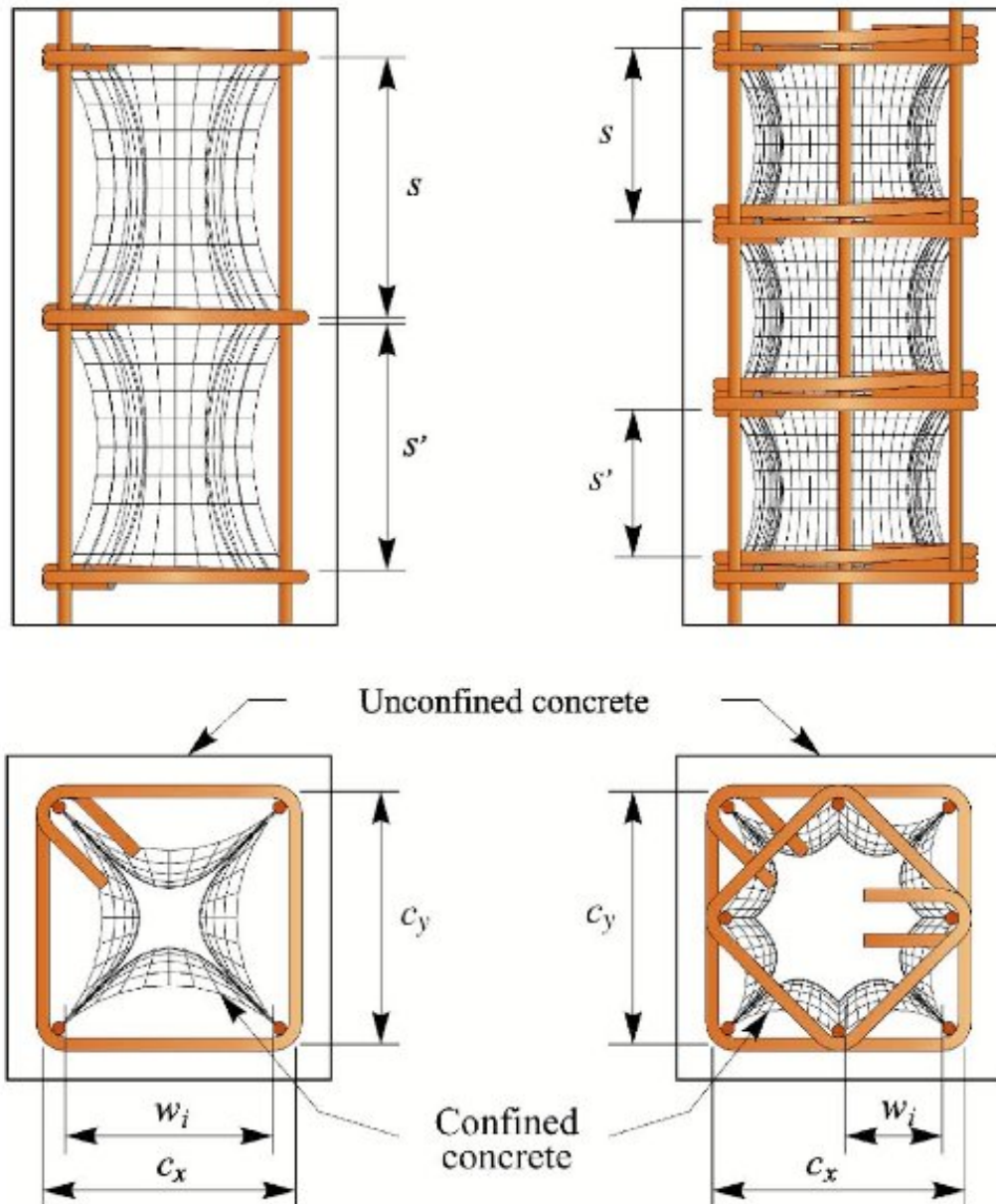
## 2.5. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT CLASSIQUES

Les premiers travaux sur l'influence des armatures transversales quant à l'amélioration de la résistance à la compression du béton ont été effectués par (considère1903), constatant déjà que les armatures servant à maintenir en place les barres longitudinales avant le coulage amélioreraient aussi le comportement en compression du béton (Kheloui 2012). Richart et al. (1928) étaient parmi les premiers chercheurs ayant étudié le confinement du béton armé. Ils ont effectués des tests sur des cylindres en béton armé confinés par une pression hydrostatique uniforme (confinement actif), ou par des spirales en acier (confinement passif) (Razvi et Saatcioglu 1999), et sont parvenus à quantifier le gain de résistance que procure le confinement en se basant sur la théorie de Mohr-Coulomb. Pour estimer la résistance à la compression du béton confiné, l'équation (2.1) proposée par Richart et al. (1928, 1929) a été utilisée longtemps dans les codes de calcul comme l'ACI». Cependant, dans les essais effectués par Richart et al. (1929), les spirales en acier avaient un espacement très petit (25 mm), combiné avec la section circulaire des colonnes et la continuité de l'armature, il en résulte que la pression latérale était quasi uniforme et agissait sur tout le noyau de béton. Plusieurs chercheurs ont basé sur le modèle de Richard et al. (1929) pour développer des modèles analytiques de confinement pour le béton armé, (Chan 1955, Roi et Sozen 1963, Soliman et Yu 1967, Sargin 1971, Kent et Park 1971, Vallenias et al. 1977, et Park et al. 1982), eu comme conséquence leurs modèles analytiques développés avec diverses limites.

Les variables principales considérées dans ces modèles à inclure la taille, la résistance, la quantité et l'espacement des aciers transversaux. D'autres variables considérées étaient la taille, la forme, le taux de chargement, et la quantité des aciers longitudinaux.

Les chercheurs avant 1980 n'ont pas considéré la distribution des aciers longitudinaux et l'espacement des aciers transversaux comme paramètre de confinement. Cet effet a été avéré être significatif par Sheikh et Uzumeri (1980) pour des colonnes testés sous un chargement concentrique. L'importance de l'espacement des cerces était également montrée par Scott et al. (1982) pour des colonnes testées sous un chargement concentrique et excentrique et par Ozcebe et Saatcioglu (1987) pour des colonnes testées sous un chargement cyclique (Razvi et al. 1999). En effet, pour les colonnes de section rectangulaire, le noyau de béton entouré par l'armature transversale en plan, et situé entre deux cadres successifs en élévation n'est pas entièrement confiné (Figure 2.19) comme suggèrent Sheikh et Uzumeri (1982), qui ont introduit la notion de béton « effectivement confiné ». La section de béton « effectivement confiné » au niveau du cadre est fonction du nombre de barres longitudinales retenues par des armatures transversales (cadre ou épingle), le béton non confiné décrit des paraboles entre ces barres longitudinales avec un angle de départ de 45°, l'augmentation du nombre de barres longitudinales en utilisant des configurations complexes permet de mobiliser une plus grande

section de béton confiné (Figure 2.19). De la même façon, le béton non confiné entre deux cadres successifs décrit une parabole avec un angle de départ de  $45^\circ$ , ce qui fait que la réduction de l'espacement contribue à avoir un meilleur confinement (Figure 2.19). Avec ces conclusions, Sheikh et Uzumeri (1982) sont les premiers à inclure l'influence de la distribution des armatures longitudinales (donc la configuration des cadres) sur l'efficacité du confinement du béton, l'influence de l'espacement des cadres et leurs taux volumétrique étant déjà été identifié (Tobbi 2012).



**Figure 2.19 :** Noyau de béton confiné dans les colonnes de section rectangulaires (Paultre and Légeron 2008).

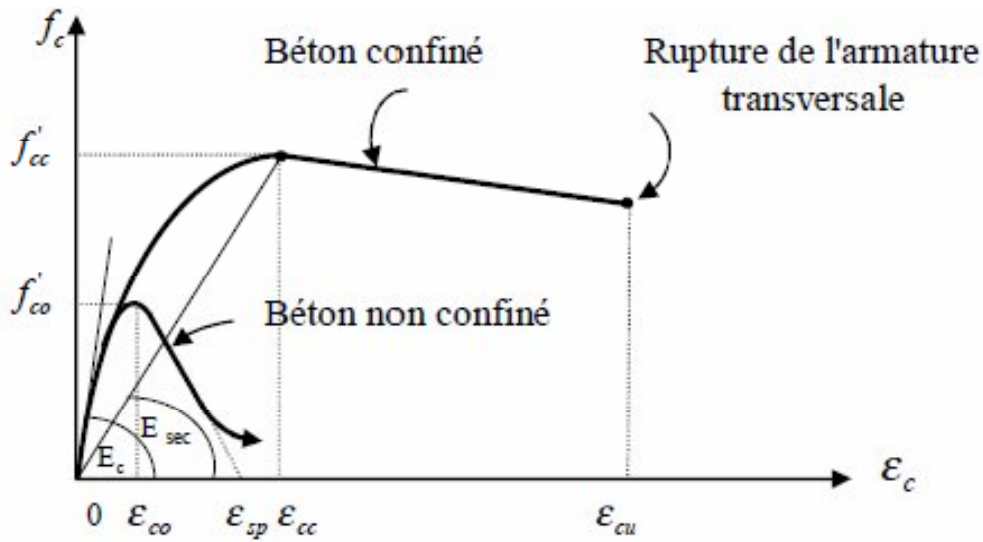
Il existe un autre modèle de confinement qui fait référence à ce jour et qui a été établi par Mander *et al.* (1988). Dans ce modèle (Figure 2.20), la résistance à la compression du béton confiné est liée à la pression latérale effective exercée par les armatures transversales d'une manière non linéaire par la considération d'une surface de rupture répondant à une sollicitation multiaxiale. La résistance à la compression du béton confiné est exprimée par :

$$f_{cu} = f_{co} \left( -1.254 - 2 \frac{f'_{ls}}{f_{co}} + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f_{co}}} \right) \quad (2.6)$$

Avec :

$f_{co}$  est la résistance à la compression du béton obtenue sur cylindre ;

$f'_{ls}$  est la pression latérale de confinement effective déterminée par la relation (2.5).



**Figure 2.20 :** Modèle contrainte déformation pour chargement monotone du béton confiné (Mander *et al.* 1988).

La courbe contrainte-déformation illustrée à la Figure 2.20 (Mander *et al.* 1988), se construit en définissant un seul point de coordonnées ( $f_{cc}$ ;  $\epsilon_{cc}$ ) puis en utilisant le modèle de Popovics (1973) pour calculer la contrainte actuelle pour chaque déformation imposée comme suit :

$$f_c = \frac{f_{cu} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (2.7)$$

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}) \quad (2.8)$$

$$\text{Où,} \quad E_c = 5000 \sqrt{f_{co}} \quad (2.9)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.10)$$

$E_c$ : est le module d'élasticité du béton initial ;

$E_{sec}$ : est le module d'élasticité du béton à la résistance pic.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \quad (2.11)$$

Où,  $\varepsilon_c$ : est la déformation longitudinale du béton, et  $\varepsilon_{cu}$  est la déformation du béton confiné. Cette déformation estimée par Mander *et al.* (1988) par:

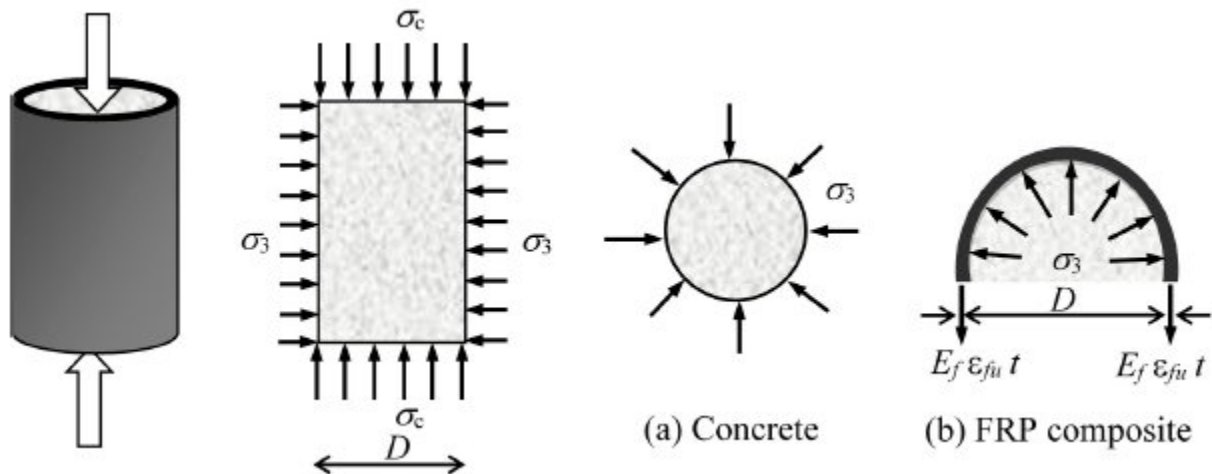
$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.12)$$

Saatcioglu et Razvi (1992) ont proposé un modèle reliant la résistance et la déformation par la pression de confinement latérale. Le modèle est basé sur le calcul de la pression de confinement uniforme équivalente résultante de différents espacements des aciers transversaux. Le modèle est applicable sur les colonnes circulaires, carrés et rectangulaires sous un chargement concentrique et excentrique avec des taux lents et élevés de contrainte (Saatcioglu *et al.* 1995). Tous les modèles mentionnés ci-dessus ont été développés pour le béton ordinaire.

## 2.6. CONFINEMENT DES COLONNES PAR MATERIAUX COMPOSITES (PRFC)

### 2.6.1. Confinement externe par PRFC

Le confinement externe des colonnes en béton, par une enveloppe de polymères renforcés de fibres de carbone PRFC est une technique relativement nouvelle. Elle est mise en place pour palier au déficit en résistance et ductilité, des colonnes dimensionnées avec des règlements sismiques anciennes, mais aussi pour réparer des colonnes endommagées suite à des séismes, lorsque les techniques de réhabilitation traditionnelles étant souvent lourdes et difficiles d'application (Figure 2.21).

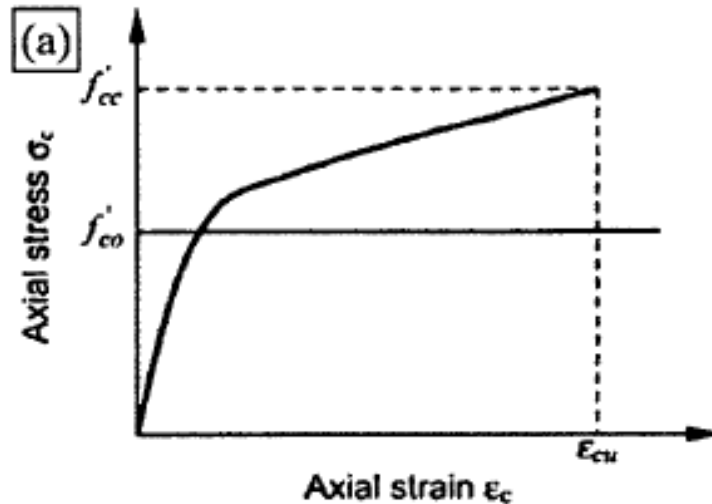


(a) pression de confinement du béton ; (b) pression de confinement par PRF sur le béton

**Figure 2.21** : Développement de la pression de confinement dans le béton confiné par PRF (Girgin et Girgin 2015).

### 2.6.2. Comportement du béton confiné par PRFC

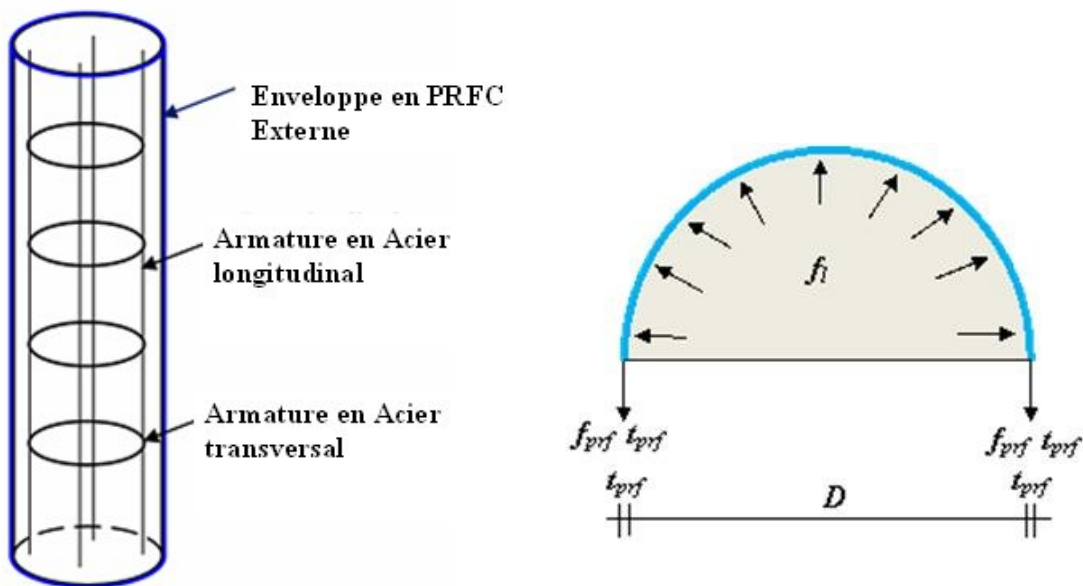
Le comportement contrainte-déformation des colonnes circulaires confinées par PRFC est différent que le comportement des colonnes confinées par aciers transversaux, comme montre les résultats des essais de (Miriman and Shaway 1997, Xiao and Wu 2000, et Lam et Teng 2003). La courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRFC contient généralement une branche ascendante non linéaire similaire que le confinement par aciers transversales, suivi par une branche ascendante presque linéaire comme illustre la Figure 2.22. En effet, la résistance et la déformation ultime du béton confiné sont atteintes simultanément, et affichent une nette augmentation, en comparaison avec ceux du béton non confiné.



**Figure 2.22 :** Diagramme contrainte-déformation pour le confinement par PRFC (Lam et Teng 2003).

### 2.6.3. Pression de confinement latérale

Lorsqu'une colonne confinée avec PRFC est soumise à une compression axiale, le béton s'étend latéralement. Cette expansion sera confinée par PRFC. Le comportement élastique linéaire des PRFC, à la différence de l'acier, induit une pression latérale croissante sur le noyau de béton, cela se traduit dans le cas des colonnes circulaires, avec une quantité suffisante de renfort. L'action de confinement exercée par PRFC sur les colonnes de sections circulaires est illustrée par la Figure 2.23.



**Figure 2.23 :** Action de confinement du PRFC

Pour les colonnes circulaires, le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression de confinement fournie par PRFC est en rapport directe avec l'épaisseur  $t_{prf}$  et la résistance à la traction  $f_{prf}$  du PRFC ainsi que le diamètre  $D$  de la section du béton enveloppé par PRFC. La pression de confinement est donnée par :

$$f_{lf} = \frac{2 t_{prf} f_{prf}}{D} \quad (2.13)$$

## 2.7. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR PRFC

Les premières recherches sur le confinement par PRFC ont vu le jour au début des années 80 (Fardis et Khalili, 1982). Actuellement, la littérature regroupe plusieurs études expérimentales et analytiques réalisés sur les colonnes circulaires confinées par enveloppe de PRFC (Nanni et Bradford 1995, Karbhari et Gao 1997, Spoelstra et Monti 1999, Shahawy *et al.* 2000, Teng et Lam 2002, Berthet *et al.* 2005, 2006, Chaallal *et al.* 2006, Chikh *et al.* 2012...) et leur comportement est maintenant bien connu. Dans le Tableau 2.1 on dresse un bilan des différents modèles permettant de prédire le comportement du béton confiné par PRFC. D'après ce tableau, il est possible de classer la plupart de ces modèles dans l'une des deux catégories suivantes : les modèles issus des études expérimentales de confinement par PRFC, et les modèles empiriques calibrés à partir des bases des données existantes dans la littérature. L'objectif de ces modèles vise d'obtenir une corrélation satisfaisante de la loi contrainte-déformation avec les résultats expérimentaux.

**Tableau 2.2 :** Modèles existants pour des colonnes circulaires en béton confinées par PRFC.

Auteurs et années	Modèles de Résistances ( $f_{cu}$ )	Modèles de Déformations ( $\epsilon_{cu}$ )
<b>Fardis et khalili (1982)</b>	Adopté l'expression de Richard <i>et al.</i> (1928) : $f_{cu} = f_{co} + 4,1 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$ Adopté l'expression de Newman (1972): $f_{cu} = f_{co} + 3,7 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,86}$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} + 0,001 \frac{E_{prf} \cdot t_{prf}}{d \cdot f_{co}}$
<b>Karbahari et Eckel (1993)</b>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 2,1 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,87} \right]$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{2 \cdot t_{prf} \cdot f_{prf}}{d \cdot f_{co}} \right) \right]$
<b>Saadatmanesh <i>et al.</i> (1994)</b>	Adopté l'expression de Mander <i>et al.</i> (1988): $f_{cu} = f_{co} \left[ -1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f_l}{f_{co}}} - 2 \cdot \frac{f_l}{f_{co}} \right]$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
<b>Karbahari et Gao (1997)</b>	$f_{cu} = f_{co} + 3,1 \cdot f_{co} \cdot \nu_c \left( \frac{2 \cdot E_{prf} \cdot t_{prf}}{D \cdot E_c} \right) + f_{lu}$ $f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 2,1 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,87} \right]$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} + 0,01 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$
<b>Mayauchi <i>et al.</i> (1997)</b>	$f_{cu} = f_{co} + k_{el} \cdot 4,1 f_{lu}$ si $f_{co} \leq 50 \text{MPa}$ et $k_{el} = 0,85$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 10,6 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,373} \right]$ pour $f_{co} = 30 \text{MPa}$ $\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 10,5 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,525} \right]$ pour $f_{co} = 50 \text{MPa}$

<p><b>Kono et al.</b> (1998)</p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 0,0286 \left( \frac{4t_{prf}}{D} \right) f_{prf}$ $30 \leq f_{co} \leq 40 \text{ MPa}$ $220 \leq E_{prf} \leq 350 \text{ GPa}$ $1280 \leq f_{prf} \leq 3820 \text{ MPa pour CFRP}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 0,140 \left( \frac{4t_{prf}}{D} \right) f_{prf}$ $30 \leq f_{co} \leq 40 \text{ MPa}$ $220 \leq E_{prf} \leq 350 \text{ GPa}$ $1280 \leq f_{prf} \leq 3820 \text{ MPa pour CFRP}$
<p><b>Saafi et al.</b> (1999)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 2,2 \left( \frac{2E_{prf} \cdot t_{prf} \cdot \varepsilon_r}{d \cdot f_{co}} \right)^{0,84} \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (537 \varepsilon_r + 2,6) \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
<p><b>Toutanji</b> (1999)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 3,5 \left( \frac{2E_{prf} \cdot t_{prf} \cdot \varepsilon_r}{d \cdot f_{co}} \right)^{0,85} \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (310,57 \varepsilon_r + 1,9) \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
<p><b>Spoelstra et Monti</b> (1999)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 0,2 + 3 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,5} \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 2 + 1,25 \left( \frac{E_c}{f_{co}} \right) \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,5} \varepsilon_{lu} \right]$
<p><b>Xiao et Wu</b> (2000)</p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1,1 + k_1 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}}$ $k_1 = 4,1 - 0,75 \left( \frac{E_l}{f_{co}^2} \right)^{-1,0}$	$\varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_{h,rupt} + \varepsilon_{co}}{\mu_{tu}}$ $\mu_{tu} = 7 \left( \frac{E_l}{f_{co}} \right)^{-0,8}$ $\varepsilon_{co} = -0,0005$
<p><b>Ilki et al.</b> (2002)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 2,227 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right) \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 15,156 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)^{0,735} \right]$
<p><b>Shehata et al.</b> (2002)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left[ 1 + 2 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right) \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 632 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \frac{f_{cu}}{E_{prf}} \right)^{0,5} \right]$
<p><b>Lam et Teng</b> (2003)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,3 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)$ $f_{lu,a} = \frac{2E_{u,f} \cdot t_f \cdot \varepsilon_{u,f}}{d}$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co} \left( 1,75 + 5,53 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{prf}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right)$
<p><b>Li et al.</b> (2003)</p>	$f_{cu} = f_{co} + f_{lu,a} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right)$ $\Phi = 36 + 1^\circ \left( 45^\circ + \frac{f_{co}}{35} \right) \leq 45^\circ$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 2,24 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right) \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right]$ $\varepsilon_u = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cu}}{2E_{des}}$

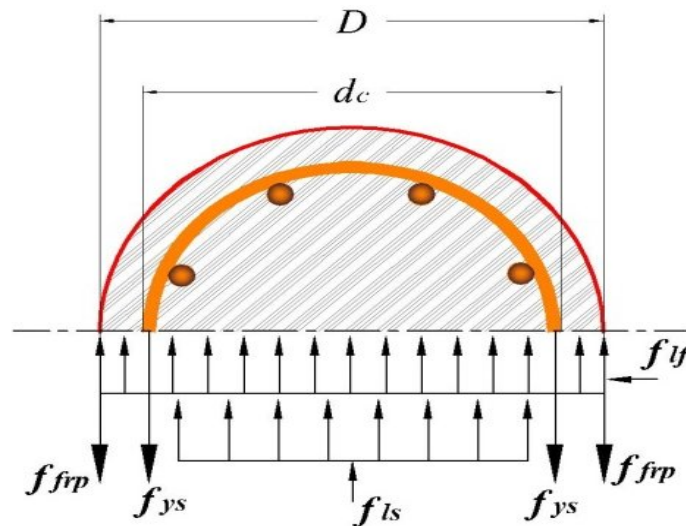
<p><b>Xiao et Wu</b> (2003)</p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1,1 + k_1 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}}$ $k_1 = 4,1 - 0,45 \left( \frac{E_l}{f_{co}^2} \right)^{-1,4}$	$\varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_{h,rupt} + \varepsilon_{co}}{\mu_{tu}}$ $\mu_{tu} = 10 \left( \frac{E_l}{f_{co}} \right)^{-0,9} \quad \varepsilon_{co} = -0,00047$
<p><b>Ilki et al.</b> (2004)</p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2,4 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{1,2}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 20 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{0,5}$
<p><b>Bisby et al.</b> (2005)</p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2,425 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} + 0,0240 \left( \frac{f_{lu}}{f_{co}} \right)$
<p><b>Saiidi et al.</b> (2005)</p>	$f_{cu} = f_{co} + 6,2 f_{lu}^{0,7}$	$\varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{0,1 - 0,25 \ln \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)}$
<p><b>Berthet et al.</b> (2006)</p>	$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_{lu,a}$ $k_1 = 3,45 \quad \text{si } 20\text{MPa} \leq f_{co} \leq 50\text{MPa}$ $k_1 = \frac{9,5}{(f'_{co})^{\frac{1}{4}}} \quad \text{si } 50\text{MPa} \leq f_{co} \leq 200\text{MPa}$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} + \frac{\varepsilon_{h,rupt} - \nu_c \varepsilon_{co}}{\mu_{tu}}$ $\mu_{tu} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{E_l}{f_{co}^2} \right)^{\frac{2}{3}}$
<p><b>Matthys et al.</b> (2006)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,5 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{0,85} \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (310,57 \varepsilon_r + 1,9) \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
<p><b>Tamuzs et al.</b> (2006)</p>	$f_{cc} = f_{co} + 4,2 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}}$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} + \frac{\varepsilon_{h,rupt} - \nu_c \varepsilon_{co}}{\mu_{tu}}$ $\mu_{tu} = 5,9 \left( \frac{E_l}{f_{co}} \right)^{-0,65}$
<p><b>Jiang et Teng</b> (2007)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,5 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right) \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 17,5 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right) \right)$
<p><b>Youssef et al.</b> (2007)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 2,25 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{1,25} \right)$	$\varepsilon_{cu} = 0,003368 + 0,2590 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \left( \frac{f_{prf}}{E_{prf}} \right)^{0,5}$
<p><b>Ciupala et al.</b> (2007)</p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 1,7 \left( \frac{2f_l}{f_{co}} \right)^{0,8} \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 1 + 6,7 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \right)$

<p><b>Binici (2008)</b></p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 2,6 \left( \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right) - 0,14 \right)^{0,17} \right)$ $si \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right) \geq 0,14$ $f_{cu} = f_{co} \left( 1,8 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{0,3} \right)$ $si \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right) < 0,14$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 1,75 + 12 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right)$
<p><b>Teng et al. (2009)</b></p>	$f_{cu} = f_{co} (1 + 3,5(\rho_k - 0,001)\rho_\varepsilon)$ $(\rho_k \geq 0,01), \rho_k = \frac{2E_{prf} \cdot t \cdot \varepsilon_{co}}{D \cdot f_{co}}$ $\rho_\varepsilon = \frac{0,586 \varepsilon_{prf}}{\varepsilon_{co}}$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} (1,75 + 6,5 \rho_k^{0,8} \rho_\varepsilon^{1,45})$
<p><b>Benzaid et al. (2010)</b></p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 1,6 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 5,55 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right)$
<p><b>Fahmy et Wu (2010)</b></p>	$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_{lu}$ $k_1 = 4,5 f_{lu}^{-0,3} \quad si \quad f_{co} \leq 40MPa$ $k_1 = 3,75 f_{lu}^{-0,3} \quad si \quad f_{co} > 40MPa$	$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_{co}}{E_2}$
<p><b>Rousakis et al. (2012)</b></p>	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \left( 1 + \left( \frac{\rho_f E_f}{f_{co}} \right) \left( \frac{\alpha E_f 10^{-6}}{E_{fu}} + \beta \right) \right)$ $E_{fu} = 10MPa$ $\alpha = -0,336 \quad \beta = 0,0223$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 24,8 \frac{4E_f \cdot t}{D \cdot f_{co}} \left( \frac{-0,45E_f 10^{-6}}{E_{fu}} + 0,0223 \right) \left( \frac{40E_f \cdot t}{E_{fu} \cdot D} \right)^{-0,16}$
<p><b>Ozbakkaloglu et Lim (2013)</b></p>	$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,64 \left( \frac{f_{l,a}}{f_{co}} \right) \right)$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 17,41 \left( \frac{f_{l,a}}{f_{co}} \right) \right)$

## 2.8. REVUE SUR LES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR LA COMBINAISON PRFC-RAT

Les modèles illustrés précédemment dans le Tableau 2.1 ne considèrent pas effectivement l'effet des armatures transversales qui se trouvent réellement dans le béton. D'ici, d'autres travaux sont apparues récemment qui considèrent explicitement l'effet de confinement par l'enveloppe des polymères renforcés de fibres (PRFC) et par le renforcement en aciers transversaux (RAT). L'action de confinement exercée par l'effet combiné du PRFC et aciers transversaux sur les colonnes de sections circulaires est illustrée dans la Figure 2.24. Dans ce cas, la pression de confinement totale ( $f_l$ ) est la somme de la pression de confinement fournie par aciers transversaux ( $f_{ls}$ ) et la pression de confinement fournie par PRFC ( $f_{lf}$ ). La relation de la pression de confinement totale est donnée par la formule suivante :

$$f_l = f_{lf} + f_{ls} \quad (2.14)$$



**Figure 2.24:** Action de confinement par la combinaison FRPC et aciers transversaux.

Actuellement, plusieurs études ont été menées sur le comportement de colonnes circulaires en béton confiné par l'action combinée du PRFC et les armatures transversales en forme de spirales et de cerces. En conséquence, plusieurs modèles contrainte-déformation pour prédire ce comportement sont proposés qui tient compte explicitement de l'effet combiné du PRFC et aciers transversales (Harajli (2006), Eid et Paultre (2008), Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Wang *et al.* (2012), Hu et Seracino (2013), Teng *et al.* (2014), Shirmohammadi *et al.* (2015)). Dans ces modèles, la résistance en compression ( $f_{cu}$ ) et la déformation ( $\epsilon_{cu}$ ) ultime du béton confiné sont calibrées par régression des résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs pour des colonnes circulaires confinées sous l'effet combiné de PRFC et aciers transversales en (cerces ou spirales).

**Tableau 2.3 : Modèles de confinement pour des colonnes circulaires confinées par la combinaison PRFC et RAT.**

	Auteurs et année	Modèle de Résistance	Modèle de Déformation
1	Harajli et al. (2006)	$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_{lf} + k_1 f_{ls} \frac{A_{cc}}{A_g}$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 1 + (310,57 \varepsilon_l + 1,9) \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \right)$
2	Eid et Paultre. (2008)	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \left[ 1 + 3,3 \left( \frac{\rho_{sey} \cdot f_{yh}}{f_{co}} + \frac{E_{fl} \varepsilon_{fu} \xi}{f_{co}} \right) \right]$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = \left[ 1,56 + 12 \left( \frac{\rho_{sey} f_{yh}}{f_{co}} + \frac{E_{fl} \varepsilon_{fu} \xi}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{fu,a}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right]$
3	Lee et al. (2010)	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \left( 1 + 2 \frac{f_l + f_{ls}}{f_{co}} \right)$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = \left( 1,75 + 5,25 \left( \frac{k_f \cdot f_{lf} + k_s \cdot f_{ls}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{fu,a}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right)$
4	Chastre et Silva. (2010)	$f_{cu} = f_D + 5,29 f_l$	$\varepsilon_{cu} = 17,65 \varepsilon_{co} \left( \frac{f_{lu}}{f_D} \right)^{0,7}$
5	Wang et al. 2012	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \left[ 1 + 1,33 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0,57} + 3,54 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0,95} \right]$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = \left[ 2 + 26,4 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} + \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0,7} \right) \right]$
6	Hu et Seracino. (2013)	$f_{cu} = f_{co} + f_{co} \left( 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_{ls}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{ls}}{f_{co}} - 2,254 \right) + 3,5 f_{lf}$	$\varepsilon_{cu} = 1 + 5 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right)$
7	Teng et al. (2014)	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \left[ 1 + 3,5 \frac{f_{lf}}{f_{ls}} + 3,12 \left[ \frac{f'_{ls}}{f_{co} (1 + 0,202 \rho_f^{0,145})} \right]^{0,736} \right]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 3,9 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right)^{1,2} \right]$
8	Shirmohammadi et al. (2015)	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1,1 + 2,5 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0,8} \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right) + 3,5 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0,2} \left( \frac{d_c^2}{D^2} \right)^4$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 6,5 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0,7} \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0,7} + 6 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0,04} \left( \frac{s}{0,5 \times D} \right)^{-0,8} \left( \frac{E_{prf}}{f_{co}} \right)^{0,5}$

**NB :** (PRFC) Polymères Renforcés de Fibres de Carbone, et (RAT) Renforcement en Aciers Transversaux.

## 2.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a exposé le comportement des colonnes circulaires confinées par les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Après la présentation de quelque notion sur polymères renforcés de fibres de carbone, on a illustré le mode confinement ordinaire des colonnes en béton armé. Ensuite, on a visualisé les différents paramètres influençant le confinement par PRFC, à savoir les effets de :

- La dimension du spécimen ;
- La résistance du béton non confiné ( $f_{co}$ ) ;
- Le nombre de couches ou l'épaisseur du PRFC ;
- La résistance à la traction du PRFC ;
- Le pourcentage volumique des armatures transversales (RAT) ;
- La résistance élastique du RAT.

Comme, on a réservé une grande partie de chapitre aux modèles de confinements des colonnes confinées par les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) sans, et avec effet combiné des armatures transversales (RAT). Dans ce contexte, on a dressé un état global des modèles existants dans la bibliographie.

Dans la suite de cette étude, on entamera une étude de la performance de quelques modèles de confinement existant en polymères renforcés de fibres (PRFC), qu'on a dressés dans ce chapitre.

CHAPITRE 3 :  
ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE  
QUELQUES MODÈLES DE CONFINEMENT PAR  
PRFC

### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on essaye d'analyser la performance de quelques modèles existants pour des colonnes circulaires confinées par des polymères renforcées de fibres de carbone (PRFC) sans et avec aciers transversaux. Cette performance sera réalisée sur une base de données regroupée plus de 310 données expérimentales recueillies à partir de la bibliographie. Deux indicateurs de performance sont utilisés à savoir : le coefficient de détermination ou le carré du coefficient de corrélation  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE. Le critère de choix de ces modèles est basé sur leurs utilisations très larges dans la littérature, ainsi que leurs expressions simples qui facilitent leurs applications. En premier lieu, on considère les modèles qui ne tiennent pas en compte de l'effet combiné avec les armatures transversales, à savoir : les modèles de Lam et Teng (2003), Ilki et al. (2004), Jiang et Teng (2007), Youssef et al. (2007), Teng et al. (2009), Benzaid et al. (2010), Fahmy et Wu. (2010), et Ozbakkaloglu et Lim (2013). Ensuite dans un second lieu, on traite la performance des modèles qui considère l'effet combiné du PRFC avec aciers transversaux, en l'occurrence : les modèles de Lee et al. (2010), Chastre et Silva (2010), Wang et al. (2012), Hu et Seracino (2013) et Teng et al. (2014).

### 3.2. METHODE DE REGRESSION MATHEMATIQUE

La régression est l'une des méthodes les plus connues et les plus appliquées en statistique pour l'analyse de données quantitatives. Elle est utilisée pour établir une liaison entre les données prédites et expérimentales, sous la forme d'un modèle. La mise en œuvre d'une régression impose l'existence d'une relation de cause entre les variables prises en compte dans le modèle.

Considérons un couple de données quantitatives (X, Y). S'il existe une liaison entre ces deux variables, la connaissance de la valeur prise par X change notre incertitude concernant la réalisation de Y. Si l'on admet qu'il existe une relation de cause entre X et Y, le phénomène aléatoire représenté par X peut donc servir à prédire celui représenté par Y et la liaison s'écrit sous la forme :

$$y = f(x) \tag{3.1}$$

On dit que l'on fait de la régression de y sur x.

Dans le cas d'une régression multiple de y sur  $x^1, x^2, \dots, x^p$ , la liaison s'écrit :

$$y = f(x^1, x^2, \dots, x^p) \quad (3.2)$$

Dans les cas les plus fréquents, on choisit l'ensemble des fonctions du type :

$$f(x) = a_0 + bx \quad (3.3)$$

Ou :

$$f(x^1, x^2, \dots, x^p) = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_px^p \quad (3.4)$$

On parle alors de régression linéaire. Pour l'analyse de la performance ou bien l'évaluation des modèles de confinement des colonnes circulaires par polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC), les valeurs du rapport de résistance et de déformation prédites par les modèles existants sont comparées aux valeurs expérimentales. Deux indices importants sont utilisés pour les évaluations, à savoir : le coefficient de détermination ou le carré du coefficient de corrélation  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE (Rakotomalala 2015, Rouaud, 2017).

### 3.2.1. Coefficient de détermination $R^2$

Le coefficient  $R^2$  est défini comme le coefficient de détermination ou le carré du coefficient de corrélation qui sert avant tout à caractériser une relation linéaire positive entre les valeurs du rapport de résistance et de déformation prédites ( $y$ ) et les valeurs expérimentales ( $x$ ). Il s'agit d'une mesure symétrique. Le coefficient  $R^2$  est une mesure relative de l'ajustement, égale au rapport de la variance expliquée sur la variance à expliquer (Rakotomalala 2015, Rouaud, 2017). L'expression de ce coefficient est donnée par :

$$R^2 = r^2(x, y) = \frac{\text{var}(\hat{y})}{\text{var}(y)} \quad (3.5)$$

Pour calculer le  $R^2$ , on peu utilisé également l'expression :

$$R^2(X, Y) = \left( \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (3.6)$$

Avec :

$X$  et  $Y$  : les vecteurs des valeurs expérimentales et prédites, respectivement ;

$x$  et  $y$  : les valeurs expérimentales et prédites, respectivement ;

$\bar{x}$  et  $\bar{y}$  : les moyennes des valeurs expérimentales et prédites, respectivement.

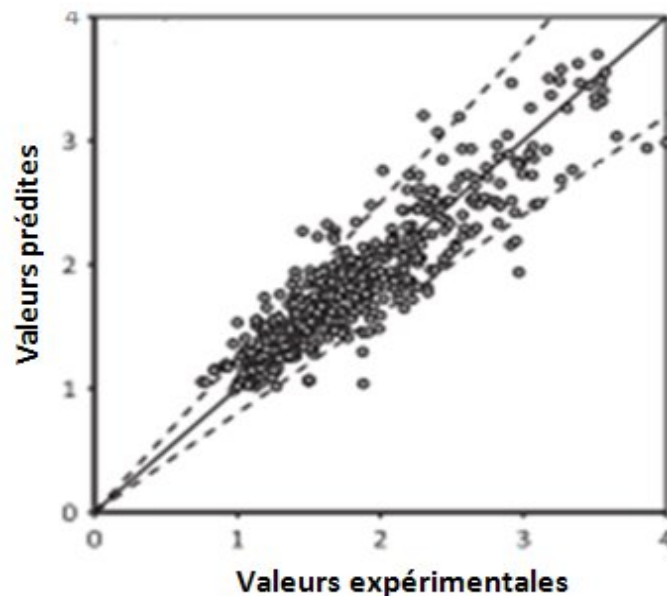
Il est à noter que le coefficient  $R^2$  varie de zéro à un. Lorsqu'il est proche de 1 indique que la corrélation est parfaite entre les valeurs prédites ( $y$ ) et les valeurs expérimentales ( $x$ ). Par contre,  $R^2 = 0$  indique l'absence de la corrélation. Le point marquant  $R^2$  proche de 1 ne garantit pas une prédiction parfaite. Il montre seulement qu'il existe une corrélation linéaire entre les valeurs prédites ( $y$ ) et les valeurs expérimentales ( $x$ ) (Sadeghian et Fam 2015). Ainsi,  $R^2$  n'est pas l'indice le plus approprié pour ce genre d'évaluation. Au lieu de cela, un autre indice statistique est mis en œuvre pour évaluer la précision des prédictions, qui est la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE.

### 3.2.2. Racine carrée du carré moyen des résidus RMSE

L'indice RMSE est défini comme étant racine carrée du carré moyen des résidus en anglais « Root Mean Squared Error ». Il est plus utilisé pour évaluer l'intérêt prédictif d'un modèle. Le RMSE est une mesure absolue d'ajustement sans limite supérieure. Il indique la proximité des valeurs prédites ( $y$ ) aux valeurs expérimentales ( $x$ ) (Rakotomalala 2015), l'équation de ce coefficient est donnée par :

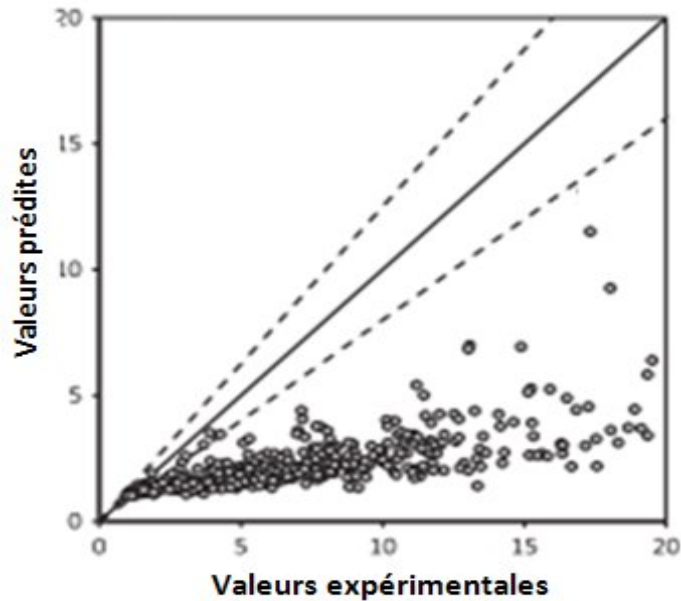
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x - y)^2}{n}} \quad (3.7)$$

Où  $n$  est le nombre de points de données,  $x$  et  $y$  représentent les valeurs du rapport de résistance ou de déformation prédite et expérimentale, respectivement. Les valeurs inférieures de RMSE indiquent un meilleur ajustement, avec zéro indiquant une prédiction parfaite qui signifie que tous les points de données sont situés sur une ligne à 45 degrés ( $R^2 = 1$ ) (Sadeghian et Fam 2015, Girgin et Girgin 2015) (voir Figure 3.1).



**Figure 3.1 :** Corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales.

Pour un cas d'hypothèse, si tous les points de données étaient situés sur une ligne de 10 degrés, on montre clairement une mauvaise prédiction (voir la Figure 3.2). Le coefficient  $R^2$  serait égal à un (1) tandis que le coefficient RMSE serait capable de montrer la mauvaise prédiction. Pour cette raison, on adopte le coefficient RMSE dans notre travail, qui est plus approprié que  $R^2$  pour l'analyse de l'évaluation la performance des modèles existants (Sadeghian et Fam 2015 Rakotomalala 2015).



**Figure 3.2 :** Corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales.

### 3.2.3. Pourquoi RMSE ?

Dans la définition de la variance, il est précisé que les valeurs doivent être purement aléatoires. Or les résidus sont composés de deux grandeurs : une grandeur aléatoire qui tient compte du fait que les réponses sont elles-mêmes aléatoires et d'un terme traduisant le fait que le modèle mathématique choisi n'est peut-être pas le bon. Ce dernier terme, encore appelé "manque d'ajustement" n'est pas aléatoire. En toute rigueur, il n'est pas possible de considérer la variance que nous venons de calculer comme une variance au sens de la définition. Dans beaucoup de livres de statistique, le ou les auteurs admettent que le modèle mathématique choisi est le bon et qu'il n'y a pas de terme de manque d'ajustement. Avec cette hypothèse, la variance des résidus est la variance des réponses mesurées. Mais, dans le domaine des plans d'expériences, il n'est pas possible d'admettre cette hypothèse puisque l'on cherche justement le modèle qui explique mieux les résultats expérimentaux. On suppose que le modèle est faux et on cherche le moins mauvais. On cherche donc à diminuer ou minimiser la RMSE (Root Mean Square Error ou racine carrée du carré moyen des résidus) pour tendre vers l'estimation du plus faible écart-type et vers le meilleur modèle (Rakotomalala 2015).

### 3.3. DONNÉES EXPERIMENTALES DES COLONNES EN BETON CONFINE PAR PRFC

Plusieurs programmes de recherches expérimentaux ont été effectués sur des spécimens en béton confiné par des polymères renforcés de fibres (PRF), sous chargement en compression uni-axial. Dans cette partie, une base de données contenant les résultats d'essais de 310 études expérimentales publiées entre 1992 et 2013 est présentée, afin de réaliser une analyse de la performance de quelques modèles de confinement par PRFC.

#### 3.3.1. Critères de sélection de la base de données

Les résultats inclus dans la base de données seront choisis, en utilisant un ensemble de critères de sélection soigneusement considérés, pour assurer les limites et l'uniformité de l'analyse de la performance. Celles-ci nécessitent de quelques critères de sélection énumérés ci-dessous :

- Seuls les spécimens cylindriques en béton confinés par des enveloppes enroulés en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) ont été sélectionnés.
- Seuls les spécimens totalement confinés par PRFC ont été choisis. Les spécimens partiellement confinés (c'est-à-dire, bandes de PRFC) ont été ignorés.
- Seuls les spécimens ayant des résistances en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) compris entre 19.7 et 169.70 MPa seront choisis.
- Seuls les spécimens dont le rapport hauteur / diamètre ( $H / D$ ) est égale à deux (2) sont inclus dans la base de données expérimentales.

#### 3.3.2. Construction de la base de données

Tous les résultats d'essais inclus dans la base de données sont résumés dans le Tableau 3.1. Cette base de données comprend les informations suivantes pour chaque spécimen :

- Les propriétés géométriques des spécimens cylindriques à savoir : le diamètre  $D$ , la hauteur  $H$  et leur rapport  $H/D$ .
- Les propriétés du béton tel que : la résistance en compression du béton non confiné  $f_{co}$  ainsi que leur déformation correspondante  $\varepsilon_{co}$ .
- Les propriétés des polymères renforcés de fibres (FRP) de carbone à savoirs : le module d'élasticité  $E_{prf}$ , l'épaisseur totale  $t_{prf}$  ainsi que la déformation à la rupture ( $\varepsilon_{n,rupt}$ ).
- Les propriétés des fibres seules ne sont pas introduites dans Le tableau 3.1.
- Cette base de données présente également les deux conditions ultimes mesurées à savoir : la résistance en compression ultime axiale du béton confiné par PRFC ( $f_{cu}$ ) et la déformation ultime correspondante ( $\varepsilon_{cu}$ ).

**Tableau 3.1** : Données expérimentaux du confinement par PRFC.

N°	Chercheurs et années	$D$ (mm)	$H$ (mm)	$H/D$	$f_{co}$ (Mpa)	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$E_{prf}$ (GPa)	$t_{prf}$ (mm)	$\varepsilon_{h, rup}$ (‰)	$f_{cu}$ (MPa)	$f_{cu}/f_{co}$	$\varepsilon_{cu}$ (‰)	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$
1	Harmon et Slattery (1992)	51	102	2	41,0	2,4	235	0,09	11,3	86,0	2,10	11,5	4,79
2		51	102	2	41,0	2,4	235	0,18	10,0	120,5	2,94	15,7	6,54
3		51	102	2	41,0	2,4	235	0,34	7,5	158,4	3,86	25,0	10,42
4		51	102	2	103,0	3,0	235	0,18	2,0	131,1	1,27	11,0	3,67
5		51	102	2	103,0	3,0	235	0,34	7,3	193,2	1,88	20,5	6,83
6		51	102	2	103,0	3,0	235	0,69	5,5	303,6	2,95	34,5	11,50
7	Howie et Karbhari (1995)	152	304	2	42,5	2,4	227	0,33	4,5	44,9	1,06	11,0	4,58
8		152	304	2	42,5	2,4	227	0,66	5,5	59,7	1,40	13,5	5,63
9		152	304	2	42,5	2,4	227	0,99	5,5	77,7	1,83	21,0	8,75
10		152	304	2	42,5	2,4	227	1,32	3,4	89,5	2,11	22,9	9,54
11	Picher <i>et al.</i> (1996)	153	305	2	39,7	2,4	83	0,60	8,4	56,0	1,41	10,7	4,46
12	Watanable <i>et al.</i> (1997)	100	200	2	30,2	2,2	612	0,14	2,3	41,7	1,38	5,7	2,59
13		100	200	2	30,2	2,2	612	0,28	2,2	56,0	1,85	8,8	4,00
14		100	200	2	30,2	2,2	612	0,42	2,2	63,3	2,10	13,0	5,91
15		100	200	2	30,2	2,2	225	0,17	9,4	46,6	1,54	15,1	6,86
16		100	200	2	30,2	2,2	225	0,50	8,2	87,2	2,89	31,1	14,14
17		100	200	2	30,2	2,2	225	0,67	7,6	104,6	3,46	41,5	18,86
18	Kono <i>et al.</i> (1998)	100	200	2	34,3	2,3	235	0,17	8,8	61,2	1,78	9,5	4,13
19		100	200	2	32,3	2,2	235	0,17	7,9	59,2	1,83	10,7	4,86
20		100	200	2	32,3	2,2	235	0,33	8,9	80,2	2,48	17,5	7,95
21		100	200	2	32,3	2,2	235	0,50	7,2	88,5	2,74	16,2	7,36
22		100	200	2	34,8	2,3	235	0,17	8,0	54,7	1,57	9,9	4,30
23		100	200	2	34,8	2,3	235	0,33	7,7	82,1	2,36	20,6	8,96
24		100	200	2	34,8	2,3	235	0,50	8,5	106,7	3,07	24,3	10,57
25	Matthys <i>et al.</i> (1999)	150	300	2	34,9	2,3	420	0,24	1,9	41,3	1,18	4,0	1,74
26		150	300	2	34,9	2,3	420	0,24	1,8	40,7	1,17	3,6	1,57
27		150	300	2	34,9	2,3	200	0,12	11,5	44,3	1,27	8,5	3,70
28		150	300	2	34,9	2,3	200	0,12	10,8	42,2	1,21	7,2	3,13
29	Rochette et Labossiere (2000)	100	200	2	42,0	2,4	83	0,60	8,9	73,5	1,75	16,5	6,88
30		100	200	2	42,0	2,4	83	0,60	9,5	73,5	1,75	15,7	6,54
31		100	200	2	42,0	2,4	83	0,60	8,0	67,6	1,61	13,5	5,63
32	Xiao et Wu (2000)	152	305	2	33,7	2,3	105	0,38	8,4	47,9	1,42	12,0	5,22
33		152	305	2	33,7	2,3	105	0,38	11,5	49,7	1,47	14,0	6,09
34		152	305	2	33,7	2,3	105	0,38	8,7	49,4	1,47	12,4	5,39
35		152	305	2	33,7	2,3	105	0,76	9,1	64,6	1,92	16,5	7,17
36		152	305	2	33,7	2,3	105	0,76	10,0	75,2	2,23	22,5	9,78
37		152	305	2	33,7	2,3	105	0,76	10,0	71,8	2,13	21,6	9,39
38		152	305	2	33,7	2,3	105	1,14	8,2	82,9	2,46	24,5	10,65
39		152	305	2	33,7	2,3	105	1,14	9,0	95,4	2,83	30,3	13,17
40		152	305	2	43,8	2,4	105	0,38	8,1	54,8	1,25	9,8	4,08
41		152	305	2	43,8	2,4	105	0,38	7,6	52,1	1,19	4,7	1,96

42		152	305	2	43,8	2,4	105	0,38	2,8	48,7	1,11	3,7	1,54
43		152	305	2	43,8	2,4	105	0,76	9,2	84,0	1,92	15,7	6,54
44		152	305	2	43,8	2,4	105	0,76	10,0	79,2	1,81	13,7	5,71
45		152	305	2	43,8	2,4	105	0,76	10,1	85,0	1,94	16,6	6,92
46		152	305	2	43,8	2,4	105	1,14	7,9	96,5	2,20	17,4	7,25
47		152	305	2	43,8	2,4	105	1,14	7,1	92,6	2,11	16,8	7,00
48		152	305	2	43,8	2,4	105	1,14	8,4	94,0	2,15	17,5	7,29
49		152	305	2	55,2	2,6	105	0,38	7,0	57,9	1,05	6,9	2,65
50		152	305	2	55,2	2,6	105	0,38	6,2	62,9	1,14	4,8	1,85
51		152	305	2	55,2	2,6	105	0,38	1,9	58,1	1,05	4,9	1,88
52		152	305	2	55,2	2,6	106	0,76	7,4	55,2	1,00	12,1	4,65
53		152	305	2	55,2	2,6	105	0,76	8,3	77,6	1,41	8,1	3,12
54		152	305	2	55,2	2,6	105	1,14	7,6	106,5	1,93	14,3	5,50
55		152	305	2	55,2	2,6	105	1,14	8,5	108,0	1,96	14,5	5,58
56		152	305	2	55,2	2,6	105	1,14	7,0	103,3	1,87	11,8	4,54
57	<b>Shahawy et al. (2000)</b>	152	305	2	19,7	2,0	207	0,5	7,4	33,8	1,72	15,9	7,95
58		152	305	2	19,7	2,0	207	1	6,3	46,4	2,36	22,1	11,05
59		152	305	2	19,7	2,0	207	1,5	5,7	62,6	3,18	25,8	12,90
60		152	305	2	19,7	2,0	207	2	5,9	75,7	3,84	35,6	17,80
61		152	305	2	49,0	2,5	207	0,5	6,2	59,1	1,21	6,2	2,48
62		152	305	2	49,0	2,5	207	1	6,2	76,5	1,56	9,7	3,88
63		152	305	2	49,0	2,5	207	1,5	6,3	98,8	2,02	12,6	5,04
64		152	305	2	49,0	2,5	207	2	6,2	112,7	2,30	19,0	7,60
65	<b>Aire et al. (2001)</b>	150	300	2	42,0	2,4	240	0,12	9,5	46,0	1,10	11,0	4,58
66		150	300	2	42,0	2,4	240	0,35	10,5	77,0	1,83	22,6	9,42
67	<b>Micelli et al. (2001)</b>	152	305	2	26,2	2,1	38	1,00	8,1	50,6	1,93	14,4	6,86
68		152	305	2	26,2	2,1	38	2,00	7,2	64,0	2,44	16,5	7,86
69	<b>De Lorenzis et al. (2002)</b>	120	240	2	43,0	2,4	91	0,30	7,0	58,5	1,36	11,6	4,83
70		120	240	2	43,0	2,4	91	0,30	8,0	65,6	1,53	9,5	3,96
71		150	300	2	38,0	2,3	91	0,45	8,0	62,0	1,63	9,5	4,13
72		150	300	2	38,0	2,3	91	0,45	8,0	67,3	1,77	13,5	5,87
73	<b>Shehata et al. (2002)</b>	150	300	2	29,8	2,2	235	0,17	12,3	57,0	1,91	12,3	5,59
74		150	300	2	29,8	2,2	235	0,33	11,9	72,1	2,42	17,4	7,91
75	<b>Youssef (2003)</b>	406	813	2	29,4	2,2	105	1,17	8,2	45,9	1,56	6,3	2,86
76		406	813	2	29,4	2,2	105	2,34	12,1	64,8	2,20	11,6	5,27
77		406	813	2	29,4	2,2	105	3,51	12,0	85,9	2,92	15,6	7,09
78		406	813	2	29,4	2,2	105	5,84	12,4	126,4	4,30	28,4	12,91
79		153	305	2	44,1	2,4	105	0,58	10,3	86,1	1,95	19,0	7,92
80		153	305	2	44,1	2,4	105	1,17	12,6	96,6	2,19	19,9	8,29
81		153	305	2	44,1	2,4	105	1,75	9,7	130,7	2,96	28,3	11,79
82		406	813	2	45,6	2,4	105	2,34	8,9	79,5	1,74	16,8	7,00
83		406	813	2	38,3	2,3	105	2,34	9,6	73,1	1,91	10,5	4,57
84	<b>Carey et Harries (2003, 2005)</b>	152	305	2	33,5	2,3	250	0,20	10,7	47,0	1,40	9,7	4,22
85		152	305	2	33,5	2,3	250	0,20	11,4	47,6	1,42	8,8	3,83
86	<b>Bullo (2003)</b>	150	300	2	32,5	2,2	390	0,17	4,7	52,6	1,62	8,3	3,77

87		150	300	2	32,5	2,2	390	0,17	5,2	56,6	1,74	9,3	4,23
88		150	300	2	32,5	2,2	390	0,17	4,2	61,1	1,88	8,3	3,77
89		150	300	2	32,5	2,2	390	0,50	6,4	97,3	2,99	18,2	8,27
90		150	300	2	32,5	2,2	390	0,50	4,4	83,8	2,58	12,7	5,77
91		150	300	2	32,5	2,2	390	0,50	5,4	100,2	3,08	16,9	7,68
92	<b>Lam et Teng (2004)</b>	152	305	2	35,9	2,3	259	0,17	11,5	50,4	1,40	12,7	5,52
93		152	305	2	35,9	2,3	259	0,17	9,7	47,2	1,31	11,1	4,83
94		152	305	2	35,9	2,3	259	0,17	9,8	53,2	1,48	12,9	5,61
95		152	305	2	35,9	2,3	259	0,33	9,9	68,7	1,91	16,8	7,30
96		152	305	2	35,9	2,3	259	0,33	10,0	69,9	1,95	19,6	8,52
97		152	305	2	34,3	2,3	259	0,33	9,5	71,6	2,09	18,5	8,04
98		152	305	2	34,3	2,3	259	0,5	8,0	82,6	2,41	20,5	8,91
99		152	305	2	34,3	2,3	259	0,5	8,8	90,4	2,64	24,1	10,48
100		152	305	2	34,3	2,3	259	0,5	9,7	97,3	2,84	25,2	10,96
101		152	305	2	34,3	2,3	259	0,17	9,1	50,3	1,47	10,2	4,43
102		152	305	2	34,3	2,3	259	0,17	8,9	50,0	1,46	10,8	4,70
103		152	305	2	34,3	2,3	259	0,17	9,3	56,7	1,65	11,7	5,09
104		<b>Rousakis et Tefers (2004)</b>	150	300	2	25,2	2,1	377	0,17	7,0	41,6	1,65	14,4
105	150		300	2	25,2	2,1	377	0,17	5,8	38,8	1,54	12,1	5,76
106	150		300	2	25,2	2,1	377	0,17	6,4	44,1	1,75	15,3	7,29
107	150		300	2	25,2	2,1	377	0,34	6,4	60,1	2,38	18,8	8,95
108	150		300	2	25,2	2,1	377	0,34	5,5	55,9	2,22	21,0	10,00
109	150		300	2	25,2	2,1	377	0,34	5,7	61,6	2,44	20,8	9,90
110	150		300	2	25,2	2,1	377	0,51	4,5	67,0	2,66	24,5	11,67
111	150		300	2	25,2	2,1	377	0,51	3,7	67,3	2,67	24,3	11,57
112	150		300	2	25,2	2,1	377	0,51	4,4	70,0	2,78	24,4	11,62
113	150		300	2	51,8	2,5	377	0,17	5,4	78,7	1,52	7,5	3,00
114	150		300	2	51,8	2,5	377	0,17	4,0	72,8	1,41	6,6	2,64
115	150		300	2	51,8	2,5	377	0,17	5,2	79,2	1,53	6,8	2,72
116	150		300	2	51,8	2,5	377	0,34	5,5	95,4	1,84	10,5	4,20
117	150		300	2	51,8	2,5	377	0,34	3,6	90,7	1,75	10,0	4,00
118	150		300	2	51,8	2,5	377	0,34	5,1	90,3	1,74	10,2	4,08
119	150		300	2	51,8	2,5	377	0,51	4,4	110,5	2,13	12,9	5,16
120	150		300	2	51,8	2,5	377	0,51	3,1	103,6	2,00	12,0	4,80
121	150	300	2	51,8	2,5	377	0,51	5,6	117,2	2,26	15,3	6,12	
122	150	300	2	51,8	2,5	377	0,85	2,9	112,7	2,18	15,9	6,36	
123	150	300	2	51,8	2,5	377	0,85	3,6	126,7	2,45	16,1	6,44	
124	150	300	2	51,8	2,5	377	0,85	5,3	137,9	2,66	18,1	7,24	
125	<b>Berthet et al. (2005)</b>	160	320	2	25,0	2,1	230	0,17	9,6	42,8	1,71	16,3	7,76
126		160	320	2	25,0	2,1	230	0,17	9,6	37,8	1,51	9,3	4,43
127		160	320	2	25,0	2,1	230	0,17	9,6	45,8	1,83	16,7	7,95
128		160	320	2	25,0	2,1	230	0,33	9,0	56,7	2,27	17,3	8,24
129		160	320	2	25,0	2,1	230	0,33	9,1	55,2	2,21	15,8	7,52
130		160	320	2	25,0	2,1	230	0,33	9,1	56,1	2,24	16,8	8,00
131		160	320	2	40,1	2,4	230	0,11	10,2	49,8	1,24	5,5	2,29

132		160	320	2	40,1	2,4	230	0,11	9,5	50,8	1,27	6,6	2,75
133		160	320	2	40,1	2,4	230	0,11	12,0	48,8	1,22	6,1	2,54
134		160	320	2	40,1	2,4	230	0,17	8,8	53,7	1,34	6,6	2,75
135		160	320	2	40,1	2,4	230	0,17	8,5	54,7	1,36	6,2	2,58
136		160	320	2	40,1	2,4	230	0,17	10,4	51,8	1,29	6,4	2,67
137		160	320	2	40,1	2,4	230	0,22	7,9	59,7	1,49	6,0	2,50
138		160	320	2	40,1	2,4	230	0,22	8,3	60,7	1,51	6,9	2,88
139		160	320	2	40,1	2,4	230	0,22	8,1	60,2	1,50	7,3	3,04
140		160	320	2	40,1	2,4	230	0,44	9,2	91,6	2,28	14,4	6,00
141		160	320	2	40,1	2,4	230	0,44	9,7	89,6	2,23	13,6	5,67
142		160	320	2	40,1	2,4	230	0,44	8,9	86,6	2,16	11,7	4,88
143		160	320	2	40,1	2,4	230	0,99	9,9	142,4	3,55	24,6	10,25
144		160	320	2	40,1	2,4	230	0,99	10,0	140,4	3,50	23,9	9,96
145		160	320	2	40,1	2,4	230	1,32	10,0	166,3	4,15	27,0	11,25
146		160	320	2	52,0	2,5	230	0,33	9,3	82,6	1,59	8,3	3,32
147		160	320	2	52,0	2,5	230	0,33	8,7	82,8	1,59	7,0	2,80
148		160	320	2	52,0	2,5	230	0,33	8,9	82,3	1,58	7,7	3,08
149		160	320	2	52,0	2,5	230	0,66	6,7	108,1	2,08	11,4	4,56
150		160	320	2	52,0	2,5	230	0,66	8,7	112,0	2,15	11,2	4,48
151		160	320	2	52,0	2,5	230	0,66	8,8	107,9	2,08	11,2	4,48
152		70	140	2	112,6	3,1	230	0,33	7,1	141,1	1,25	4,5	1,45
153		70	140	2	112,6	3,1	230	0,33	7,4	143,1	1,27	4,9	1,58
154		70	140	2	112,6	3,1	230	0,82	7,5	189,5	1,68	7,2	2,32
155		70	140	2	112,6	3,1	230	0,82	7,3	187,9	1,67	7,0	2,26
156		70	140	2	169,7	3,4	230	0,33	4,6	186,4	1,10	6,7	1,97
157		70	140	2	169,7	3,4	230	0,99	8,0	296,4	1,75	10,2	3,00
158	Modarelli <i>et al.</i> (2005)	150	300	2	28,0	2,2	221	0,17	15,3	55,3	1,98	9,0	4,09
159		150	300	2	38,0	2,3	221	0,17	13,2	62,7	1,65	4,8	2,09
160	Lam <i>et al.</i> (2006)	152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	8,1	52,6	1,28	9,0	3,75
161		152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	10,8	57,0	1,39	12,1	5,04
162		152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	10,7	55,4	1,35	11,1	4,63
163		152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	13,2	60,2	1,46	13,4	5,58
164		152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	10,3	56,8	1,38	11,7	4,88
165		152	305	2	41,1	2,4	250	0,17	11,3	56,5	1,37	12,0	5,00
166		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	10,6	76,8	1,97	19,1	8,30
167		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	11,3	79,1	2,03	20,8	9,04
168		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	7,9	65,8	1,69	12,5	5,43
169		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	12,2	81,5	2,10	24,4	10,61
170		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	10,8	78,2	2,01	18,9	8,22
171		152	305	2	38,9	2,3	250	0,33	12,2	85,6	2,20	23,4	10,17
172	Jiang et Teng (2007)	152	305	2	38,0	2,3	241	0,68	9,8	110,1	2,90	25,5	11,09
173		152	305	2	38,0	2,3	241	0,68	9,7	107,4	2,83	26,1	11,35
174		152	305	2	38,0	2,3	241	1,02	8,9	129,0	3,39	27,9	12,13
175		152	305	2	38,0	2,3	241	1,02	9,3	135,7	3,57	30,8	13,39
176		152	305	2	38,0	2,3	241	1,36	8,7	161,3	4,24	37,0	16,09

177		152	305	2	38,0	2,3	241	1,36	8,8	158,5	4,17	35,4	15,39
178		152	305	2	37,7	2,3	260	0,11	9,4	48,5	1,29	9,0	3,91
179		152	305	2	37,7	2,3	260	0,11	10,9	50,3	1,33	9,1	3,96
180		152	305	2	44,2	2,4	260	0,11	7,3	48,1	1,09	6,9	2,88
181		152	305	2	44,2	2,4	260	0,11	9,7	51,1	1,16	8,9	3,71
182		152	305	2	44,2	2,4	260	0,22	11,8	65,7	1,49	13,0	5,42
183		152	305	2	44,2	2,4	260	0,22	9,4	62,9	1,42	10,3	4,29
184		152	305	2	47,6	2,5	260	0,33	9,0	82,7	1,74	13,0	5,20
185		152	305	2	47,6	2,5	260	0,33	11,3	85,5	1,80	19,4	7,76
186		152	305	2	47,6	2,5	260	0,33	10,6	85,5	1,80	18,2	7,28
187		150	300	2	61,6	1,8	234	0,17	1,8	80,5	1,31	2,7	1,5
188	Valdmanis et al. (2007)	150	300	2	61,6	1,8	234	0,34	1,6	95,3	1,54	3,2	1,78
189		150	300	2	61,6	1,8	234	0,51	3,2	104,9	1,70	3,6	2,00
190		150	300	2	30,9	2,2	219	0,17	11,1	55,8	1,81	25,0	11,36
191	Wang et Wu (2008)	150	300	2	52,1	2,5	219	0,17	11,1	67,9	1,30	33,6	13,44
192		150	300	2	52,1	2,5	197	0,33	14,4	99,3	1,91	20,0	8,00
193		152	305	2	48,1	2,5	85	1,00	10,5	80,9	1,68	15,1	6,04
194		152	305	2	48,1	2,5	85	1,00	11,2	86,6	1,80	15,3	6,12
195		152	305	2	48,1	2,5	85	2,00	9,7	109,4	2,27	20,1	8,04
196		152	305	2	48,1	2,5	85	2,00	12,2	126,7	2,63	26,6	10,64
197		152	305	2	48,1	2,5	85	3,00	11,6	162,7	3,38	30,9	12,36
198		152	305	2	48,1	2,5	85	3,00	10,4	153,6	3,19	28,9	11,56
199		152	305	2	48,1	2,5	85	1,00	10,5	84,2	1,75	15,5	6,2
200		152	305	2	48,1	2,5	85	1,00	12,2	87,9	1,83	16,9	6,76
201		152	305	2	48,1	2,5	85	2,00	10,6	123,3	2,56	23,7	9,48
202		152	305	2	48,1	2,5	85	2,00	8,9	108,2	2,25	19,3	7,72
203		152	305	2	48,1	2,5	85	3,00	10,9	156,5	3,25	31,3	12,52
204		152	305	2	48,1	2,5	85	3,00	11,4	157,0	3,26	28,4	11,36
205		152	305	2	79,9	2,8	85	1,00	11,0	90,9	1,14	5,3	1,89
206		152	305	2	79,9	2,8	85	1,00	9,2	105,3	1,32	7,4	2,64
207	Cui et Sheikh (2010)	152	305	2	79,9	2,8	85	2,00	9,9	142,1	1,78	11,3	4,04
208		152	305	2	79,9	2,8	85	2,00	11,0	140,8	1,76	9,7	3,46
209		152	305	2	79,9	2,8	85	3,00	9,8	172,9	2,16	14,8	5,29
210		152	305	2	79,9	2,8	85	3,00	11,1	181,8	2,28	14,7	5,25
211		152	305	2	110,6	3,0	85	1,00	10,3	107,3	0,97	5,2	1,73
212		152	305	2	110,6	3,0	85	1,00	8,6	116,6	1,05	5,5	1,83
213		152	305	2	110,6	3,0	85	3,00	8,7	198,4	1,79	8,4	2,80
214		152	305	2	110,6	3,0	85	3,00	7,5	182,3	1,65	7,3	2,43
215		152	305	2	45,6	2,4	241	0,11	16,8	57,7	1,27	12,1	5,04
216		152	305	2	45,6	2,4	241	0,11	16,0	55,4	1,21	13,1	5,46
217		152	305	2	45,6	2,4	241	0,22	16,2	78,0	1,71	19,7	8,21
218		152	305	2	45,6	2,4	241	0,22	18,0	86,8	1,90	21,4	8,92
219		152	305	2	45,6	2,4	241	0,33	17,9	106,5	2,34	29,0	12,08
220		152	305	2	45,6	2,4	241	0,33	18,0	106,0	2,32	28,3	11,79
221		152	305	2	45,6	2,4	241	0,11	15,7	56,3	1,23	12,3	5,13

222		152	305	2	45,6	2,4	241	0,11	15,8	58,8	1,29	11,9	4,96
223		152	305	2	45,6	2,4	241	0,22	10,3	81,9	1,80	18,7	7,79
224		152	305	2	45,6	2,4	241	0,22	11,4	82,8	1,82	21,7	9,04
225		152	305	2	45,6	2,4	241	0,33	11,5	107,3	2,35	28,6	11,92
226		152	305	2	45,6	2,4	241	0,33	11,5	108,6	2,38	27,8	11,58
227		152	305	2	85,6	2,9	241	0,11	8,2	64,4	0,75	4,4	1,52
228		152	305	2	85,6	2,9	241	0,11	7,6	66,6	0,78	4,4	1,52
229		152	305	2	85,6	2,9	241	0,22	7,4	78,9	0,92	5,6	1,93
230		152	305	2	85,6	2,9	241	0,22	7,6	86,1	1,01	5,8	2,00
231		152	305	2	85,6	2,9	241	0,44	8,9	125,4	1,46	10,0	3,45
232		152	305	2	85,6	2,9	241	0,44	9,2	126,5	1,48	9,9	3,41
233		152	305	2	111,8	3,0	241	0,22	9,4	101,1	0,90	3,2	1,07
234		152	305	2	111,8	3,0	241	0,22	8,3	94,3	0,84	4,8	1,60
235		152	305	2	111,8	3,0	241	0,56	7,5	152,1	1,36	5,0	1,67
236		152	305	2	111,8	3,0	241	0,56	6,0	145,3	1,30	5,8	1,93
237		152	305	2	45,7	2,4	438	0,16	7,9	67,5	1,48	11,1	4,63
238		152	305	2	45,7	2,4	438	0,16	7,7	64,1	1,40	10,3	4,29
239		152	305	2	45,7	2,4	438	0,33	6,4	84,2	1,84	13,3	5,54
240		152	305	2	45,7	2,4	438	0,33	6,3	83,1	1,82	12,3	5,13
241		152	305	2	45,7	2,4	438	0,49	6,0	99,7	2,18	15,6	6,50
242		152	305	2	45,7	2,4	438	0,49	5,5	94,9	2,08	14,3	5,96
243		152	305	2	45,7	2,4	438	0,16	7,2	65,8	1,44	9,7	4,04
244		152	305	2	45,7	2,4	438	0,16	7,7	65,9	1,44	10,3	4,29
245		152	305	2	45,7	2,4	438	0,33	6,9	88,1	1,93	14,2	5,92
246		152	305	2	45,7	2,4	438	0,33	6,1	82,0	1,79	12,3	5,13
247		152	305	2	45,7	2,4	438	0,65	3,6	103,2	2,26	15,3	6,38
248		152	305	2	45,7	2,4	438	0,65	4,4	105,6	2,31	18,6	7,75
249		152	305	2	85,7	2,9	438	0,16	3,0	91,5	1,07	4,2	1,45
250		152	305	2	85,7	2,9	438	0,16	4,2	94,5	1,10	5,4	1,86
251		152	305	2	85,7	2,9	438	0,33	4,4	117,7	1,37	7,1	2,45
252		152	305	2	85,7	2,9	438	0,33	4,1	117,5	1,37	5,5	1,90
253		152	305	2	85,7	2,9	438	0,65	3,8	161,6	1,89	10,2	3,52
254		152	305	2	85,7	2,9	438	0,65	3,8	162,6	1,90	9,5	3,28
255		152	305	2	111,8	3,0	438	0,33	2,2	139,1	1,24	3,2	1,07
256		152	305	2	111,8	3,0	438	0,33	1,7	123,3	1,10	3,1	1,03
257		152	305	2	111,8	3,0	438	0,82	2,4	176,4	1,58	4,9	1,63
258		152	305	2	111,8	3,0	438	0,82	2,1	172,5	1,54	5,0	1,67
259	Xiao et al. (2010)	152	305	2	70,8	3,2	237,8	0,34	11,0	104,2	1,47	10,7	3,34
260		152	305	2	70,8	3,2	237,8	0,34	12,1	110,3	1,56	14,3	4,37
261		152	305	2	70,8	3,2	237,8	1,02	10,0	180,5	2,55	21,6	6,75
262		152	305	2	70,8	3,2	237,8	1,02	9,0	197,7	2,79	23,3	7,28
263		152	305	2	70,8	3,2	237,8	1,7	6,7	191,5	2,70	22,8	7,12
264		152	305	2	70,8	3,2	237,8	1,7	5,2	162,4	2,29	13,9	4,34
265		152	305	2	111,6	3,4	237,8	0,68	5,7	141,2	1,26	9,7	2,85
266		152	305	2	111,6	3,4	237,8	0,68	5,8	134,0	1,20	7,5	2,21

267		152	305	2	111,6	3,4	237,8	1,02	5,2	170,4	1,53	9,8	2,88
268		152	305	2	111,6	3,4	237,8	1,02	6,0	176,6	1,58	11,2	3,29
269		152	305	2	111,6	3,4	237,8	1,7	5,6	217,3	1,95	15,6	4,59
270		152	305	2	111,6	3,4	237,8	1,7	5,7	217,1	1,94	16,0	4,70
271	<b>Benzaid et al. (2010)</b>	160	320	2	25,93	2,7	34	1,00	13,1	39,63	1,53	12,8	4,68
272		160	320	2	25,93	2,7	34	3,00	13,2	66,14	2,55	15,2	5,55
273		160	320	2	49,46	1,7	34	1,00	2,9	52,75	1,066	2,5	1,49
274		160	320	2	49,46	1,7	34	3,00	13,2	82,9	1,676	7,3	4,3
275		160	320	2	61,8	2,8	34	1,00	2,5	62,68	1,01	3,3	1,15
276		160	320	2	61,8	2,8	34	3,00	12,9	93,2	1,51	10,5	3,71
277	<b>Wu et Jiang (2013)</b>	150	300	2	20,6	2,0	242	0,17	14,1	50,4	2,45	19,7	9,85
278		150	300	2	20,6	2,0	242	0,17	15,6	53,0	2,57	21,4	10,7
279		150	300	2	20,6	2,0	242	0,17	14,3	53,2	2,58	22,7	11,35
280		150	300	2	20,6	2,0	242	0,33	18,4	83,7	4,06	38,6	19,3
281		150	300	2	20,6	2,0	242	0,33	18,6	86,6	4,20	40,2	20,1
282		150	300	2	20,6	2,0	242	0,33	22,6	88,8	4,31	29,7	14,85
283		150	300	2	20,6	2,0	242	0,50	17,9	110,2	5,35	48,2	24,1
284		150	300	2	20,6	2,0	242	0,50	13,7	108,1	5,25	48,6	24,3
285		150	300	2	20,6	2,0	242	0,50	17,3	110,0	5,34	41,3	20,65
286		150	300	2	20,6	2,0	242	0,67	19,2	127,7	6,20	54,9	27,45
287		150	300	2	20,6	2,0	242	0,67	18,5	132,5	6,43	55,2	27,6
288		150	300	2	20,6	2,0	242	0,67	17,1	140,6	6,83	52,0	26,00
289		150	300	2	24,8	2,1	242	0,17	18,1	61,7	2,49	22,1	10,52
290		150	300	2	24,8	2,1	242	0,17	15,6	56,7	2,29	20,2	9,62
291		150	300	2	24,8	2,1	242	0,17	20,4	56,9	2,29	21,3	10,14
292		150	300	2	24,8	2,1	242	0,33	18,7	87,2	3,52	34,5	16,43
293		150	300	2	24,8	2,1	242	0,33	17,1	87,8	3,54	36,1	17,19
294		150	300	2	24,8	2,1	242	0,33	16,5	88,3	3,56	35,2	16,76
295		150	300	2	24,8	2,1	242	0,50	17,3	118,6	4,78	40,8	19,43
296		150	300	2	24,8	2,1	242	0,50	17,5	114,7	4,63	43,6	20,76
297		150	300	2	24,8	2,1	242	0,50	20,0	114,6	4,62	41,9	19,95
298		150	300	2	24,8	2,1	242	0,67	13,6	133,8	5,40	50,9	24,24
299		150	300	2	24,8	2,1	242	0,67	14,4	135,0	5,44	49,5	23,57
300		150	300	2	24,8	2,1	242	0,67	15,1	139,1	5,61	49,6	23,62
301	150	300	2	36,7	2,3	242	0,17	15,2	61,9	1,69	15,8	6,87	
302	150	300	2	36,7	2,3	242	0,17	19,1	71,6	1,95	20,2	8,78	
303	150	300	2	36,7	2,3	242	0,17	16,0	65,5	1,78	16,3	7,09	
304	150	300	2	36,7	2,3	242	0,33	16,0	92,4	2,52	27,2	11,83	
305	150	300	2	36,7	2,3	242	0,33	16,8	97,6	2,66	27,9	12,13	
306	150	300	2	36,7	2,3	242	0,33	17,1	95,7	2,61	29,0	12,61	
307	150	300	2	36,7	2,3	242	0,50	15,2	121,2	3,30	25,2	10,96	
308	150	300	2	36,7	2,3	242	0,50	15,4	128,6	3,50	33,7	14,65	
309	150	300	2	36,7	2,3	242	0,50	17,0	116,5	3,17	32,5	14,13	
310	150	300	2	36,7	2,3	242	0,67	16,2	141,8	3,86	34,9	15,17	

### 3.4. PERFORMANCE DE QUELQUES MODELES DE CONFINEMENT PAR PRFC SANS RAT

#### 3.4.1. Modèle de Lam et Teng (2003)

Lam et Teng (2003) ont développé un modèle, pour le béton confiné avec des enveloppes en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC), sur la base de 76 données expérimentales. Ce modèle adopte une forme linéaire simple, comme il considérait bien la déformation à la rupture du PRFC. Les expressions analytiques de la résistance ultime et de la déformation correspondante du béton confiné sont exprimées comme suivantes :

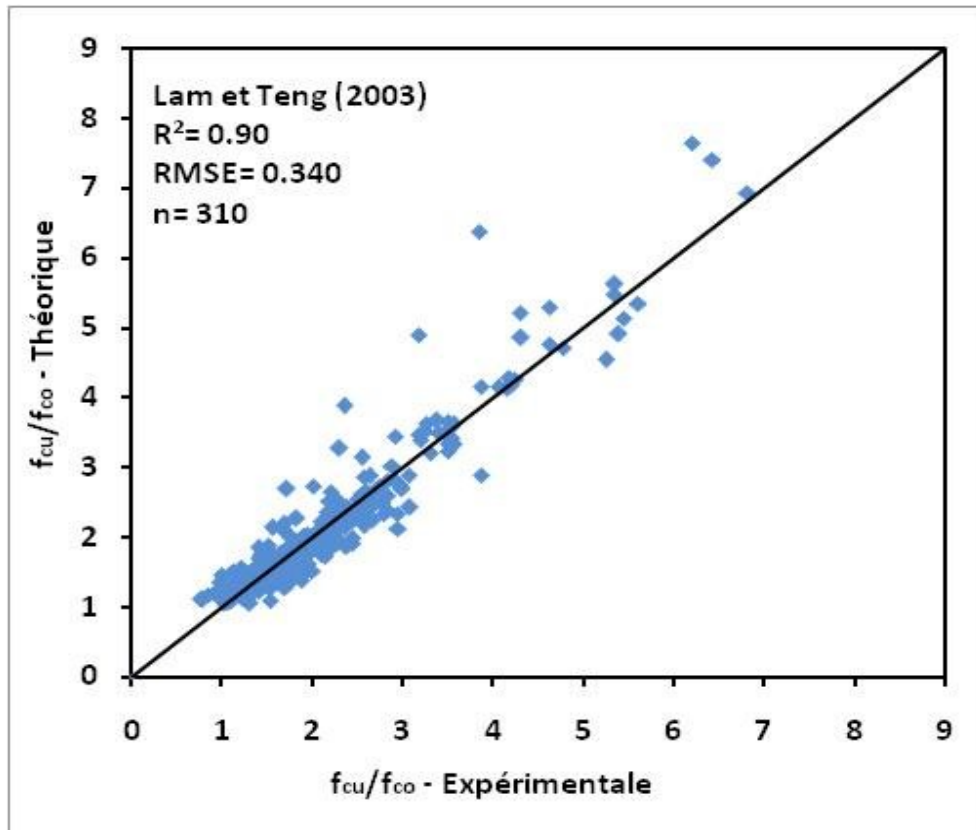
$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.3 \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \quad (3.8)$$

et :

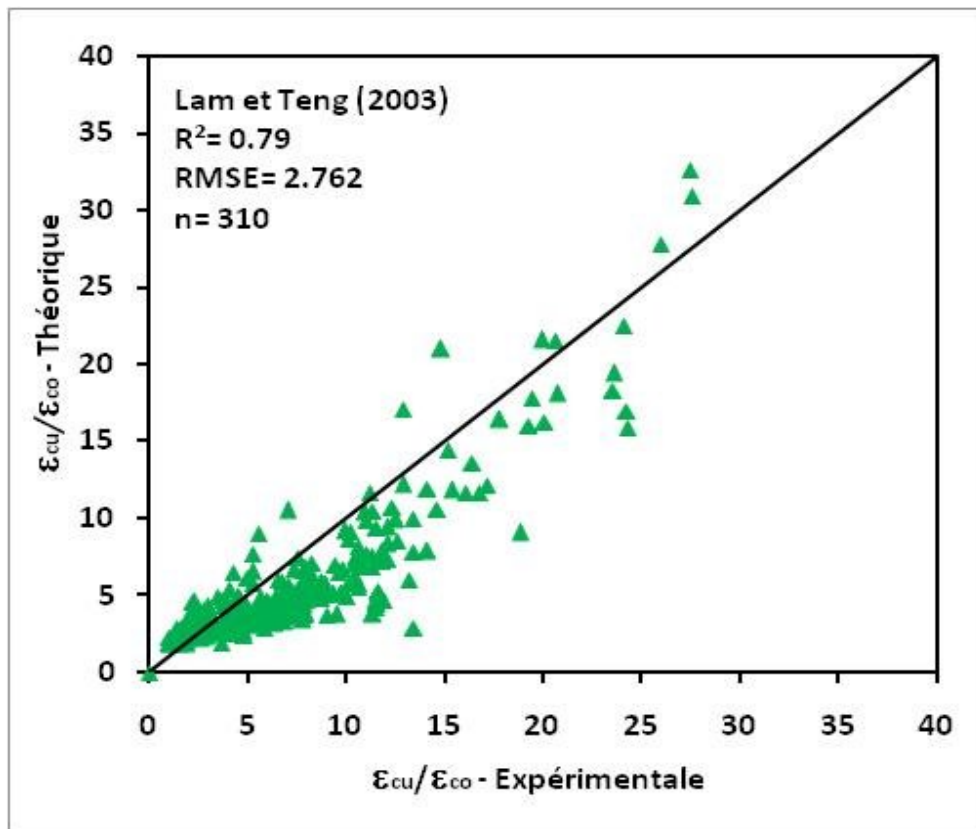
$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = \left( 1,75 + 5,53 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{prf}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right) \quad (3.9)$$

Sur la base des données expérimentales représentées dans le Tableau 3.1, la Figure 3.3a illustre la performance du modèle de résistance. Cette Figure présente que le coefficient de détermination  $R^2= 0,90$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,34$ . D'après ces deux indicateurs de performance, on peut dire que le modèle de résistance proposé montre une bonne performance ainsi qu'une distribution uniforme des points.

Concernant la performance du modèle de déformation de l'équation (3.9), la Figure 3.3b montre que  $R^2= 0,79$  et  $RMSE = 2,762$  pour  $n=310$ . Ces deux indicateurs montrent que le modèle de déformation prédit présente une performance relativement bonne bien qu'il sous-estime un peu les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.3 :** Performance du modèle de Lam et Teng (2003).

## 3.4.2. Modèle d'Ilki et al. (2004)

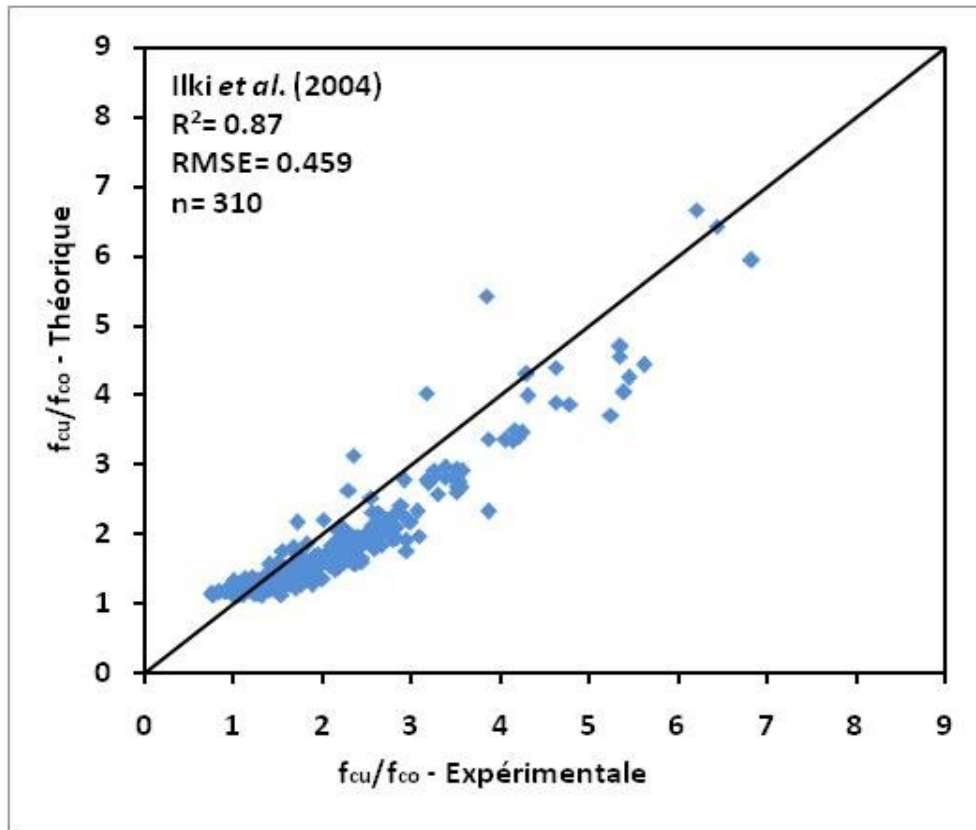
Le modèle d'Ilki *et al.* (2004) a été développé pour le béton confiné avec des enveloppes en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Ce modèle adopte une forme de puissance et néglige la déformation à la rupture de PRFC. Les expressions de la résistance et la déformation ultimes proposées sont formulées par les équations suivantes :

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2,4 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{1,2} \quad (3.10)$$

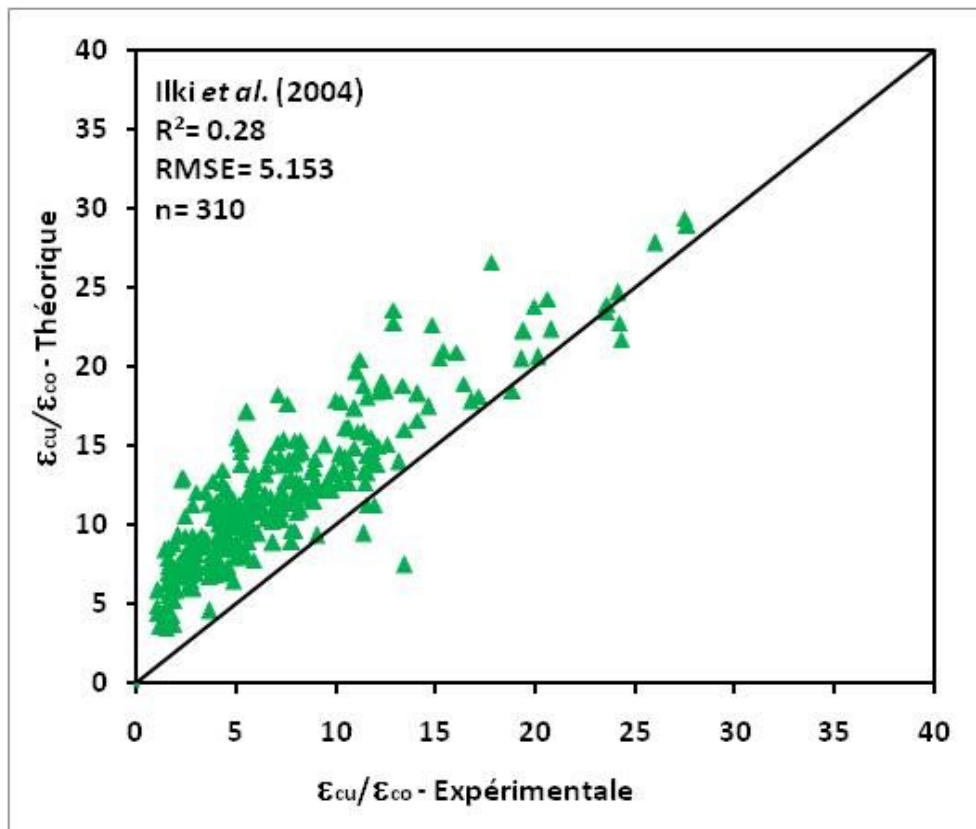
et,

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 20 \left( \frac{f_{lu,a}}{f_{co}} \right)^{0,5} \quad (3.11)$$

Sur la base des données expérimentale illustrée dans le Tableau 3.1, la performance du modèle de résistance est dressée dans la Figure 3.4a. D'après cette Figure, on observe que la majeure partie du nuage des points de ce modèle se localisent dans la partie inférieure de la diagonale. Le coefficient de détermination  $R^2$  de ce modèle est égal à 0,87, ce qui représente une bonne corrélation avec la base de données ( $n = 310$ ). De même, la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE tend vers zéro,  $RMSE = 0.459$ , ce qui confirme la performance de ce modèle de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ). Par ailleurs dans la Figure 3.4b, le nuage des points de déformation se localisent au-dessus de la diagonale, avec une très faible valeur du carré du coefficient de corrélation, qui est  $R^2 = 0,28$ , ceci montre une faible performance du modèle de déformation. Comme, il surestime les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ). La racine carrée du carré moyen des résidus RMSE confirme bien cette constatation, est tend vers 5 ceci indique clairement que le modèle de déformation prédit sur estime les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ) ; et leur performance vis-à-vis des données expérimentales reste faible.



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de Déformation

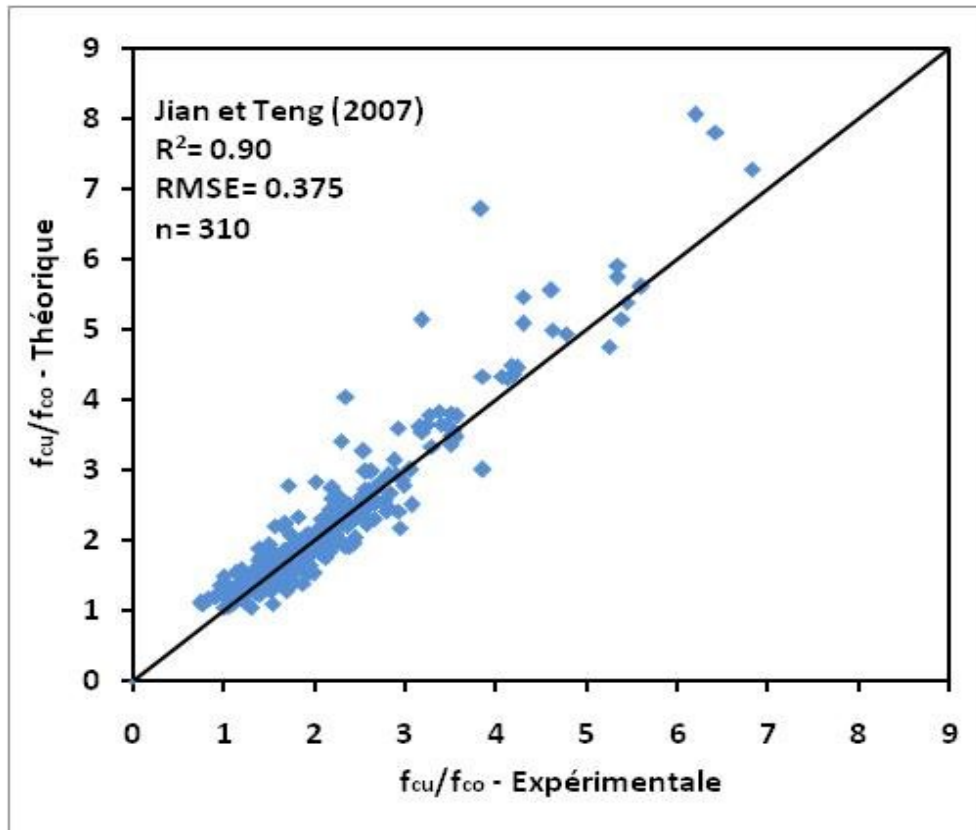
**Figure 3.4 :** Performance du modèle d'Ilki *et al.* (2004).

### 3.4.3. Modèle de Jiang et Teng (2007)

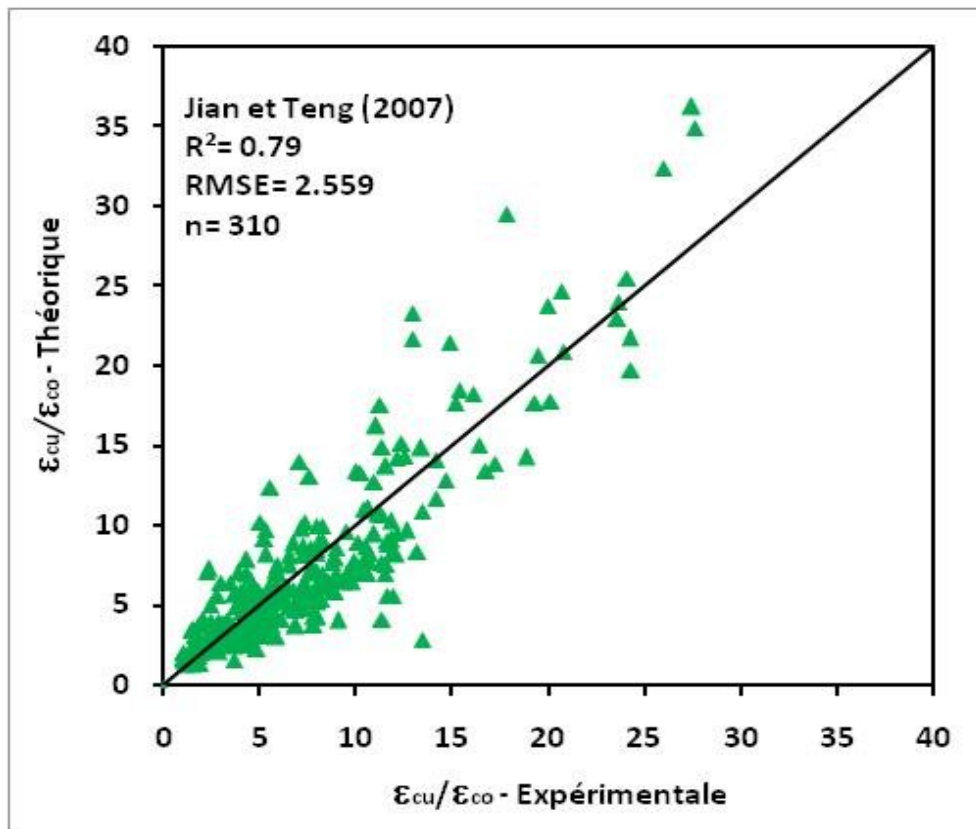
La Figure 3.5a éclairci la performance du modèle de résistance de Jiang et Teng (2007), exprimé en (3.12). Cette Figure montre un coefficient de détermination  $R^2= 0,90$  et une erreur quadratique  $RMSE= 0,375$ , ce qui montre une très bonne performance presque similaire au modèle de Lam et Teng (2003). En outre, la Figure 3.5b de la performance du modèle de déformation proposé en (3.13) présente les indices de  $R^2= 0,79$  et  $RMSE = 2,559$ , elle montre que le modèle prédit présente une performance relativement bonne, et reste presque similaire au modèle de déformation proposé par Lam et Teng (2003).

$$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,5 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 17,5 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.13)$$



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.5** : Performance du modèle de résistance de Jiang et Teng (2007).

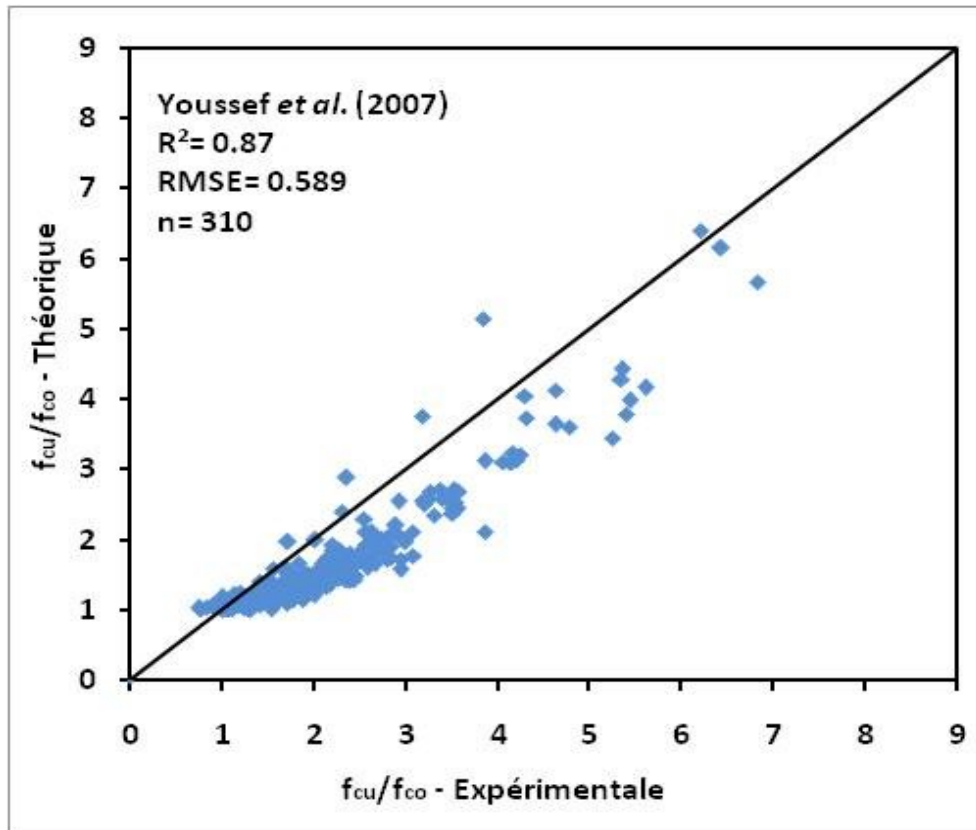
### 3.4.4. Modèle de Youssef et al. (2007)

Les modèles de résistance et de déformation développés par Youssef *et al.* (2007) sont exprimés par l'équation (3.14) et (3.15), respectivement. Le modèle de résistance (3.14) possède une forme de puissance. D'après la Figure 3.6a, les indicateurs de performance du modèle de résistance, enregistrent  $R^2= 0,87$  et  $RMSE = 0,589$ . D'après ce constat, on peut dire que ce modèle sous-estime les valeurs de la résistance ultime ( $f_{cu}/f_{co}$ ). Par ailleurs, il présente une performance relativement similaire au modèle proposé par Ilki *et al.* (2004), néanmoins, il présente une performance un peu faible par rapport au modèle de résistance proposé par Lam et Teng (2003) qui adopte une forme linéaire simple.

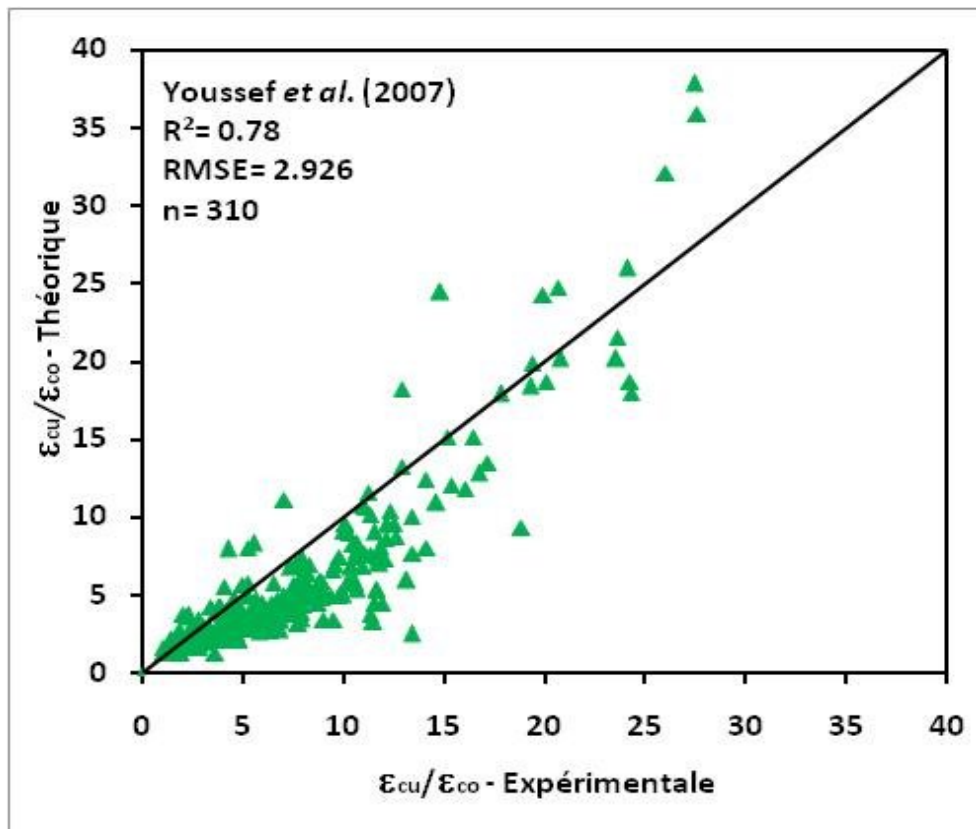
$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2,25 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{1,25} \quad (3.14)$$

La performance du modèle de déformation développé par Youssef *et al.* (2007) donné en (3.15), est exposé dans la Figure 3.6b avec le carré du coefficient de corrélation  $R^2= 0,78$  et  $RMSE = 2,926$ . L'évaluation visuelle montre que le modèle prédit présente une performance relativement bonne et similaire au modèle de déformation proposé par Lam et Teng (2003) ; malgré que le nuage de la majorité des points se situés dans la partie inférieure sous la diagonale (Figure 3.6b).

$$\varepsilon_{cu} = 0,003368 + 0,2590 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \left( \frac{f_{prf}}{E_{prf}} \right)^{0,5} \quad (3.15)$$



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.6** : Performance du modèle de résistance de Youssef *et al.* (2007).

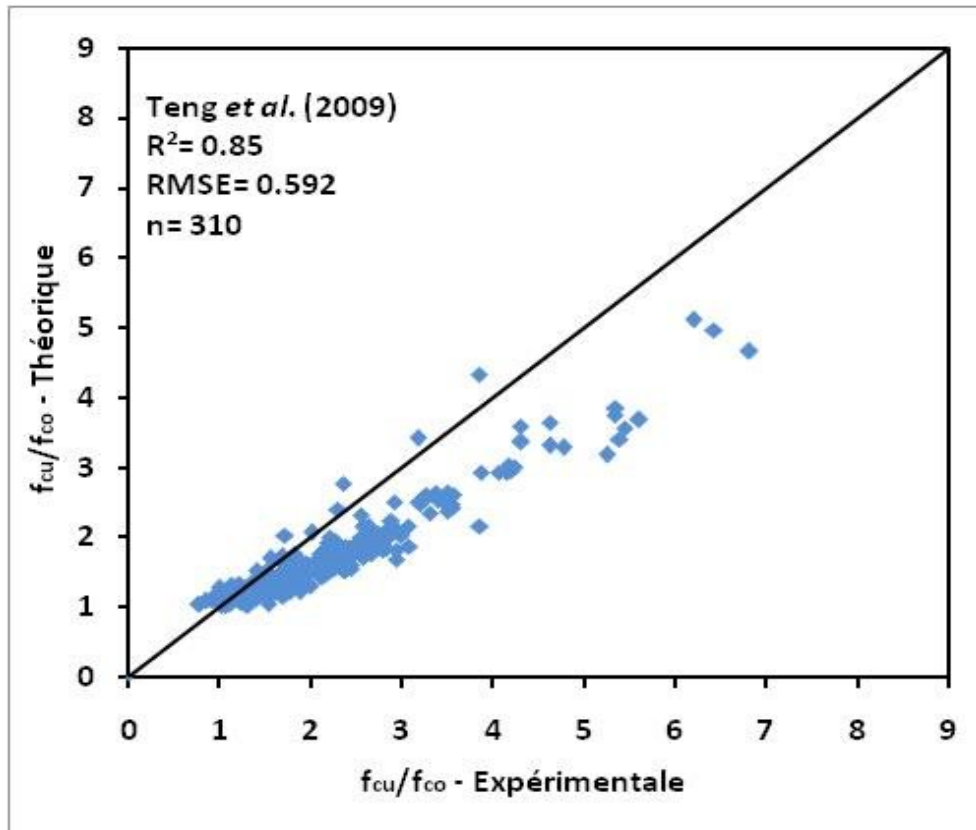
### 3.4.5. Modèle de Teng et al. (2009)

Contrairement au modèle de résistance développé par Lam et Teng (2003) qui est caractérisé par une fonction de  $(f_l/f_{co})$  seulement, Teng *et al.* (2009) ont proposé un modèle qui fait participer explicitement l'effet de la rigidité de confinement ( $\rho_k$ ), et la capacité de déformation du PRFC ( $\rho_\varepsilon$ ). Le modèle de résistance développé sous une forme linéaire est exprimé par l'équation (3.16). La performance de ce modèle est schématisée dans la Figure 3.7a. D'après cette Figure, on observe qu'une grande partie du nuage de points de ce modèle se localise au-dessous de la diagonale, comme on enregistre que le carré du coefficient de corrélation  $R^2= 0,85$  et l'indice RMSE= 0,592, pour une base de données expérimentale du Tableau 3.1 (n= 310). En conséquence, on peut dire que le modèle proposé présente une faible performance par rapport aux modèles de Lam et Teng (2003) et Jiang *et Teng* (2007), bien qu'il sous-estime les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ).

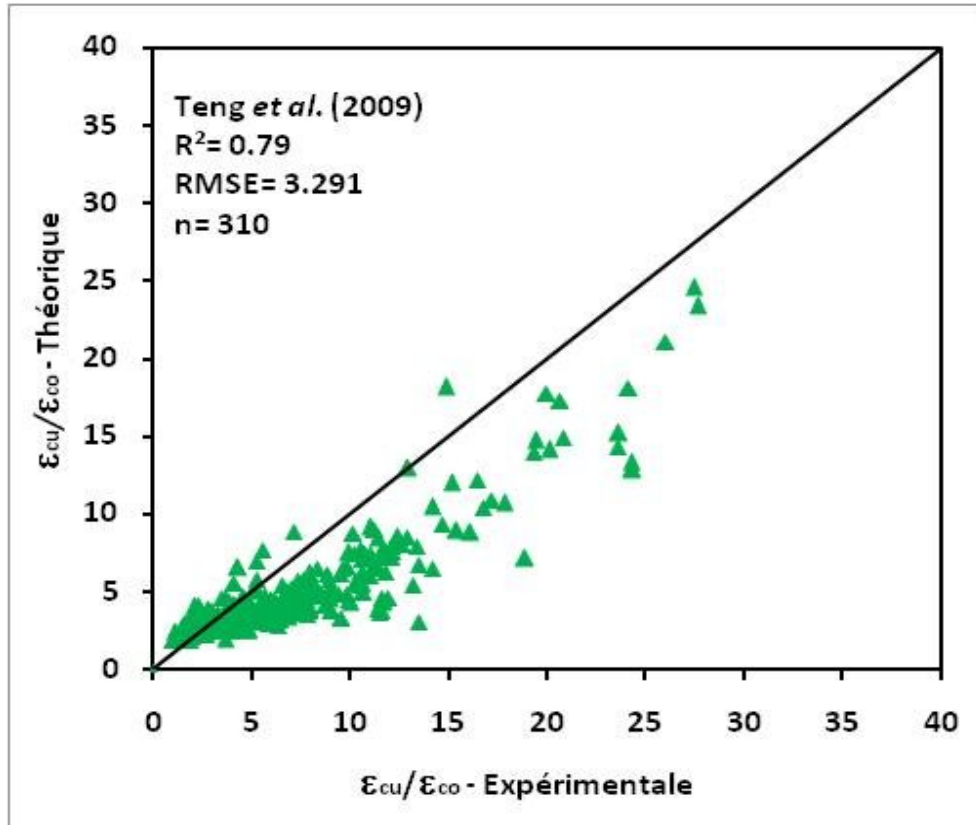
$$f_{cu} = f_{co} (1 + 3,5(\rho_k - 0,001)\rho_\varepsilon) \quad (\rho_k \geq 0,01) \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} (1,75 + 6,5\rho_k^{0,8} \rho_\varepsilon^{1,45}) \quad (3.17)$$

La Figure 3.7b montre la performance du modèle de déformation exprimé par la relation (3.17). D'après cette figure, on constate que le nuage des points prend une position similaire que le modèle de résistance, avec  $R^2= 0,79$  et RMSE= 3,291. D'après ces deux indicateurs et l'observation visuelle, on peut dire que le modèle prédit présente une performance faible par rapport aux modèles proposés par Lam et Teng (2003), Jiang et Teng (2007) et Youssef *et al.* (2007), néanmoins les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ) se localisent sous la diagonale comme le modèle de Youssef *et al.* (2007).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.7 :** Performance du modèle de Teng *et al.* (2009).

## 3.4.6. Modèle de Benzaid et al. (2010)

Benzaid *et al.* (2010), ont développé un modèle de confinement pour des colonnes circulaires confiné par enveloppe en PRFC sur la base de leurs résultats expérimentaux. La forme de ces modèles est linéaire simple. Les expressions des modèles de résistance et de déformation ultimes prédites sont les suivantes :

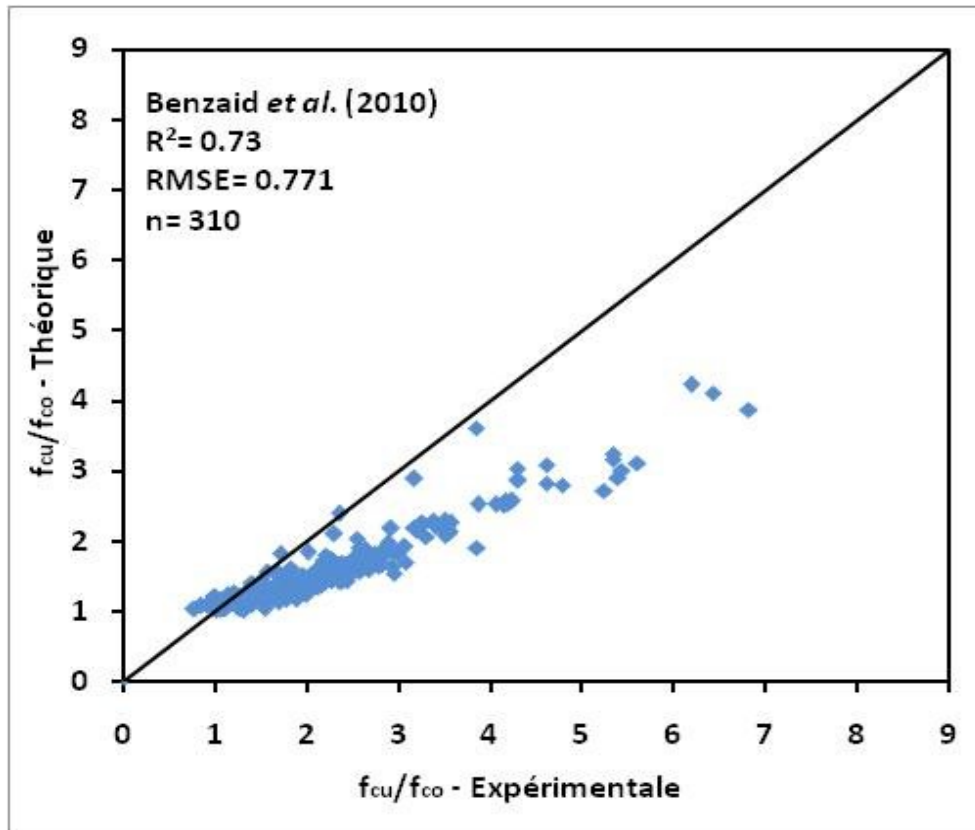
$$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 1,6 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.18)$$

et

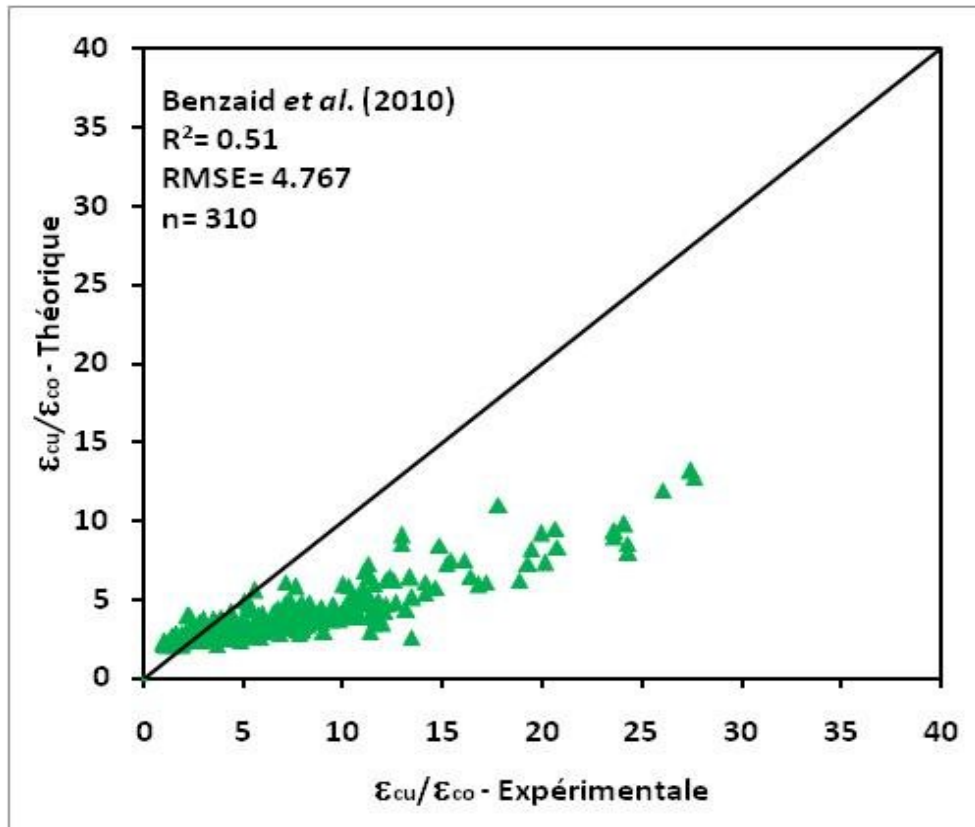
$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 5,55 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.19)$$

La performance du modèle de résistance est représentée dans la Figure 3.8a. Cette Figure indique que le nuage de points (x, y) est localisé sur la partie inférieure de la diagonale. Les indicateurs de la performance sont  $R^2 = 0,73$  et  $RMSE = 0,771$ . En conséquence, ce modèle présente une performance faible par rapport aux modèles présentés ci-dessus, ainsi qu'il sous-estime les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ).

La Figure 3.8b illustre bien la performance du modèle de déformation proposé par Benzaid *et al.* (2010). D'après cette Figure, le nuage de points de ce modèle forme un angle de l'ordre de  $20^\circ$ , comme il nous montre que le carré du coefficient de corrélation  $R^2 = 0,51$  et une erreur  $RMSE = 4,767$ . On constate bien que le modèle prédit présente une faible performance par rapport aux différents modèles présentés sauf le modèle d'Ilki *et al.* (2004). En outre, ce modèle sous-estime largement les valeurs du rapport de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.8** : Performance du modèle de résistance de Benzaid *et al.* (2010).

### 3.4.7. Modèle de Fahmy et Wu (2010)

Les modèles de résistance et de déformation de Fahmy et Wu (2010) sont formulés de la manière suivante :

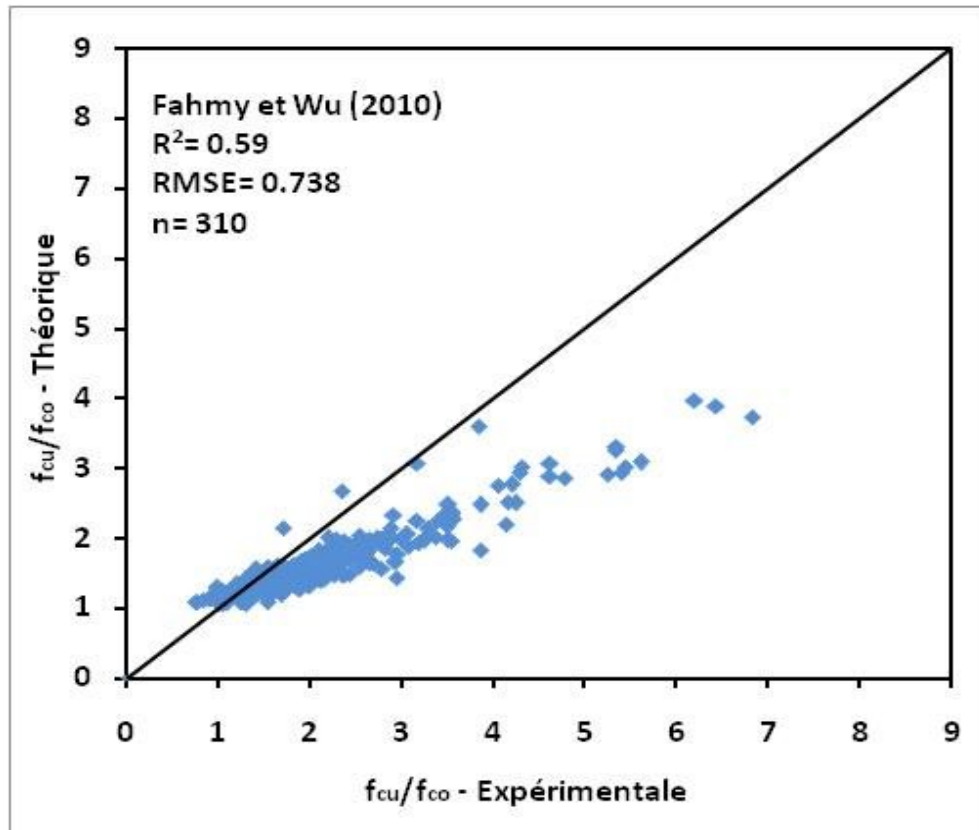
$$\begin{cases} f_{cu} = f_{co} + k_1 f_{lu} \\ k_1 = 4,5 f_{lu}^{-0,3} \text{ si } f_{co} \leq 40 \text{MPa} \\ k_1 = 3,75 f_{lu}^{-0,3} \text{ si } f_{co} > 40 \text{MPa} \end{cases} \quad (3.20)$$

et

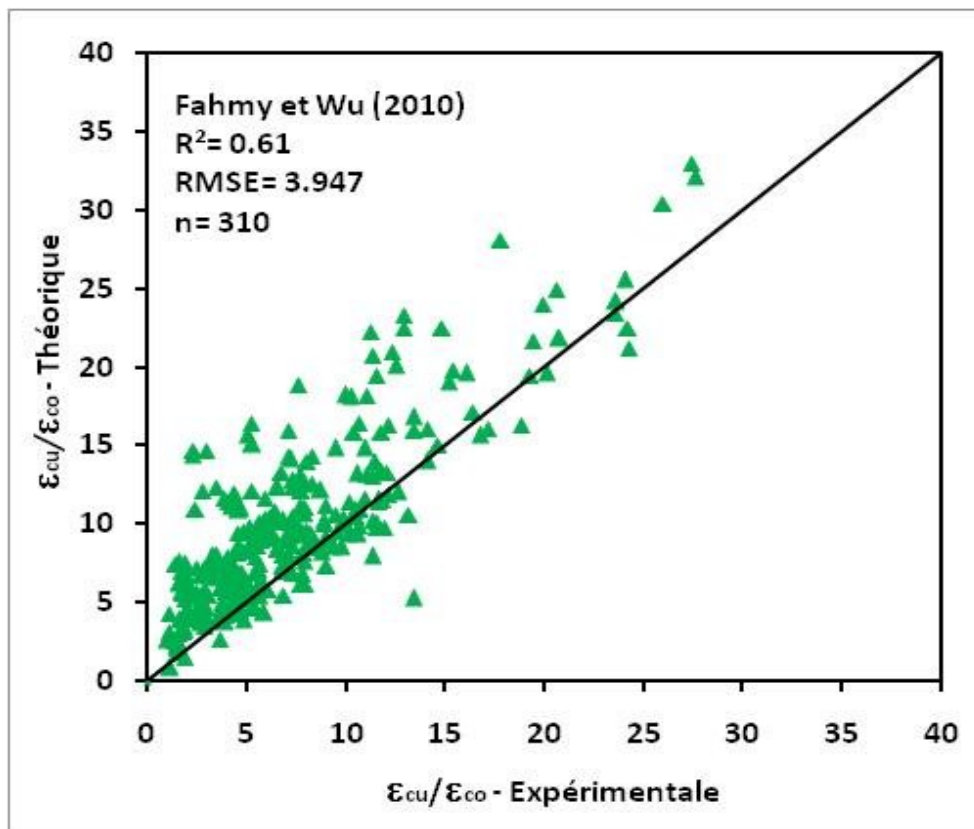
$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_{co}}{E_2} \quad (3.21)$$

Le modèle de résistance proposé sous forme d'une fonction de puissance de la pression de confinement latérale ( $f_{lu}$ ) a deux expressions pour le béton confiné avec différentes résistances du béton non confiné ( $f_{co}$ ). Les deux indicateurs de la performance illustrés dans la Figure 3.9a enregistre  $R^2 = 0,59$  et  $RMSE = 0,738$ . D'après ces deux indicateurs, on déduit que le modèle prédit présente une très faible performance par rapport à tous les modèles présentés, bien qu'il sous-estime largement les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ).

De même que pour la performance du modèle de déformation illustrée dans la figure 3.9b, avec  $R^2 = 0,61$  et  $RMSE = 3,947$ . Les valeurs de ces deux indices montrent que le modèle prédit sur-estime les valeurs du rapport de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ). Comme, il présente une très faible performance comparativement aux modèles de déformation proposés par Lam et Teng (2003), Jiang et Teng (2007), Youssef *et al.* (2007) et Teng *et al.* (2009), mais il présente une bonne performance comparativement aux modèles de Benzaid *et al.* (2010) et Ilki *et al.* (2004).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.9** : Performance du modèle de résistance de Fahmy et Wu (2010).

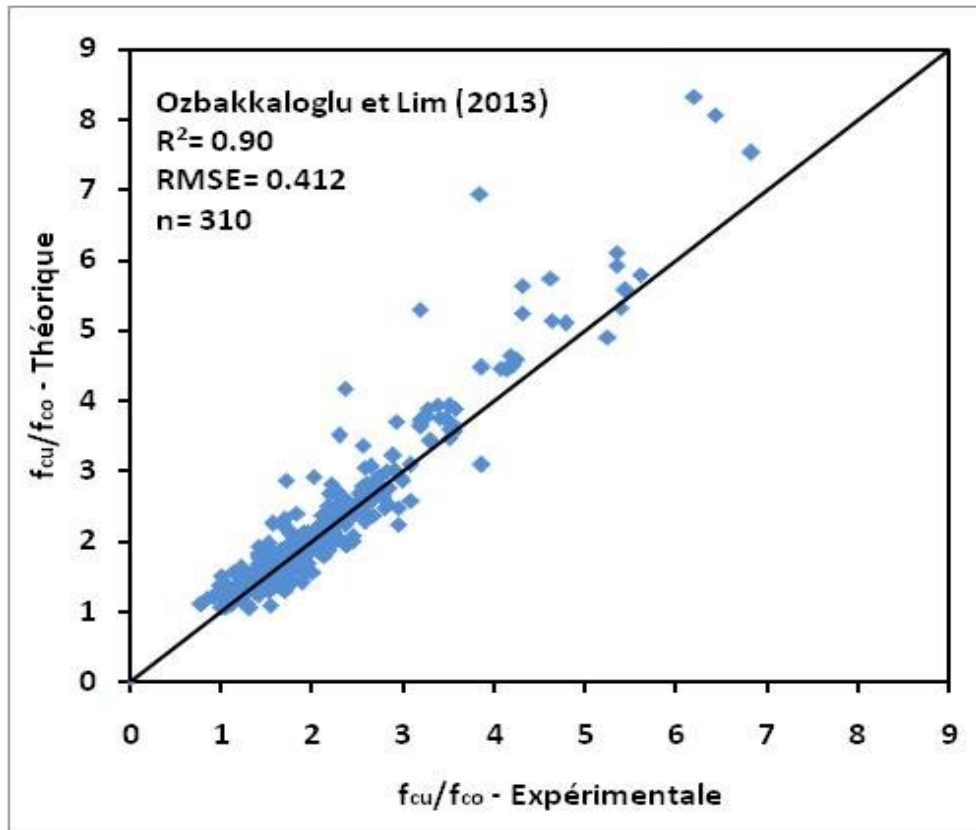
### 3.4.8. Modèle d'Ozbakkaloglu et Lim (2013)

Ozbakkaloglu et Lim 2013 ont prédit des modèles de résistance et de déformation de forme linéaire et simple. Les expressions de ces modèles sont formulées de la manière suivante :

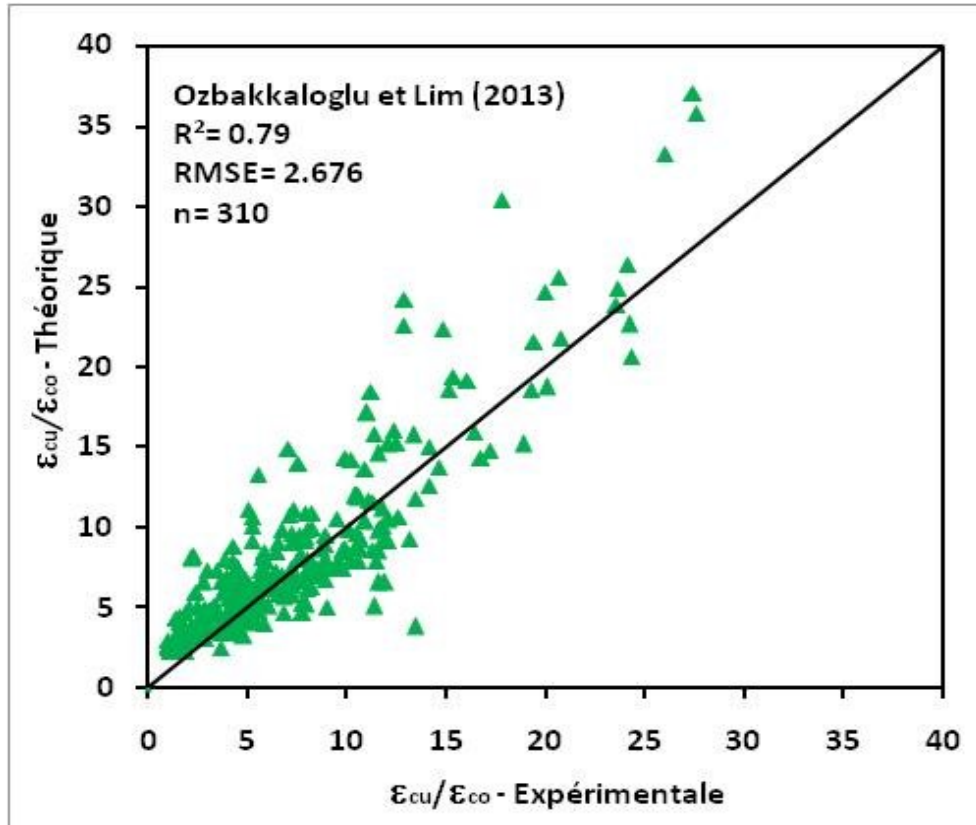
$$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 3,64 \left( \frac{f_{l,a}}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 17,41 \left( \frac{f_{l,a}}{f_{co}} \right) \right) \quad (3.23)$$

La Figure 3.10a schématise la performance du modèle de résistance. D'après cette Figure, on observe qu'il y a un bon ajustement entre les valeurs des résistances proposés et expérimentales. La même figure montre que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,90$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,412$ . D'après ces deux signes, on peut déduire que ce modèle présente une très bonne performance par rapport à tous les modèles de résistance présentés sauf les modèles de résistance proposés par Lam et Teng (2003) et Jiang et Teng (2007) qui présentent des  $RMSE$  inférieurs, ainsi que ce modèle sur-estime légèrement les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ). Dans ce contexte, pour la performance du modèle de déformation, la Figure 3.10b présente  $R^2 = 0,79$  et  $RMSE = 2,676$ , ce qui montre que le modèle prédit sur estime légèrement les valeurs du rapport de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ), ainsi qu'il présente une bonne performance comparativement aux autres modèles, et qui reste presque similaire avec le modèle de déformation proposé par Lam et Teng (2003) et Jiang et Teng (2007). De même, la distribution du nuage de points qui forme un angle de  $45^\circ$  confirme ce constat.



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.10 :** Performance du modèle de résistance d'Ozbakkaloglu et Lim (2013).

### 3.5. PERFORMANCE DE QUELQUES MODELES DE CONFINEMENT PAR PRFC ET RAT

#### 3.5.1. Données expérimentales

Actuellement, peu de programmes de recherches expérimentaux ont été conduits sur des spécimens du béton confiné sous l'effet combiné, des polymères renforcés de fibres en carbone (PRFC) et le renforcement en aciers transversaux (RAT), sous un chargement de compression uni axial. Dans cette partie, on présente une base de données contenant les résultats d'essais expérimentaux de 34 spécimens cylindriques en béton confiné sous l'effet combiné du PRFC et des aciers transversaux, existants dans la littérature, à savoir : Lee *et al.* (2010), Benzaid *et al.* 2010 et Wang *et al.* (2012). Cette base de données expérimentales est présentée dans le Tableau 3.2. Ce tableau contient des spécimens cylindriques ayant un diamètre ( $D$ ) qui varie de 150 à 305 (mm), et de résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) qui varie de 24,5 à 61,81 (MPa), le module d'élasticité du PRFC ( $E_{prf}$ ), varie de 34000 à 250000 (MPa), la résistance à la traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) varie de 450 à 4510 (MPa). Le même Tableau rapporte aussi l'acier transversal utilisé et ces propriétés mécaniques, la forme (cerces ou spirales), l'espacement ( $s$ ) qui varie de 20 à 140 (mm), le diamètre ( $d_s$ ) qui varie de 5 à 8 (mm) et la limite élastique ( $f_{ys}$ ), qui varie de 235 à 1200 (MPa).

**Tableau 3.2 : Données expérimentaux de 34 spécimens en béton confiné sous l'effet combiné du PRFC – RAT.**

	Références	Spécimens	$D$	$f'_{co}$	$\epsilon_{co}$	FRP				RAT			$f_{cu} (exp)$ (MPa)	$\epsilon_{cu} (exp)$	
	Chercheurs (Année)		(mm)	(MPa)		Type	$t_{prf}$ (mm)	$E_{prf}$ (MPa)	$f_{prf}$ (MPa)	type	$f_{ys}$ (MPa)	$s$ (mm)			$d_s$ (mm)
1	Lee et al. 2010	S2F1	150	36,2	0,0024	CFRP	0,11	250000	4510	Spirale	1200	20	5	72,87	0,039
2		S2F2	150	36,2	0,0024	CFRP	0,22	250000	4510	Spirale	1200	20	5	92,68	0,036
3		S2F3	150	36,2	0,0024	CFRP	0,33	250000	4510	Spirale	1200	20	5	108,01	0,034
4		S2F4	150	36,2	0,0024	CFRP	0,44	250000	4510	Spirale	1200	20	5	115,72	0,038
5		S2F5	150	36,2	0,0024	CFRP	0,55	250000	4510	Spirale	1200	20	5	150,8	0,043
6		S4F1	150	36,2	0,0024	CFRP	0,11	250000	4510	Spirale	1200	40	5	60	0,019
7		S4F2	150	36,2	0,0024	CFRP	0,22	250000	4510	Spirale	1200	40	5	74,77	0,023
8		S4F3	150	36,2	0,0024	CFRP	0,33	250000	4510	Spirale	1200	40	5	88,8	0,029
9		S4F4	150	36,2	0,0024	CFRP	0,44	250000	4510	Spirale	1200	40	5	104,15	0,03
10		S4F5	150	36,2	0,0024	CFRP	0,55	250000	4510	Spirale	1200	40	5	123,64	0,036
11		S6F1	150	36,2	0,0024	CFRP	0,11	250000	4510	Spirale	1200	60	5	50,37	0,017
12		S6F2	150	36,2	0,0024	CFRP	0,22	250000	4510	Spirale	1200	60	5	68,52	0,025
13		S6F4	150	36,2	0,0024	CFRP	0,44	250000	4510	Spirale	1200	60	5	99,44	0,034
14		S6F5	150	36,2	0,0024	CFRP	0,55	250000	4510	Spirale	1200	60	5	114,64	0,036
15	Benzaid et al. 2010	I,RCC,1,1L	160	29,5	0,00377	CFRP	1	34000	450	Tie	235	140	8	50,59	0,016
16		I,RCC,1,3L	160	29,5	0,00377	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	70,83	0,022
17		I,PCC,1,1L	160	25,93	0,00273	CFRP	1	34000	450	tie	235	140	8	39,63	0,013
18		I,PCC,1,3L	160	25,93	0,00273	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	66,14	0,015
19		II,RCC,2,1L	160	58,24	0,003	CFRP	1	34000	450	Tie	235	140	8	79,18	0,093
20		II,RCC,1,3L	160	58,24	0,003	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	101,48	0,014

<b>21</b>		<b>II,PCC,1,1L</b>	160	49,46	0,0017	CFRP	1	34000	450	Tie	235	140	8	52,75	0,002
<b>22</b>		<b>II,PCC,1,3L</b>	160	49,46	0,0017	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	82,91	0,007
<b>23</b>		<b>III,RCC,2,1L</b>	160	63,01	0,0027	CFRP	1	34000	450	Tie	235	140	8	74,43	0,003
<b>24</b>		<b>III,RCC,2,3L</b>	160	63,01	0,0027	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	94,71	0,008
<b>25</b>		<b>III,PCC,1,1L</b>	160	61,81	0,0028	CFRP	1	34000	450	Tie	235	140	8	62,68	0,003
<b>26</b>		<b>III,PCC,1,3L</b>	160	61,81	0,0028	CFRP	3	34000	450	Tie	235	140	8	93,19	0,01
<b>27</b>	<b>Wang et al. 2012</b>	<b>C1H1L1C</b>	305	24,5	0,002	CFRP	0,167	244000	4340	Tie	397	80	6	43,1	0,0196
<b>28</b>		<b>C1H1L2M</b>	305	24,5	0,002	CFRP	0,334	244000	4340	Tie	397	80	6	52,2	0,0268
<b>29</b>		<b>C1H2L1M</b>	305	24,5	0,002	CFRP	0,167	244000	4340	Tie	397	40	6	47	0,0232
<b>30</b>		<b>C1H2L2M</b>	305	24,5	0,002	CFRP	0,334	244000	4340	Tie	397	40	6	62,1	0,033
<b>31</b>		<b>C2H1L1M</b>	204	24,5	0,002	CFRP	0,167	244000	4340	Tie	397	120	6	52,1	0,023
<b>32</b>		<b>C2H1L2M</b>	204	24,5	0,002	CFRP	0,334	244000	4340	Tie	397	120	6	66,1	0,0341
<b>33</b>		<b>C2H2L1M</b>	204	24,5	0,002	CFRP	0,167	244000	4340	Tie	397	60	6	52,2	0,0253
<b>34</b>		<b>C2H2L2M</b>	204	24,5	0,002	CFRP	0,334	244000	4340	Tie	397	60	6	69,5	0,0341

### 3.5.2. Modèle de Lee et al. (2010)

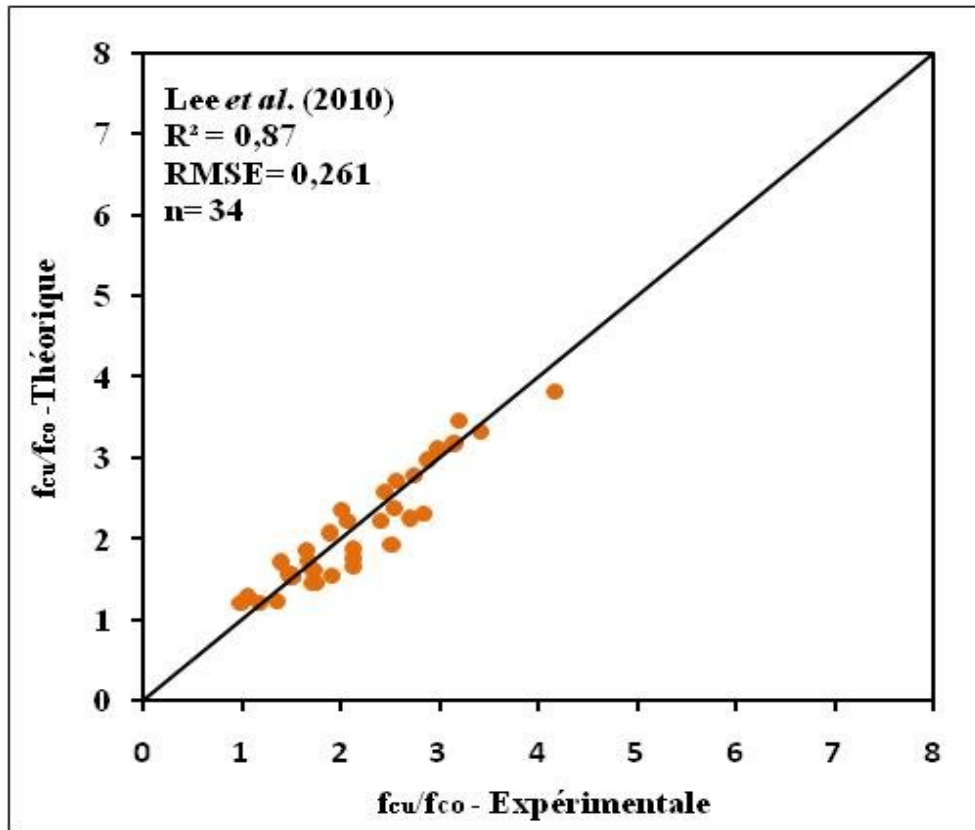
Lee *et al.* (2010) ont proposé un modèle empirique pour le béton en sections circulaires confinées avec le renforcement en acier transversal (RAT) en spirales internes, et l'enveloppe des polymères renforcés de fibres en carbone (PRFC) externe, sur la base de leurs propres essais. Les expressions des modèles de résistance ( $f_{cu}$ ) et de déformation ( $\varepsilon_{cu}$ ), sont exprimées par les expressions suivantes :

$$f_{cu} = f_{co} \left( 1 + 2 \frac{f_{lf} + f_{ls}}{f_{co}} \right) \quad (3.24)$$

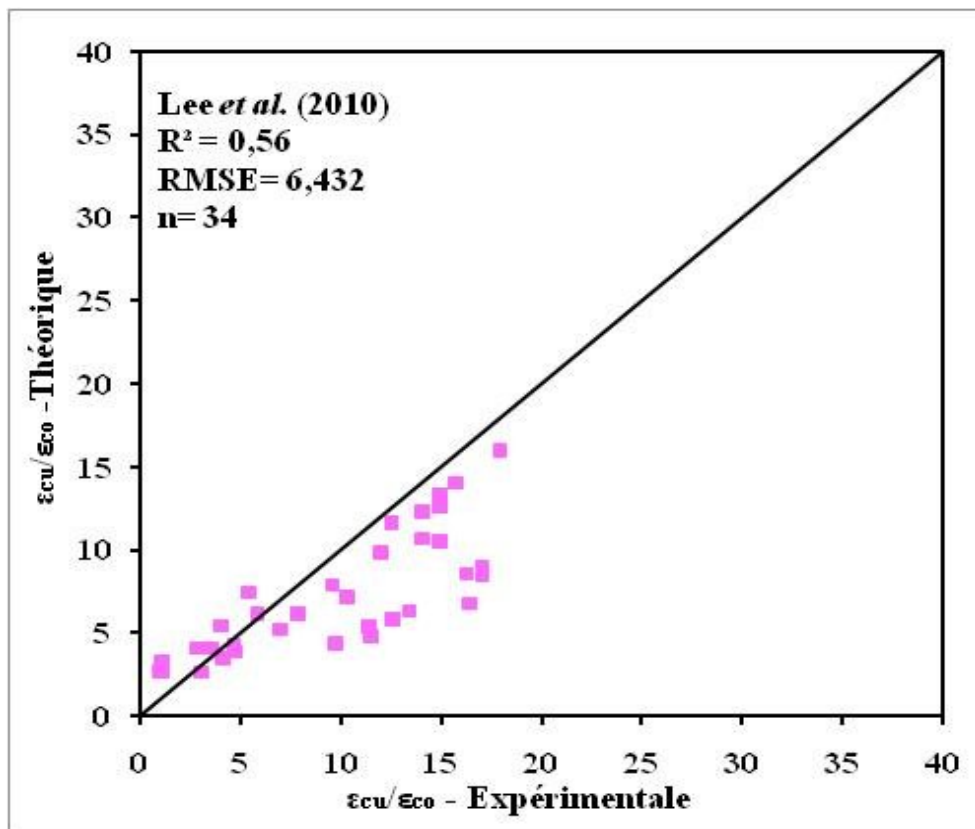
$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left( 1.75 + 5.25 \left( \frac{k_f \cdot f_{lf} + k_s \cdot f_{ls}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{fu,a}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \right) \\ k_s = \left( 2 - \frac{f_{lf}}{f_{ls}} \right) \quad \text{et} \quad k_f = 1 \quad \text{pour} \quad f_{lf} \leq f_{ls} \\ k_s = 1 \quad \text{et} \quad k_f = 1 \quad \text{pour} \quad f_{lf} > f_{ls} \end{array} \right. \quad (3.25)$$

La Figure 3.11a expose la performance du modèle de résistance. D'après cette Figure, on visualise que le nuage des points forme un angle de 45° coïncide directement avec la diagonale. Le carré du coefficient de corrélation enregistré est de  $R^2 = 0,87$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,261$ , pour  $n = 34$ . Ici, le RMSE tend vers une valeur nulle, ce qui indique que le modèle de Lee *et al.* (2010), présente une bonne performance pour ce nombre de spécimens, pour la résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ).

Concernant la performance du modèle de déformation, la Figure 3.11b signale  $R^2 = 0,56$  et  $RMSE = 6,432$ , ce qui montre que le modèle prédit présente une très faible performance, ainsi qu'il sous-estime largement les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

Figure 3.11 : Performance du modèle de résistance Lee et al. (2010).

### 3.5.3. Modèle proposé par Chastre et Silva (2010)

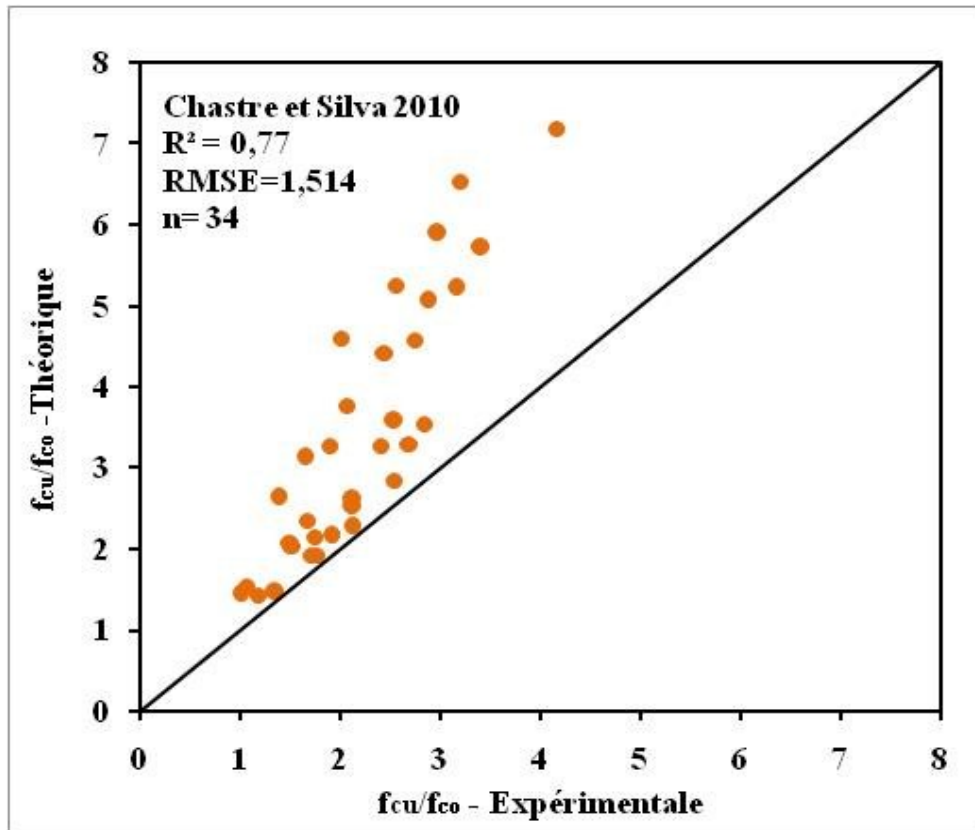
Les expressions du modèle proposé par Chastre et Silva (2010) pour des colonnes circulaires confinées sous l'effet combiné des aciers transversaux en cerces internes et des enveloppes en PRFC externe sont exprimées comme suit :

$$f_{cu} = f_D + 5.29 f_l \quad (3.26)$$

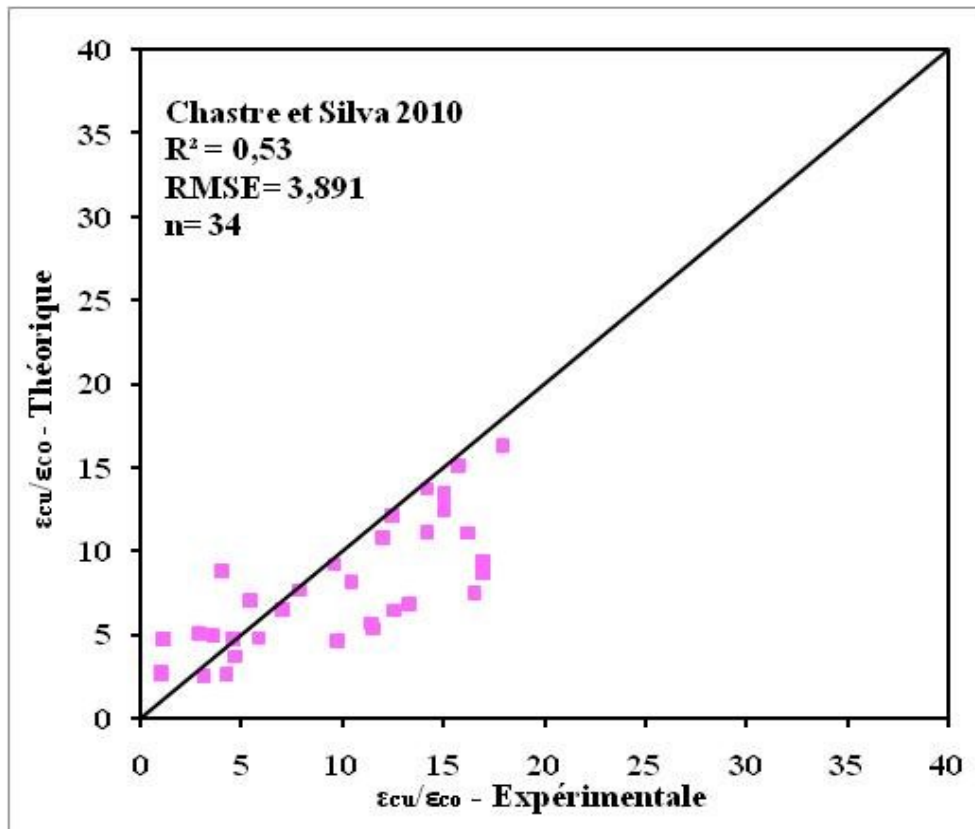
$$\varepsilon_{cu} = 17.65 \varepsilon_{co} \left( \frac{f_{lu}}{f_D} \right)^{0.7} \quad (3.27)$$

La performance du modèle de résistance est représentée dans la Figure 3.12a. La distribution du nuage de points (x, y) forme un angle de l'ordre de 60°. Ainsi, les indicateurs de la performance montrent  $R^2 = 0,77$  et  $RMSE = 1,514$ . En conséquence, ce modèle présente une performance relativement faible, comparativement au modèle de Lee *et al.* (2010), pour le nombre  $n = 34$ , ce modèle présente une faible performance. Même, l'indice de  $R^2$  inférieur à 0,8 confirme ce constat.

La figure 3.12b esquisse la performance du modèle de déformation proposé par Chastre et Silva (2010). Cette figure nous montre que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,53$  et une erreur  $RMSE = 3,891$ . D'après ces deux indicateurs, on observe que la faible valeur de  $R^2$  et la valeur élevée de  $RMSE$ , montrent que le modèle prédit présente une faible performance. Néanmoins, quoiqu'elle n'est pas bonne que la performance du modèle de Lee *et al.* (2010), leur avantage est la simplicité de leur forme.



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

Figure 3.12 : Performance du modèle de résistance Chastre et Silva (2010).

### 3.5.4. Modèle proposé par Wang et al. (2012)

Wang *et al.* (2012) ont proposé un modèle empirique, pour prédire le comportement de la colonne confinée sous l'effet combiné de PRFC et aciers transversaux en (cerces), sur la base d'une étude expérimentale. Ce modèle adopte une forme de puissance. Les expressions analytiques de la résistance du béton confiné et de la déformation sont exprimées comme suivantes :

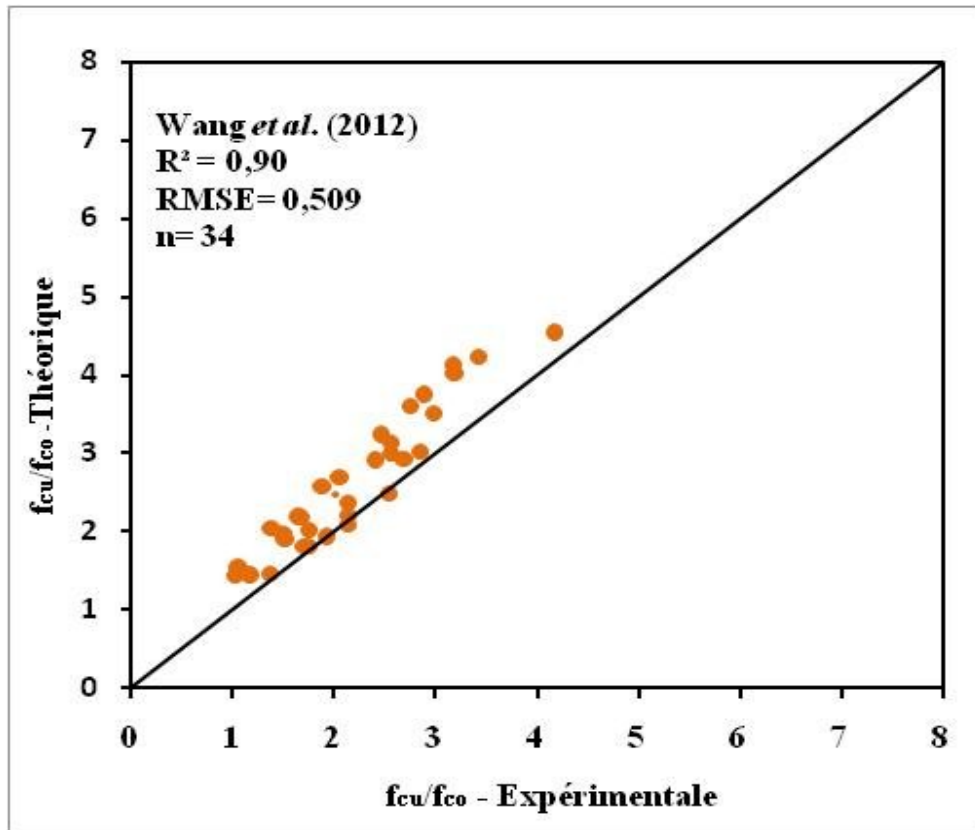
$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 1.33 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0.57} + 3.54 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0.95} \quad (3.28)$$

et,

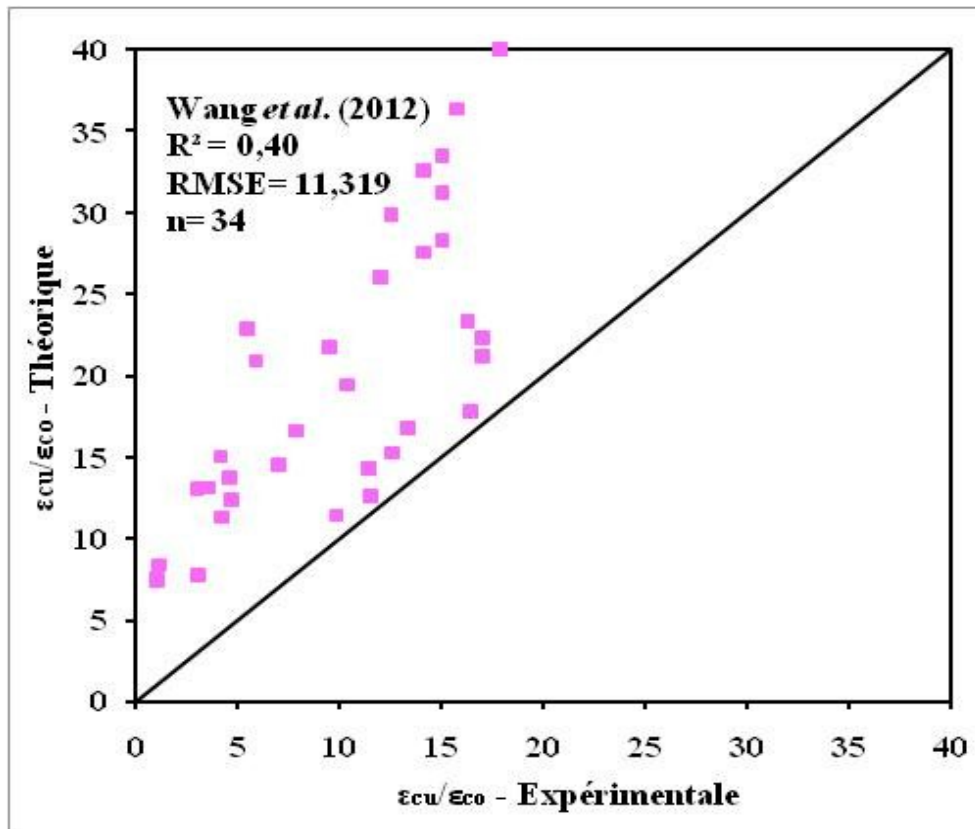
$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 26.4 \left( \frac{f_{ls}}{f_{co}} + \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0.7} \right) \quad (3.29)$$

Sur la base des données expérimentales représentée dans le Tableau 3.2, la Figure 3.13a schématise bien la performance du modèle de résistance. Cette Figure montre que le carré du coefficient de corrélation  $R^2 = 0,90$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,509$  pour  $n = 34$ . D'après ces deux signes de performance, on peut remarquer que le modèle de résistance prédit indique une bonne performance ainsi qu'il surestime les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ). La performance de ce modèle de résistance est bonne comparativement à tous les modèles présentés excepté celui de Lee *et al.* (2010).

Par ailleurs, pour la performance du modèle de déformation de l'équation (3.29), la Figure 3.13b montre que  $R^2 = 0,40$  et  $RMSE = 11,32$ . Ces deux indicateurs montrent que le modèle de déformation prédit présente une performance très faible. D'autre part, le RMSE est très élevé par rapport aux tous les modèles présentés, ceci conduit à surestimer largement les valeurs du rapport de déformation ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.13** : Performance du modèle de résistance Wang *et al.* (2012).

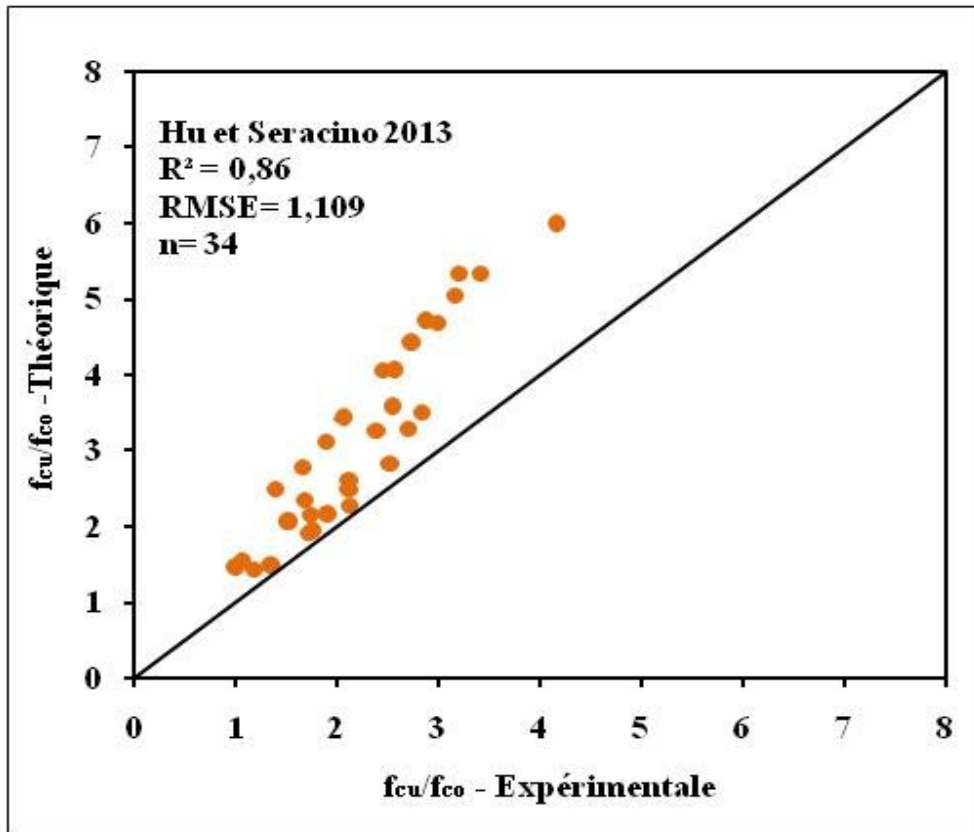
### 3.5.5. Modèle proposé par Hu et Seracino (2013)

Hu et Seracino (2013), ont développé un nouveau modèle constitutif pour des colonnes circulaires en béton confiné par la combinaison PRFC et les aciers transversaux, basé sur une base de données expérimentales de vingt cinq spécimens. Les expressions des modèles de résistance ( $f_{cu}$ ) et de déformation ( $\varepsilon_{cu}$ ) sont exprimées par les équations (3.30) et (3.31), respectivement. On utilise la base de données expérimentales du Tableau 3.2, la performance du modèle de résistance est représenté dans la Figure 3.14a avec un coefficient de détermination  $R^2= 0,86$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 1,109$  pour  $n = 34$ . Quoique  $R^2$  visualise que ce modèle présente une bonne corrélation néanmoins la valeur de  $RMSE$  est un peu élevée, ce qui montre que la performance de ce modèle est faible comparativement aux modèles proposés par Lee *et al.* (2010) et Wang *et al.* (2012).

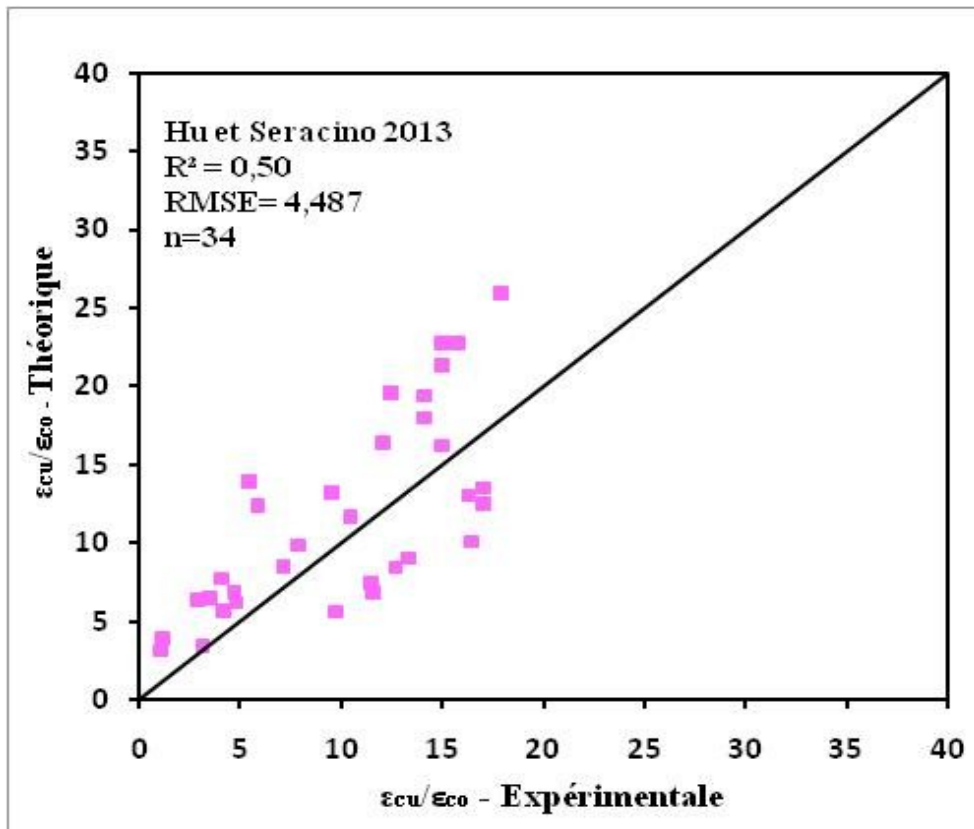
$$f_{cu} = f_{co} + f_{co} \left( 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{ls}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{ls}}{f_{co}} - 2.254 \right) + 3.5 f_{lf} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_{cu} = 1 + 5 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right) \quad (3.31)$$

Cependant, la performance du modèle de déformation enregistré dans la Figure 3.14b présente le carré du coefficient de corrélation  $R^2= 0,50$  et  $RMSE = 4,487$ . Ces deux indices envisagent que le modèle de déformation prédit présente une très faible performance, ainsi qu'une distribution des points est très aléatoire.



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.14** : Performance du modèle de résistance Hu et Seracino (2013).

### 3.5.6. Modèle proposé par Teng et al. (2014)

Les expressions des modèles de résistance ( $f_{cu}$ ) et de déformation ( $\varepsilon_{cu}$ ) développées par Teng *et al.* (2014), pour prédire le comportement des colonnes confinées sous l'effet combiné de matériaux composites en PRFC et aciers transversaux en (cerces ou spirales), sont exprimées par :

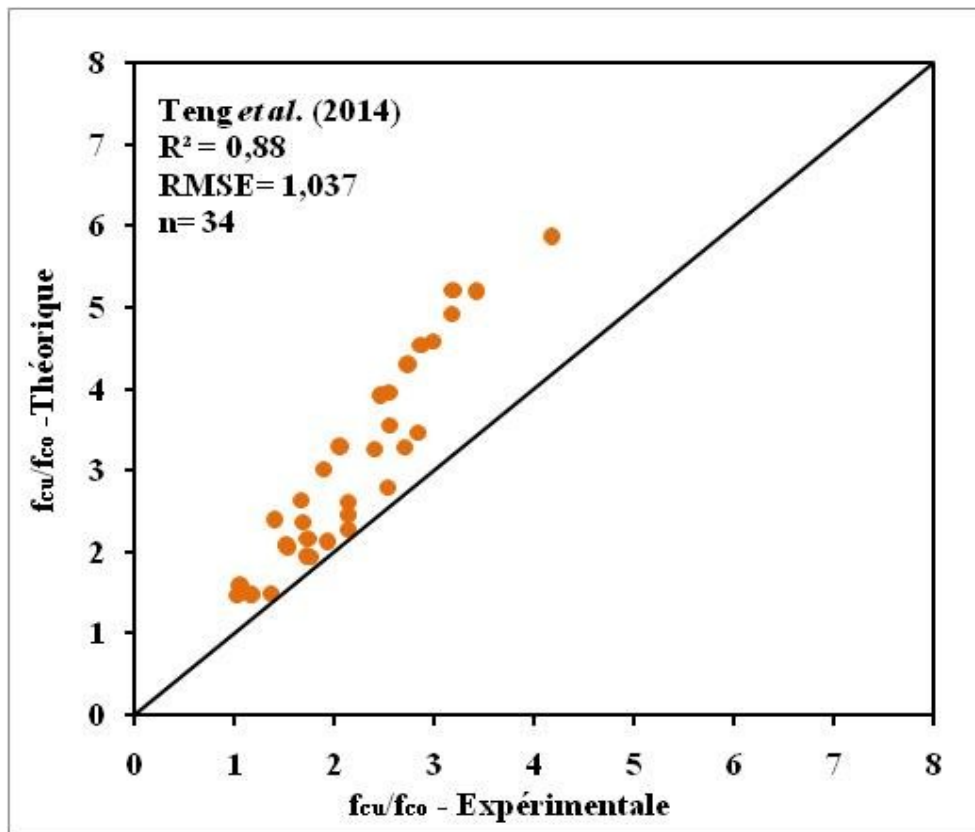
$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \frac{f_{lf}}{f_{ls}} + 3.12 \left[ \frac{f'_{ls}}{f_{co} (1 + 0.202 \rho_f^{0.145})} \right]^{0.736} \quad (3.32)$$

et,

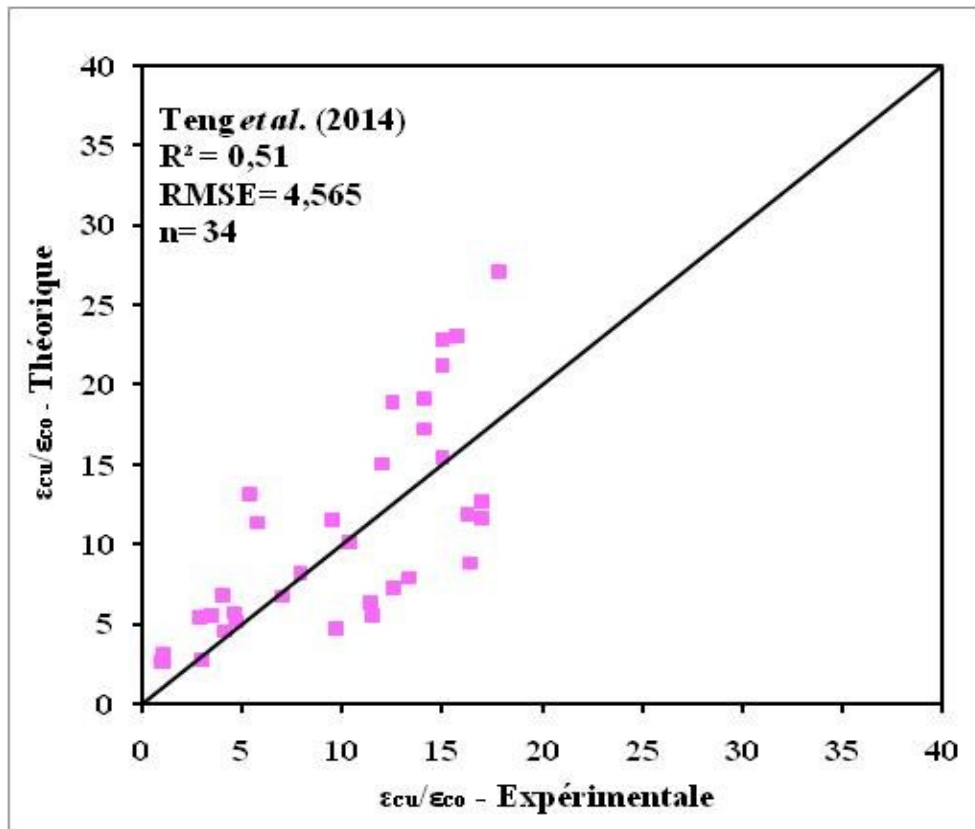
$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 3.9 \left( \frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right)^{1.2} \quad (3.33)$$

En utilisant la base de données expérimentale compilée dans le Tableau 3.2, la Figure 3.15a illustre la performance du modèle de résistance. Sur cette Figure, on enregistre que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,88$  et un RMSE = 1,037. En conséquence, bien que ce modèle présente une bonne performance avec  $R^2$  proche de 1 néanmoins, vu leur l'erreur RMSE élevée, ce modèle sur estime largement les valeurs du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ). La performance de ce modèle est presque similaire que le modèle de Hu et Seracino (2013) mais reste plus faible par rapport au modèle proposé par Lee *et al.* (2010) et Wang *et al.* (2012).

En ce qui concerne la performance du modèle de déformation présenté en (3.33), la Figure 3.15b montre un coefficient de détermination  $R^2 = 0,51$  et RMSE = erreur 4,565. Ces deux signes montrent que le modèle de déformation prédit présente des performances très faibles, bien que l'erreur RMSE soit inférieure à celle de Lee *et al.* (2010), et qu'il reste plus élevé par rapport au modèle de Chastre et Silva, (2010).



(a) Modèle de résistance



(b) Modèle de déformation

**Figure 3.15** : Performance du modèle de résistance Teng et al. (2014).

### 3.6. CONCLUSION

Ce chapitre a traité la performance de quelques modèles existants pour des colonnes circulaires en béton confiné par des polymères renforcées de fibres de carbone (PRFC) sans et avec aciers transversaux, sur la base de plus de 340 données expérimentales disponibles dans la bibliographie. Les indicateurs de performance utilisés dans cette étude sont le coefficient de détermination  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus (RMSE).

D'après l'analyse de performance des modèles sans tenir compte des armatures transversales dans le confinement par (PRFC) par rapport à 310 données expérimentales pour les modèles de : Lam et Teng (2003), Ilki *et al.* (2004), Jiang et Teng (2007), Youssef *et al.* (2007), Teng *et al.* (2009), Benzaid *et al.* (2010), Fahmy et Wu (2010) et Ozbakkaloglu et Lim (2013), on a déduit que le modèle Ozbakkaloglu et Lim (2013) présente une très bonne performance par rapport à tous les modèles de résistance présentés sauf celles proposés par Lam et Teng (2003) et Jiang et Teng (2007) qui présentent des RMSE inférieurs. Aussi, les modèles de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ) proposés par Lam et Teng (2003), Jiang et Teng (2007) et Ozbakkaloglu et Lim (2013) offrent une performance relativement bonne comparativement avec les autres modèles analysés.

L'étude de la performance des modèles qui considère l'effet combiné du PRFC avec des armatures transversales par rapport à 34 données expérimentales, des modèles de Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Wang *et al.* (2012), Hu et Seracino (2013) et Teng *et al.* (2014), a illustré le modèle de résistance de Lee *et al.* (2010) comme le plus performant comparativement aux autres modèles traités. Ce qui concerne la performance du modèle de déformation, le modèle de Chastre et Silva (2010) reste le meilleur.

Dans la suite de cette étude, on essaye de proposer deux autres modèles pour ces deux bases de données expérimentales, qui répondent aux indicateurs de la performance utilisée dans ce chapitre.

CHAPITRE 4 :  
DÉVELOPPEMENT DE DEUX NOUVEAUX  
MODÈLES DE CONFINEMENT PAR  
POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE  
CARBONE

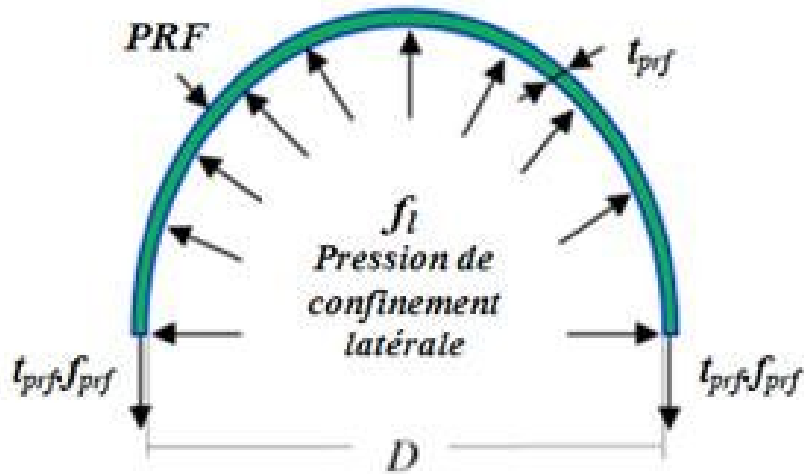
## 4.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sur la base d'une régression mathématique des mêmes données expérimentales recueillies à partir de la bibliographie (Tableaux 3.1 et 3.2), on essaye de développer deux nouveaux modèles contraintes-déformations pour des colonnes circulaires confinées à l'aide des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Le premier sera sans tenir compte de l'effet des aciers transversaux. Tandis que le deuxième, sera calibré en considérant l'effet de la présence des aciers transversaux. Dans ce contexte, la mise en évidence de la performance des modèles développés sera réalisée, ainsi que leurs validations par rapports aux autres modèles existants.

## 4.2. DEVELOPPEMENT DU MODÈLE EMPIRIQUE DE CONFINEMENT PAR PRFC

### 4.2.1. Pression de confinement latérale

La pression de confinement latérale ( $f_{lf}$ ) fournie par une enveloppe de PRFC au béton est naturellement passive. Dans les colonnes circulaires en béton confinées par PRFC, le noyau de béton s'étend latéralement. Cette dilatation est retenue par le matériau composite en PRFC lorsqu'elle est soumise à une compression axiale. La pression produit une traction circulaire résultant dans l'enveloppe PRFC. L'action de dilatation et la réaction du confinement sont représentées par une pression latérale uniforme dans l'interface et la réponse du matériau en PRFC. Le mécanisme de confinement par PRFC exercée est schématisé sur la Figure 4.1. Pour les sections circulaires, la pression maximale de confinement est atteinte lorsque la déformation circonférentielle dans le PRFC atteint sa déformation ultime ( $\epsilon_{prf}$ ) correspondant à la défaillance ou à la rupture de la colonne. Elle est en rapport direct avec l'épaisseur et la résistance à la traction du composite PRFC ainsi que le diamètre de la colonne (Lam et Teng 2003, Berthet *et al.* 2006).



**Figure 4.1** : Mécanisme de confinement par PRFC.

La pression de confinement latérale due au PRFC est exprimée par la formule suivante :

$$f_{lf} = \frac{2 \cdot f_{prf} \cdot t_{prf}}{D} \quad (4.1)$$

Avec :

$f_{prf}$  : est la résistance à la traction du matériau composite en PRFC,

$t_{prf}$  : est l'épaisseur du PRFC,

$D$  : est le diamètre de la section du béton de la colonne,

#### 4.2.2. Modèle contrainte déformation

Afin de prédire le comportement des colonnes circulaires confinées, à l'aide des enveloppes externes en polymères renforcés de fibres de carbone (Figure 4.2), l'expression de contrainte déformation de Popovics (1973) modifiée par Thorenfeldt *et al.* (1987) est donnée de la manière suivante :

$$\frac{f_c}{f_{cu}} = \frac{\left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \right)^{0,8r}} \quad (4.2)$$

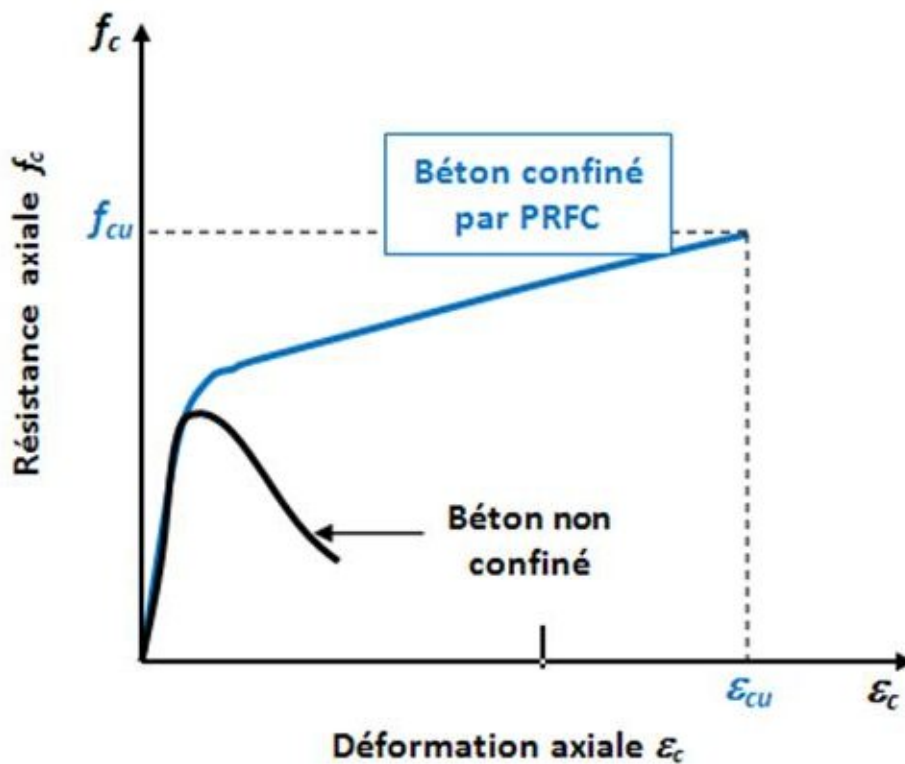
Avec,

$$r = \frac{E_c}{\left[ E_c - \left( \frac{f_{cu}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right]} \quad (4.3)$$

Où,  $f_c$  et  $\varepsilon_c$  représentent respectivement la contrainte et la déformation axiale du béton ;  $E_c$  définit le module d'élasticité du béton non confiné ;  $f_{cu}$  et  $\varepsilon_{cu}$  représentent respectivement la résistance ultime et la déformation ultime du béton confiné par PRFC.

Plusieurs chercheurs utilisent différentes expressions pour le calcul du module d'élasticité du béton ( $E_c$ ). Dans ce travail, l'expression donnée par ACI 318 (2011) est utilisée.

$$E_c = 4700 \sqrt{f_{co}} \quad (4.4)$$



**Figure 4.2 :** Courbe contrainte-déformation proposée pour le béton confiné par PRFC.

#### 4.2.3. Expression du modèle de résistance en compression ultime proposé

La résistance en compression ultime  $f_{cu}$  est un paramètre très important dans le modèle contrainte-déformation, car elle considère réellement l'influence de la pression du confinement. Pour des colonnes circulaires confinées par PRFC, cette résistance est largement supérieure à la résistance du béton non confiné  $f_{co}$ . Généralement, la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRFC est représentée par une deuxième branche ascendante. La relation de la résistance ultime du béton confiné par enveloppe PRFC et les paramètres influents, seront considéré comme un modèle de résistance. Actuellement, plusieurs chercheurs ont formulé le rapport  $f_{cu}/f_{co}$  et  $f_{ij}/f_{co}$  comme une fonction linéaire. De même, l'étude de la performance dans le chapitre 3 a montré que les modèles ayant cette

tendance auront une performance très satisfaisante comparativement aux autres. Selon Lam et Tang (2003), Jiang et Teng (2007), Benzaid *et al.* (2010), Ozbakkaloglu et Lim (2013), la résistance de compression ultime est formulée généralement par l'expression suivante :

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_{lf}}{f_{co}} \quad (4.5)$$

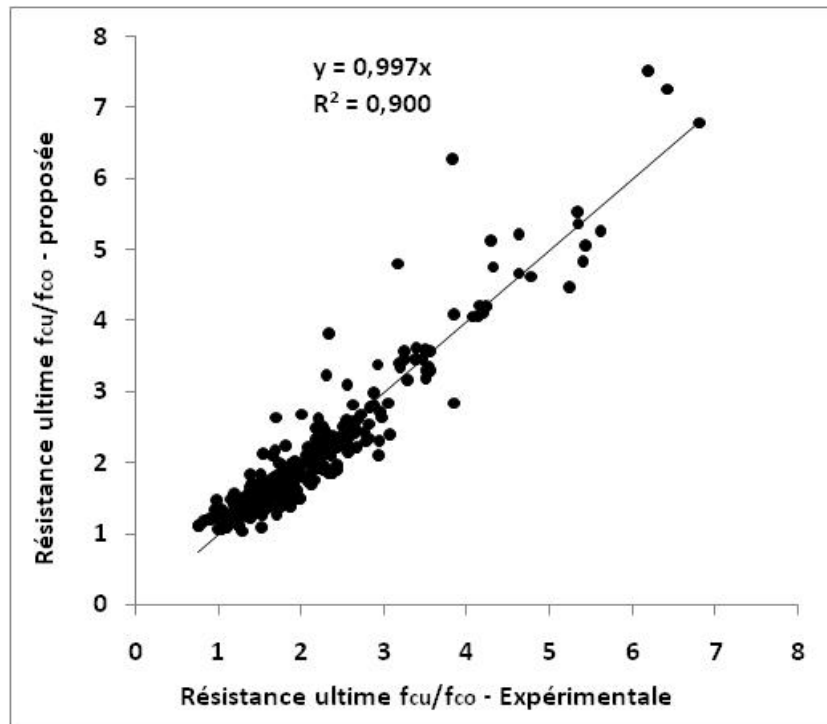
Où :

- : Le coefficient d'efficacité de confinement;
- : La résistance en compression du béton non confiné ;
- $f_{lf}$ : La pression de confinement latéral produit par le matériau composite en PRFC donnée par l'équation (4.1).

Pour le développement d'un nouveau modèle de résistance en compression ultime ( $f_{cu}$ ) pour des colonnes circulaires en béton confinées par PRFC sans tenir en compte l'effet des aciers transversaux, on utilise une analyse de régression sur 310 données expérimentales représentées dans le Tableau 3.1. Le principe de cette analyse est d'avoir une bonne corrélation entre les valeurs théoriques et expérimentales, c'est-à-dire que le coefficient de détermination ou le carré du coefficient de corrélation  $R^2$  doit être proche de 1, ainsi que de minimiser l'indice RMSE, c'est-à-dire tend vers 0. Pour cette technique d'analyse, on utilise le programme Microsoft Office Excel. L'avantage de cette technique est de calibrer un modèle qu'on peut choisir ainsi que le nombre de paramètres illimités. La nouvelle équation de la résistance en compression ultime  $f_{cu}$  proposée est exprimée comme suite :

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.2 \frac{f_{lf}}{f_{co}} \quad (4.6)$$

La Figure 4.3 montre une comparaison entre la résistance ultime expérimentale et proposée. D'après, cette Figure, on observe que la relation proposée en (4.6) présente une bonne corrélation linéaire avec les données de 310 résultats expérimentaux, comme représente la Figure 4.3, où  $R^2 = 0,90$ .



**Figure 4.3 :** Comparaison entre la résistance ultime expérimentale et proposée.

#### 4.2.4. Expression du modèle de déformation ultime proposé

Le deuxième paramètre constituant le modèle de confinement par PRFC seul est la déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}$ ). Actuellement, plusieurs chercheurs ont formulé le rapport  $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$  en fonction de  $f_l/f_{co}$  comme une fonction linéaire, où l'analyse de la performance dans le chapitre précédent a montré leur pertinence. Selon Lam et Tang (2003), Jiang et Teng (2007), Benzaid *et al.* (2010), Ozbakkaloglu et Lim (2013), cette relation s'écrit :

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (4.7)$$

Où,

: Le coefficient d'efficacité de confinement;

$\varepsilon_{co}$  : La déformation du béton non confiné

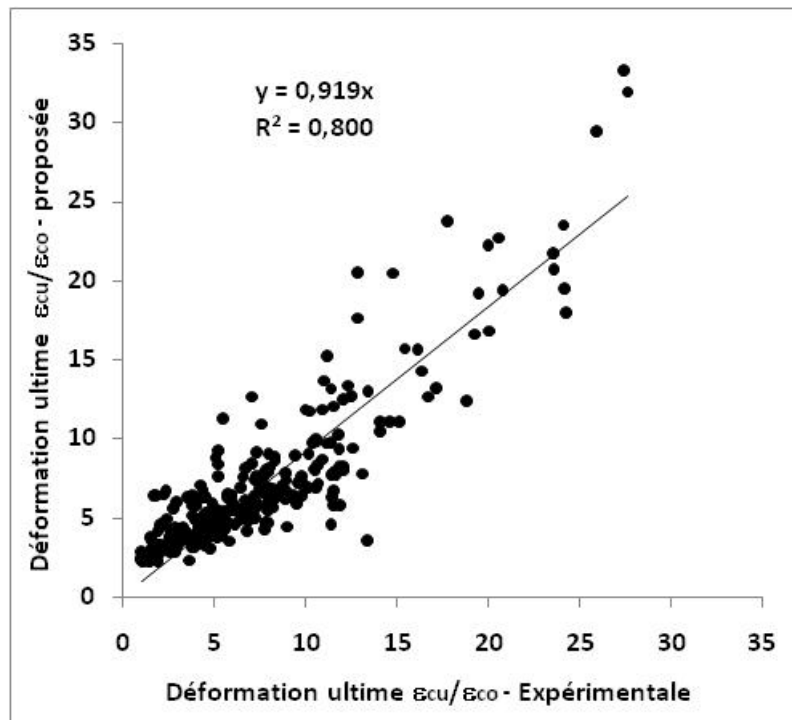
A partir de la régression mathématique de 310 données expérimentales représentées dans le Tableau 3.1, on détermine  $k_2$  du nouveau modèle de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}$ ) pour des colonnes circulaires en béton confinées par PRFC, qui tient compte des déformations du

PRFC  $\varepsilon_{h,rupt}$ . La nouvelle expression du modèle de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}$ ) prédit est formulée comme suite :

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 11.5 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.13} \quad (4.8)$$

Avec,  $\varepsilon_{h,rupt}$  est la déformation à la rupture du PRFC.

La Figure 4.4 illustre une confrontation entre la déformation ultime expérimentale et proposée. Cette Figure montre bien que la relation proposée en (4.8) présente une corrélation linéaire relativement bonne avec les 310 données expérimentales, avec  $R^2 = 0,80$ .



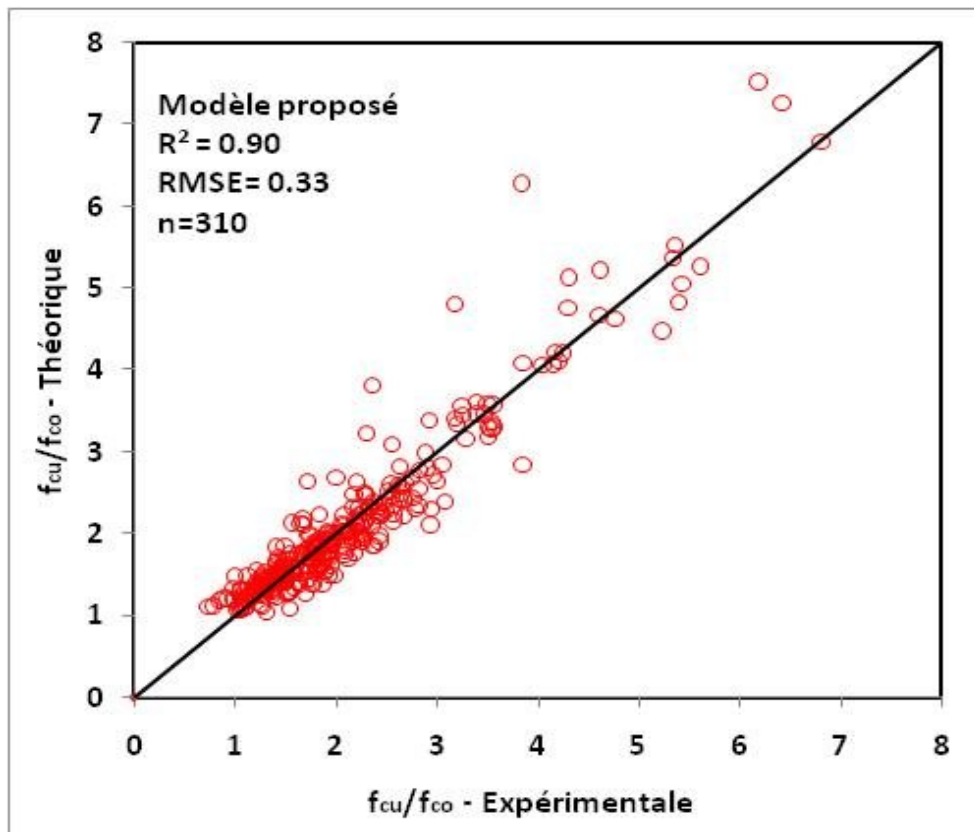
**Figure 4.4 :** Comparaison entre la déformation ultime expérimentale et proposée.

#### 4.2.5. Performance du modèle développé

Dans cette partie, on va mettre en évidence la performance des expressions de résistance ultime ( $f_{cu}/f_{co}$ ) (Eq. 4.6) et de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ) (Eq. 4.8), du nouveau modèle de confinement par enveloppe externe en PRFC pour des colonnes circulaires en béton. Cette performance sera réalisée par une régression mathématique de 310 données expérimentales illustrées dans Tableau 3.1. Dans ce contexte, on maintient le coefficient de détermination  $R^2$ , la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE, comme indicateurs de la performance.

#### 4.2.5.1. Performance de l'expression de la résistance ultime

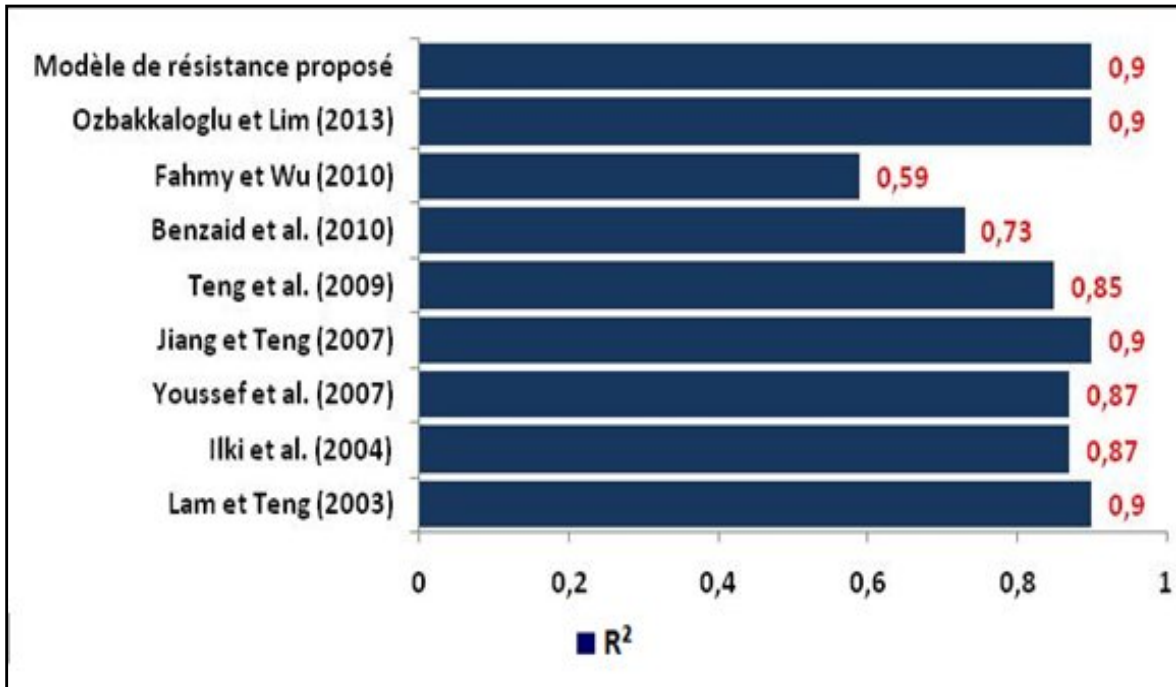
La Figure 4.5 explicite bien la performance de l'expression prédit pour la résistance en (4.6) et les autres modèles analysés dans le chapitre 3. D'après cette Figure, on constate qu'il existe une bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,90$  qui est la valeur la plus proche de 1; et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,29$ , qui est tend vers à 0. D'après ces deux indicateurs, on déduit que les valeurs prédites par la nouvelle expression sont très proches aux valeurs expérimentales, ce qui montre la bonne précision du modèle proposé comparativement avec les autres modèles.



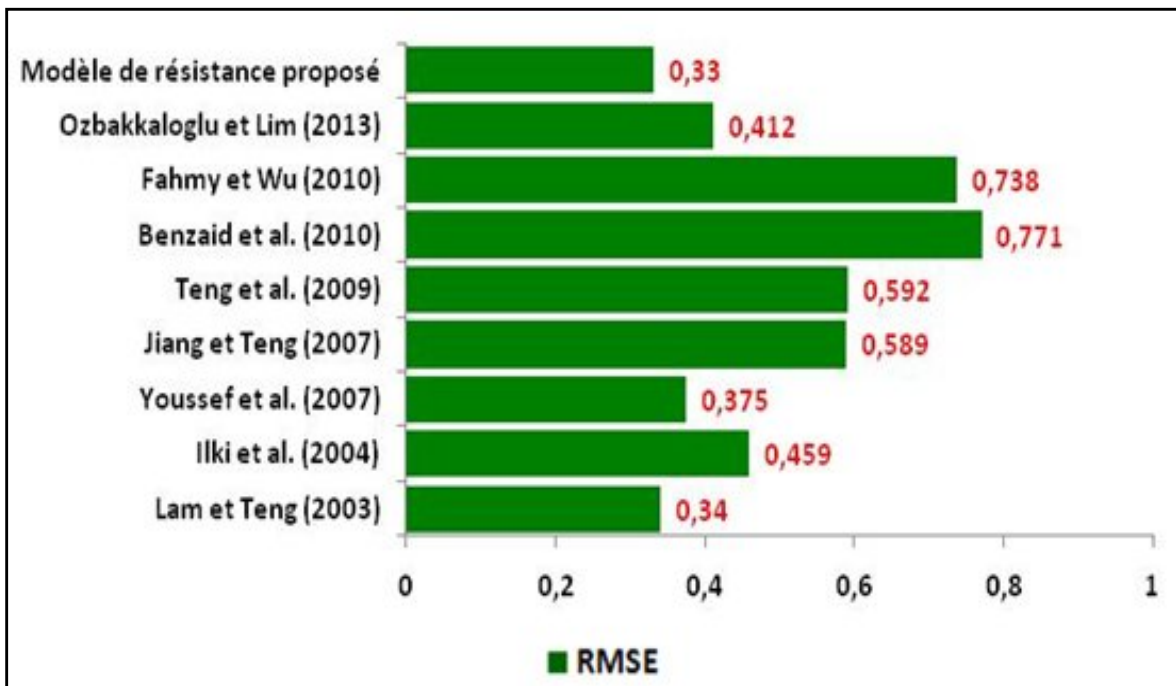
**Figure 4.5 :** Performance du nouveau modèle de résistance pour le confinement par PRFC.

Dans ce contexte, la Figure 4.6 illustre une comparaison entre les deux indicateurs de la performance de notre modèle de résistance proposé, et la performance des modèles existants analysée dans le chapitre 3, à savoir : Lam et Teng (2003), Ilki *et al.* (2004), Youssef *et al.* (2007), Jiang et Teng (2007), Teng *et al.* (2009), Benzaid *et al.* (2010), Fahmy et Wu. (2010) et Ozbakkaloglu et Lim (2013). L'histogramme de la Figure 4.6a révèle clairement que le modèle de résistance ultime proposé illustre une meilleure corrélation  $R^2 = 0,90$  comparativement aux modèles d'Ilki *et al.* (2004), Youssef *et al.* (2007), Teng *et al.* (2009), Benzaid *et al.* (2010) et Fahmy et Wu. (2010), bien qu'il reste identique à ceux des modèles de Lam et Teng (2003), Jiang et Teng (2007) et Ozbakkaloglu et Lim (2013). En outre,

l'histogramme de la Figure 4.6b montre nettement que l'indice  $RMSE = 0,33$  de notre modèle est pratiquement le plus faible comparativement aux autres traités dans cette étude. Vu le nombre de données expérimentales disponibles (310) pour le PRFC seulement, une chose qui n'est pas réalisée avant, ce ci offre une large crédibilité dans l'utilisation pratique et avantage largement ce modèle par rapport aux autres cités dans le chapitre deux.



a-  $R^2$

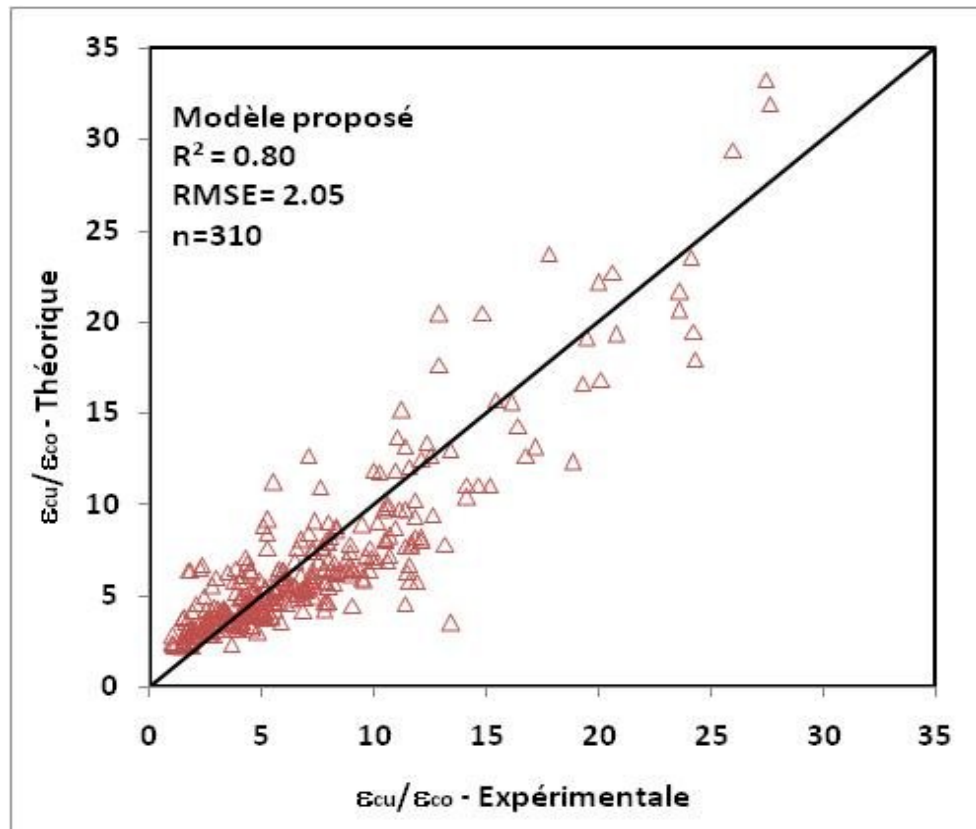


b- RMSE

**Figure 4.6 :** Comparaison entre les indicateurs de performance du modèle de résistance pour le confinement par PRFC développé et les autres modèles existants.

#### 4.2.5.2. Performance de l'expression de la déformation ultime proposée

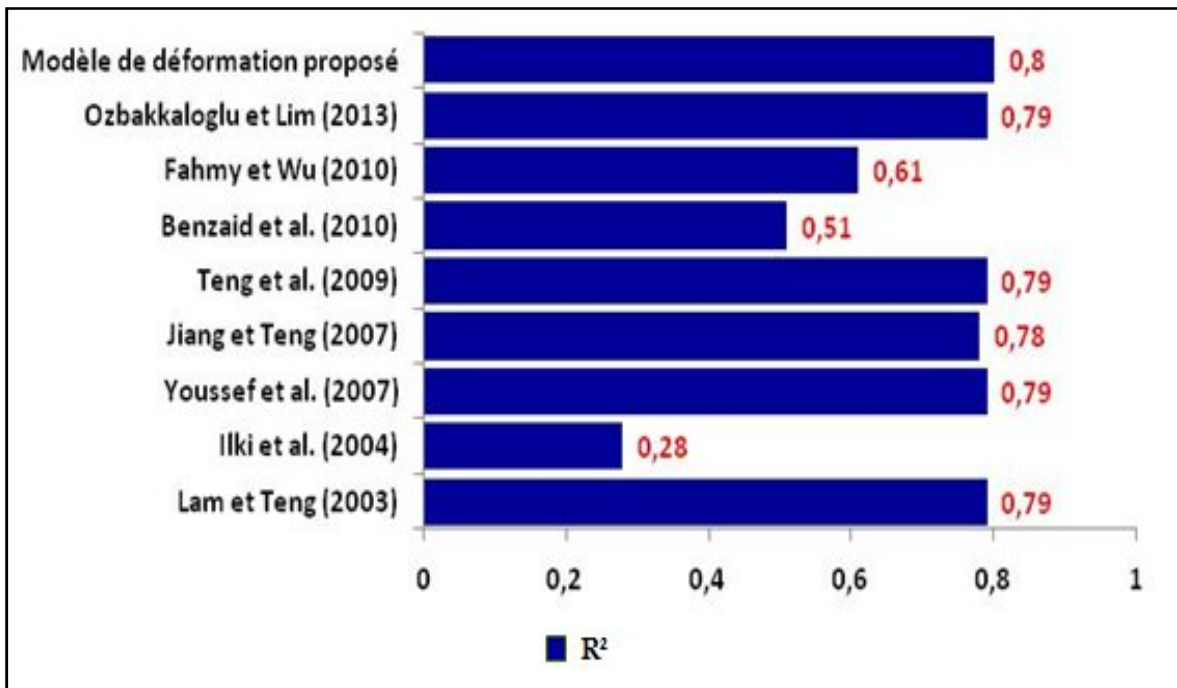
La Figure 4.7 illustre la performance de l'expression prédite pour la déformation en (4.8) et les résultats expérimentaux illustrés dans le chapitre 3. Cette Figure montre que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,80$  ; qu'on peut considérer comme une valeur la plus précise qui tend vers 1, avec la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 2,05$ . D'après ces deux signes de performances, on déduit que la nouvelle expression de déformation offre des valeurs plus proches aux résultats expérimentaux. Ce constat prouve la bonne prédiction de notre modèle proposé.



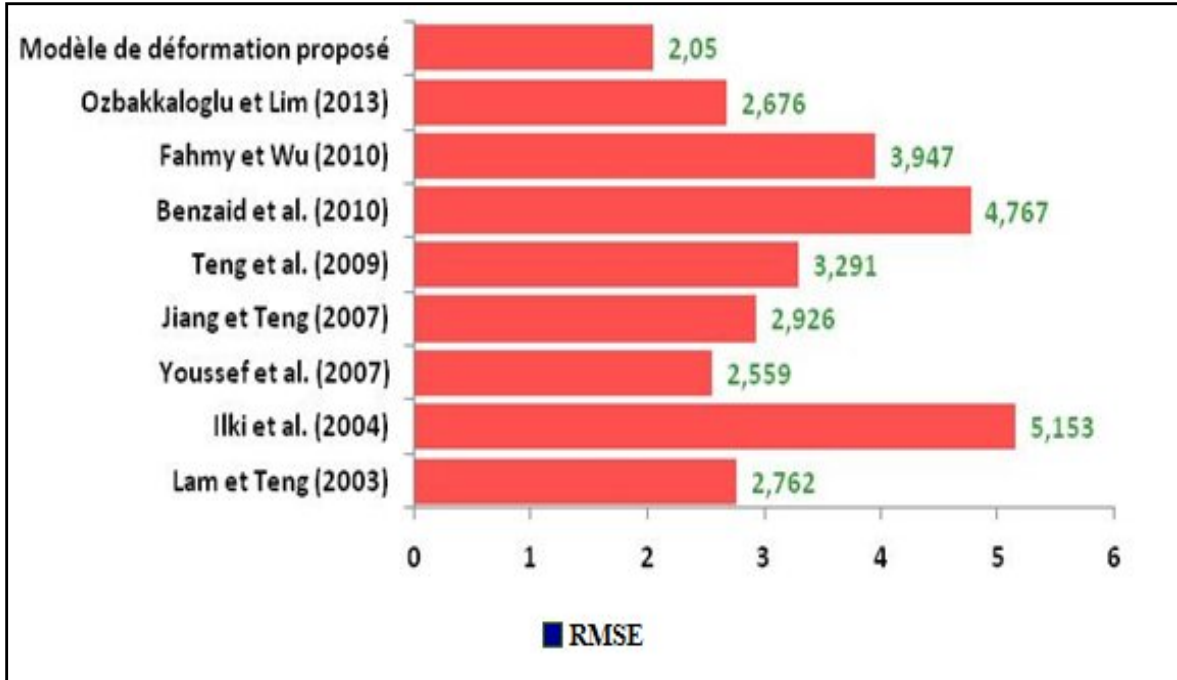
**Figure 4.7 :** Performance du nouveau modèle de déformation pour le confinement par PRFC.

En outre, la figure 4.8 présente une comparaison entre les deux indicateurs de performance de notre modèle de déformation proposé et la performance des modèles existants présentés au chapitre 3, Lam et Teng (2003), Ilki *et al.* (2004), Youssef *et al.* (2007), Jiang et Teng (2007), Teng *et al.* (2009), Benzaid *et al.* (2010), Fahmy et Wu (2010) et Ozbakkaloglu et Lim (2013). L'histogramme 4.8a fulgure que notre modèle de déformation présente une meilleure corrélation  $R^2 = 0,80$  par rapport aux modèles discutés. De même, l'histogramme 4.8b illustre que l'indice  $RMSE = 2,05$  de notre modèle prédit est pratiquement la valeur minimale la plus proche de zéro, par rapport aux autres modèles. D'autre part, l'avantage de ce modèle est qu'il déduit à partir de 310 données expérimentales disponibles dans la littérature pour le PRFC

seulement une chose qui n'est pas faite auparavant. Cette conclusion offre une grande précision pour notre modèle proposé.



a- R<sup>2</sup>



b- RMSE

**Figure 4.8 :** Comparaison entre les indicateurs de performance du modèle de déformation pour le confinement par PRFC développé et les autres modèles existants.

#### 4.2.6. Validation du modèle proposé

Le nouveau modèle contrainte-déformation proposé pour le béton confiné à l'aide des matériaux composites en PRFC sera confronté avec quelques modèles, et résultats expérimentaux présentés dans les chapitres deux et trois. Dans ce cadre, les Figures (4.9 - 4.15) dressent la confrontation de notre modèle avec quatre modèles existants (Lam et Teng 2003, Jiang et Teng 2007, Teng *et al.* 2009, et Fahmy et Wu 2010), ainsi que les courbes contraintes-déformations expérimentales des huit spécimens, à savoir : spécimen n° 54 et 47 de (Xiao et Wu 2000), n° 188 de (Lam *et al.* 2006 ), n° 167 et 156 de (Berthet *et al.* 2005) ainsi que le spécimen n° 199 et 204 de (Jiang et Teng 2007).

La comparaison du modèle proposé et les quatre modèles existants avec les spécimens n°54 et 47 de (Xiao et Wu 2000) schématisés dans les Figures (4.9) et (4.10) montre que le modèle proposé surestime un peu les valeurs de la résistance ultime ( $f_{cu}$ ), et présente une bonne performance par rapport au modèle de Teng *et al.* (2009) et Fahmy et Wu (2010), ces derniers sous-estiment largement les valeurs de ( $f_{cu}$ ) par rapport aux valeurs expérimentales. Comme, elle montre aussi que les valeurs de ( $f_{cu}$ ) estimé par les modèles de Lam et Teng (2003) et Jiang et Teng (2007) dépassent les valeurs expérimentales.

Par ailleurs, les Figures (4.11), (4.12) et (4.13) illustrent la comparaison du modèle proposé et les quatre modèles choisis avec les spécimens n° 188 de (Lam *et al.* 2006) et n° 156 et 167 de (Berthet *et al.* 2005) respectivement. Ces comparaisons indiquent que notre modèle proposé est plus performant que les autres modèles existants. En effet, notre modèle estime des valeurs de la résistance ultime ( $f_{cu}$ ) plus proches aux valeurs expérimentales. Par contre, les modèles de Teng *et al.* (2009) et Fahmy et Wu (2010) sous-estiment largement les valeurs de la résistance ultime ( $f_{cu}$ ) par rapport aux valeurs expérimentales. Comme, ils indiquent aussi que les modèles de Lam et Teng (2003) ainsi que de Jiang et Teng (2007) sur estiment les valeurs de ( $f_{cu}$ ).

Les Figures (4.14) et (4.15) exposent la confrontation du modèle proposé et les quatre modèles existants avec les spécimens n°199 et 204 de (Jiang et Teng 2007). Ces Figures indiquent que notre modèle et le modèle de Jiang et Teng (2007) sont plus performants aux autres modèles existant. Ces derniers estiment des valeurs de ( $f_{cu}$ ) proches aux valeurs expérimentales. Néanmoins, le modèle de Fahmy et Wu (2010) sous-estime largement les valeurs de ( $f_{cu}$ ) par rapport aux valeurs expérimentales.

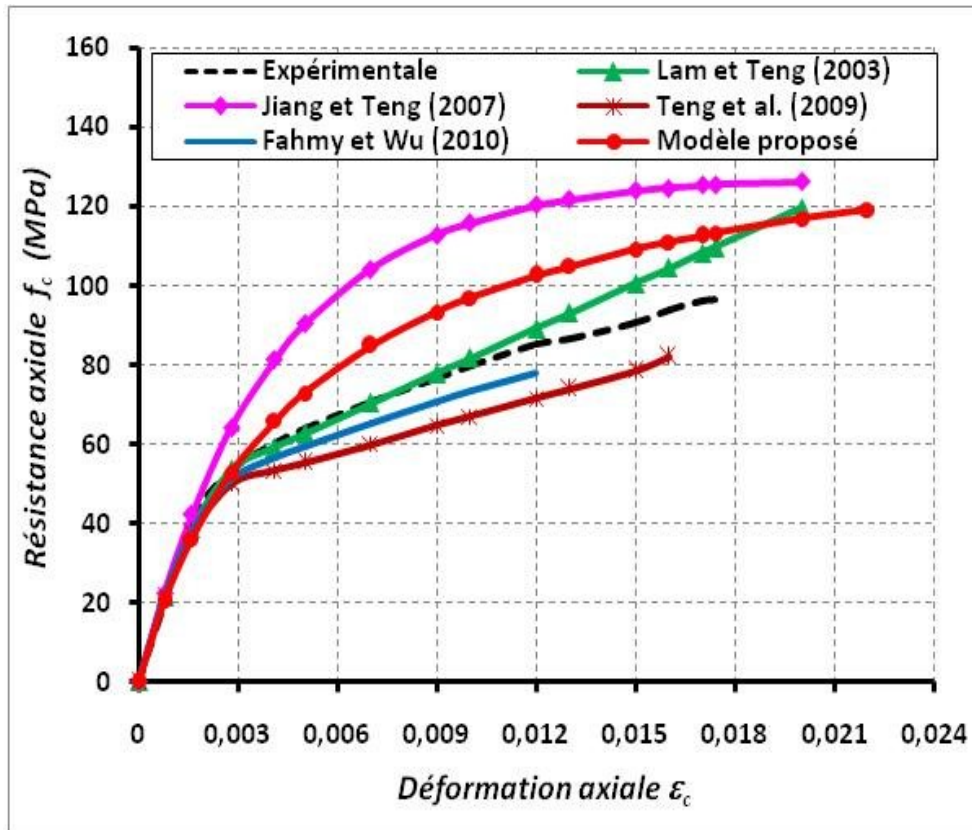


Figure 4.9 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n°54 de (Xiao et Wu 2000).

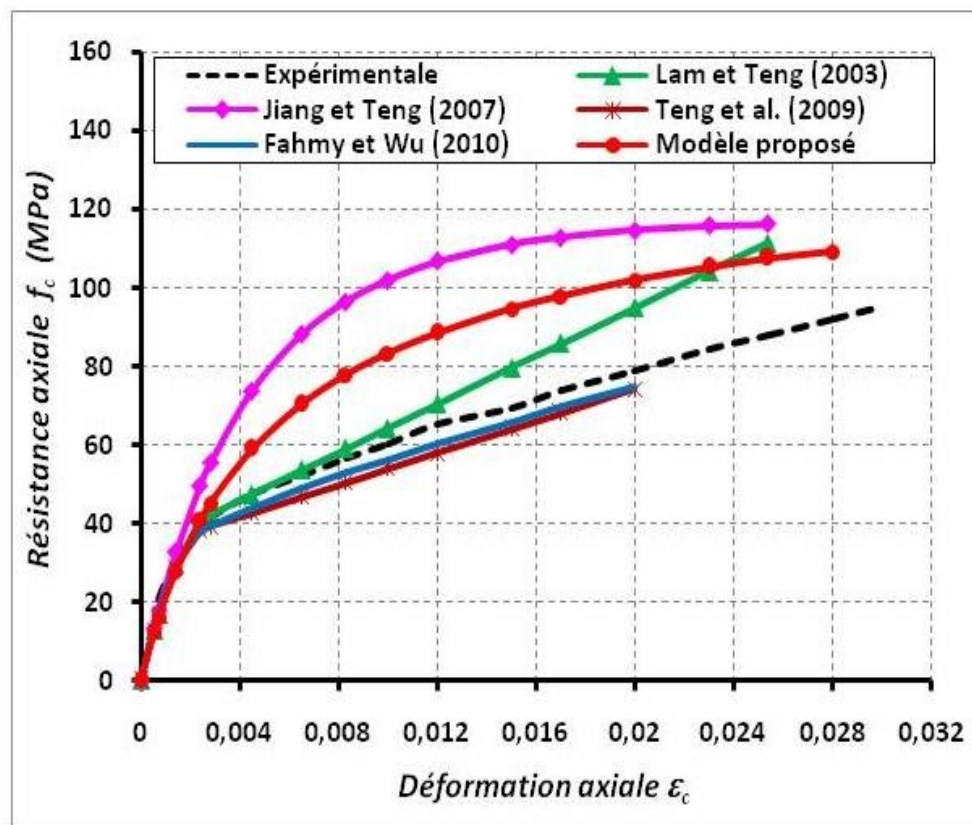


Figure 4.10 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n°47 de (Xiao et Wu 2000).

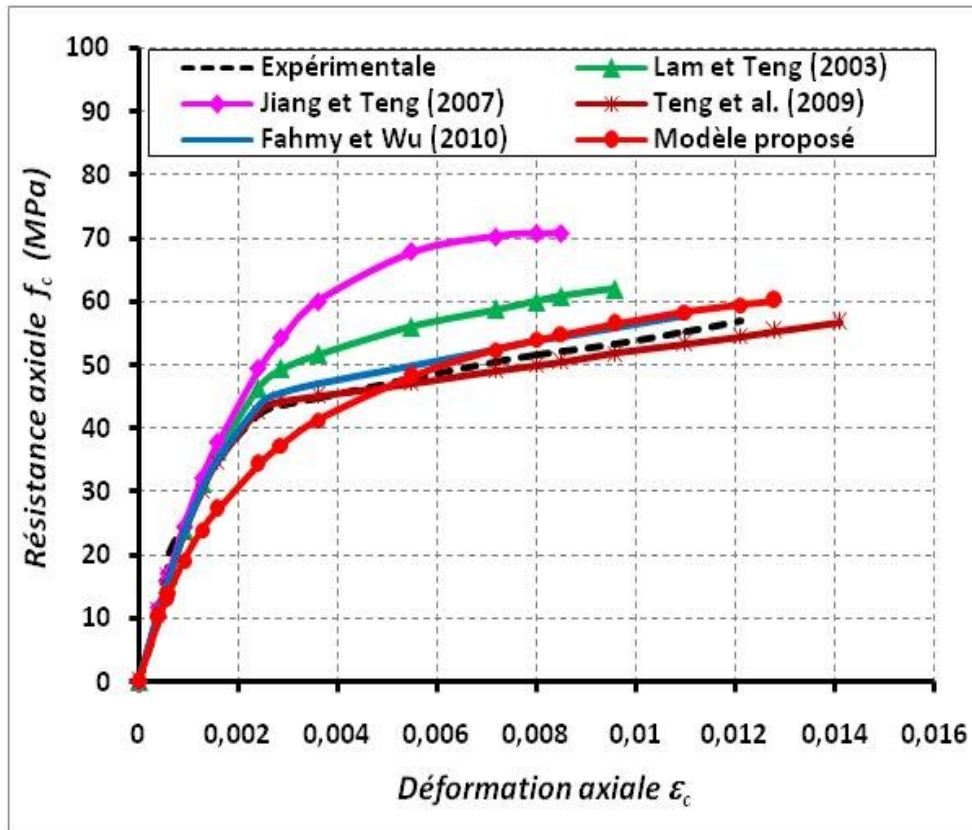


Figure 4.11 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 188 de (Lam *et al.* 2006).

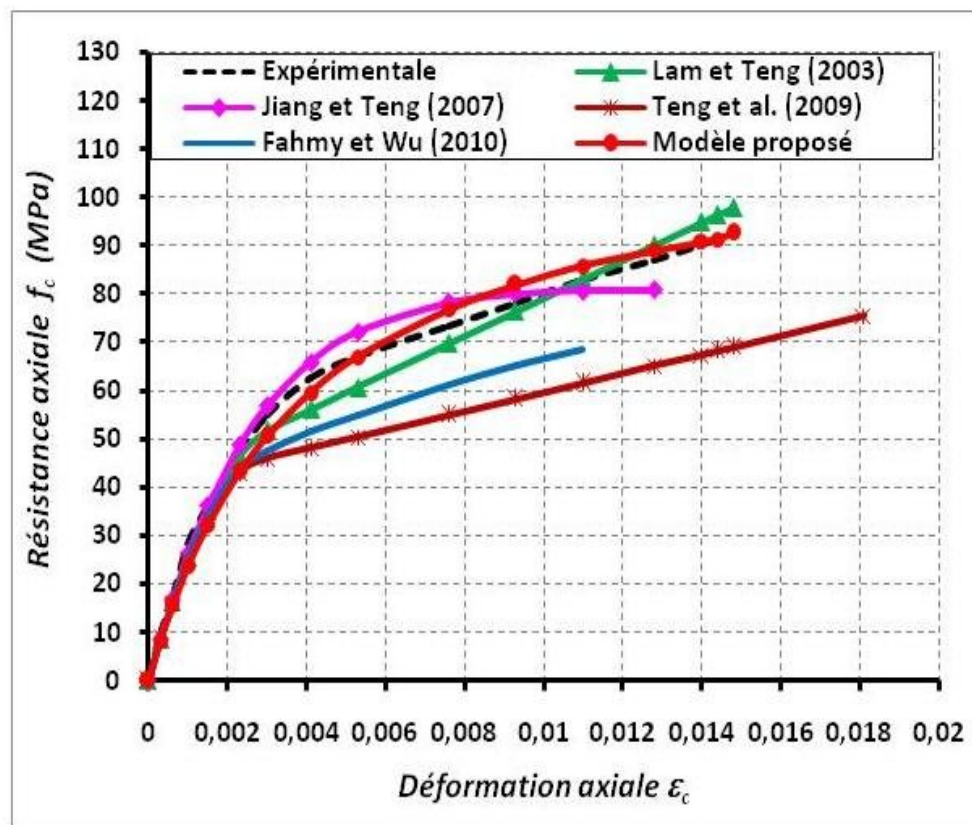


Figure 4.12 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 167 de (Berthet *et al.* 2005).

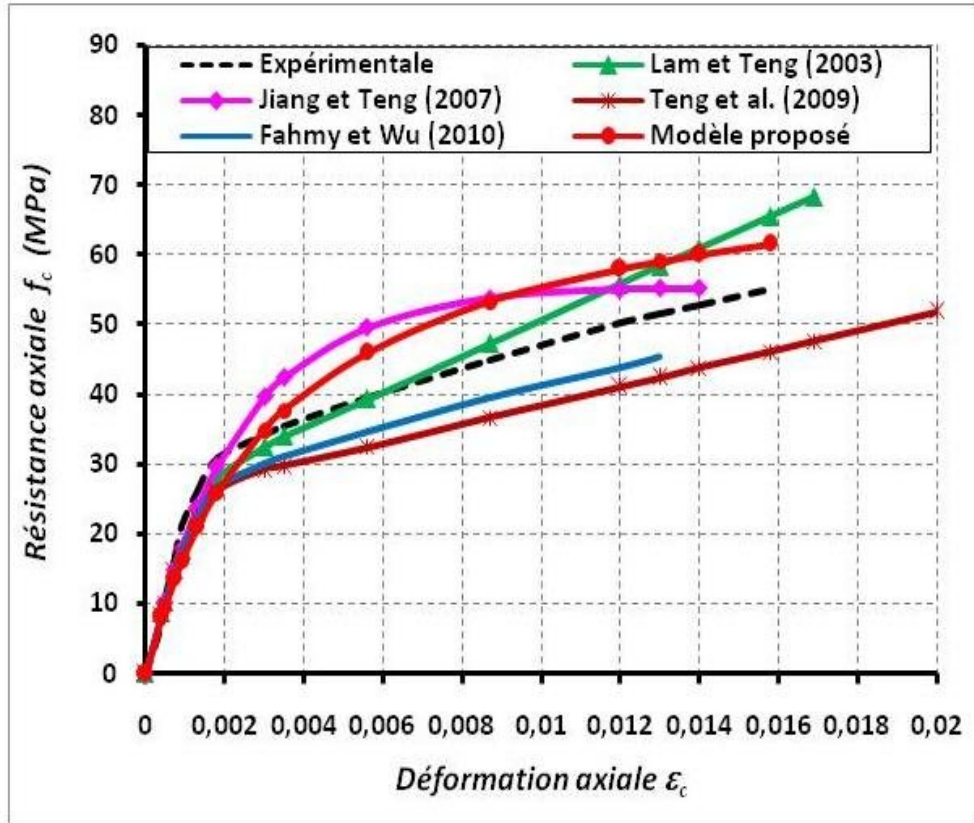


Figure 4.13 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 156 de (Berthet *et al.* 2005).

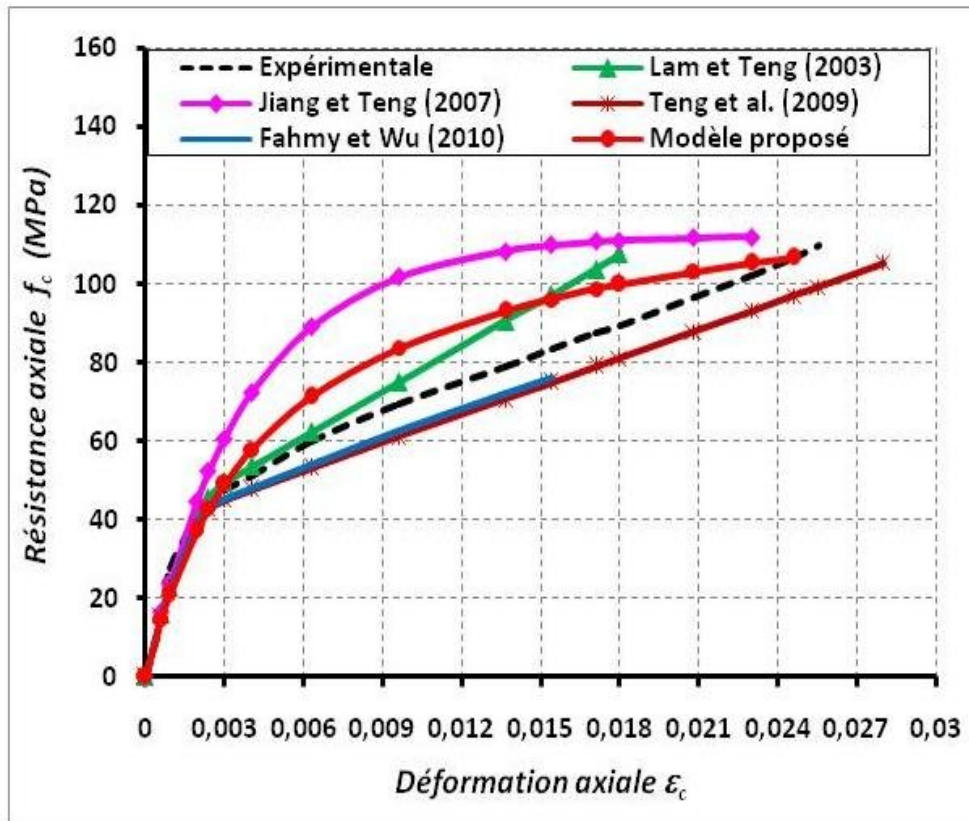
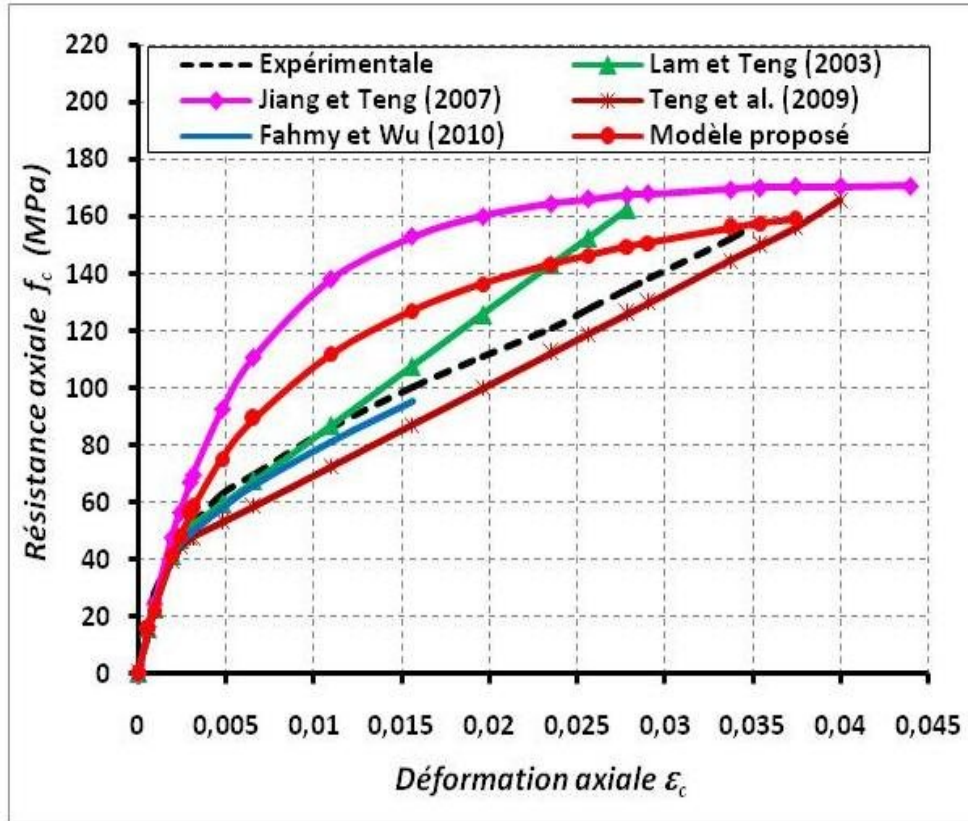


Figure 4.14 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 199 de (Jiang et Teng 2007).



**Figure 4.15 :** Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen n° 204 de (Jiang et Teng 2007).

### 4.3. DEVELOPPEMENT DE MODELES EMPIRIQUES DE CONFINEMENT PAR PRFC-RAT

#### 4.3.1. Pression de confinement latérale

Plusieurs chercheurs qu'on a cités dans les chapitres deux et trois ont montré, que les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) ne sont pas le seul facteur contribuant dans le confinement des colonnes circulaires, mais les armatures transversales (RAT) peuvent aussi apporter un autre avantage dans l'amélioration de la résistance ultime et la déformation correspondante. Le confinement par les deux matériaux simultanément produit, un effet combiné comme montre la Figure 4.16. La pression de confinement latérale  $f_{le}$  qui tient compte de cet effet combiné PRFC et la forme RAT exprimée par Teng *et al.* (2014) est donnée par :

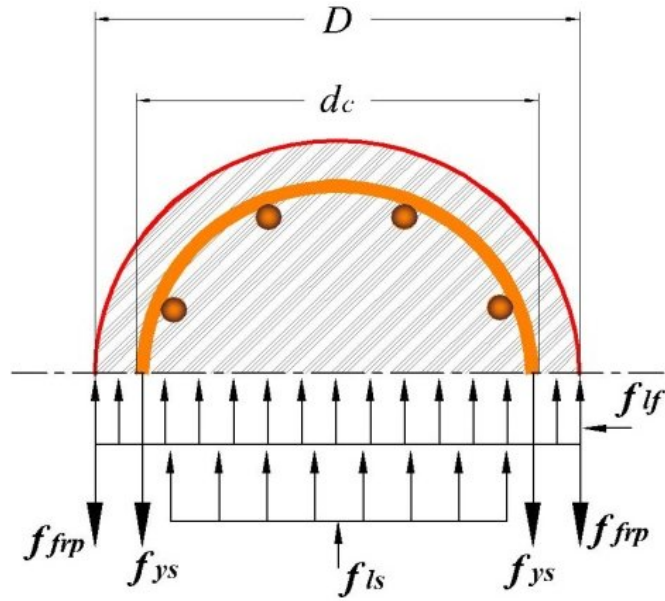
$$f_{le} = f_{lf} + k_e f_{ls} \quad (4.9)$$

Où,  $f_{lf}$  est la pression de confinement latérale produit par PRFC, leur expression est donnée par l'équation (4.1) ;  $f_{ls}$  représente la pression de confinement latérale qui résulte de l'effet de confinement par les aciers transversaux. Pour les colonnes circulaires, la pression maximale de confinement est en rapport direct avec la section  $A_{st}$ , l'espacement  $s$ , la résistance élastique  $f_{ys}$  de l'acier utilisé ainsi que le diamètre de noyau du béton confiné  $d_c$  (Mander *et al.* 1988). Cette pression de confinement ( $f_{ls}$ ) dans les sections circulaires est exprimée par la formule suivante :

$$f_{ls} = \frac{2 A_{st} f_{ys}}{s \cdot d_c} \quad (4.10)$$

Avec,  $k_e$  est le coefficient d'efficacité du confinement qui tient compte de la géométrie de la section et de la configuration des armatures longitudinales et transversales proposé par Sheikh et Uzumeri (1982). Ce coefficient est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_c}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{pour les cerces} \\ k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{pour les spirales} \end{array} \right. \quad (4.11)$$



**Figure 4.16** : Mécanisme de confinement pour le béton confiné par PRFC-RAT.

#### 4.3.2. Modèle contrainte-déformation

Pour la prédiction du comportement contrainte déformation du béton confiné par l'effet combiné de l'enveloppe PRFC et armatures d'aciers transversales RAT (Figure 4.17), on utilise l'équation modifiée de Thorenfeldt (1987) exprimée sous la forme suivante :

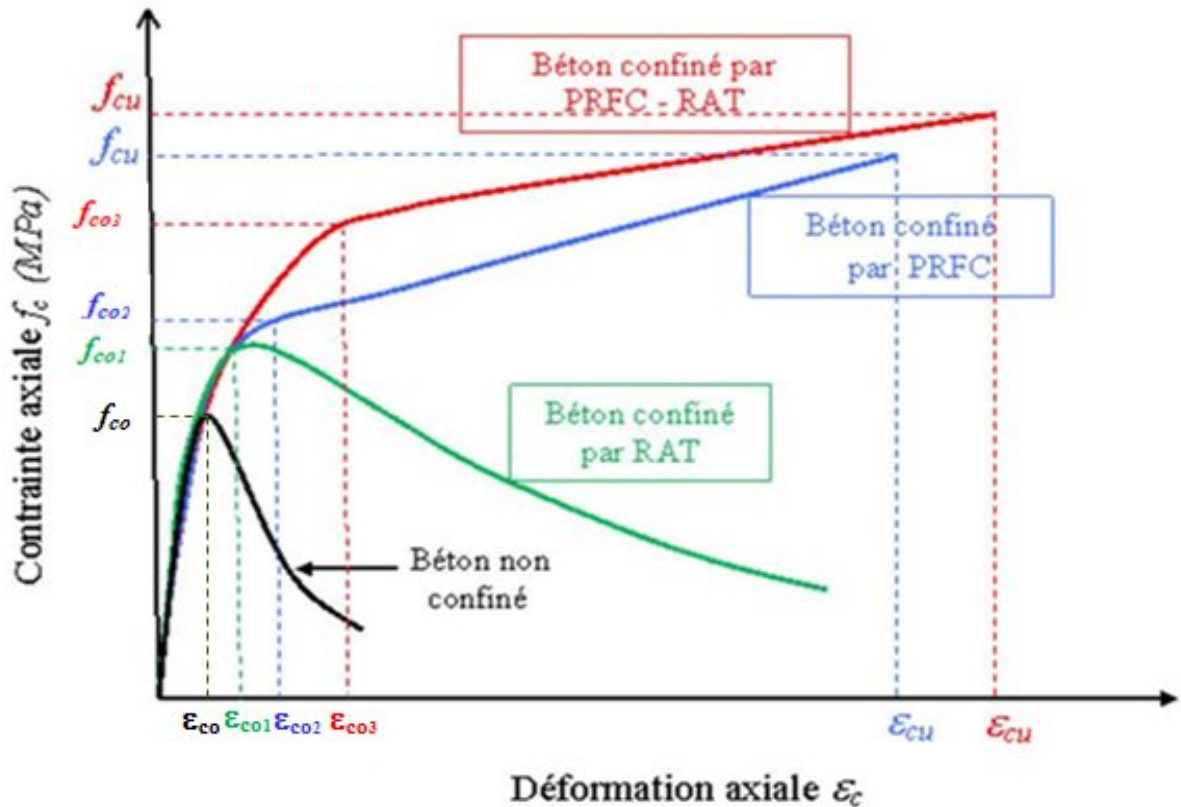
$$\frac{f_c}{f_{cu}} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}}\right)^r}{r-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}}\right)^{0,8r}} \quad (4.12)$$

et,

$$r = \frac{E_c}{\left[ E_c - \left(\frac{f_{cu}}{\varepsilon_{cu}}\right) \right]} \quad (4.13)$$

Plusieurs chercheurs utilisent différentes formules pour le calcul du module d'élasticité du béton  $E_c$ . Dans ce travail, l'expression donnée par ACI 318 (2011) est utilisée, comme suivant :

$$E_c = 4700 \sqrt{f_{co}} \quad (4.14)$$



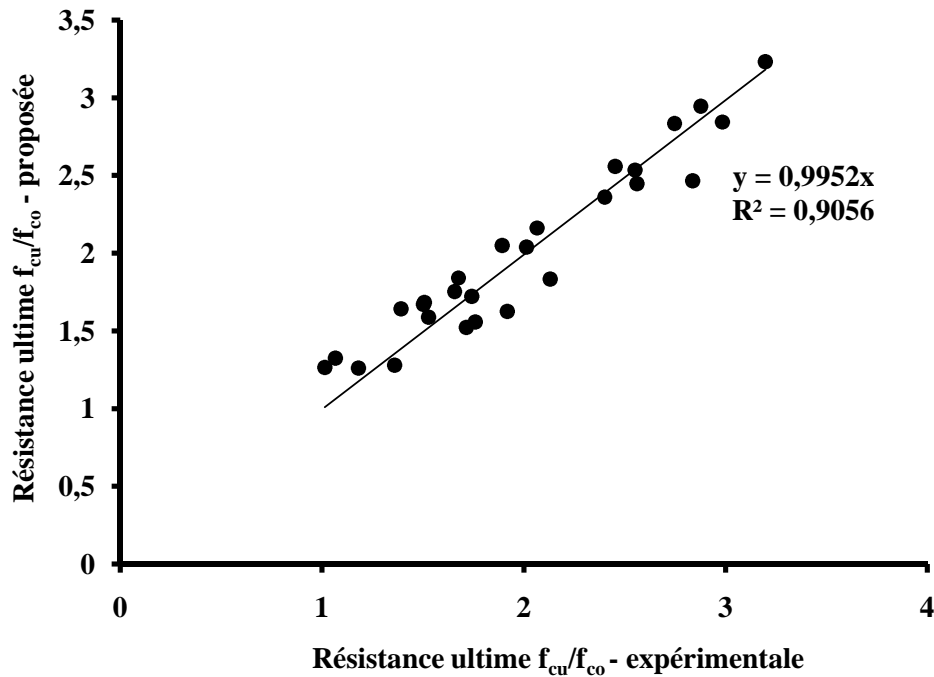
**Figure 4.17** : Courbe contrainte-déformation proposée pour le béton confiné par PRFC-RAT.

#### 4.3.3. Expression du modèle de résistance ultime proposé

D'après l'équation (4.5) du modèle de confinement par PRFC seulement, formulé par plusieurs chercheurs à savoir : Lam et Tang (2003), Jiang et Teng (2007), Benzaid *et al.* (2010), Ozbbakaloglu et Lim (2013), la résistance ultime est en fonction de la pression de confinement latérale produit par PRFC sans tenir en compte l'effet des aciers transversaux. Cependant, les résultats présentés dans le Tableau 3.2, ont indiqué que le confinement par aciers transversaux ne devrait pas être négligé en présence du confinement par des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Ceci montre que la résistance en compression ultime ( $f_{cu}$ ) est en fonction de la pression de confinement latéral ( $f_{le}$ ) produit sous l'effet combiné du PRFC et RAT. La relation de ( $f_{le}$ ) est donnée par l'équation (4.9). D'autre part, les indicateurs de performance des modèles qui considèrent l'effet combiné, dans le chapitre trois, ont montré que peu de modèles ont atteint une performance suffisante. En effet, la proposition d'un nouveau modèle de résistance ultime ( $f_{cu}$ ) s'avère nécessaire, avec la régression des résultats actualisés. Les coefficients et les paramètres de ce modèle sont calibrés en utilisant une analyse de régression mathématique des résultats de 26 essais expérimentaux. L'expression du nouveau modèle de résistance ultime ( $f_{cu}$ ) proposé est formulée de la manière suivante :

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2,2 \left( \frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0,94} + 1,1 \left( \frac{k_e f_{ls}}{f_{co}} \right)^{0,76} \quad (4.15)$$

La Figure 4.18 indique que le modèle proposé en (4.15) possède une bonne corrélation linéaire par rapport aux résultats expérimentaux de 26 spécimens. Comme, elle montre clairement le coefficient de détermination ( $R^2$ ) égal à 0.91 qui est proche de 1.



**Figure 4.18** : Comparaison entre la résistance ultime expérimentale et proposée.

#### 4.3.4. Expression du modèle de déformation ultime proposé

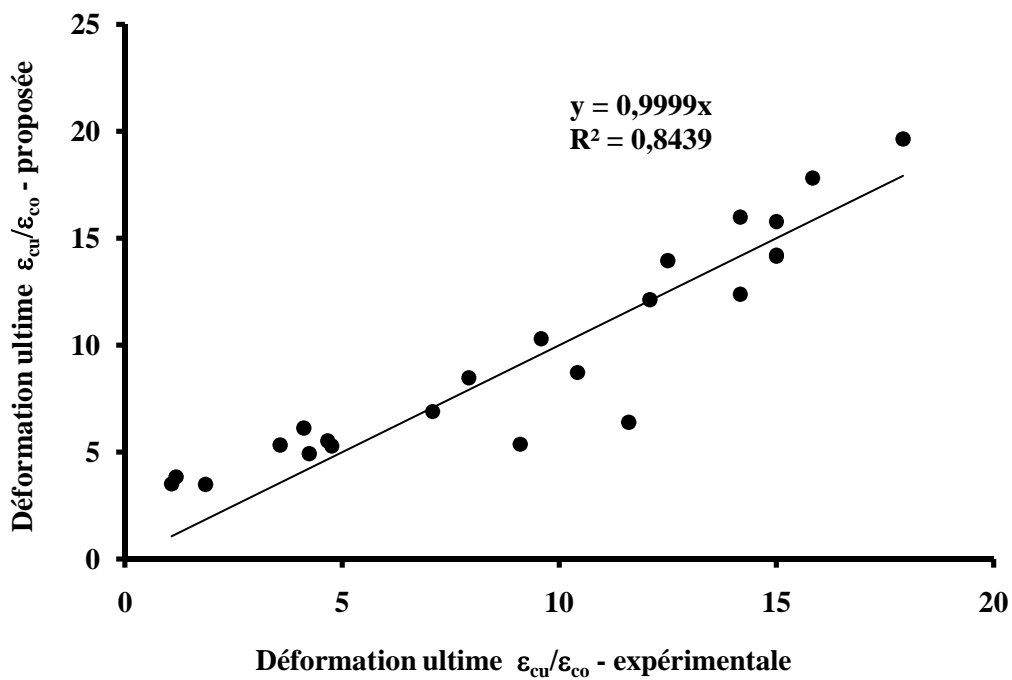
D'après l'équation (4.7) du modèle de confinement par PRFC seulement, formulé par plusieurs chercheurs à savoir : Lam et Tang (2003), Jiang et Teng (2007), Benzaid *et al.* (2010), Ozbbakaloglu et Lim (2013), la déformation ultime est en fonction de la pression de confinement latérale produit par PRFC seul. Par ailleurs, les résultats présentés dans le Tableau 3.2, ont indiqué que le confinement par aciers transversaux ne peut pas être négligé en présence du confinement par polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC), ce qui indique que la déformation ultime ( $\epsilon_{cu}$ ) est en fonction de la pression de confinement latérale ( $f_{le}$ ) produit sous l'effet combiné du PRFC et RAT.

Afin de tenir compte de l'effet combiné du confinement par l'enveloppe PRFC et RAT dans l'équation (4.7), une nouvelle expression peut être inspirée pour des colonnes circulaires en béton confinées sous l'effet combiné de PRFC-RAT. Les coefficients et les paramètres de cette expression sont établis en utilisant une analyse de régression de 21 essais expérimentaux

présentés dans le Tableau 3.2. Cette nouvelle expression du modèle de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}$ ) proposée est exprimée de la manière suivante :

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 10\left(\frac{f_{lf}}{f_{co}}\right) + 15\left(\frac{k_e f_{ls}}{f_{co}}\right)^{0,7} \quad (4.16)$$

La Figure. 4.19 illustre une corrélation linéaire très acceptable entre le rapport des déformations expérimentales de 21 spécimens et le rapport proposé de l'équation (4.16).



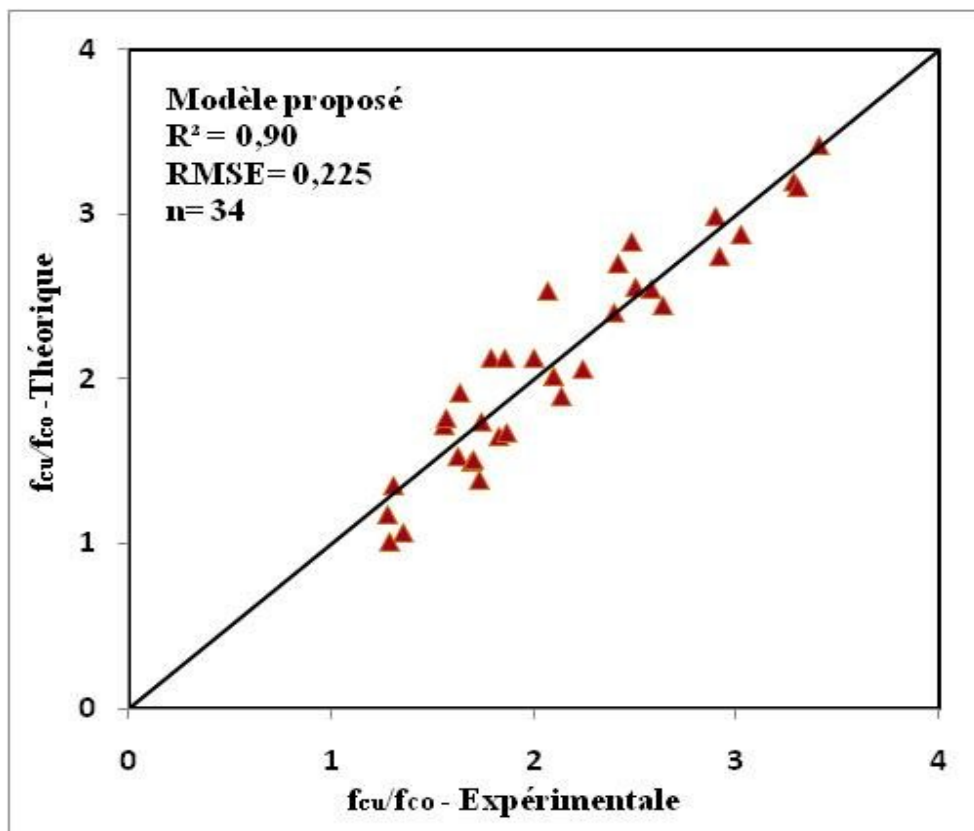
**Figure 4.19** : Comparaison entre la déformation ultime expérimentale et proposée.

#### 4.3.5. Performance du modèle développé pour l'effet combiné PRFC-RAT

Il est très utile maintenant d'examiner la performance par une régression mathématique, des expressions de résistance ultime ( $f_{cu}/f_{co}$ ) (Eq. 4.15) et de déformation ultime ( $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{co}$ ) (Eq. 4.16), du nouveau modèle de confinement des colonnes circulaires en béton confinées par l'effet combiné du PRFC-RAT. Cette performance sera traitée, en utilisant toutes les données expérimentales (n=34), comme il sera confronté aux modèles existants déjà discutés dans le chapitre 3, en l'occurrence : Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Wang *et al.* (2012), Hu et Seracino (2013) et Teng *et al.* (2014).

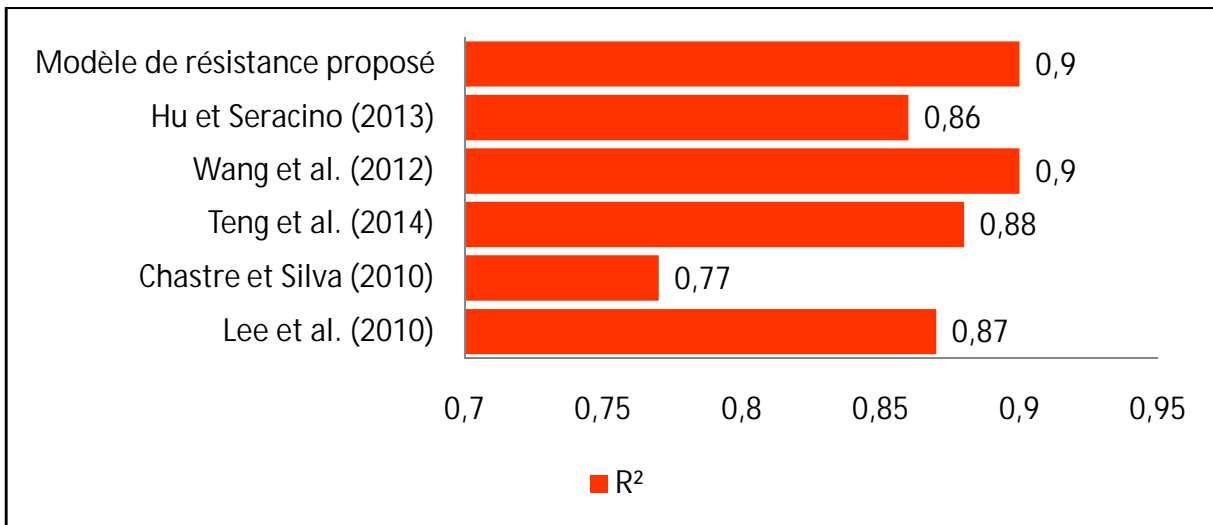
##### 4.3.5.1. Performance de l'expression de la résistance ultime

Figure 4.20(a) met en lumière la performance du modèle de résistance. Cette Figure indique que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,90$  et la racine carrée du carré moyen des résidus  $RMSE = 0,225$ . A partir de ces deux indicateurs de performance, on peut dire que le modèle de résistance proposé montre une bonne corrélation ainsi que le nuage de points se focalise sur la diagonale  $45^\circ$  de la fonction  $y = x$ , ce qui indique que les valeurs prédites sont plus proches aux valeurs expérimentales.

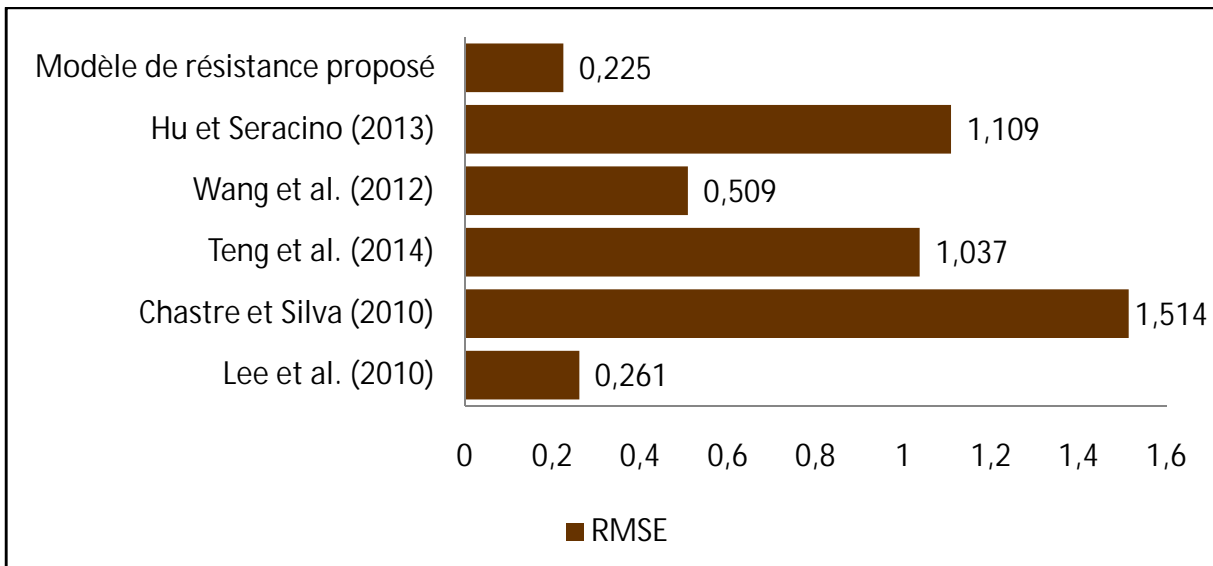


**Figure 4.20 :** Performance du nouveau modèle de résistance proposé PRFC-RAT.

À titre de comparaison de notre modèle de résistance proposé avec d'autres modèles existants, la Figure 4.21 (a, b) précise la confrontation entre les indicateurs  $R^2$  et RMSE pour tous les modèles. Selon l'histogramme 4.21a, bien que toutes les valeurs de  $R^2$  de tous les modèles soient très proches, à l'exception du modèle de Chastre et Silva (2010), néanmoins le  $RMSE = 0,225$  de notre modèle proposé reste le minimum proche de zéro par rapport aux autres modèles d'après histogramme 4.21b. En effet, le modèle de résistance proposé présente une meilleure performance comparativement aux autres modèles existants.



a- $R^2$

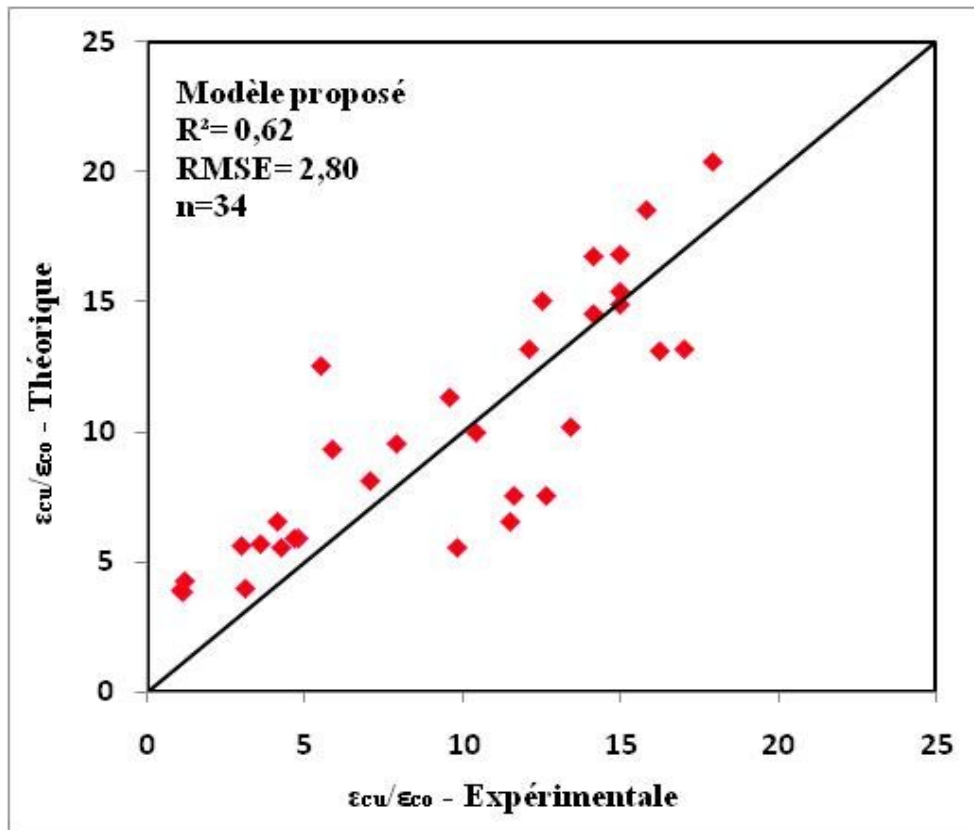


b- RMSE

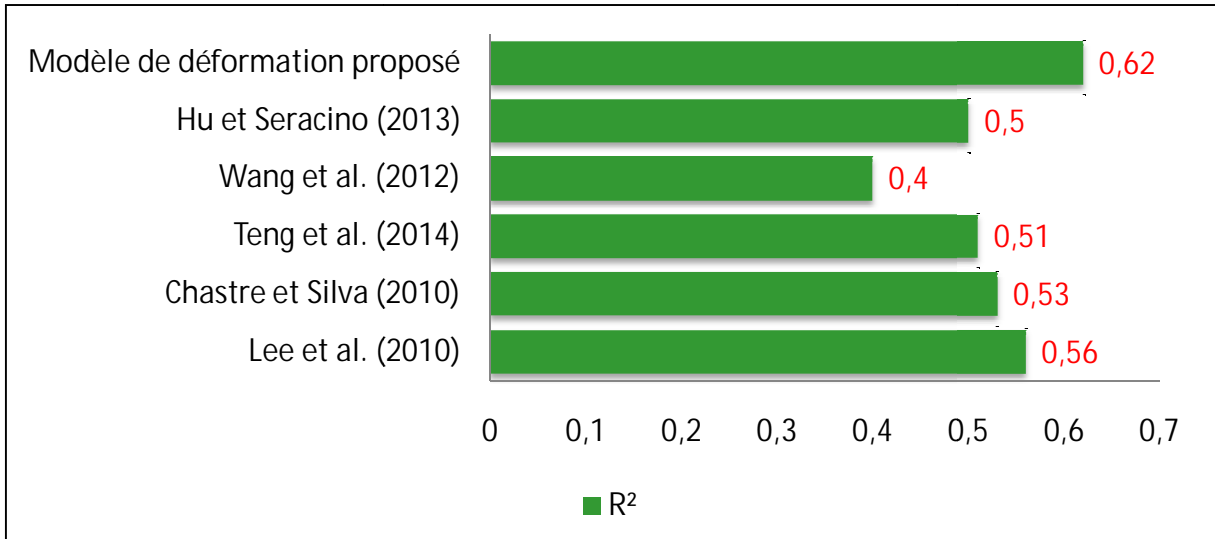
**Figure 4.21 :** Comparaison des indicateurs de performance entre le modèle de résistance proposé et les modèles existants pour le confinement par PRFC-RAT.

#### 4.3.5.2. Performance de l'expression de la déformation ultime

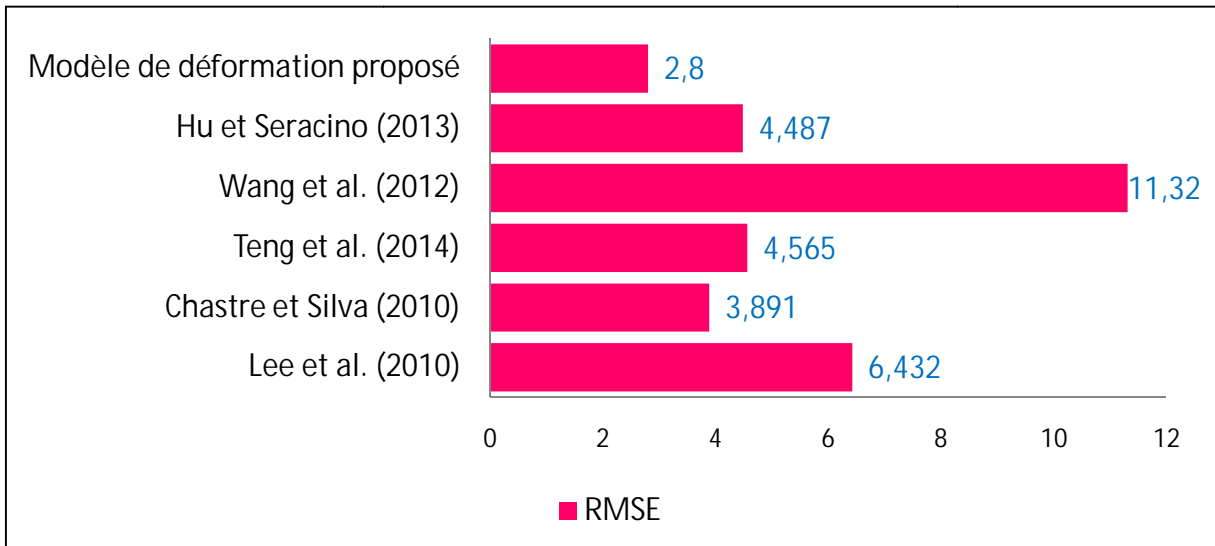
Concernant la performance du modèle de déformation (PRFC + RAT), la Figure 4.22 montre que  $R^2= 0,62$  et  $RMSE = 2,80$  pour 34 données expérimentales. Quoique ces deux indicateurs montrent que le modèle de déformation proposé présente une faible performance, néanmoins la valeur du  $R^2 = 0,62$  de notre modèle est le plus proche de 1 comparativement aux autres modèles illustrés dans l'histogramme de la Figure 4.23a, ainsi que la valeur  $RMSE = 2,8$  est la valeur minimale proche de zéro, comparativement aux autres modèles, comme montre l'histogramme de la Figure 4.23b. D'ici, on peut déduire qu'actuellement le modèle déformation (PRFC+RAT) est le plus pertinent que les modèles proposés par Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Wang *et al.* (2012), Hu et Seracino (2013) et Teng *et al.* (2014).



**Figure 4.22 :** Performance du nouveau modèle de déformation proposé (PRFC-RAT).



**a-R<sup>2</sup>**



**b-RMSE**

**Figure 4.23 :** Comparaison des indicateurs de performance entre le modèle de déformation proposé et les modèles existants pour le confinement par PRFC-RAT.

#### 4.3.6. Comparaison du modèle proposé avec des modèles existants

Le nouveau modèle suggéré du confinement par l'effet combiné de l'enveloppe PRFC et RAT, sera confronté aux différents résultats expérimentaux et numériques afin de valider notre proposition. Les Figures. (4.24) à (4.31) illustrent une confrontation de notre modèle et les prédictions de Lee *et al.* (2010), Chastre et Silva (2010), Tang *et al.* (2014) et Shirmohammadi *et al.* (2015) ainsi que les résultats expérimentaux de huit spécimens S2F2, S2F3, S4F2 de Lee *et al.* (2010) et C1H1L1M, C1H1L2M, C1H2L1M, C2H2L1M, C2H2L2M de Wang *et al.* (2012). Dans ce contexte, l'étalement de la courbe contrainte déformation de notre modèle avec les courbes expérimentales S2F2, S2F3, S4F2 de Lee *et al.* (2010), ainsi que les autres prédictions illustrées dans les Figures (4.24), (4.25) et (4.26) respectivement montre clairement que la justesse de notre modèle proposé par rapport aux autres modèles. En effet, le modèle proposé coïncide exactement avec les courbes expérimentales, comme il rapproche mieux avec les modèles de Lee *et al.* (2010). et Shirmohammadi *et al.* (2015), néanmoins les expressions de notre modèle sont très simplifiées que ces deux derniers modèles. Comme, il donne des résultats très séduisants comparativement aux modèles proposés par Chastre et Silva (2010) ainsi que Teng *et al.* (2014), où ces courbes indiquent que ces deux derniers modèles surestiment largement les valeurs de la résistance et la déformation ultimes comparativement aux résultats expérimentaux. Ces observations seront largement validées avec la comparaison de notre modèle et les courbes expérimentales de Wang *et al.* (2012) schématisés dans les Figures. (4.27) à (4.31) respectivement. Effectivement, les points de notre modèle se rapprochent bien avec les courbes expérimentales de Wang *et al.* (2012) et le modèle de Lee *et al.* (2010), toutefois les valeurs ultimes ( $f_{cu}$  et  $\varepsilon_{cu}$ ) de nos courbes restent toujours inférieures aux courbes expérimentales ce qui offre à notre proposition une marge de sécurité respectable. Autrement, les résistances ultimes ( $f_{cu}$ ) de Chastre et Silva (2010) et Teng *et al.* (2014) dépassent de loin les résultats expérimentaux. Toutefois, le modèle shirmohammadi *et al.* (2015) montre un comportement très variable relativement aux autres modèles. Ceux-ci sont dus à la forme très complexe de leurs expressions de résistance et de déformation. En conséquence, notre modèle étale une forme très simple avec une corrélation très acceptable, et qui donne des résultats plus fiables qui se rapprochent aux résultats expérimentaux.

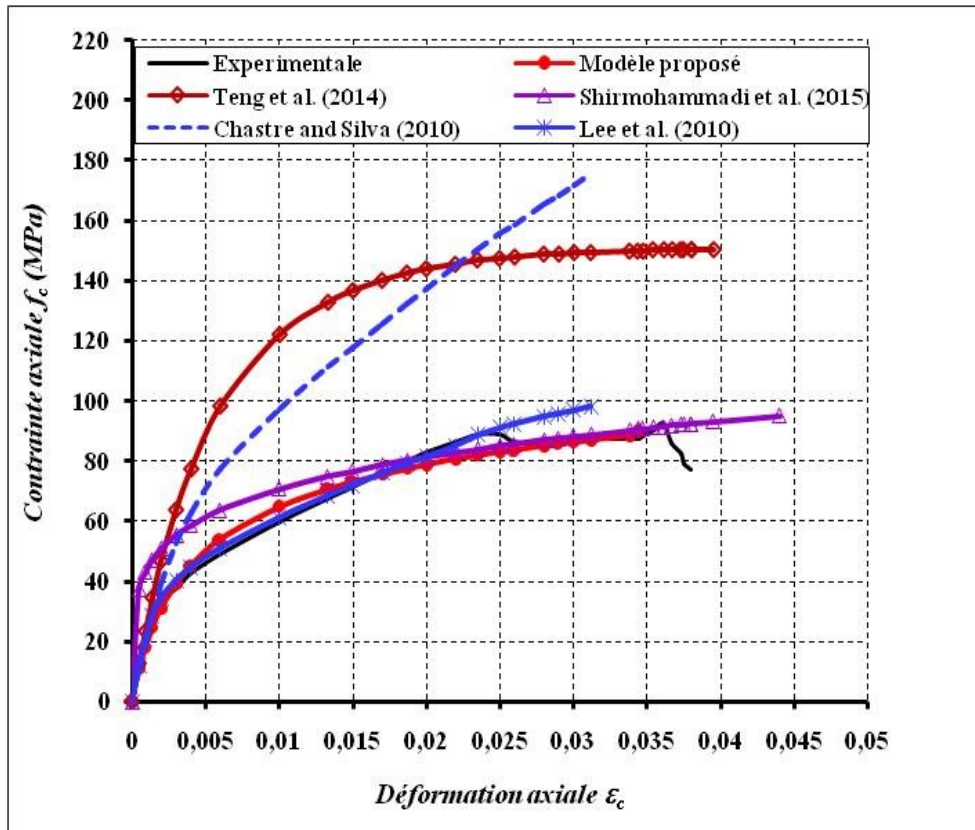


Figure 4.24 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S2F2 (Lee *et al.* 2010).

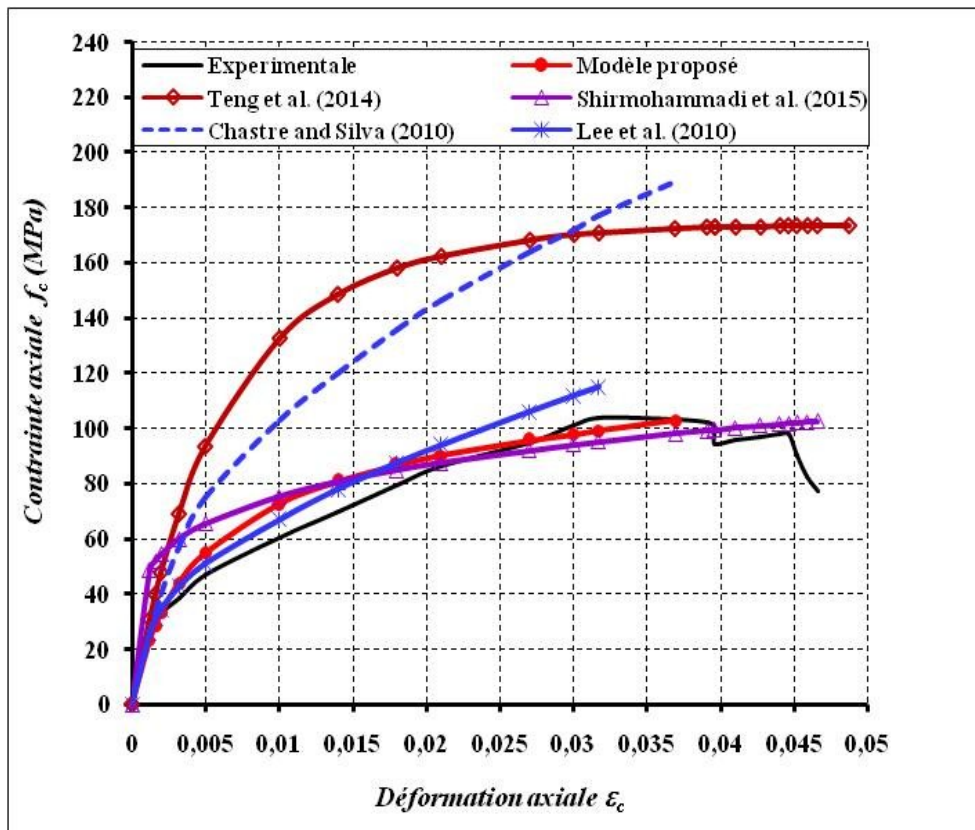


Figure 4.25 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S2F3 (Lee *et al.* 2010).

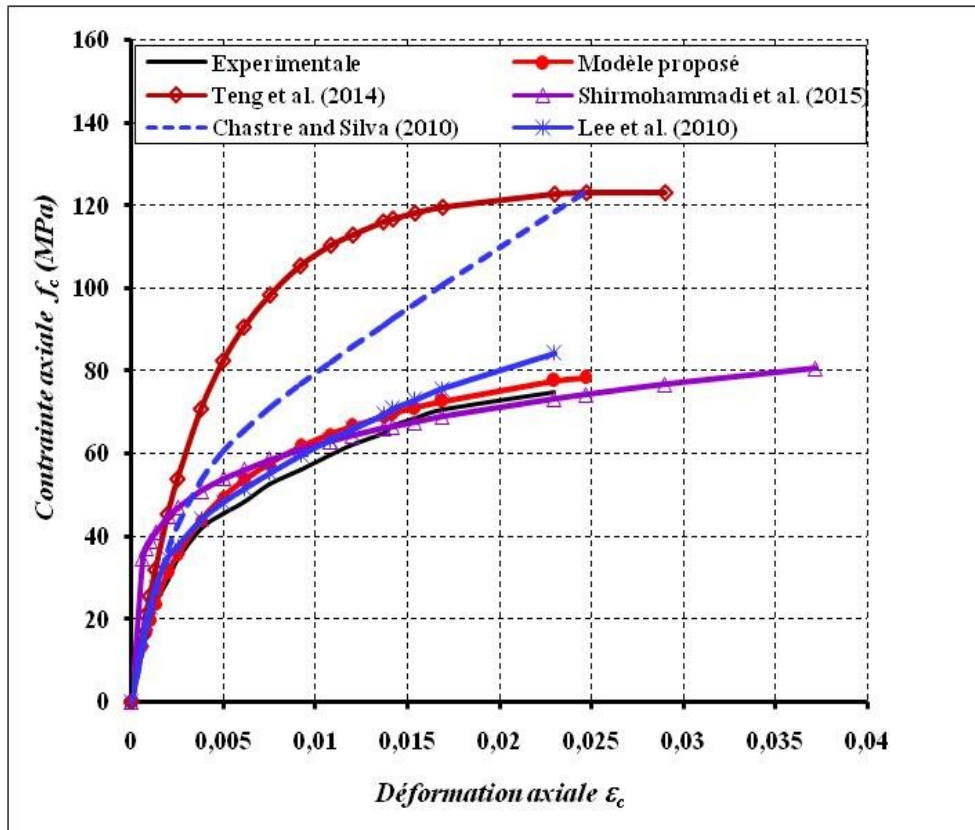


Figure 4.26 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen S4F2 (Lee *et al.*2010).

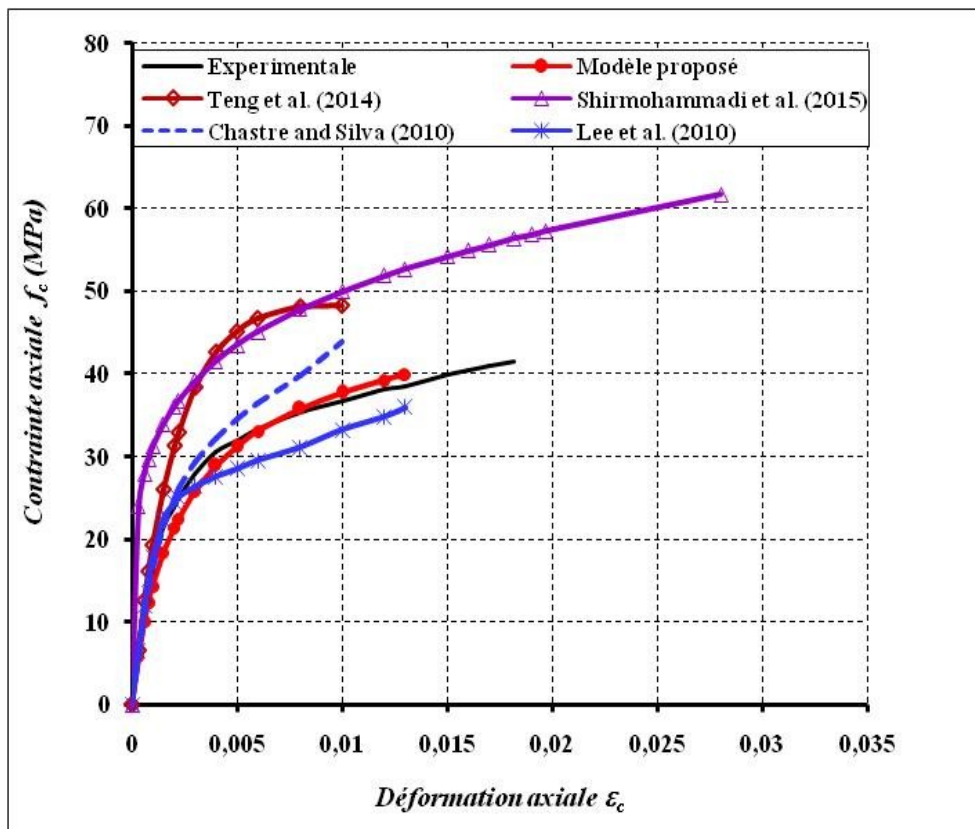


Figure 4.27 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H1L1C (Wang *et al.*2012).

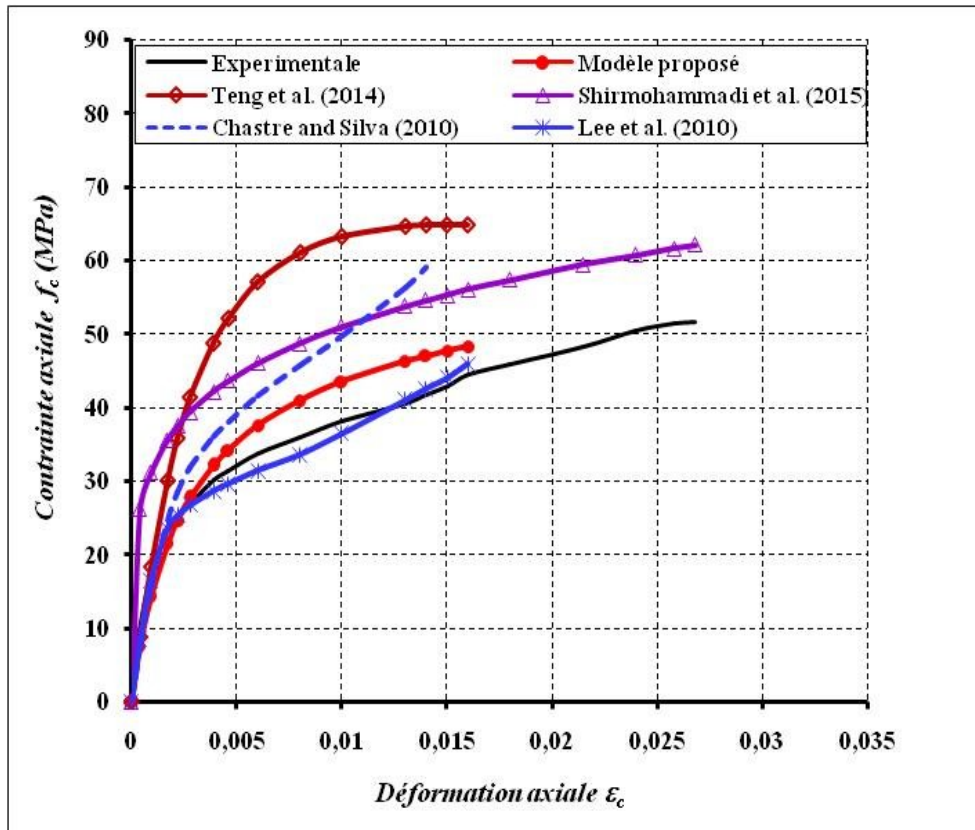


Figure 4.28 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H1L2M (Wang *et al.*2012).

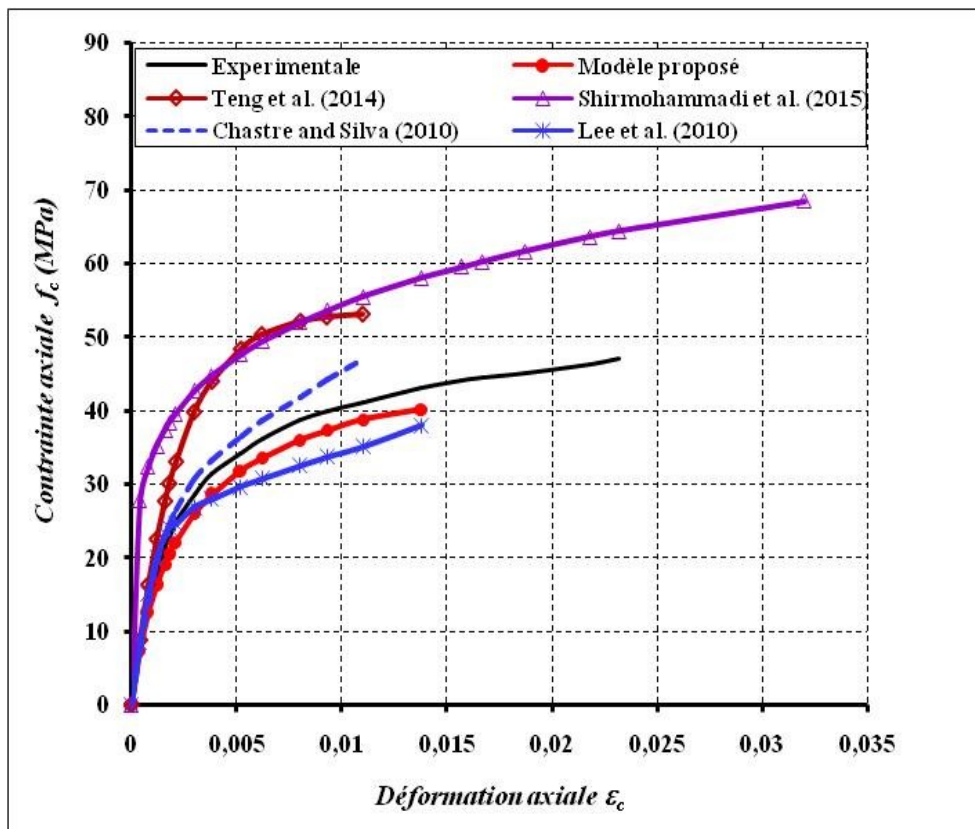


Figure 4.29 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C1H2L1M (Wang *et al.*2012).

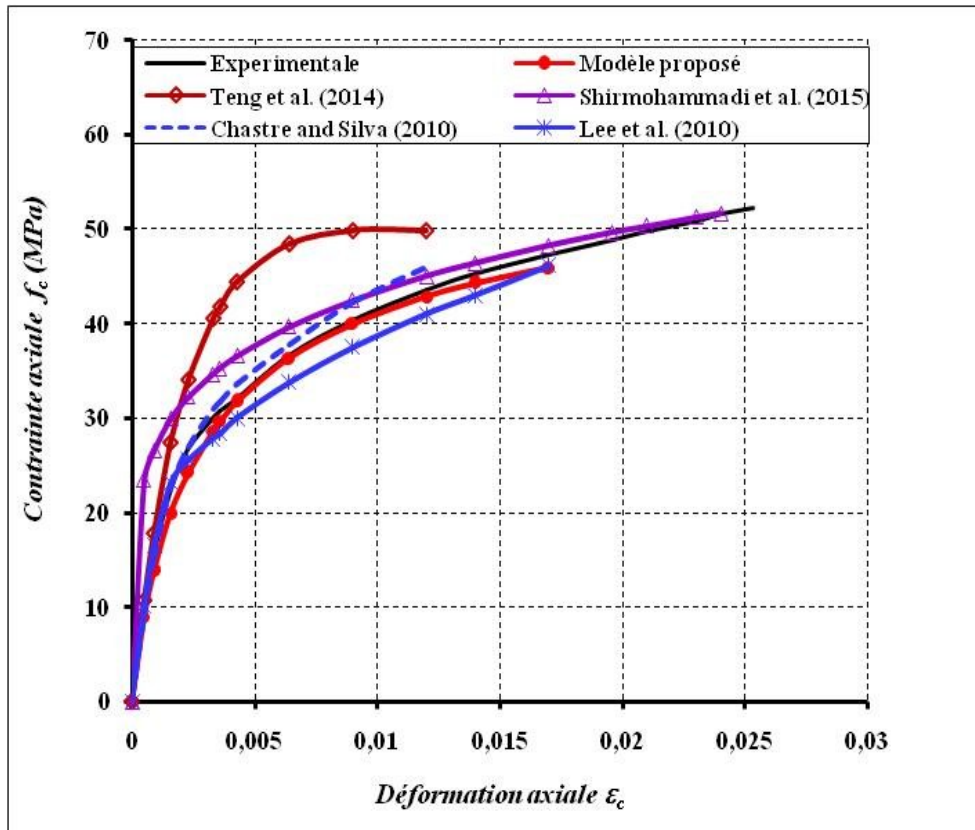


Figure 4.30 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C2H2L1M (Wang *et al.*2012).

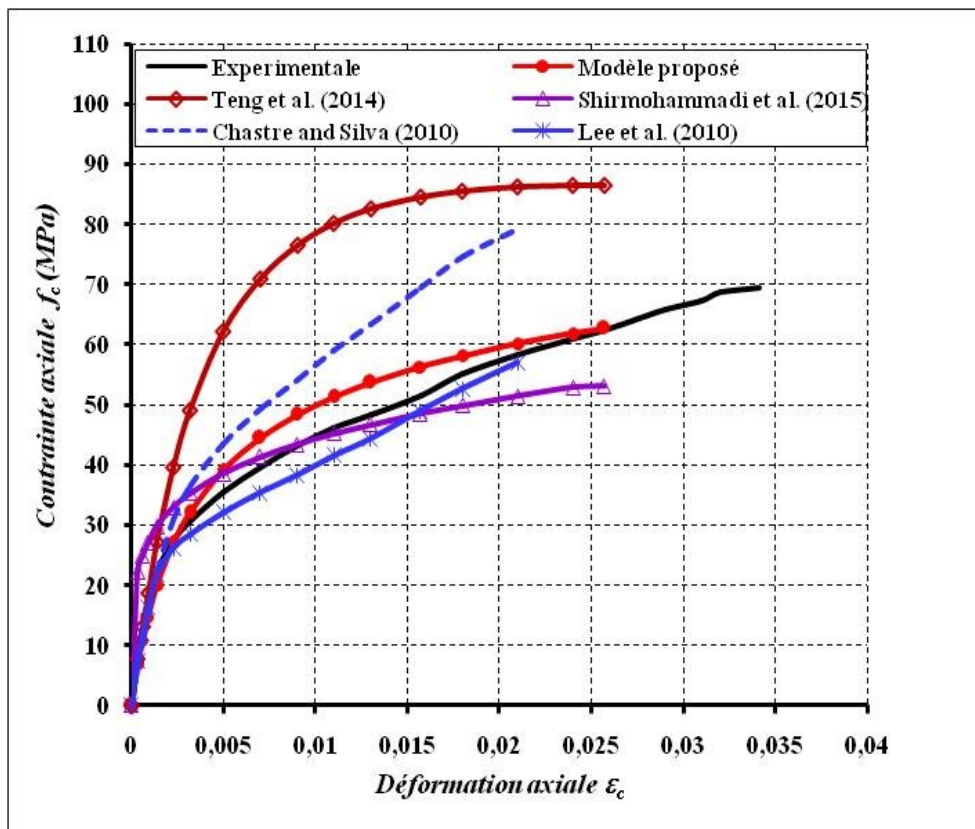


Figure 4.31 : Comparaison des modèles de confinement avec courbe contrainte-déformation du spécimen C2H2L2M (Wang *et al.*2012).

#### 4.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a développé deux nouveaux modèles de confinement par polymères renforcés de fibres de carbone, sur la base d'une régression mathématique de plus de 340 données expérimentales recueillies à partir de la bibliographie.

Le premier nouveau modèle suggéré pour le confinement des colonnes circulaires en béton par PRFC sans tenir en compte l'effet des aciers transversaux, a été développé sur la base de l'analyse de régression de 310 données expérimentales. Ses deux indicateurs de performance sont considérés comme les meilleurs sur le nombre de données considérées.

Le deuxième nouveau modèle prédit pour le confinement des colonnes circulaires en béton considère l'effet combiné de PRFC et les aciers transversaux, sur la base de régression de 34 données expérimentales. D'après l'étude de la performance et la comparaison avec les résultats expérimentaux, on a montré que les signes de pertinence sont aussi justifiés comme le maximum pour  $R^2$  et le minimum pour RMSE.

CHAPITRE 5 :  
ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES FACTEURS  
INFLUENÇANT LE CONFINEMENT DES  
COLONNES CIRCULAIRES PAR PRFC

## 5.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce présent chapitre est de mener une comparaison entre les deux modèles de confinement par polymères renforcés de fibres de carbone développés, dans le chapitre précédent, où une étude paramétrique des facteurs influençant le confinement par PRFC sera réalisée. Les paramètres illustrés dans le chapitre 2, à savoir : la résistance en compression du béton non confiné, le diamètre de la colonne, l'épaisseur des polymères renforcés de fibres de carbone et leurs résistances à la traction ainsi que la limite élastique des aciers transversaux et leurs pourcentages volumiques seront mis en évidence ; à travers l'examen des deux nouveaux modèles prédits ; afin de quantifier le gain de résistance et de déformation. Dans ce contexte, une confrontation entre la pertinence de gain de résistances dans ces deux modèles sera illustrée. Le tableau 5.1 illustre les différents paramètres traités et les quantités utilisées dans cette étude. Tous ces paramètres seront variés en fonction de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) de 20 MPa à 120 MPa.

**Tableau 5.1** : Différents paramètres traités et les quantités utilisés.

	<b>Paramètre</b>	<b>Notation</b>	<b>Unité</b>	<b>Quantité</b>
<b>1</b>	La résistance en compression du béton non confiné	$f_{co}$	MPa	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 et 120
<b>2</b>	Le diamètre de la colonne	$D$	mm	300, 400, 500, 600, 700 et 800
<b>3</b>	L'épaisseur des polymères renforcés de fibres de carbone	$t_{prf}$	mm	0.25, 0,5, 0,75, 1, 1,25 et 1,5
<b>4</b>	La résistance en traction des polymères renforcés de fibres de carbone	$f_{prf}$	MPa	500, 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000
<b>5</b>	La limite élastique des aciers transversaux	$f_{ys}$	MPa	235, 400, 500, 600, 700, et 800
<b>6</b>	Le pourcentage volumique des aciers transversaux	$\rho_{vt}$	%	0.5, 1, 2, 3, 4, et 5

## 5.2. EFFET DU DIAMÈTRE DE LA COLONNE ( $D$ )

Le diamètre de la colonne ( $D$ ) est l'un des facteurs influent sur le confinement latéral des colonnes circulaire en béton armé. L'effet de ce diamètre ( $D$ ) sur le rapport de résistance en compression ( $f_{cu}/f_{co}$ ) du béton confiné par PRFC du modèle proposé en (4.6), ainsi que pour l'effet combiné PRFC-RAT du modèle proposé en (4.15), en fonction de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) sera étudié ce dessous.

La Figure 5.1 décrit l'effet du diamètre  $D$  sur le rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le béton confiné par PRFC sans armatures transversales. D'après cette figure, on constate que pour chaque valeur du diamètre ( $D$ ), la courbe du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue en fonction de l'augmentation de la résistance en compression ( $f_{co}$ ), ceci confirme bien les observations montrées par Micelli et Modarelli (2013) et Sadeghian et Fam (2015). La comparaison des courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour chaque valeur de  $D$  montre que ces courbes diminuent avec l'augmentation de  $D= 300\text{mm}$  jusqu'à  $D= 800\text{mm}$ , cette diminution est largement observée pour les faibles résistances en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ), par ailleurs pour les valeurs élevée de  $f_{co}$ , cette diminution devient négligeable. D'ici, en déduire que le taux de diminution est plus important pour les faibles diamètres ( $D$ ), que les grands diamètres. Par exemple, pour un diamètre  $D= 300\text{mm}$  le taux de diminution du rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) est de 55,67%, alors que pour un diamètre  $D= 800\text{mm}$  le taux de diminution est de 28%. Ce constat converge largement avec ceux indiqués par Yeh et Chang (2004) et Sadeghian et Fam (2015). Par conséquent, un gain de résistance considérable est observé pour les colonnes préparées avec des petites résistances en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ), comparativement aux résistances ( $f_{co}$ ) élevées. Ces constats sont largement décrits dans la Figure 5.2, lorsqu'on tient en compte de l'effet combiné par des polymères renforcés de fibres (PRFC) et les aciers transversaux (RAT), ce qui affirme bien les résultats de l'Eid et al. (2009).

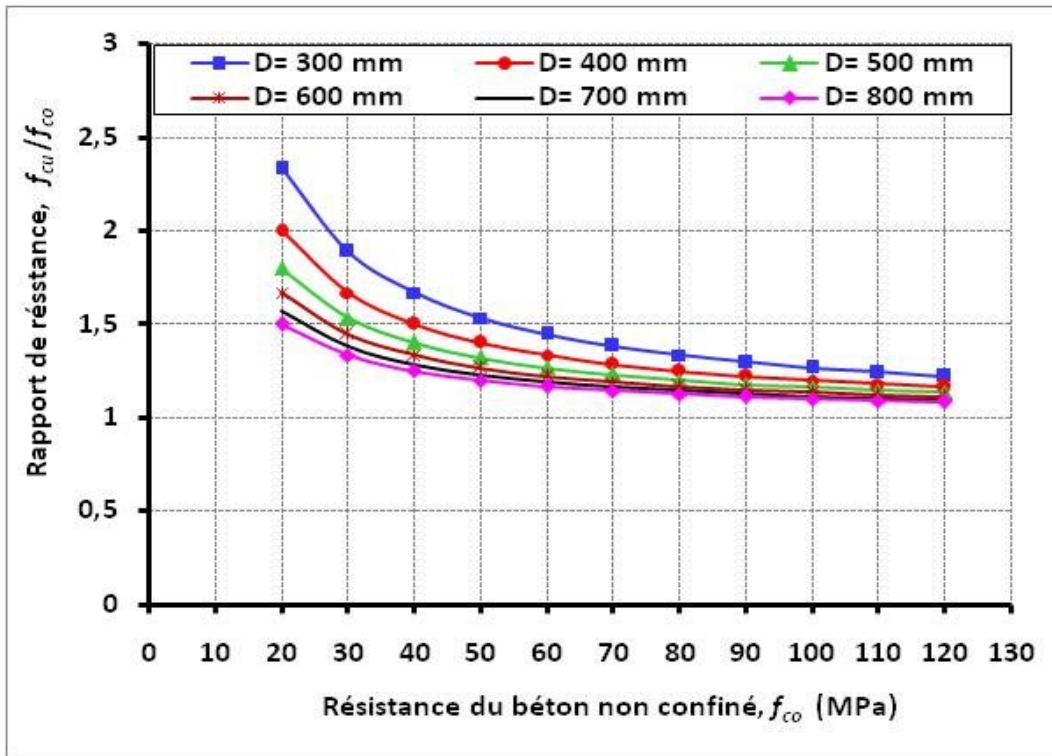
Afin de quantifier l'effet du diamètre  $D$  sur le modèle de résistance pour le confinement, par des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) sans et avec effet combiné avec les aciers transversaux (RAT), la confrontation des Figures 5.1 et 5.2 montre, que pour chaque valeur de  $D$  la courbe de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue lorsqu'on ajoute l'effet des aciers transversaux RAT. L'histogramme de la Figure 5.3 illustre nettement cette confrontation ; et il montre que pour chaque valeur de  $D$ , le gain de résistance diminue lorsqu'on ajoute l'effet des armatures transversales RAT. Cet histogramme affiche que le confinement par PRFC sans aciers transversaux donne un gain de résistance légèrement supérieur comparativement à celui de l'effet combiné PRFC et aciers transversaux. Le pourcentage de différence est de 7.15%, 5.31%, 4.02%, 3.07%, 2.35% et 1.8% pour 300mm, 400mm, 500mm, 600mm, 70mm et 800mm respectivement.

La Figure 5.4 présente une comparaison globale entre le modèle contrainte-déformation proposé pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux et le modèle proposé pour le

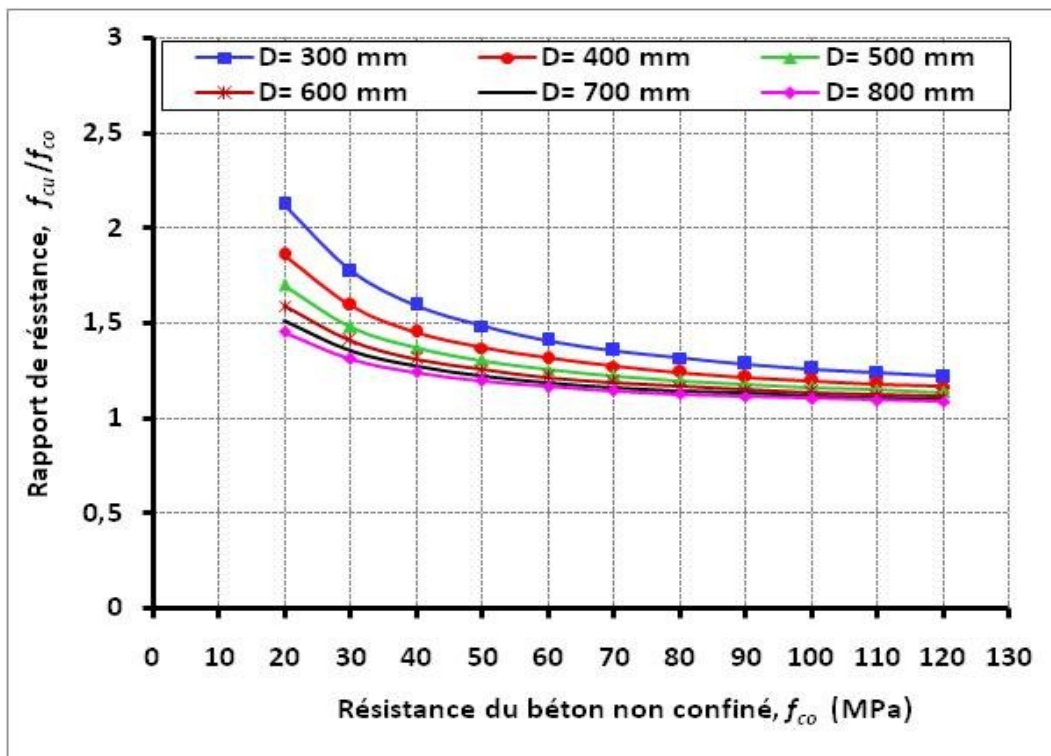
béton confiné par PRFC avec aciers transversaux. Cette comparaison est effectuée pour un diamètre  $D= 300\text{mm}$ . D'après cette figure, on constate que les valeurs de résistances estimées par le modèle de confinement par (PRFC) sont nettement supérieures à celles estimées par le modèle de confinement combiné (PRFC+RAT) ; néanmoins du point de vue déformation ce dernier est plus avantageux que le premier modèle.

D'après cette analyse, on peut mentionner que pour chaque valeur du diamètre ( $D$ ):

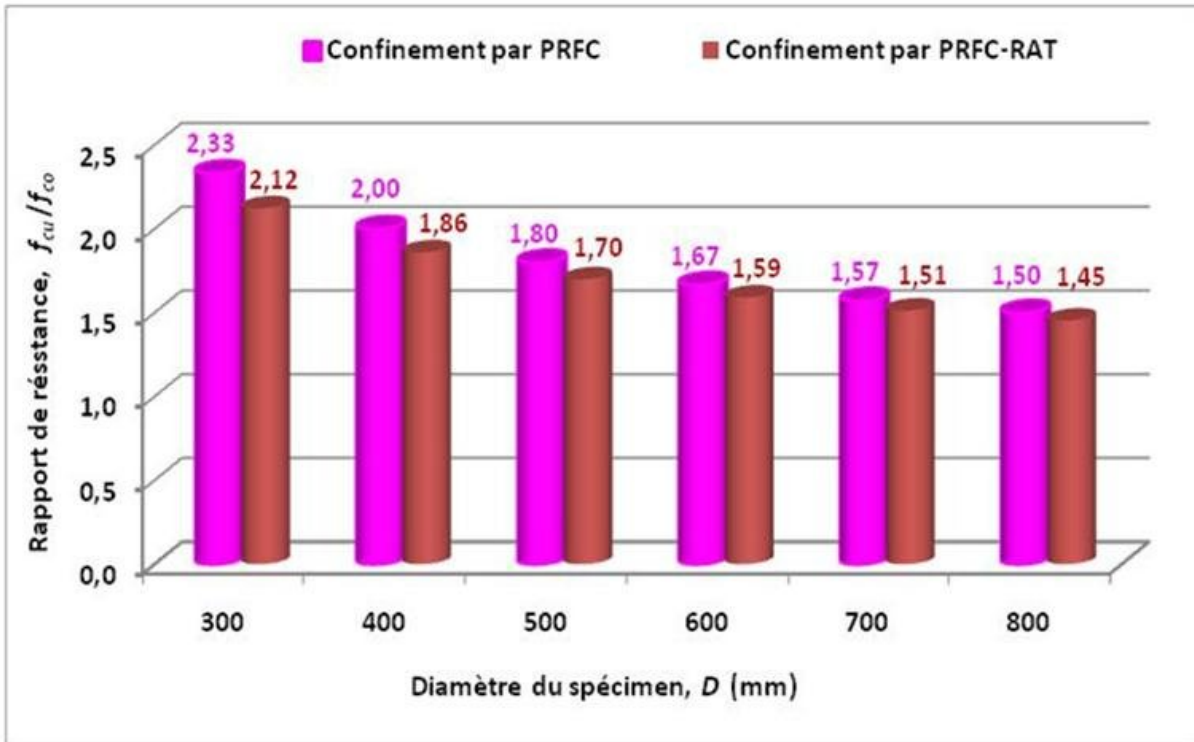
- ❖ Le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue en fonction de l'augmentation de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Le taux de diminution du rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de  $f_{co}$  pour le béton confiné par PRFC ainsi que par PRFC+RAT est plus important pour les colonnes ayant des petits diamètres  $D$  ;
- ❖ Pour chaque valeur de  $f_{co}$ , le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue inversement proportionnelle avec  $D$  ;
- ❖ Le gain de résistance pour les deux types de confinement est considérable pour le cas des colonnes préparés avec des faibles résistances en compression ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux offre un gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) élevé comparativement au modèle proposé pour le béton confiné par l'effet combiné PRFC-RAT ;
- ❖ Le modèle contrainte-déformation proposé pour le confinement par PRFC surestime les valeurs de résistance comparativement au modèle proposé pour le confinement par la combinaison PRFC-RAT ;
- ❖ Le modèle contrainte-déformation de confinement par la combinaison PRFC-RAT a un effet plus avantageux sur la déformation ultime que le modèle de confinement par PRFC seulement.



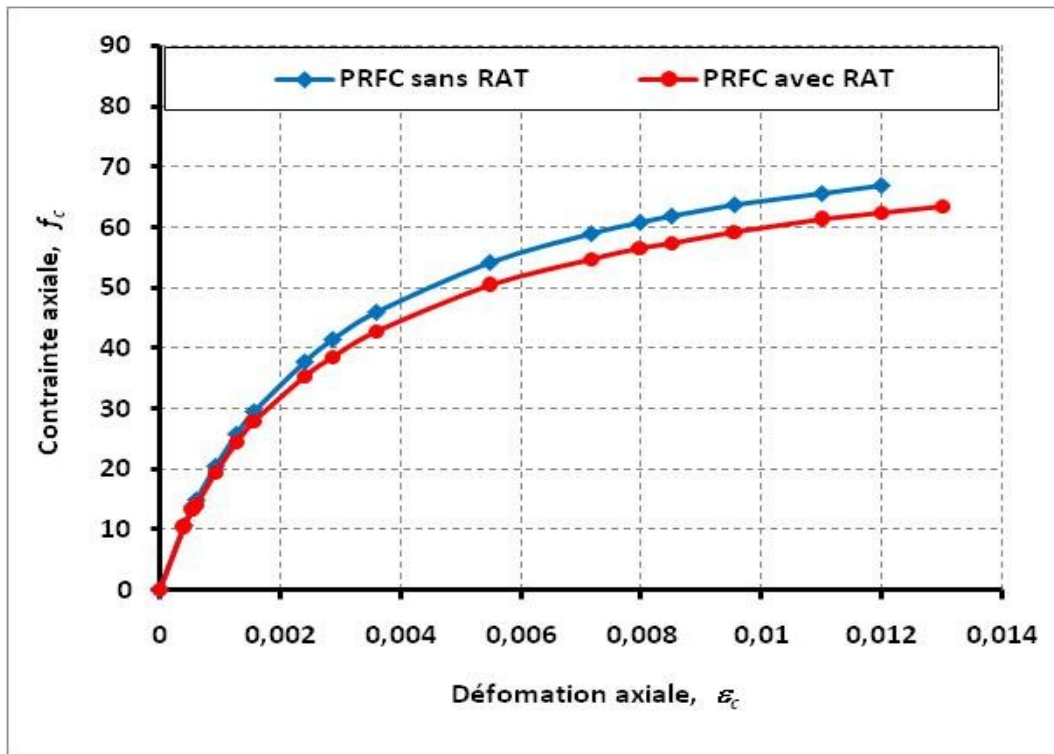
**Figure 5.1 :** Influence du diamètre de la colonne ( $D$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa.



**Figure 5.2 :** Influence du diamètre de la colonne ( $D$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vi} = 0,77$  %, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.3 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du diamètre de la colonne ( $D$ ) pour les modèles par PRFC et par PRFC-RAT, Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.



**Figure 5.4 :** Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D= 300$  mm,  $f_{co}= 40$  MPa,  $t_{prf}= 0,5$  mm,  $f_{prf}= 2500$  MPa,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.

### 5.3. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU PRFC ( $t_{prf}$ )

Dans le confortement par matériaux composites renforcés par fibres de carbone, l'épaisseur de ce dernier ( $t_{prf}$ ), ou bien le nombre de couches ( $n$ ) qui enveloppe la colonne, est un paramètre déterminant, qui influe le confinement latéral des colonnes en béton armé. L'influence de cette épaisseur sur le rapport de résistance en compression ( $f_{cu}/f_{co}$ ) du béton confiné par PRFC sans, et avec effet combiné des armatures transversales, en fonction de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ) sera analysé dans ce paragraphe.

La Figure 5.5 illustre l'effet de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) sur le rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le béton confiné par PRFC sans armatures transversales. Cette Figure montre que pour chaque valeur de l'épaisseur ( $t_{prf}$ ), la courbe de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue en fonction de l'augmentation de  $f_{co}$ , ces remarques sont similaires avec celles de Micelli et Modarelli (2013) et Sadeghian et Fam (2015). Cependant, un taux de diminution élevé est remarqué pour la colonne confinée avec un nombre de couches en PRFC élevé. Par exemple, pour six couches de PRFC correspond à  $t_{prf} = 1,5\text{mm}$  le taux de diminution du rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) est de 62,5%, alors que pour une couche correspond à  $t_{prf} = 0,25\text{mm}$  le taux de diminution est de 28%. En outre, la comparaison des courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour chaque valeur de  $t_{prf}$  montre que ces courbes augmentent avec l'augmentation de  $t_{prf} = 0,25\text{mm}$  jusqu'à  $t_{prf} = 1,5\text{mm}$ . Cette augmentation est largement observée pour les faibles résistances en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ), par ailleurs pour les valeurs élevées de  $f_{co}$ , cette augmentation devient faible. Ce constat affirme considérablement les résultats de Park *et al.* (2008) et Cui (2009).

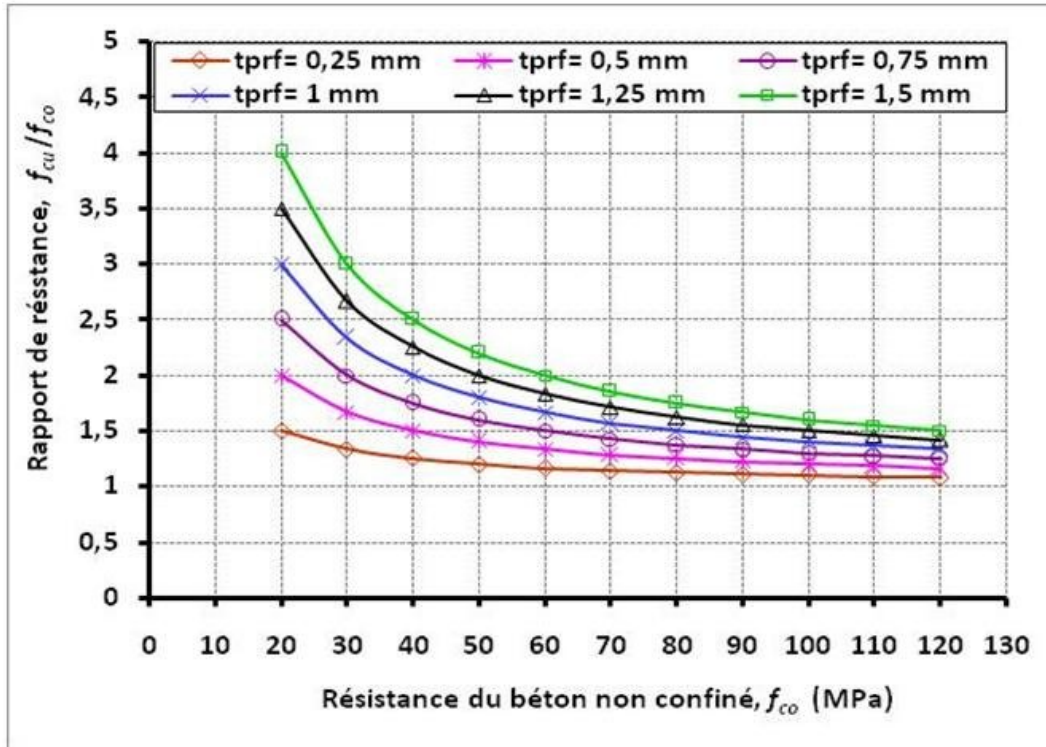
Par conséquent, un gain de résistance considérable est observé pour les colonnes préparées avec des petites résistances en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ), comparativement aux résistances ( $f_{co}$ ) élevées. Ces constats sont largement observés dans la Figure 5.6, lorsqu'on tient en compte de l'effet combiné par des polymères renforcés de fibres (PRFC) et les aciers transversaux (RAT), pour  $\rho_{vt} = 0,77\%$ . Ceci, est réellement comme les indiqués par l'Eid *et al.* (2009).

La confrontation, des Figures 5.5 et 5.6, montre que pour chaque valeur de  $t_{prf}$  la courbe de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue lorsqu'on ajoute l'effet des aciers transversaux (RAT). L'histogramme de la Figure 5.7 illustre nettement cette confrontation ; et il montre que pour chaque valeur de  $t_{prf}$ , le gain de résistance diminue lorsqu'on ajoute l'effet des armatures transversales (RAT), pour  $\rho_{vt} = 0,77\%$ . Cet histogramme affiche que les gains de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) sont améliorés par le confinement avec PRFC sans aciers transversaux, qu'avec l'effet combiné PRFC-RAT. Par conséquence, le taux d'amélioration est de 7%, 11,92%, 15,43%, 18,08% et 20,17% pour 0,5mm, 0,75mm, 1mm, 1,25mm et 1,5mm respectivement.

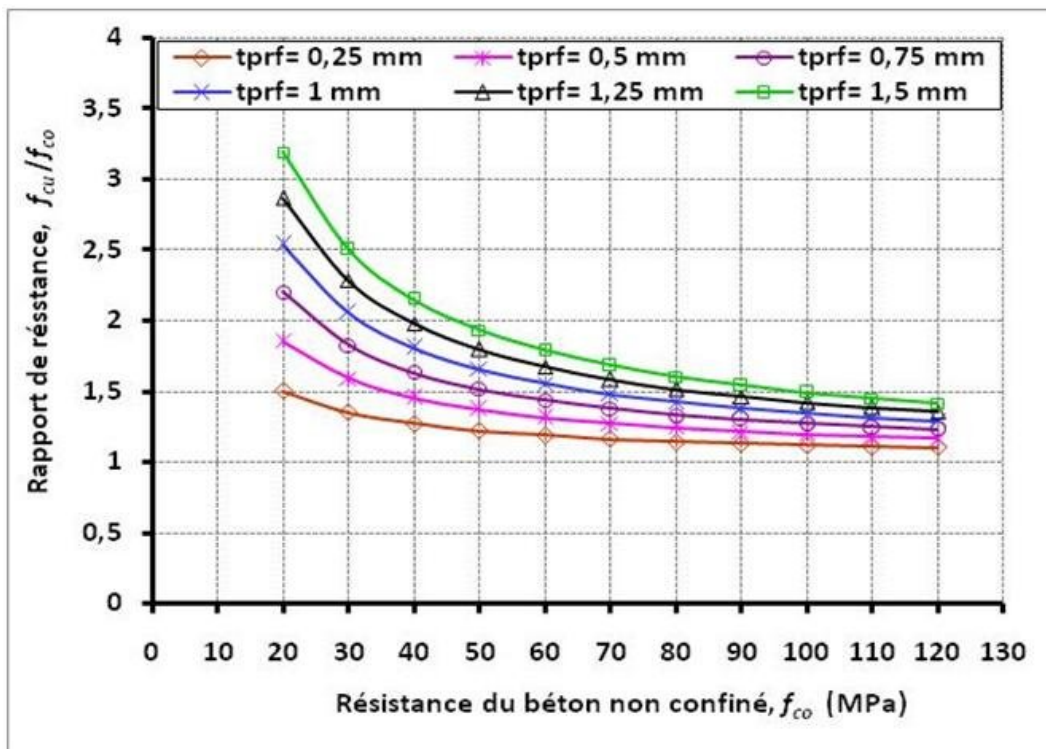
La comparaison globale entre le modèle contrainte-déformation proposé pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux (4.6) et le modèle proposé pour le béton confiné par PRFC avec aciers transversaux (4.15) est représentée sur la Figure 5.8. Cette comparaison est effectuée pour une épaisseur  $t_{prf} = 1,5\text{mm}$  (correspondant à  $n = 6$ ). D'après cette figure, on constate que les valeurs de résistances estimées par le modèle de confinement par PRFC seulement, sont nettement supérieures à celles estimées par le modèle de confinement par la combinaison PRFC-RAT ; dans ce cas.

D'après l'étude de l'effet de l'épaisseur  $t_{prf}$  ci-dessus, on peut déduire que :

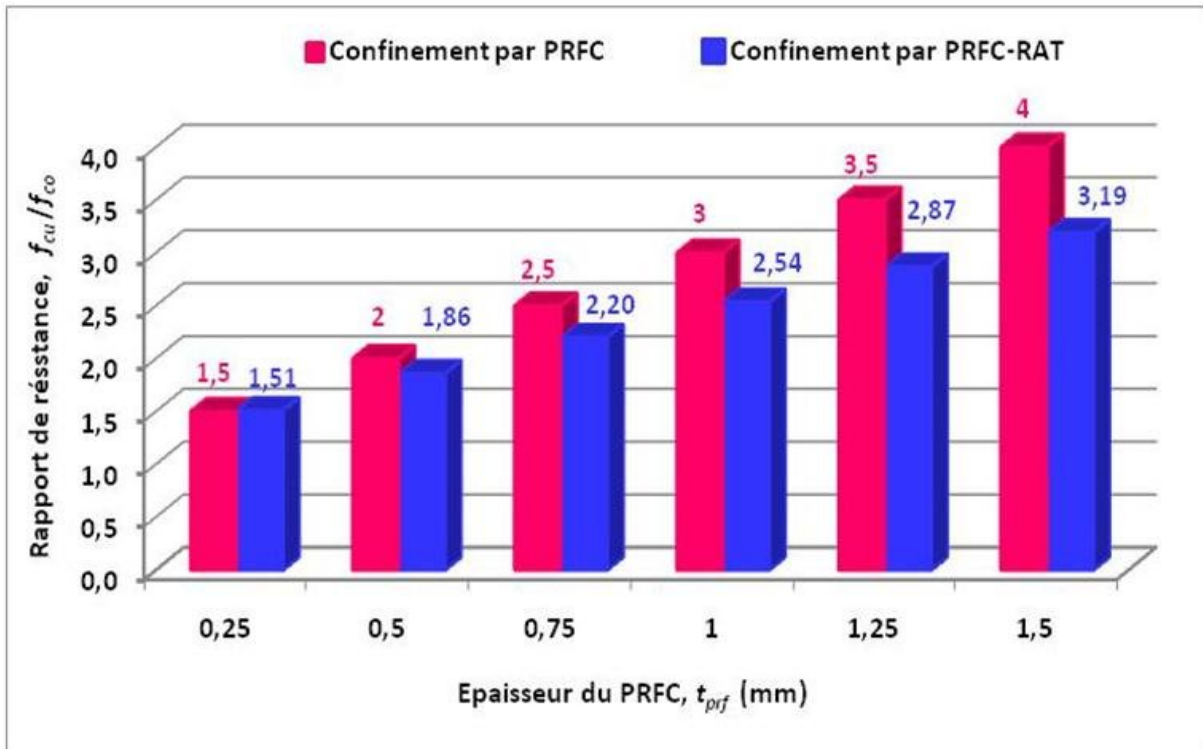
- ❖ Le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) diminue en fonction de l'augmentation de la résistance en compression ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Le taux de diminution du rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de  $f_{co}$  pour le béton confiné par PRFC ainsi que par PRFC+RAT est plus important pour les colonnes confinées avec un nombre de couche en PRFC élevé ;
- ❖ Pour chaque valeur de  $f_{co}$ , le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) augmente proportionnellement avec l'augmentation du nombre de couches ( $n$ ) ;
- ❖ Le gain de résistance pour les deux types de confinement est considérable pour le cas des colonnes préparées avec des faibles résistances en compression ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux donne un gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) élevé comparativement au modèle proposé pour le béton confiné par l'effet combiné PRFC-RAT. ;
- ❖ Le modèle de confinement par seulement PRFC a un effet plus propice aussi bien sur la résistance que sur la déformation comparativement au modèle par l'effet combiné PRFC-RAT.



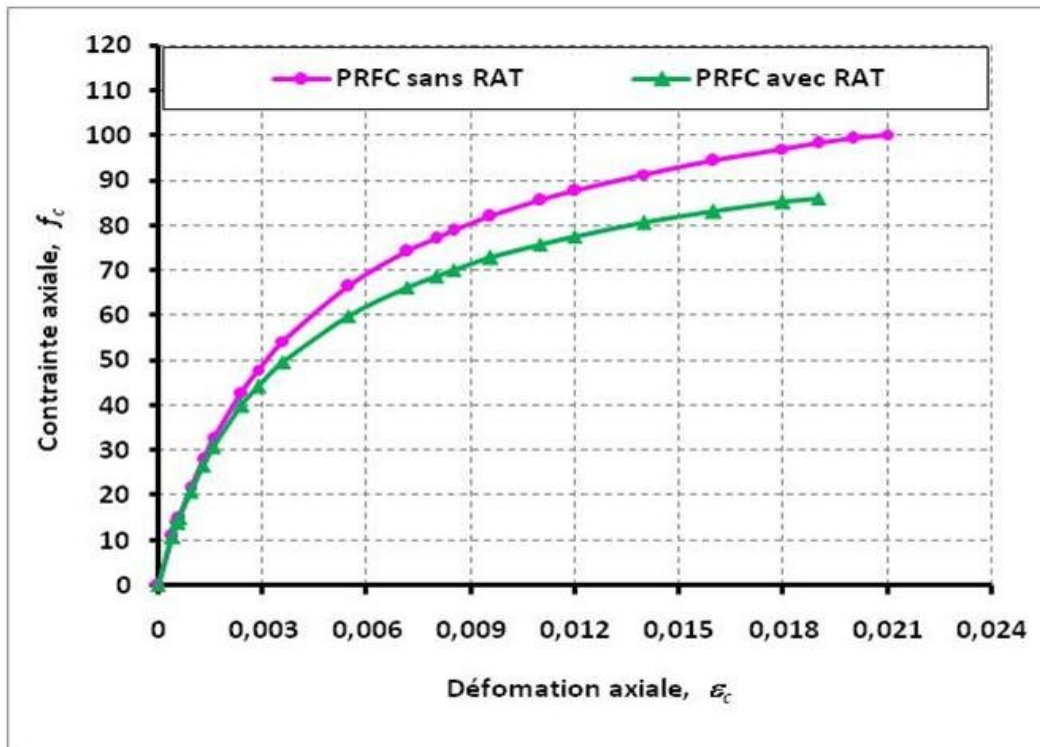
**Figure 5.5 :** Influence de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $D= 400$  mm,  $f_{prf}= 2500$  MPa.



**Figure 5.6:** Influence de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D= 400$  mm,  $f_{prf}= 2500$  MPa,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.



**Figure 5.7 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ) pour les deux types de confinement (par PRFC et par PRFC-RAT), Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.



**Figure 5.8 :** Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D = 400$  mm,  $f_{co} = 40$  MPa,  $t_{prf} = 1,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vt} = 0,77$  %, et  $f_{ys} = 400$  MPa.

#### 5.4. EFFET DE LA RÉSISTANCE EN TRACTION DU PRFC ( $f_{prf}$ )

La résistance en traction ( $f_{prf}$ ) est une propriété mécanique du matériau composite PRFC, qui a un effet considérable sur les modèles de confinement renforcés, par les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Dans cette partie, on essaye de fulgurer leur effet et cerner mieux leur variation en fonction de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ).

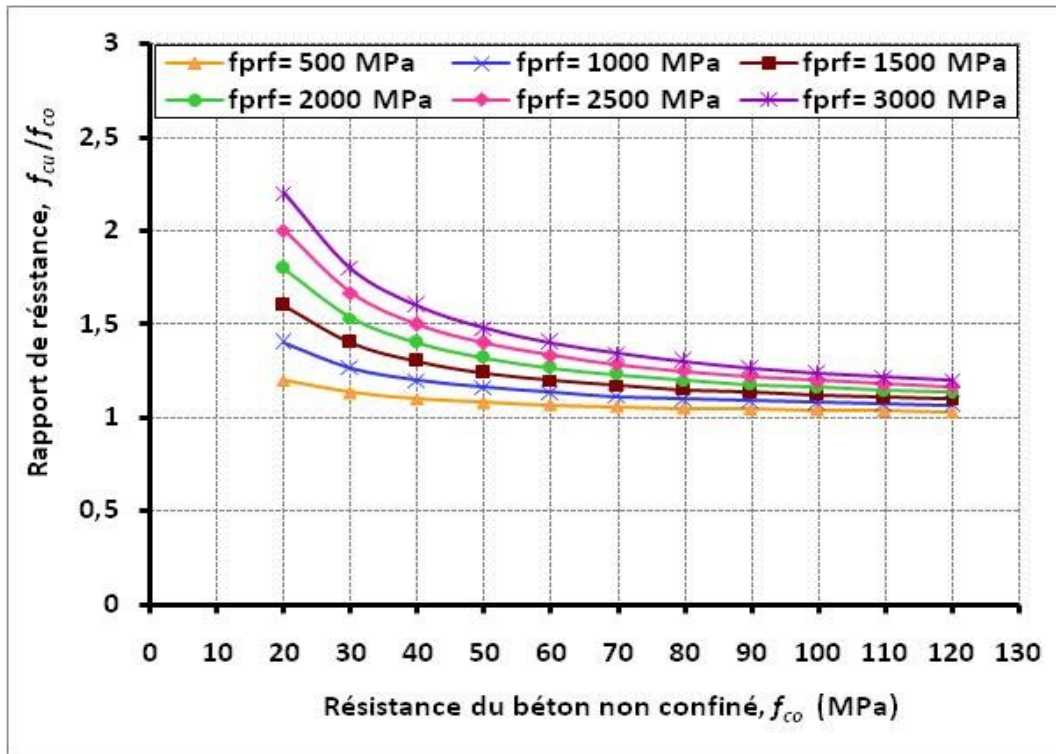
La Figure 5.9 esquisse bien l'effet des différentes valeurs de résistance en traction ( $f_{prf}$ ) sur le rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux, en fonction de  $f_{co}$ . D'après cette Figure, on observe que chaque courbe  $f(f_{prf})$  diminue avec l'augmentation de la résistance en compression ( $f_{co}$ ). Par ailleurs, l'augmentation de résistance en traction ( $f_{prf}$ ) de 500 MPa à 3000 MPa, ces courbes  $f(f_{prf})$  s'améliorent largement, ceci prouve les résultats exposés par Sadeghian et Fam (2015). Les mêmes remarques sont enregistrées sur la figure 5.10, pour le modèle de l'effet combiné PRFC-RAT proposé.

L'histogramme de la Figure 5.11 éclaire visiblement la comparaison entre les gains de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) donnés par le modèle proposé en (4.6) pour le béton confiné par PRFC et en (4.15) pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT. D'après cet histogramme, on constate que les gains de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) sont améliorés par le confinement avec PRFC sans aciers transversaux, qu'avec l'effet combiné PRFC-RAT pour  $\rho_{vt} = 0,77\%$ , pour des faibles valeurs de  $f_{prf}$ . Par ailleurs, pour les valeurs de  $f_{prf}$  supérieures à 1500MPa le gain de résistance diminue avec l'ajout de l'effet des aciers transversaux.

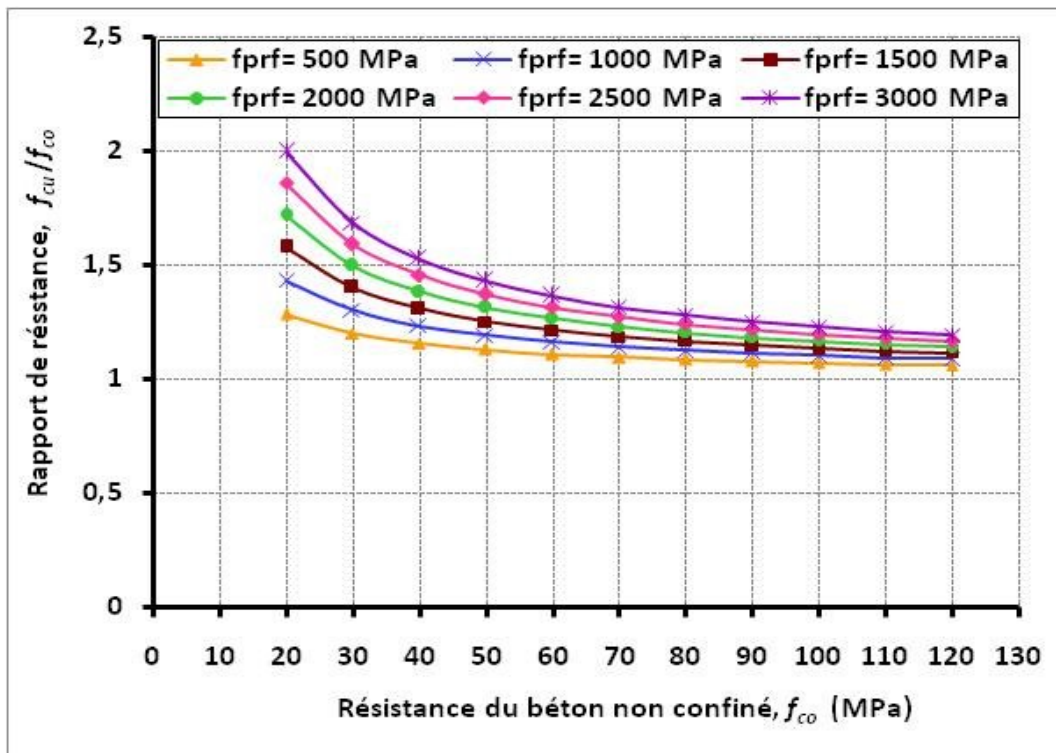
La Figure 5.12 schématise une confrontation globale entre les modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans, et avec l'effet des aciers transversaux pour  $\rho_{vt} = 0,77\%$ , et  $f_{prf} = 3000\text{MPa}$ . Cette Figure, indique que le modèle proposé pour le confinement par PRFC compte des valeurs de résistance supérieures à celles estimées par le modèle proposé pour l'effet combiné PRFC-RAT, néanmoins ce dernier assure une déformation ultime très significative que le modèle avec PRFC seulement.

En vertu de cette analyse, on peut rapporter pour chaque valeur de  $f_{prf}$  que :

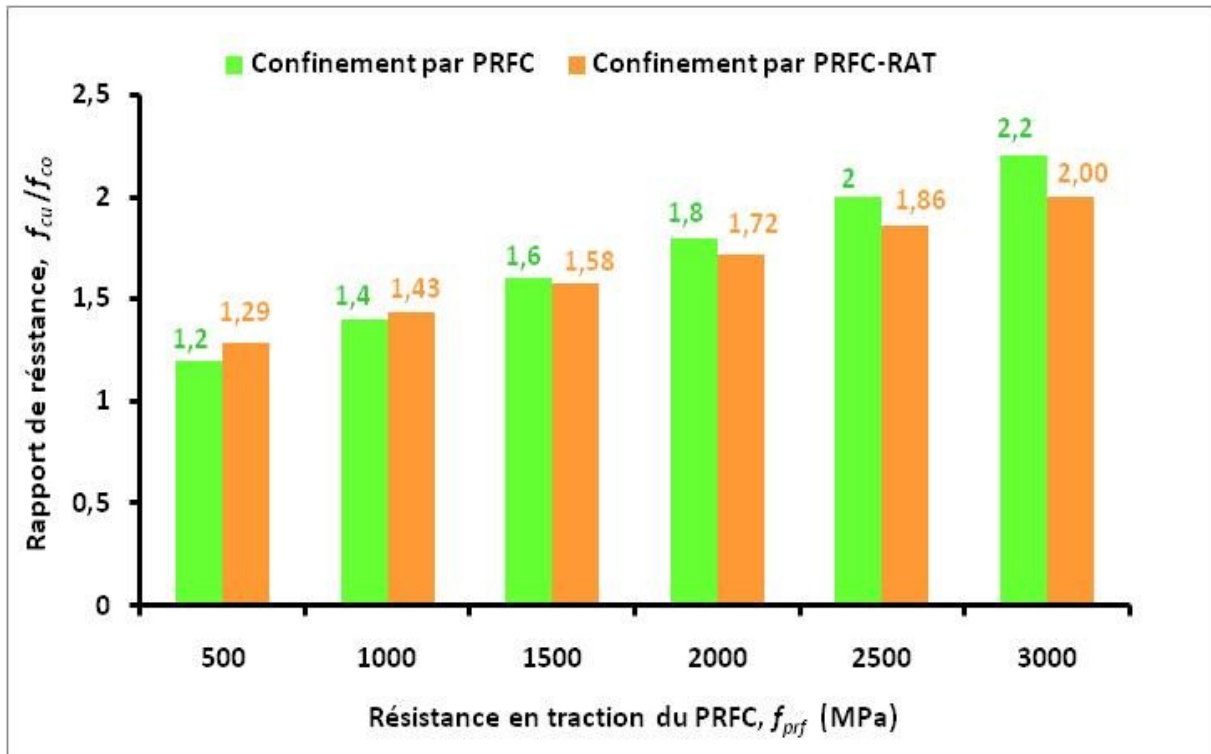
- ❖ La courbe de rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) réduit en fonction de l'augmentation de la résistance en compression ( $f_{co}$ );
- ❖ Pour chaque valeur de  $f_{co}$ , le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) augmente proportionnellement avec l'accroissement de la résistance ( $f_{prf}$ )
- ❖ Le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour les deux types de confinement est élevé pour le cas des colonnes préparés avec des faibles résistances en compression ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Le confinement par PRFC amplifie le gain de résistance comparativement au confinement par PRFC-RAT pour des valeurs de  $f_{prf}$  élevées ;
- ❖ Le modèle contrainte-déformation proposé pour le confinement par PRFC surévalue les valeurs de résistance comparativement au modèle développé pour le confinement par la combinaison PRFC-RAT ;
- ❖ Le modèle contrainte-déformation de confinement par la combinaison PRFC-RAT a un effet plus rentable sur la déformation que le modèle par PRFC seulement.



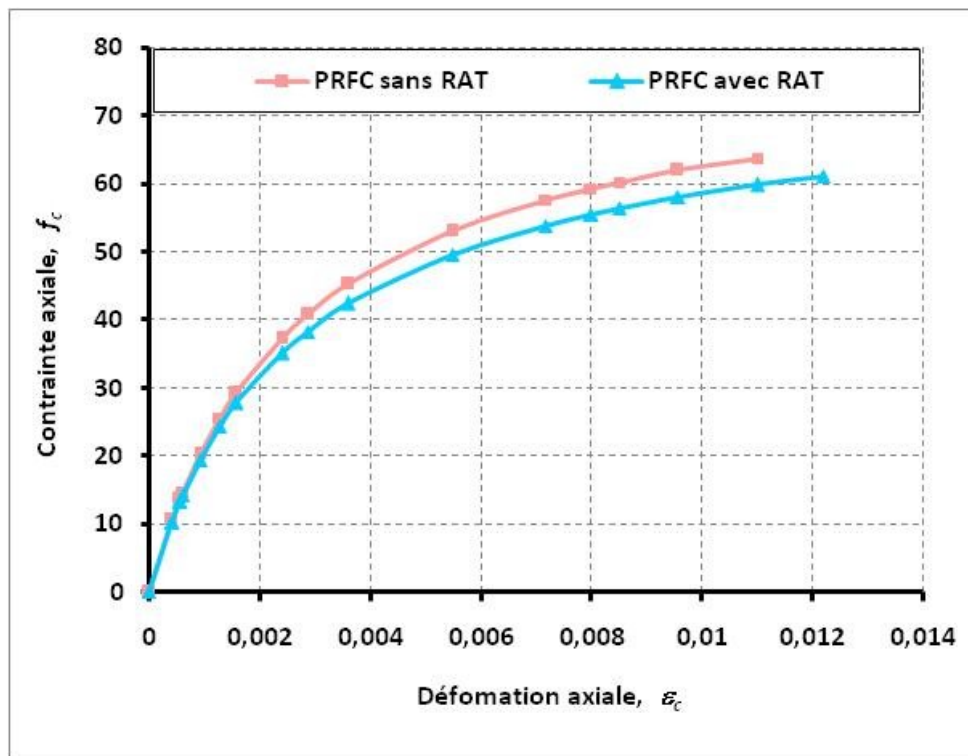
**Figure 5.9 :** Influence de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans RAT, avec :  $D= 400$  mm,  $t_{prf}= 0,5$  mm.



**Figure 5.10:** Influence de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D= 400$  mm,  $t_{prf}= 0,5$  mm,  $\rho_{vt}= 0,77$  %, et  $f_{ys}= 400$  MPa.



**Figure 5.11** : Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la résistance en traction du PRFC ( $f_{prf}$ ) pour les deux types de confinement (par PRFC et par PRFC-RAT), Avec  $f_{co} = 20$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.



**Figure 5.12** : Comparaison des modèles contraintes-déformations proposés pour le béton confiné par PRFC sans RAT et par PRFC avec RAT, Pour  $D = 400$  mm,  $f_{co} = 40$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 3000$  MPa,  $\rho_{vt} = 0,77$  %, et  $f_{ys} = 400$  MPa.

### 5.5. EFFET DE LA LIMITE ÉLASTIQUE DES ACIERS TRANSVERSAUX ( $f_{ys}$ )

Dans le confinement des colonnes en béton sous l'effet combiné du polymère renforcé de fibre de carbone (PRFC) et aciers transversaux (RAT), en plus des propriétés mécaniques du PRFC qui ont un effet avantageux sur leurs comportements, les propriétés mécaniques de (RAT) notamment la limite élastique ( $f_{ys}$ ) a également un impact conséquent sur le comportement du béton confiné. Dans la suite, on va visualiser cet effet.

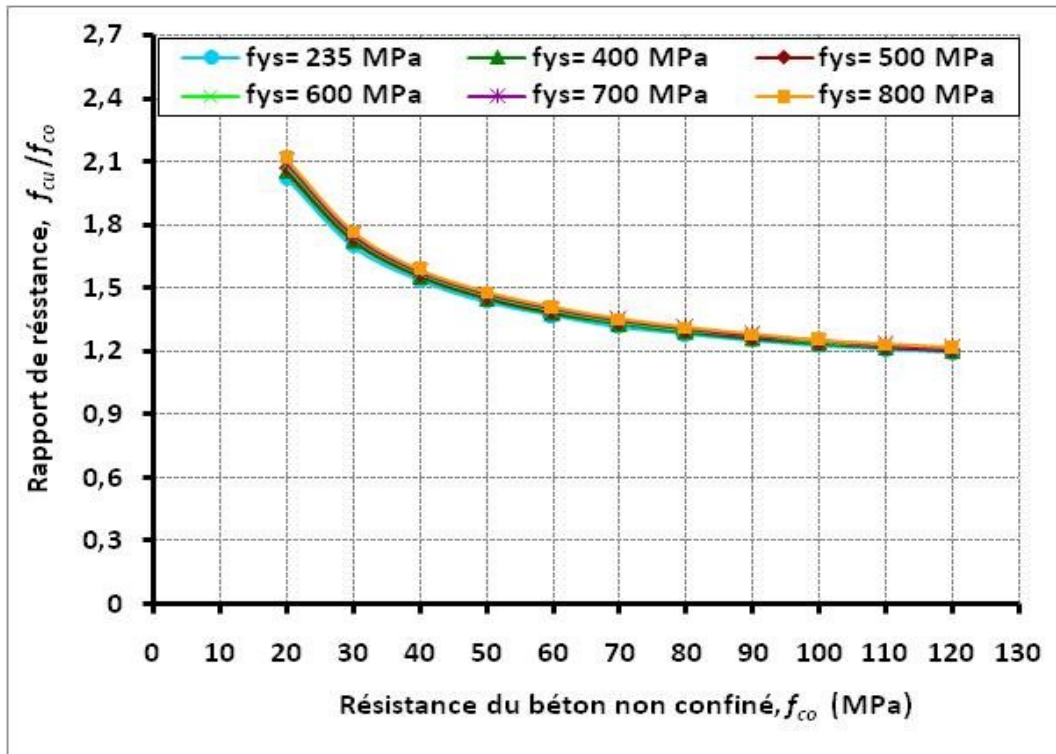
La Figure 5.13 dresse l'effet de  $f_{ys}$  sur le rapport de résistance en compression ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le béton confiné sous l'effet combiné PRFC-RAT en fonction de la résistance en compression ( $f_{co}$ ). L'examen de cette Figure, nous permet de voir que les courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) réduits avec l'accroissement de  $f_{co}$ , ceci est notable pour chaque valeur de  $f_{ys}$ . Par ailleurs, une amélioration très faible, pratiquement illisible des courbes  $f(f_{ys})$  en fonction de l'agrandissement de la limite élastique  $f_{ys}$  de 235MPa jusqu'à 800MPa, est observée. En effet, on peut déduire que l'effet de  $f_{ys}$  sur le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) est assez faible.

Dans ce contexte, la Figure 5.14 visualise l'évolution du gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) sous l'influence de la variation limite élastique ( $f_{ys}$ ), pour le modèle de confinement par PRFC+RAT avec  $\rho_{vt} = 0,77\%$ . D'après l'histogramme de cette figure, on remarque une faible progression du gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) avec la variation de  $f_{ys} = 235\text{MPa}$  jusqu'à  $f_{ys} = 800\text{MPa}$ .

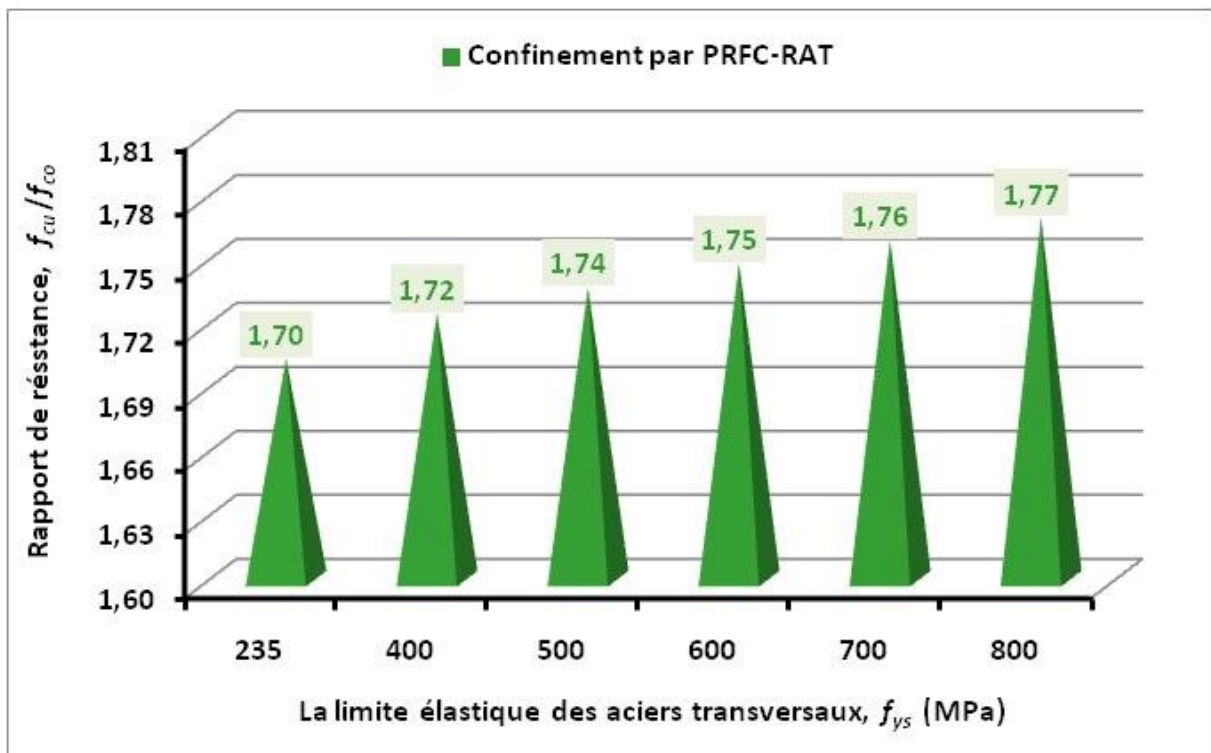
La Figure 5.15 expose l'influence de la limite élastique ( $f_{ys}$ ) sur le comportement contrainte-déformation pour le béton confiné par PRFC+RAT avec  $\rho_{vt} = 0,77\%$ . Cette Figure confirme bien que l'augmentation de  $f_{ys}$  n'a pas d'influence sur le comportement contrainte-déformation, où on observe clairement une coïncidence de différentes courbes correspondantes à  $f_{ys}$ , celle-ci diverge totalement avec ce qui a été montré par Eid et al. (2009). Par ailleurs, l'effet réel de  $f_{ys}$  est bien observé sur la déformation ultime, où on constate une augmentation de ce paramètre avec l'augmentation de  $f_{ys}$ . Ce résultat est prouvé aussi par Eid et al. (2009).

Conformément de ce qui précède, on peut dégager pour chaque valeur de  $f_{ys}$  que :

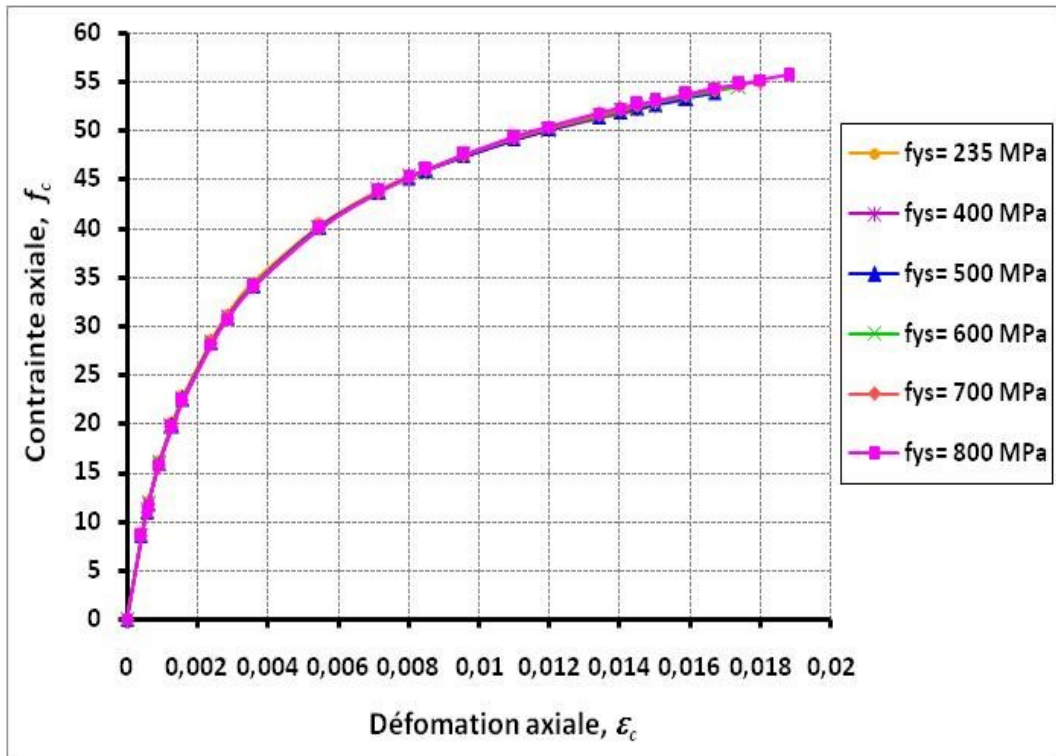
- ❖ Le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) réduit en fonction de l'accroissement de la résistance ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ L'accroissement de  $f_{ys}$  n'a pas d'influence sur les courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ Une amélioration très faible du gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le confinement par la combinaison PRFC-RAT en fonction de la variation de  $f_{ys}$  ;
- ❖ L'influence de  $f_{ys}$  sur le comportement contrainte-déformation du béton confiné par PRFC-RAT est insignifiant, toutefois pour la déformation ultime ce paramètre a un effet très propice.



**Figure 5.13:** Influence de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.



**Figure 5.14 :** Comparaison du gain de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $f_{co} = 30$  MPa et  $\rho_{vt} = 0,77$  %.



**Figure 5.15 :** Influence de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT

Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $\rho_{vt} = 0,77$  %.

## 5.6. EFFET DU POURCENTAGE VOLUMIQUE DES ACIERS TRANSVERSAUX ( $\rho_{vt}$ )

L'étude de l'effet des paramètres précédents a été traitée avec une valeur constante du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ), dans le cas du modèle de confinement des colonnes par la combinaison PRFC-RAT. Par ailleurs, le pourcentage  $\rho_{vt}$  est un facteur majeur qui influe substantiellement sur le confinement des colonnes. Il est souligné que ce paramètre est formé par d'autres facteurs, à savoir : la section ( $A_{st}$ ) des aciers transversaux, l'espacement ( $s$ ), le diamètre du noyau de béton ( $d_c$ ), ainsi que le facteur de forme (cerces ou spirales) des aciers transversaux ( $k_e$ ). Afin de visualiser clairement l'effet de ce paramètre, on essaye d'analyser leur apport sur le comportement du béton confiné sous l'effet combiné PRFC-RAT, en fonction de la variation des paramètres qui sont déjà traités pour une seule valeur de  $\rho_{vt}$ , en l'occurrence le diamètre de la colonne ( $D$ ), l'épaisseur du PRFC ( $t_{prf}$ ), et la limite d'élasticité des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ).

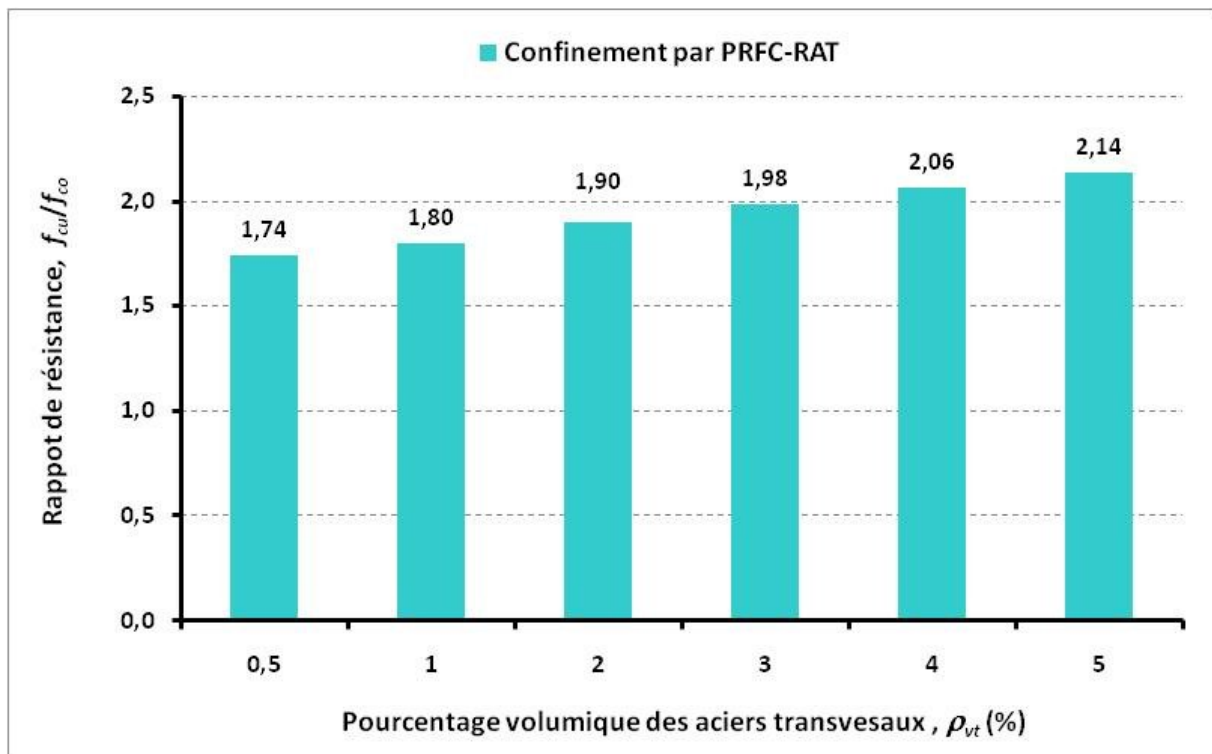
La Figure 5.16 illustre l'influence du pourcentage ( $\rho_{vt}$ ) sur le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, en fonction de la résistance en compression du béton non confiné ( $f_{co}$ ), en considérant une colonne de 300mm de diamètre. L'analyse de cette figure montre que les courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) pour chaque valeur  $\rho_{vt}$  diminuent toute en augmentant la résistance ( $f_{co}$ ). Dans la même figure, on constate que ces courbes s'améliorent avec l'accroissement de  $\rho_{vt}= 0,5\%$  jusqu'à  $\rho_{vt}= 5\%$ . Ce constat converge bien avec celui déduit par Eid *et al.* (2009). L'évolution du gain de résistance avec la variation de  $\rho_{vt}= 0,5\%$  jusqu'à  $\rho_{vt}= 5\%$  est schématisée dans l'histogramme de la figure 5.17. D'après cet histogramme, on constate que la variation de  $\rho_{vt}= 0,5\%$  jusqu'à  $\rho_{vt}= 5\%$  améliore significativement le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ).

La confrontation des Figures (5.16, 5.18 et 5.19) montre que l'enveloppe de six (6) courbes de  $f(\rho_{vt})$  diminue avec l'augmentation de  $D$  de 300mm à 800mm. L'histogramme de la Figure 5.20 expose la comparaison des gains de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de  $\rho_{vt}$  pour des colonnes en béton de différents diamètres confinées par PRFC+RAT. Cet histogramme indique clairement que le gain de résistance est plus grand pour  $D = 300\text{mm}$  que pour  $D = 600\text{mm}$  et  $D = 800\text{mm}$ . En effet, on peut déduire que l'effet de  $\rho_{vt}$  est très efficace pour les faibles diamètres des colonnes.

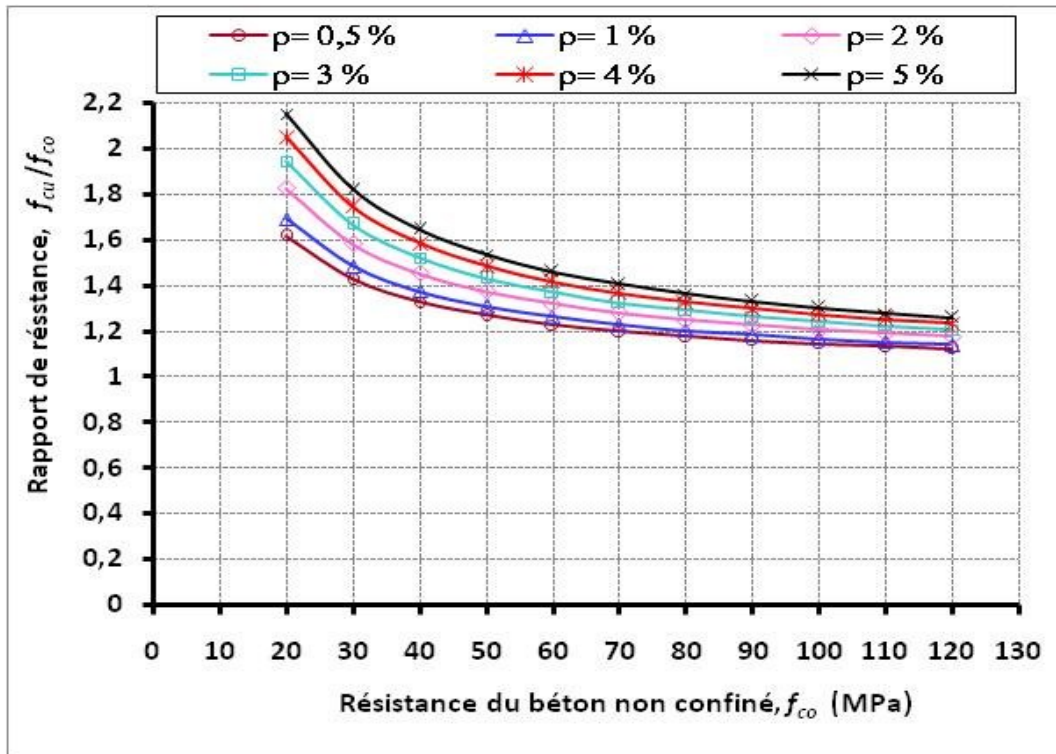
L'analyse de l'effet de  $\rho_{vt}$  sur le comportement global du modèle contrainte-déformation, pour des colonnes en béton confiné sous l'effet combiné PRFC-RAT, pour des valeurs de  $D = 300\text{mm}$ ,  $D = 600\text{mm}$  et  $D = 800\text{mm}$ , est présentée dans les Figures 5.21, 5.22 et 5.23. D'après ces Figures, on peut constater que la deuxième branche ascendante est largement améliorée avec l'augmentation de  $\rho_{vt}$ . D'autre part, la confrontation entre l'enveloppe de six courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) des trois Figures montre que cet effet favorable est très considérable pour les faibles diamètres  $D$ .



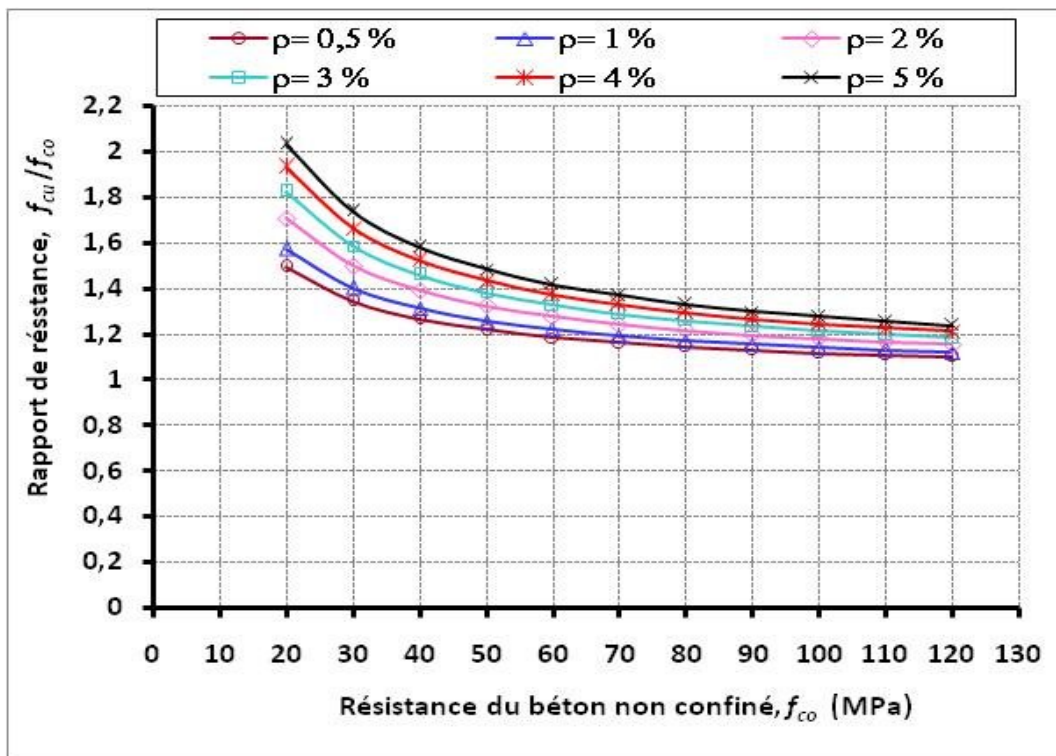
**Figure 5.16 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



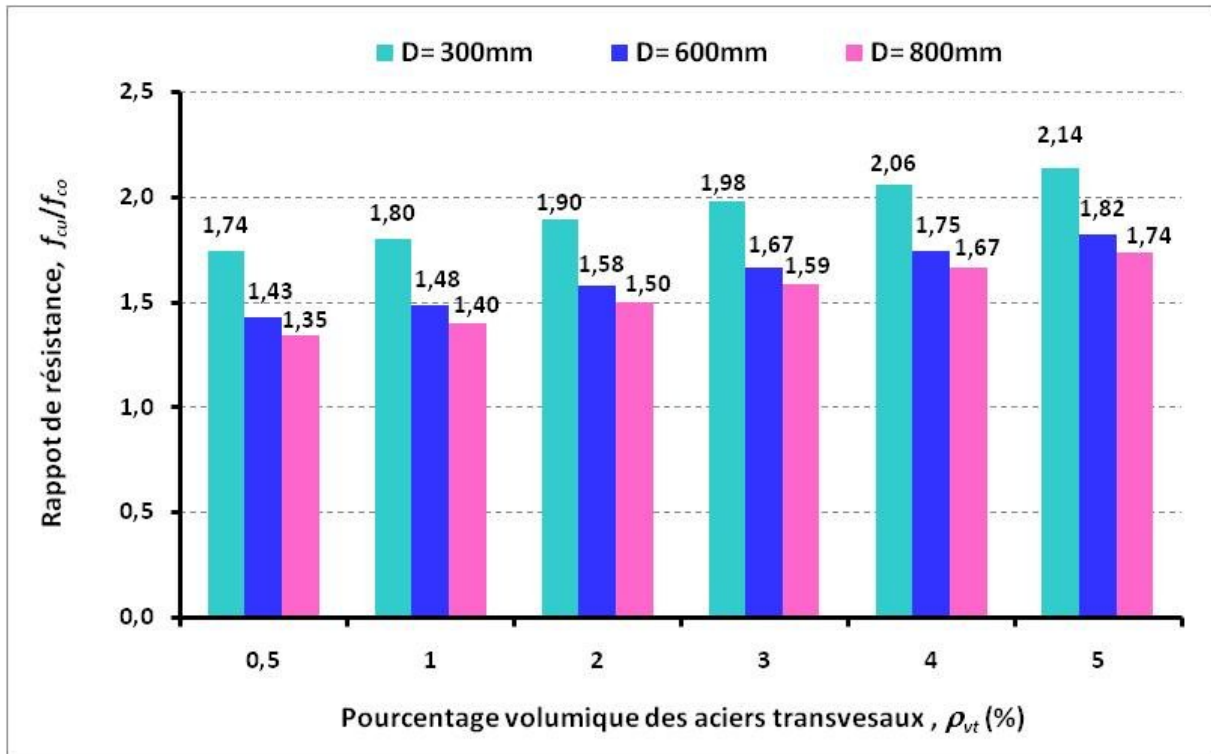
**Figure 5.17 :** Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC+RAT proposé. Avec  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa.



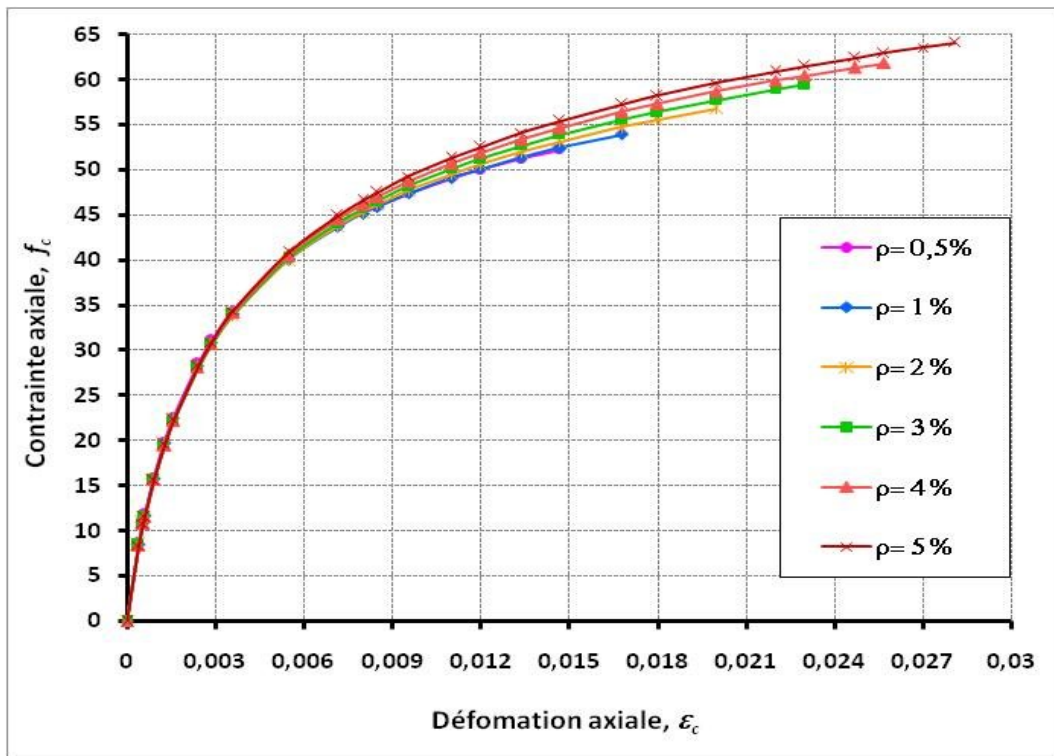
**Figure 5.18 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 600$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



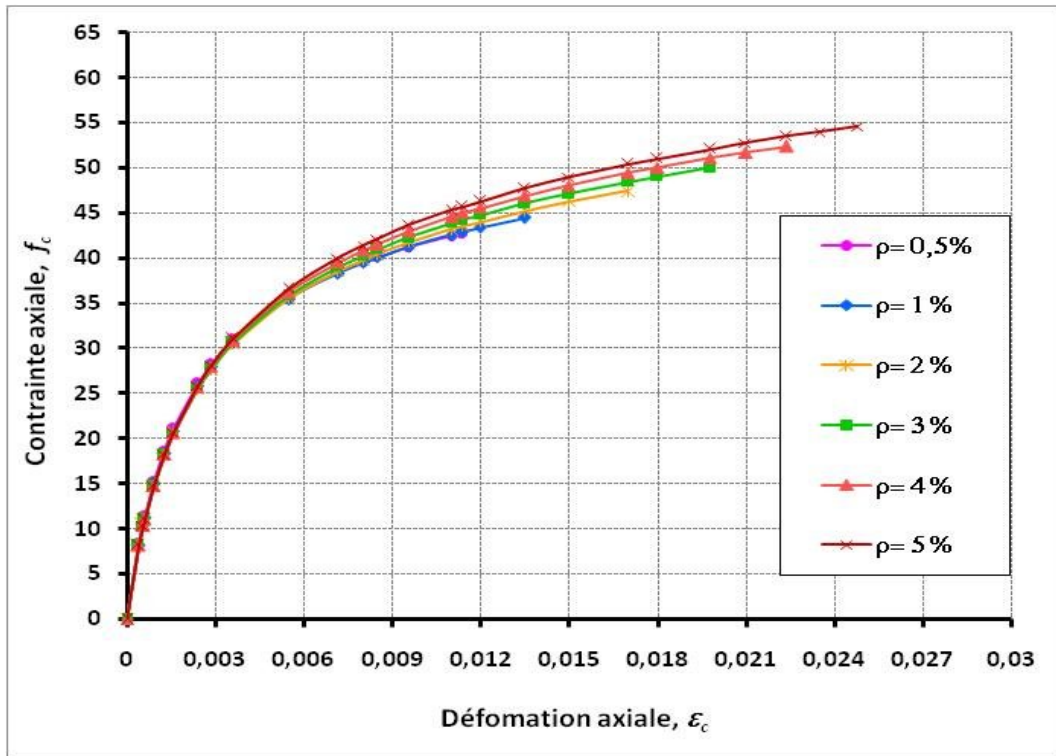
**Figure 5.19 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 800$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.20 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cul}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC+RAT, Avec  $D = 300$  mm,  $D = 600$  mm, et  $D = 800$  mm.

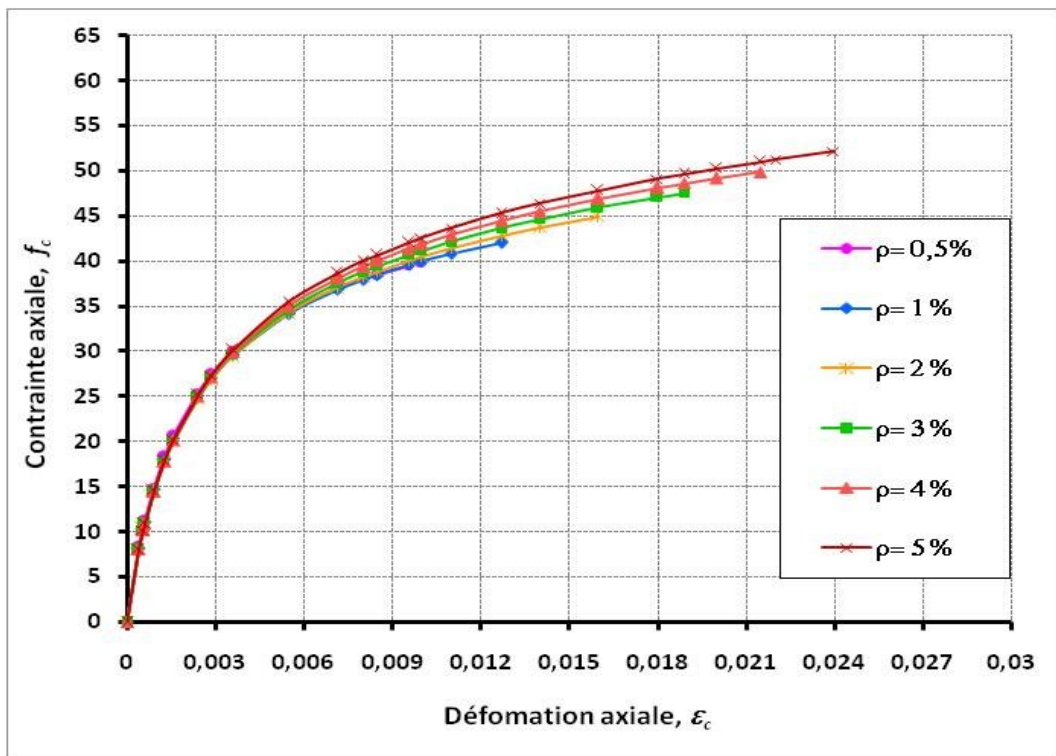


**Figure 5.21 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT  
 Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.22 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT

Pour  $D = 600$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.23:** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC+RAT

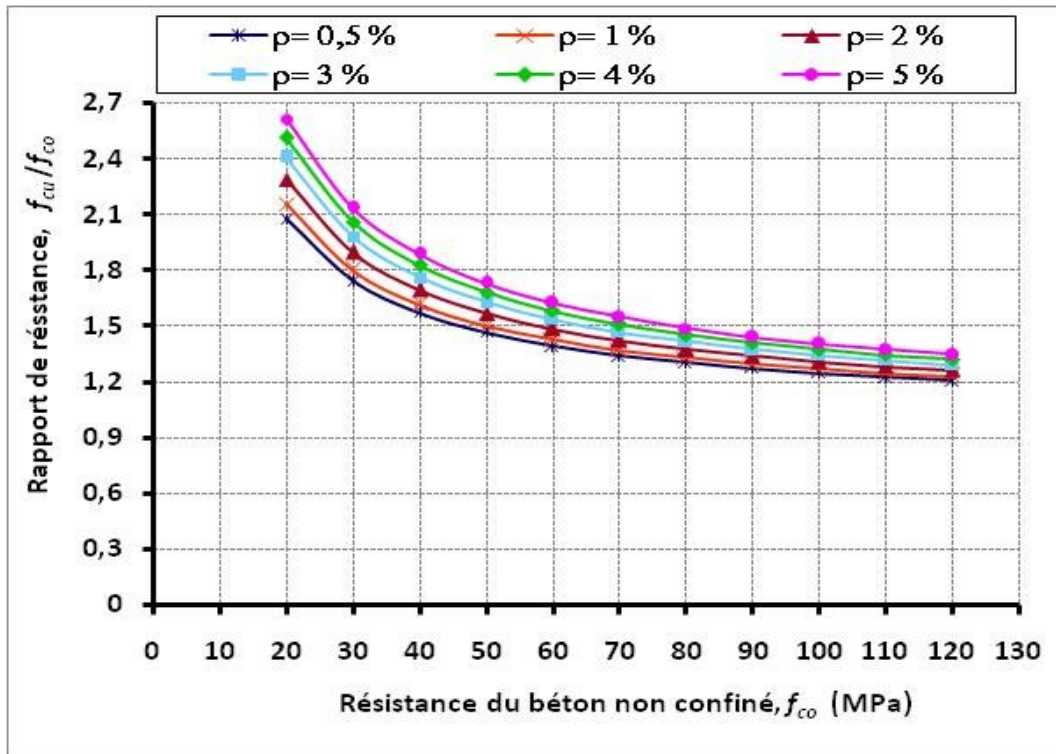
Pour  $D = 800$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.

Dans ce paragraphe, on essaye de visualiser l'effet de  $\rho_{vt}$  en fonction de l'augmentation de la limite élastique des aciers transversaux ( $f_{ys}$ ).

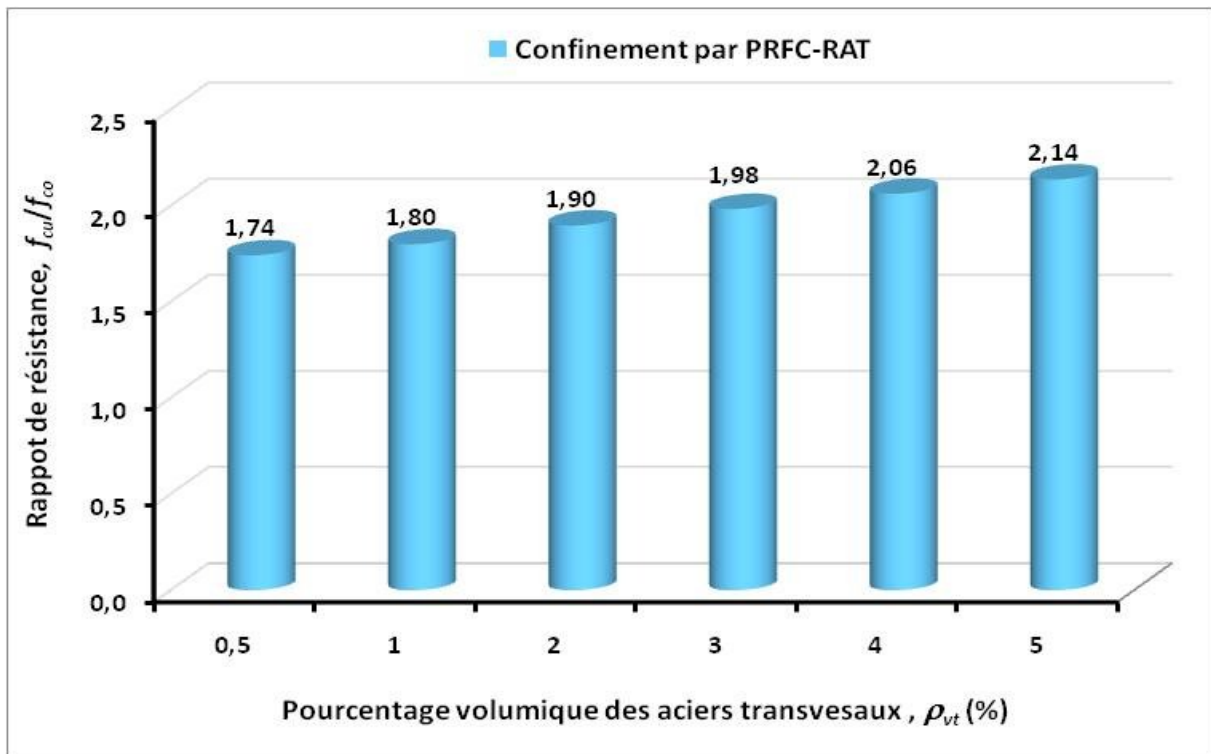
La Figure 5.24 illustre l'effet de  $\rho_{vt}$  sur le rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la résistance  $f_{co}$ , pour le béton confiné par la combinaison PRFC et aciers transversaux avec  $f_{ys} = 400\text{MPa}$ . D'après cette Figure, on enregistre que les courbes de  $f(\rho_{vt})$  réduisent en fonction de l'augmentation de  $f_{co}$ . Par ailleurs, une progression acceptable de ces courbes a été observée pour une variation de  $\rho_{vt} = 0,5\%$  jusqu'à  $\rho_{vt} = 5\%$ . Les gains de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) du béton confiné sont clairement affichés dans l'histogramme de la Figure 5.25.

L'étalement des Figures 5.24, 5.26 et 5.27 indique que l'enveloppe de six (6) courbes de  $f(f_{ys})$  augmente avec l'augmentation de  $f_{ys}$  de 400MPa à 800MPa. Dans le même contexte, l'histogramme de la Figure 5.28 illustre une comparaison entre les gains de résistance obtenus, selon le modèle proposé pour le confinement par la combinaison PRFC et RAT dans les Figures 5.24, 5.26 et 5.27. Cet histogramme expose lisiblement que l'influence de  $\rho_{vt}$  est importante pour des valeurs élevées de  $f_{ys}$ . De plus, le gain de résistance s'améliore lorsque  $\rho_{vt}$  devient supérieur ou égal à 1%. Cependant, pour des faibles valeurs de  $\rho_{vt}$ , le modèle proposé pour les trois valeurs de  $f_{ys}$  donne des gains de résistance presque les mêmes, avec une très légère amélioration.

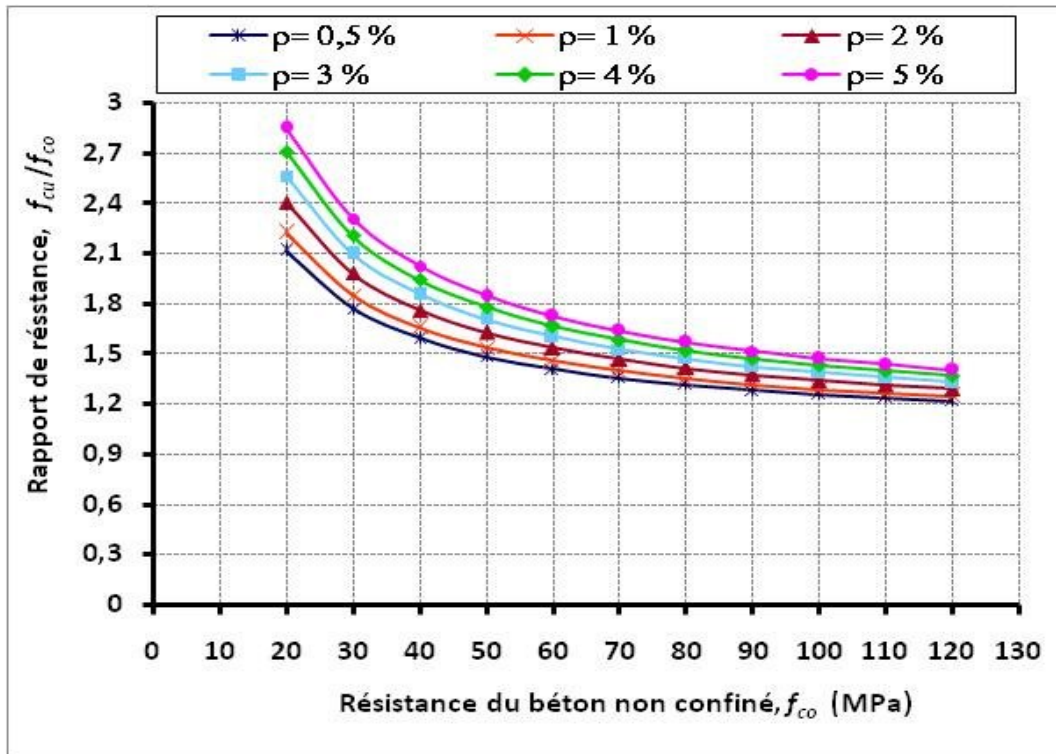
Les Figures 5.29, 5.30 et 5.31, exposent les enveloppes de six (6) courbes représentant le comportement global du modèle contrainte-déformation proposé pour le confinement par PRFC+RAT, avec la variation de  $\rho_{vt}$  correspondant au  $f_{ys} = 400\text{MPa}$ ,  $f_{ys} = 600\text{MPa}$  et  $f_{ys} = 800\text{MPa}$ , respectivement. D'après ces Figures, on observe que la deuxième branche s'améliore largement avec l'accroissement de  $\rho_{vt}$  de 0,5% jusqu'à 5%. De plus, la comparaison de l'enveloppe de ces six courbes dans les Figures 5.29, 5.30 et 5.31 indique que ces courbes continuent à s'améliorer avec l'augmentation de  $f_{ys}$ . Ceci explique que l'impact favorable de  $\rho_{vt}$  dépend des valeurs élevées de  $f_{ys}$ .



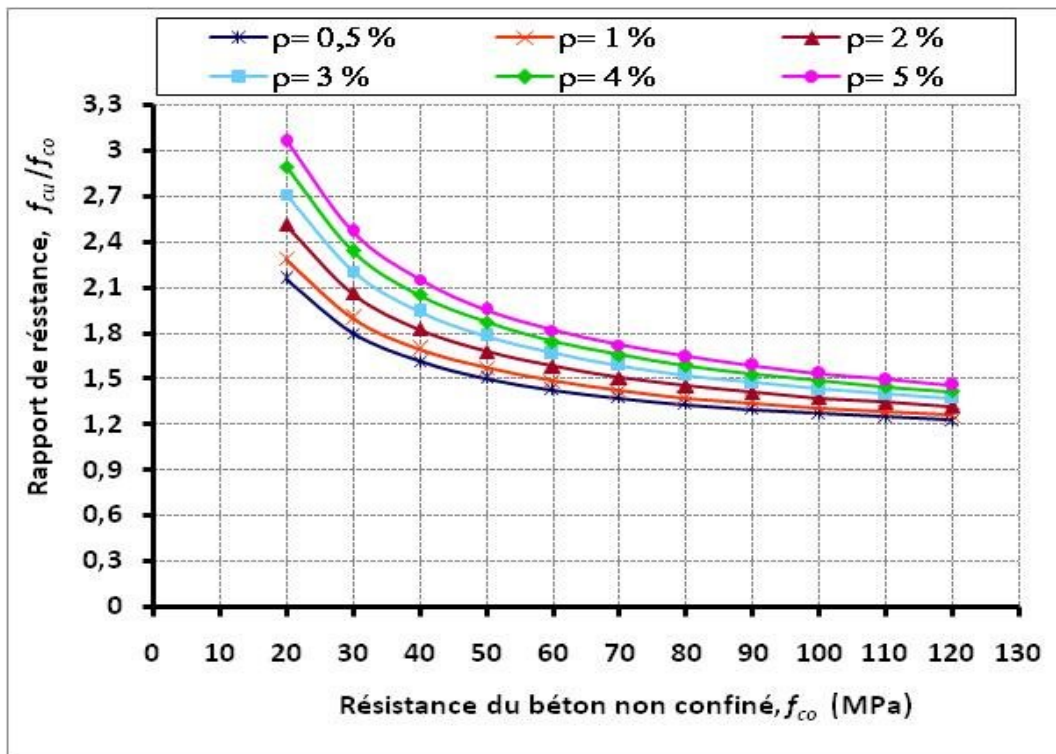
**Figure 5.24 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



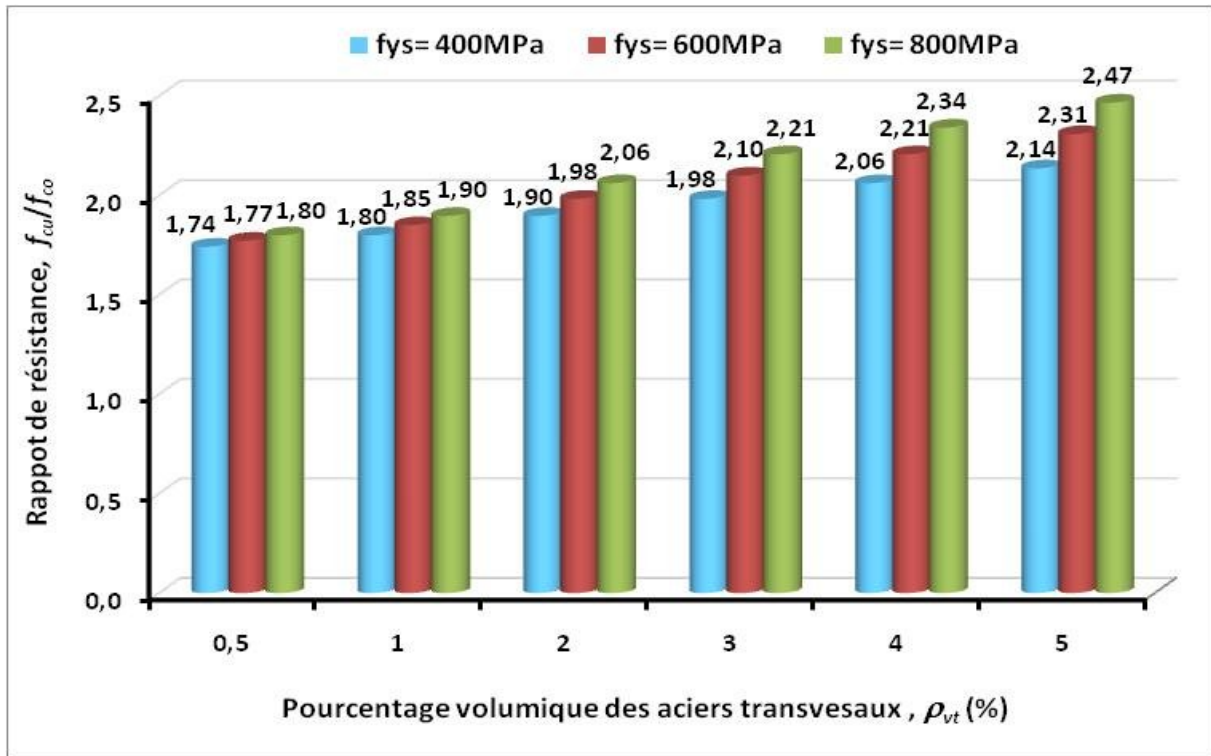
**Figure 5.25 :** Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $f_{ys} = 400$  MPa,  $f_{co} = 30$  MPa.



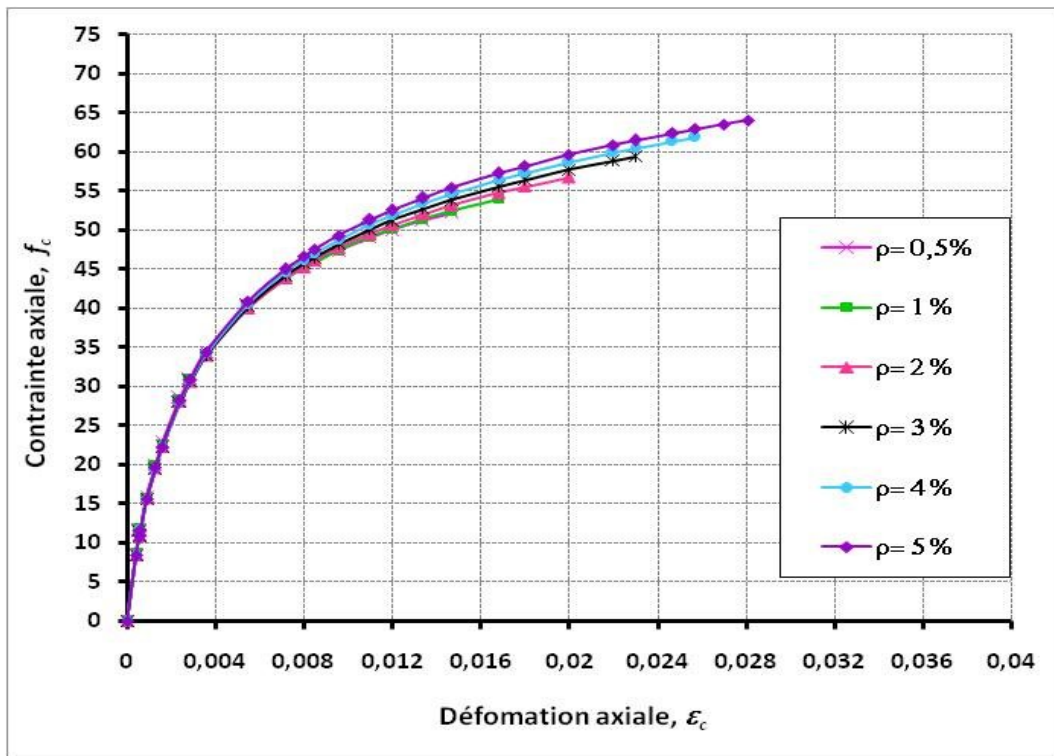
**Figure 5.26 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 600$  MPa.



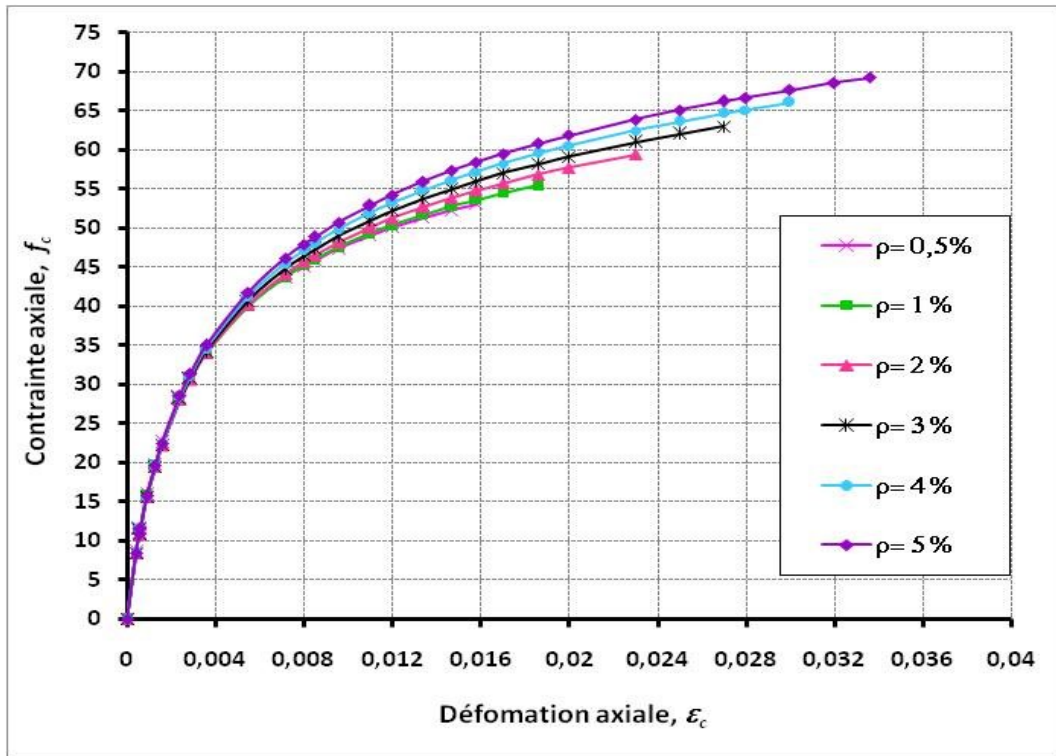
**Figure 5.27 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 800$  MPa.



**Figure 5.28 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC-RAT, Avec  $f_{ys} = 400 \text{ MPa}$ ,  $f_{ys} = 600 \text{ MPa}$ , et  $f_{ys} = 800 \text{ MPa}$ .

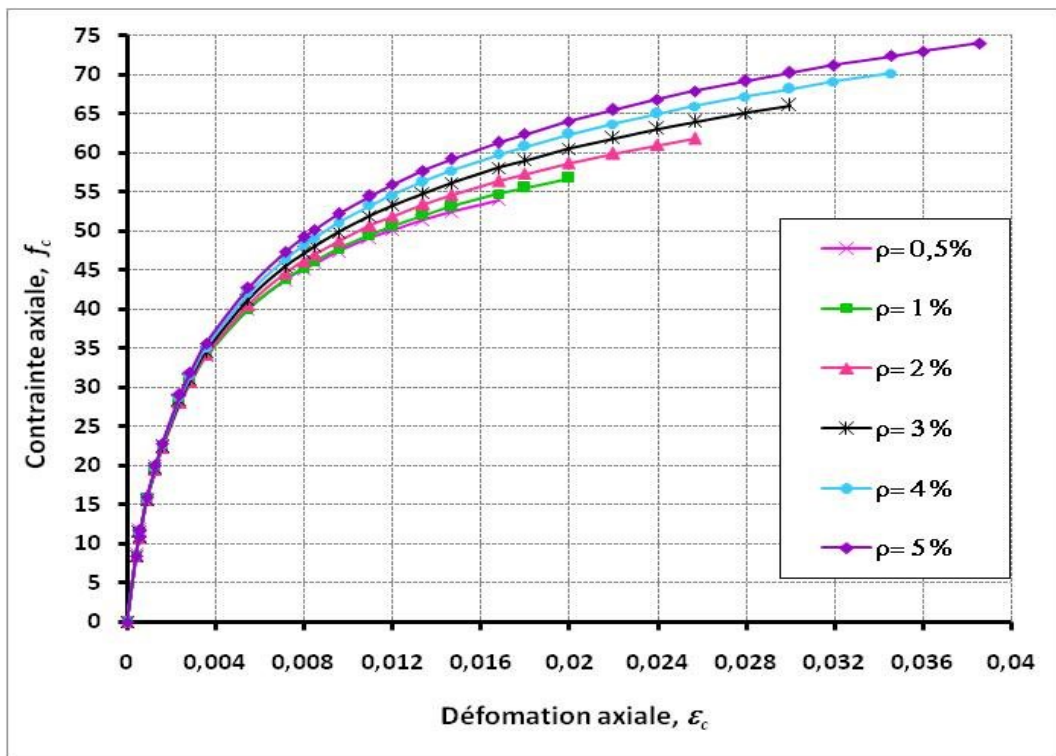


**Figure 5.29 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT  
 Pour  $D = 300 \text{ mm}$ ,  $f_{co} = 30 \text{ MPa}$ ,  $t_{prf} = 0,5 \text{ mm}$ ,  $f_{prf} = 2500 \text{ MPa}$ ,  $f_{ys} = 400 \text{ MPa}$ .



**Figure 5.30 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT

Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 600$  MPa.



**Figure 5.31 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT

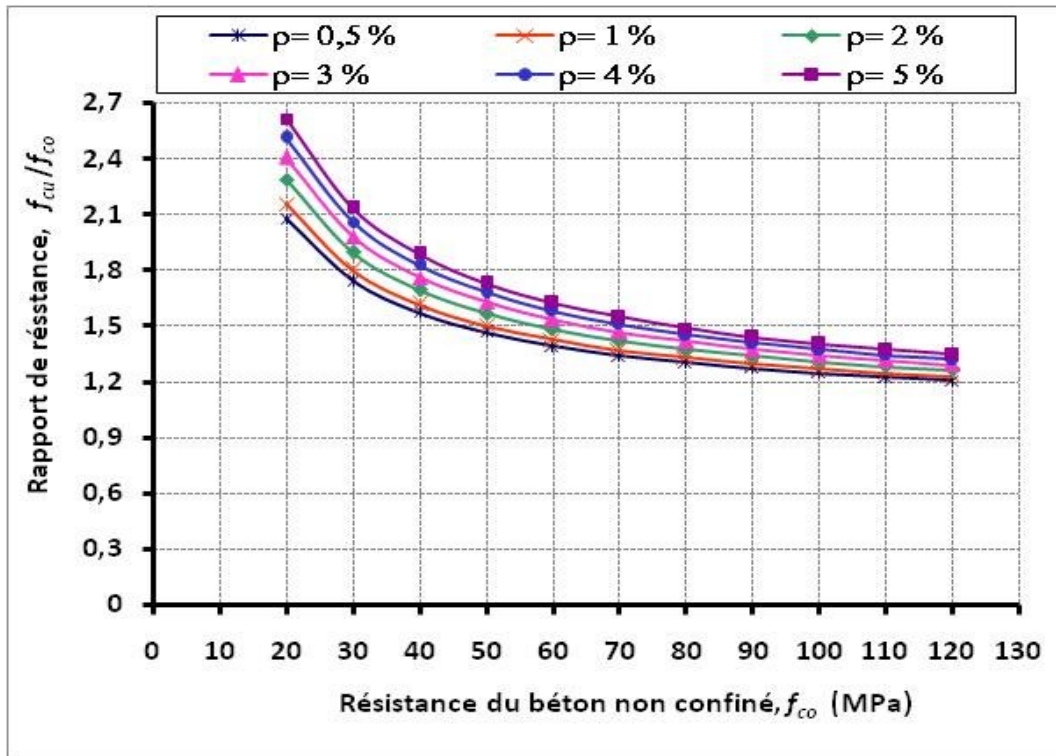
Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 800$  MPa.

Dans ce paragraphe, l'effet du pourcentage  $\rho_{vt}$  sera traité en fonction de l'épaisseur du matériau composite ( $t_{prf}$ ) ou le nombre de couches ( $n$ ) de PRFC. Trois valeurs de nombre de couches seront considérées, à savoir : ( $n$ ) de PRFC  $n = 2$  ( $t_{prf} = 0,5\text{mm}$ ),  $n = 4$  ( $t_{prf} = 1\text{mm}$ ) et  $n = 5$  ( $t_{prf} = 1,5\text{mm}$ ).

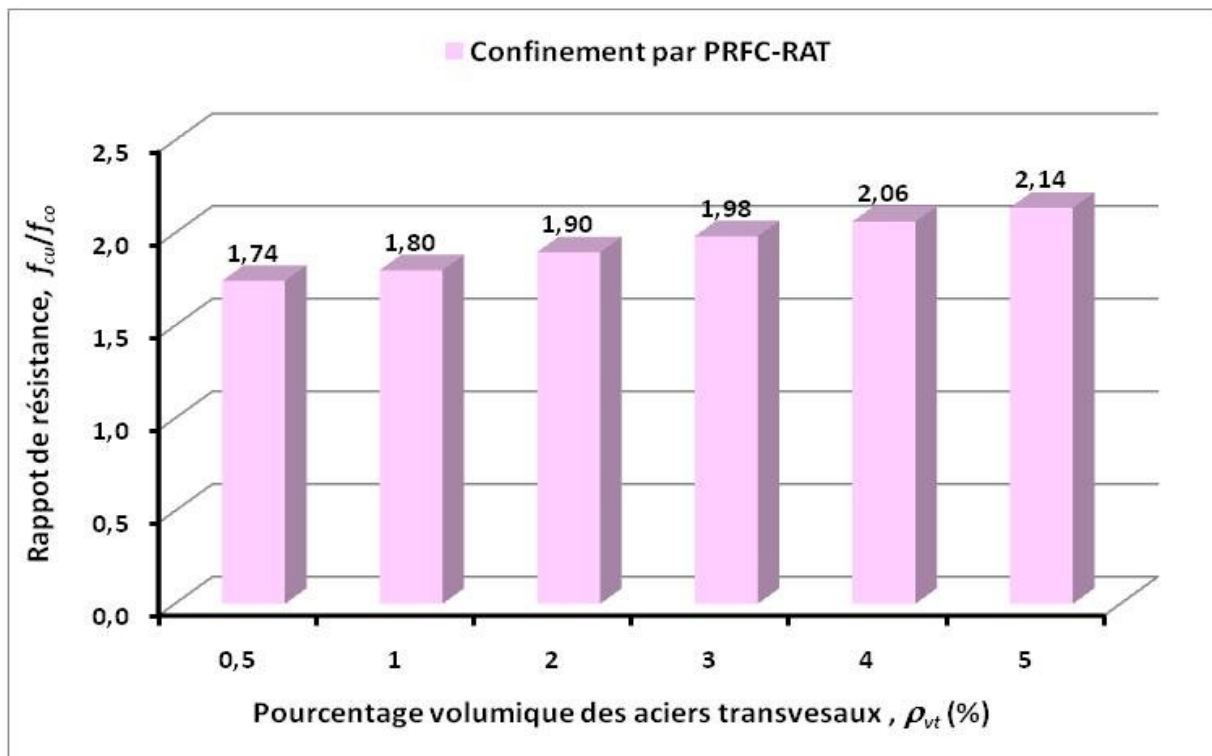
La Figure 5.32 étale la variation de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de la variation de plusieurs valeurs de ( $f_{co}$ ) avec  $n = 2$ , pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT. D'après cette Figure, on constate que les courbes  $f(\rho_{vt})$  diminuent inversement proportionnelle avec l'accroissement de  $f_{co}$ . Ce constat est remarquable pour chaque valeur de  $\rho_{vt}$ . Par ailleurs, l'agrandissement de  $\rho_{vt} = 0,5\%$  jusqu'à  $\rho_{vt} = 5\%$  offre une amélioration considérable des courbes de ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de  $f_{co}$ . L'évolution du gain ( $f_{cu}/f_{co}$ ) sous la variation de  $\rho_{vt}$  est présentée dans l'histogramme de la Figure 5.33. D'après l'histogramme de cette Figure, on constate que le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) augmente proportionnellement avec l'augmentation de  $\rho_{vt}$ .

D'autre part, l'affrontement des Figures 5.32, 5.34 et 5.35 correspondent à  $n = 2$ , 4 et 6 respectivement, montre que l'augmentation du nombre de couche des PRFC a un effet très propice sur le gain de résistance. En effet, l'histogramme de la Figure 5.36, conforte largement cette remarque.

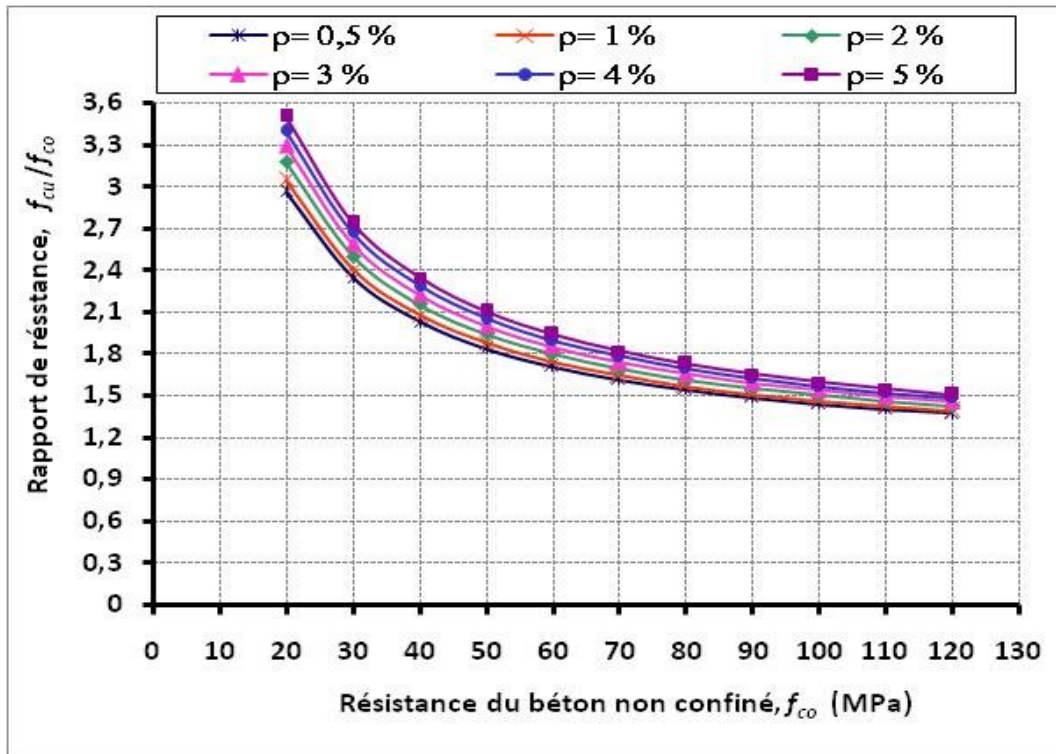
Dans le même contexte, la comparaison globale du modèle contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) des Figures 5.37, 5.38 et 5.39 avec  $n = 2$  couches, 4 couches et 6 couches, indique nettement l'apport de  $\rho_{vt}$  sur l'amélioration de la deuxième branche ascendante de l'enveloppe de six (6) courbes. Comme, il montre l'effet très favorable pour le cas du confinement avec un nombre de couches élevé.



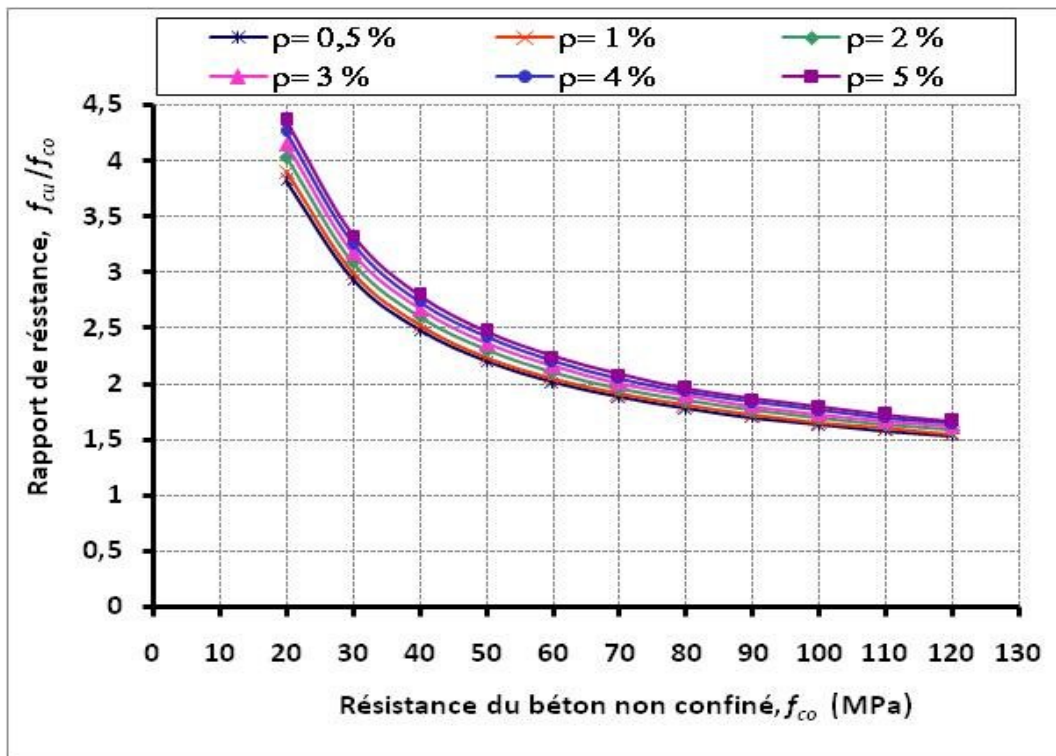
**Figure 5.32 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



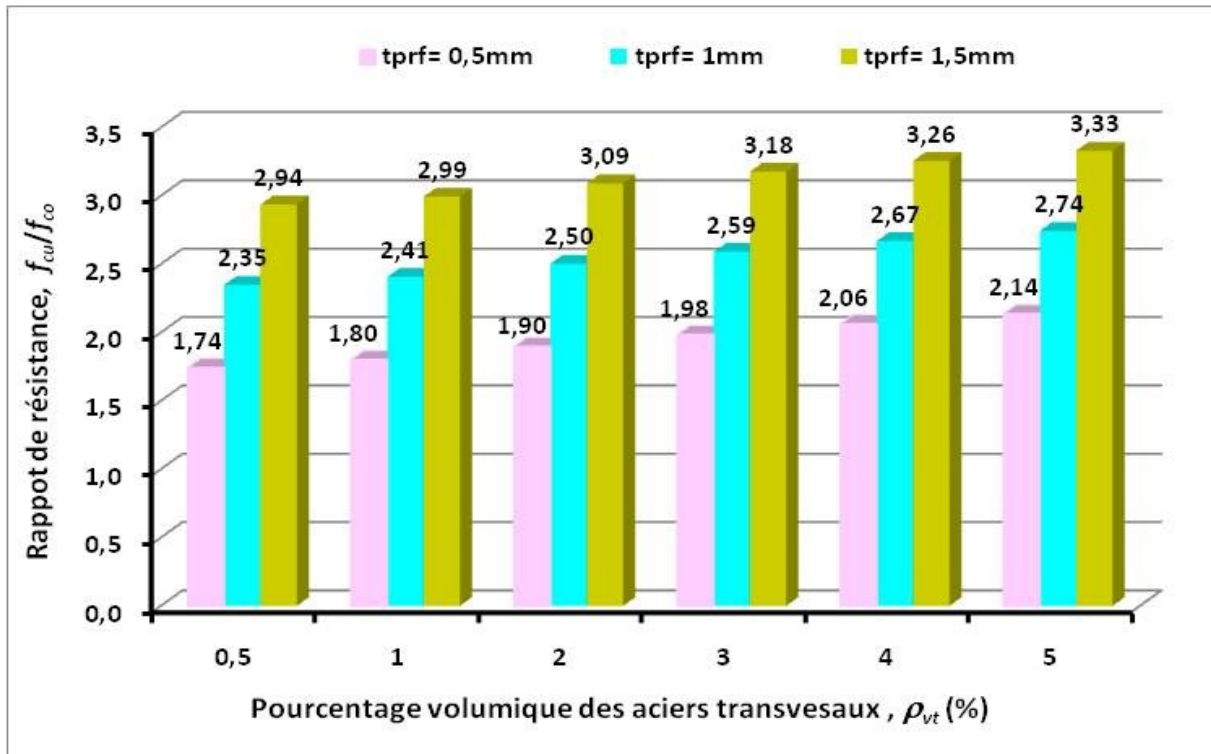
**Figure 5.33 :** Gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour le modèle de confinement par PRFC-RAT proposé. Avec  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa.



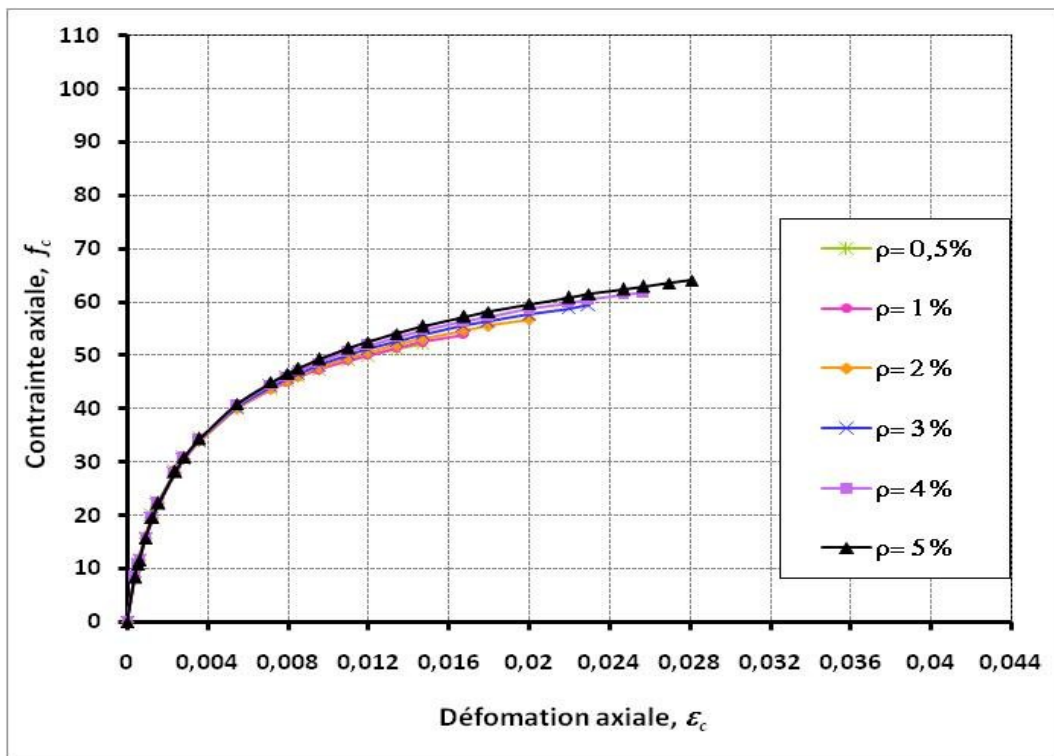
**Figure 5.34 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 1$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



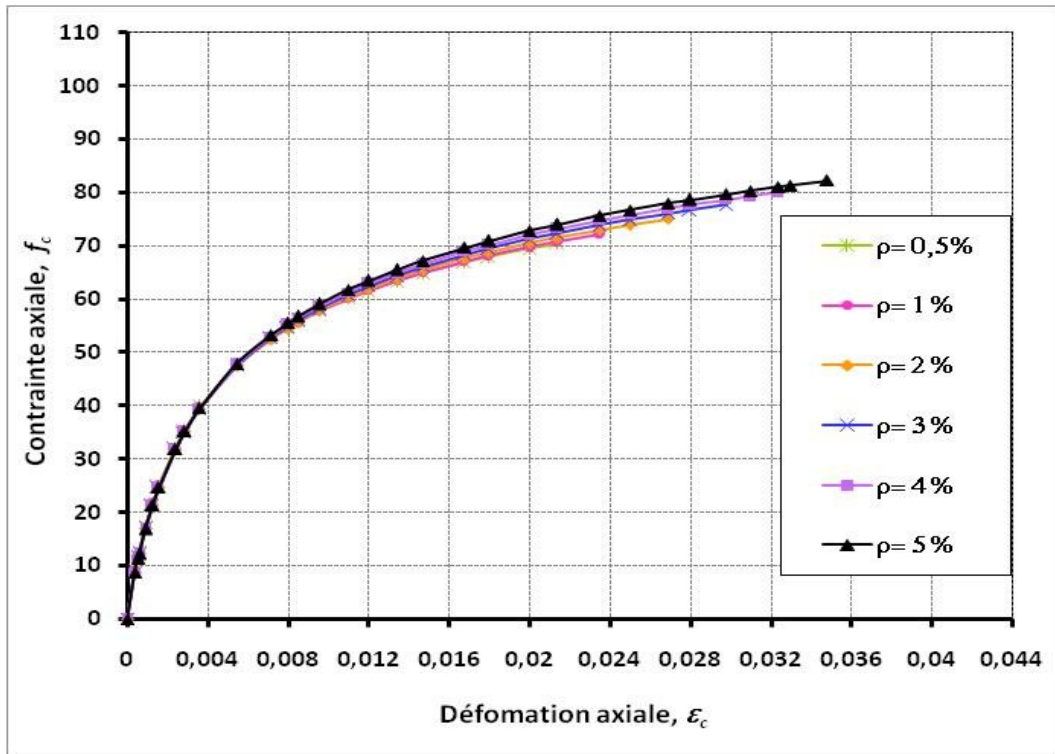
**Figure 5.35 :** Influence du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par la combinaison PRFC-RAT, Avec :  $D = 300$  mm,  $t_{prf} = 1,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa, et  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.36 :** Comparaison des gains de résistances ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction du pourcentage volumique des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) pour des colonnes en béton confiné par PRFC-RAT, Avec  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $t_{prf} = 1$  mm, et  $t_{prf} = 1,5$  mm.

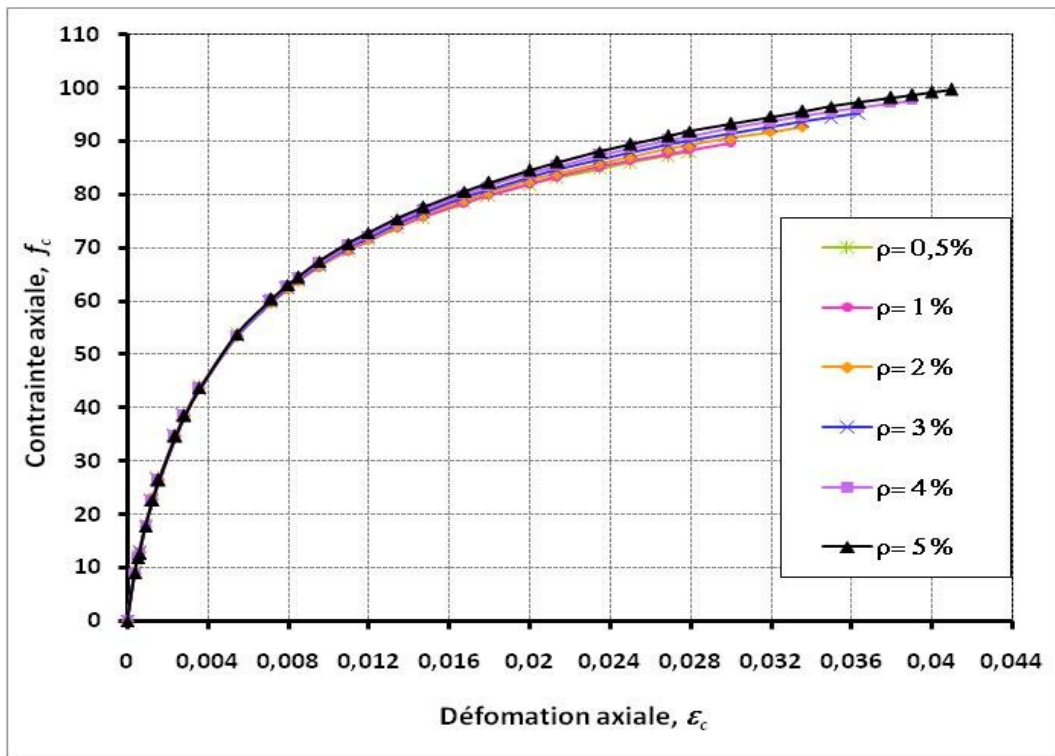


**Figure 5.37 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT  
 Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 0,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.38 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT

Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 1$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.



**Figure 5.39 :** Influence du pourcentage des aciers transversaux ( $\rho_{vt}$ ) sur le comportement contraintes-déformations pour le béton confiné par PRFC-RAT

Pour  $D = 300$  mm,  $f_{co} = 30$  MPa,  $t_{prf} = 1,5$  mm,  $f_{prf} = 2500$  MPa,  $f_{ys} = 400$  MPa.

De ce qui précède, on peut tirer pour chaque valeur de  $\rho_{vt}$  les remarques suivantes :

- ❖ Le rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) est réduit en fonction de l'augmentation de la résistance ( $f_{co}$ ) ;
- ❖ L'accroissement de  $\rho_{vt}$  à un effet avantageux sur l'amélioration des courbes du rapport de la résistance en fonction de  $f_{co}$  ;
- ❖ L'apport du diamètre  $D$  reste toujours plus défavorable sur le gain de résistance malgré l'augmentation de  $\rho_{vt}$  ;
- ❖ L'enveloppe de six courbes représentant le rapport de résistance en compression en fonction de  $f_{co}$  diminue avec l'augmentation du diamètre  $D$ .
- ❖ L'effet de  $\rho_{vt}$  sur l'enveloppe de six courbes contrainte-déformation est plus favorable pour les faibles valeurs de  $D$  comparativement aux valeurs élevées.
- ❖ L'augmentation du  $\rho_{vt}$  améliore largement la deuxième branche ascendante de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par la combinaison PRFC-RAT.
- ❖ Le gain de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) s'améliore en fonction de l'augmentation de  $f_{ys}$  lorsque  $\rho_{vt}$  devient supérieur ou égal à 1%. Pour des faibles valeurs de  $\rho_{vt}$  l'effet de  $f_{ys}$  devient négligeable ;
- ❖ L'enveloppe de six courbes correspondant au rapport ( $f_{cu}/f_{co}$ ) en fonction de  $f_{co}$  augmente avec l'agrandissement du  $f_{ys}$ .
- ❖ L'influence positive du pourcentage  $\rho_{vt}$  sur l'enveloppe de six courbes contrainte-déformation dépend des valeurs de  $f_{ys}$  élevées.
- ❖ Le confinement par un nombre de couche de PRFC élevé produit un gain de résistance plus important, que par une ou deux couches.
- ❖ L'enveloppe de six courbes du rapport de résistance ( $f_{cu}/f_{co}$ ) s'améliore largement avec l'accroissement du nombre de couche ( $n$ ).
- ❖ L'effet de  $\rho_{vt}$  sur l'enveloppe de six courbes contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) est très avantageux pour le cas du confinement avec un nombre de couches élevé.

## 5.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a traité l'influence des différents paramètres sur le comportement des colonnes circulaires en béton confiné avec PRFC sans et avec aciers transversaux. Compte tenu de l'analyse ci-dessus, on peut tirer les conclusions suivantes pour chaque paramètre :

Concernant l'effet de la résistance en compression du béton non confiné :

- Le rapport de résistance ultime diminue en fonction de l'augmentation de la résistance en compression du béton non confiné, pour tous les paramètres considérés ;

Concernant l'effet du diamètre de la colonne  $D$  :

- Le gain de résistance en compression diminue avec l'augmentation du diamètre de la colonne ;
- Le confinement par PRFC sans, et avec aciers transversaux pour des colonnes préparées avec des faibles résistances du béton offrent des gains de résistance plus élevés.

Concernant l'effet de l'épaisseur des polymères renforcés de fibres de carbone :

- L'augmentation du nombre de couches des polymères renforcés de fibre de carbone produit un gain de résistance en compression plus rentable ;

Concernant l'effet de la résistance en traction  $f_{prf}$  :

- Le gain de résistance s'améliore proportionnellement avec l'accroissement de la résistance en traction des polymères renforcés de fibres de carbone ;

Concernant l'effet de la limite élastique des aciers transversaux :

- Effet négligeable de la limite élastique des aciers transversaux sur le gain de résistance en compression.

Concernant l'effet du pourcentage des aciers transversaux :

- La progression du pourcentage volumique des aciers transversaux offre une amélioration significative au gain de résistance.

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

L'analyse de la performance de quelques modèles de confinement par polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) sans et avec aciers transversaux (RAT), basée sur plus de 340 données expérimentales existantes dans la bibliographie ; et la confrontation des résultats trouvés avec deux indicateurs statistiques, à savoir : le coefficient de détermination  $R^2$  et la racine carrée du carré moyen des résidus RMSE, deux nouveaux modèles ont été développés.

- Le premier modèle de confinement par PRFC seulement prédit sur la base d'une analyse de régression mathématique de plus de 310 données expérimentales. Ce modèle comporte des expressions simples et précises pour le calcul de la résistance ultime et la déformation correspondante. Leurs indicateurs de performance ont montré une nette précision comparativement aux autres modèles. Ainsi, la confrontation menée entre les courbes contrainte-déformation du modèle développé avec les modèles existants et les différents résultats expérimentaux, a montré que le modèle développé présente une pertinence remarquable.
- Le deuxième modèle de confinement par la combinaison des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) et les aciers transversaux de forme (cerces ou spirales) a été développé sur la base de régression de 34 données expérimentales existantes. Ce modèle présente une forme des expressions de résistance ultime et déformation correspondante très simples est plus précises. D'après l'étude de la performance de ce nouveau modèle proposé, les indicateurs statistiques ont montré que le modèle proposé présente la meilleure performance comparativement aux autres modèles existants. La comparaison de la courbe contrainte-déformation du modèle proposé avec les modèles existants a montré que les courbes de notre modèle sont plus proches aux courbes expérimentales.

La dernière partie de cette thèse s'intéresse à une analyse paramétrique des facteurs influençant le confinement à l'aide des enveloppes en polymères renforcés de fibres de carbone sans, et avec aciers transversaux. Après cette analyse, on a dégagé les conclusions suivantes :

1. L'augmentation du diamètre de la colonne offre un gain de résistance élevé pour le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC sans aciers transversaux comparativement au modèle proposé pour le béton confiné par l'effet combiné PRFC-RAT. De point de vue comparaison globale, le modèle contrainte-déformation proposé pour le confinement par PRFC estime des valeurs de résistance élevées comparativement au modèle par la combinaison PRFC-RAT, néanmoins, ce dernier a un effet très intéressant sur la déformation ultime que le premier modèle.

2. L'accroissement de l'épaisseur du PRFC donne un gain de résistance important pour le modèle de résistance proposé pour le béton confiné par PRFC comparativement au modèle proposé pour l'effet combiné PRFC-RAT. En outre point de vu global, le modèle contrainte-déformation par PRFC a un effet propice aussi bien sûr la résistance que sur la déformation que le modèle proposé sous l'effet combiné.
3. L'augmentation de la résistance en traction du PRFC amplifié largement le gain de résistance pour le confinement par PRFC que par la combinaison PRFC+RAT. Néanmoins, leur effet sur la déformation ultime pour le modèle contrainte-déformation (PRFC+RAT) est plus rentable que le modèle par PRFC seulement.
4. L'influence de la limite élastique des aciers transversaux sur le gain de résistance dans le modèle contrainte déformation du béton confiné par PRFC-RAT est négligeable, toutefois pour la déformation ultime ce paramètre à un effet très propice.
5. L'augmentation du pourcentage des aciers transversaux améliore largement la deuxième branche ascendante de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par la combinaison PRFC-RAT.
6. Pour le pourcentage volumique supérieur ou égal à 1% en présence de la limite d'élasticité des aciers transversaux, produit un gain de résistance remarquable. Comme, on note une influence positive de ce pourcentage sur l'enveloppe des courbes contrainte-déformation.
7. Le pourcentage volumique des aciers transversaux en présence de l'augmentation de l'épaisseur ou le nombre de couche des PRFC, offre un gain de résistance et de déformation plus important.

En perspective, ce travail sera suivi par une étude expérimentale en laboratoire sur une échelle réelle afin de cerner mieux les modèles proposés. Comme, on recommande de suivre cette recherche par la simulation numérique à l'aide du logiciel.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACI 318. (2011), "Building code requirements for structural concrete and commentary", American Concrete Institute; Farmington Hills, MI, U.S.A, 436 pp.
- Aire, C., Gettu, R. et Casas, J.R. (2001), "Study of the compressive behavior of concrete confined by fiber reinforced composites", international conference on composites in constructions, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 239-243.
- Attari, N. et Si Youssef, Y. (2003), "Le séisme du 21 mai 2003 à BOUMERDES", Colloque international Fabrication, gestion et pratiques des territoires. Écoles d'architecture de Paris Val de Seine.
- Badoux, M. et Jirsa, J. (1990), "Steel bracing of RC frames for seismic retrofitting" *Journal of Structural Engineering*, **116**(1), 55-74.
- Barros, J. A. O., Varma, R. K., Sena-Cruz, J. M. et Azevedo, A. F. M. (2008), "Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: Experimental and numerical research.", *Engineering Structures*, **30**(12), 3412-3425.
- Benzaid, R. (2010), "Contribution à l'étude des matériaux composite dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 280 p.
- Benzaid, R., Mesbah, H. et Chikh, N. (2010), "FRP-confined concrete cylinders: axial compression experiments and strength model", *Journal of Reinforced Plastics and Composites.*, **29**(16), 2469-2488.
- Benzaid, R., Mesbah, H. et Chikh, N. (2013), "Les matériaux composites pour le confinement externe du béton", Hal-00782103, version 1, 253 p.
- Berreuer, L., De Maillard, B. et Nösperger, S. (2002), "L'industrie française des matériaux composites", Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP / SIM", Rapport final, 129 p.
- Berthelot, J.M. (2010), "Mécanique des matériaux et structures composites", Livre, Le Mans, France, 641 p.
- Berthet, J.F., Ferrier, E. et Hamelin, P. (2005), "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: Experimental study", *Construction and Buildings Materials*, **19**(3), 223-232.
- Berthet, J.F., Ferrier, E. et Hamelin, P. (2006), "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets Part B: modeling", Elsevier Science Ltd. *Construction and Building Materials*, **20**, 338-347
- Binici, B. (2008), "Design of FRPs in circular bridge column retrofits for ductility enhancement", *Engineering Structures*. **30**(3), 766-776.

- Bisby, L.A., Dent, A.J.S. et Green, M.F. (2005), "Comparison of confinement models for fiber-reinforced polymer-wrapped concrete", *ACI. Structural Journal.*, **102**(1), 62-72.
- Bullo, S. (2003), "Experimental study of the effects of the ultimate strain of fiber reinforced plastic jackets on the behavior of confined concrete", international conference on composites in construction, Cosenza, Italy, 465-470.
- Carey, S.A. et Harries, K.A. (2003), "The effects of shape, 'gap', and scale on the behavior and modeling of variably confined concrete", Report no. ST03-05, University of South Carolina, Columbia.
- Carey, S.A. et Harries, K.A. (2005), "Axial behavior and modeling of small-, medium-, and large-scale cylindrical sections confined with CFRP jackets", *ACI. Structural Journal.*, **102**(4), 596-604.
- Carolin, A. (2003), "Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements", Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, Suède, 178 pp.
- Chaallal, O., Hassan, M. et LeBlanc, M. (2006), "Circular columns confined with FRP: experimental versus predictions of models and guidelines", *ASCE. Journal of Composites for Construction*, **10**(1), pp 4-12.
- Chai, Y.H., Priestley, M.J.N. et Seible F. (1991), "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance", *ACI Structural Journal*, **88**(5), 572-584.
- Chan, W. L. (1955), "The ultimate strength and deformation of plastic hinges in reinforced concrete", *frameworks Magazine of Concrete Research*, **7**(21), 121-132.
- Chastre, C. et Silva, M. A. G. (2010), "Monotonic axial behavior and modeling of RC circular columns confined with CFRP", *Engineering. Structures*, **32**(8), 2268-2277.
- Chatain, M. (2001), "Matériaux composites: présentation générale", AM 5000, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites.
- Chemrouk, M., Attari, N. et Si Youcef Y. (2005), "Lessons from the Boumerdes-Algiers earthquake", London: Thomas Telford. ISBN 0 7277 3403 2, 787 pp.
- Chikh, N., Benzaid, R. et Mesbah, H. (2012), "An experimental investigation of circular RC columns with various slenderness confined with CFRP sheets", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **37**, 315-323.
- Ciupala, M.A., Pilakoutas, K. et Mortazavi, A.A. (2007), "Effectiveness of FRP composites in confined concrete", In: Proc. 8th int. symp on fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures. Greece Univ of Patras.
- Considère, A. (1903), "Résistance à la compression du béton armé et du béton fretté. Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées. Génie Civil. Traduction utilisée. «Experimental Researches on Reinforced Concrete»", De Moisseiff, L. S. New York McGraw Publishing Company 114 Liberty Street. 188 pp.
- Cui, C. (2009), "Behaviour of normal and high strength concrete confined with fibre reinforced polymers (FRP)", Thèse de Doctorat, Université de Toronto, Canada, 346 pp.

- Cui, C. et Sheikh, S.A. (2010), "Experimental study of normal- and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers", *Journal Composites Construction.*, **14**(5), 553-561.
- De Lorenzis, L., Micelli, F. et La Tegola, A. (2002), "Influence of specimen size and resin type on the behavior of FRP-confined concrete cylinders", 1st international conference on advanced polymer composites for structural applications in construction, London, UK: Thomas Telford, 231-239.
- Eid, R., et Paultre, P. (2008), "Analytical model for FRP-confined circular reinforced concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, **12**(5), 541-552.
- Eid, R., Roy, N. et Paultre, P. (2009), "Normal and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites", *Journal of Composites for Construction.*, **13**(2), 113-124.
- El Gawady, M., Endeshaw, M., McLean, D. et Sack, R. (2010), "Retrofitting of rectangular columns with deficient lap splices", *Composites Constructions Journal*, **14**(1), 22-35.
- EN 1998-3. (2005), "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance", Part 3: Assessment and retrofitting of buildings.
- Fahmy M. et Wu Z. (2010), "Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites", *Composites Part B: Engineering.*, **41**(3), 199-213.
- Fanggi, B.A.L. et Ozbakkaloglu, T. (2015), "Square FRP-HSC-steel composite columns: Behavior under axial compression", *Engineering Structures.*, **92**, 156-171.
- Fardis, M. N. et Khalili, H. H. (1982), "FRP-encased concrete as a structural material", *Magasine of Concrete Research.*, **34**(12), 191-202.
- Fardis, M. N. (2009), "Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings: based on EN-Eurocode 8", *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. ISBN: 978-1-4020-9842-0.
- FEMA 273. (1997), "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, 273 pp.
- FIB, (2003). "Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings." Fib Bulletin 24; Federation Internationale du Béton, Lausanne, 312 pp.
- Foo, S., Naumoski, N. et Saatcioglu, M. (2001), "Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens", Rapport du Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile, Ottawa (Ontario), Canada ([www.bpiepc-ocipep.gc.ca](http://www.bpiepc-ocipep.gc.ca)).
- Girgin, Z. C. et Girgin, K. (2015), "A Design-Oriented Combined Model (7 MPa to 190 MPa) for FRP-Confined Circular Short Columns", *Polymers*, **7**, 1905-1917; doi: 10.3390/polym7101489.

- Hachem, R. (2004), "Étude de la ductilité de déplacement des poteaux en béton armé", Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 113 p.
- Hadi, M.N.S. (2007), "Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading", *Composites Structures*, **77**(1), 92-96.
- Hamelin, P. (2002), "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, AM 5615.
- Harajli, M. H. (2006), "Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns", *Cement and Concrete Composites*, **28**(10), 938-948.
- Harmon, T.G. et Slattery, K.T. (1992), "Advanced composite confinement of concrete", 1st international conference on advanced composite materials in bridges and structures, Sherbrooke, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 299-306.
- Howie, I. et Karbhari, V.M. (1995), "Effect of tow sheet composite wrap architecture on strengthening of concrete due to confinement. I: Experimental studies", *J. Reinf. Plast. Compos.*, **14**(9), 1008-1030.
- Hu, D. (2012), "Efficient finite element modeling of reinforced concrete columns confined with fiber reinforced polymers", Master Thesis, Southwest Jiaotong University, China, 127 pp.
- Hu, H. et Seracino, R. (2013), "Analytical model for FRP-and-steel-confined circular concrete columns in compression", *J. Composites. Constructions (ASCE)*, (ISSN 1090-0268/A4013012 (7)).
- Iacobucci, R.D., Sheikh, S.A. et Bayrak, O. (2003), "Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance", *ACI Structural Journal*, **100**(6), 785-794.
- Ilki, A., Kumbasar, N. et Koc, V. (2002), "Strength and deformability of low strength concrete confined by carbon fibre composite sheets", 15th eng. mech. conference. New York: Columbia Univ, 1-8.
- Ilki, A., Kumbasar, N. et Koc, V. (2004), "Low strength concrete members externally confined with FRP sheets", *Structural Engineering. Mech.*, **18**(2), 167-194.
- Jiang, T. et Teng, J. G. (2007), "Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete", *Engineering Structures*, **29**(11), 2968-2986.
- Karbhari, V.M. et Eckel, D.A. (1993), "Strengthening of concrete column stubs through resin infused composite wraps", *Journal of thermoplastic composite materials*, **6**(2), 92-107.
- Karbhari, V. M. et Gao, Y. (1997), "Composite jacketed concrete under uniaxial compression, verification of simple design equations", ASCE. *Journal of materials in civil engineering*, **9**(4), 185-193.
- Kent, D. C. et Park, R. (1971), "Flexural members with confined concrete", *Journal of Structural Division, ASCE*, **97**(7), 1969-1990.

- Kheloui, F. (2012), "Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibres", Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 182 p.
- Khuong, L.N. (2015), "Contribution à la compréhension du comportement des structures renforcées par FRP sous séismes", Thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 250 p.
- Kono, S., Inazumi, M. et Kaku, T.(1998), "Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members", 2nd international conference on composites in infrastructure, Tucson, AZ: University of Arizona, 343-55.
- Laclau, B. (2008), "Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20ième siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites", Rapport final ,08NOBATEK090, 59 p.
- Lam, L. et Teng, J.G. (2003), "Design oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", Elsevier Science Ltd. *Construction and Building Materials*, **17**, 471-489.
- Lam, L. et Teng, J.G. (2004), "Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete", *Journal of Composites Construction.*, **8**(6), 539-548.
- Lam, L., Teng, J.G., Cheung, C.H. et Xiao, Y. (2006) "FRP-confined concrete under axial cyclic compression", *Cement Concrete Composites.*, **28**(10), 949-958.
- Lee, J.Y., Yi, C.K., Jeong, H.S., Kim, S.W. et Kim J.K. (2010), "Compressive reponse of concrete confined with steel spirals and FRP composites", *Journal of Composites Materials.*, **44**(4), 1-24.
- Li, Y. F., Lin, C. T. et Sung, Y. Y (2003), "A Constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Elsevier Science Ltd, *Mechanics of Materials*, **35**, 603-619.
- Lu, W.Y., Yu, H.W., Chen, C.L., Liu, S.L. et Chen, T.C. (2015), "High-strength concrete deep beams with openings strengthened by carbon fiber reinforced plastics", *Compuer and. Concrete.*, **15**(1), 21-35.
- Luyckx, J. (1999), "Composites à fibres de carbone dans le génie civil ", Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, AM 5620, 12 pp.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. et Park, R. (1988), "Theoretical stress-stain model for confined concrete", ASCE. *Journal of structural engineering*, **114**(8), 1804-1826.
- Masri, A. C. et Goel, S. C. (1996). "Seismic design and testing of an RC slab-column frame strengthened by steel bracing", *Earthquake Spectra*, **12**(4), 645-666.
- Matthys, S., Taerwe, L. et Audenaert, K. (1999), "Test on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping", 4th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures (FRPRCS-4). Farmington, MI: American Concrete Institute, 217-229.

- Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K. et Taerwe, L. (2005), "Axial load behavior of largescale columns confined with fiber-reinforced polymer composites", *ACI. Structural Journal.*, **102**(2), 258-267.
- Micelli, F. et Modarelli, R. (2013), "Experimental and analytical study on properties affecting the behaviour of FRP-confined concrete", *Journal Composites Part B*, **45**, 1420-1431.
- Micelli, F., Myers, J.J. et Murthy, S. (2001), "Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP", international conference on composites in constructions, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 317-322.
- Mirmiran, A. et Shahawy, M. (1997), "Behavior of concrete columns confined by fiber composites", *ASCE. Journal of structural engineering*, **123**(5), 583-590.
- Miyauchi, K., Nishibayashi, S. et Inoue, S. (1997), "Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column", in: 3rd Int. symp of non-metallic reinforcement for concrete structures, **1**, 217-224.
- Modarelli, R., Micelli, F. et Manni, O. (2005), "FRP-confinement of hollow concrete cylinders and prisms", 7th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures (FRPRCS-7), NO. SP- 230. Farmington, MI: American Concrete Institute, 1029-1046.
- Morsy, A. et Mahmoud, E.T. (2013), "Bonding techniques for flexural strengthening of R.C. beams using CFRP laminates", *Ain Shams Engineering Journal.*, **4**(3), 369-374.
- Nanni, A. et Bradford, N. M. (1995), "FRP Jacketed concrete under axial compression. Elsevier Science Ltd", *Construction and Building Materials*, **9**(2), 115-124.
- Ozbakkaloglu, T. (2013), "Compressive behavior of concrete-filled FRP tube columns: Assessment of critical column parameters", *Engineering Structures.*, **51**, 188-199.
- Ozbakkaloglu, T. et Lim, J.C. (2013), "Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model", *Composites. Part B.*, **55**, 607-634.
- Ozcebe, G. et Saatcioglu, M. (1987), "Confinement of concrete columns for seismic loading", *ACI. Structural Journal.*, **84**(4), 308-315.
- Pantelides, C., Duffin, J. et Cercone, L. (2002), "Phase II: seismic rehabilitation of concrete bridges-verification using in-situ tests at south temple bridge on I-15", Construction Report, Utah Department of Transportation-Research Division, Civil & Environmental Engineering Department, University of Utah, Salt Lake City, Utah, Report N°. UT-02.14, December, 33 pp.
- Park, R., Priestley, M. J. N. et Gill, W. D. (1982), "Ductility of square confined concrete columns", *Journal of Structures Division, ASCE.*, **108**(4), 929-951.
- Park, T.W., Na, U.J., Chung, L. et Feng, M.Q. (2008), "Compressive behavior of concrete cylinders confined by narrow strips of CFRP with spacing", *Journal of Composites. Part B.*, **39**, 1093-1103.

- Paultre, P. et Légeron, F. (2008), "Confinement reinforcement design for reinforced concrete columns", *ASCE. Journal of Structural Engineering*, **134**(5), 738-749.
- Penelis, G.G. et Kappos, A.J. (1997), "Earthquake resistant concrete structures", Edition E & FN SPON, London, 572p.
- Perrone, M., Barros, J. et Aprile, A. (2009), "CFRP-based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns", *Composites Construction Journal*, **13**(5), 372-383.
- Picher, F. et Rochette, P. (1996), "Labossiere P. Confinement of concrete cylinders with CFRP", 1st international conference on composites for infrastructures, Tucson, AZ: University of Arizona, 829-841.
- Pincheira, J. et Jirsa, J. (1995). "Seismic response of RC frames retrofitted with steel braces or walls", *Journal of Structural Engineering*, **121**(8), 1225-1235.
- Popovics, S. (1973), "Numerical approach to the complete stress-strain relation for concrete", *Cement Concrete Research*, **3**(5), 583-599.
- Priestley, M.J.N., Seible, F. et Calvi, G.M. (1996), "Seismic design and retrofit of bridges-Wiley", Interscience. Publication, John Wiley & Sons, Inc. 686 p.
- Rakotomalala. R. (2015), "Analyse de corrélation Étude des dépendances-Variables quantitatives", Documentation version 1.1, Université Lumière Lyon 2, France, (<http://dis.univ-lyon2.fr/>), 105 p.
- Raphaëlle, S. (2012), "Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement", Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, France, 305 p.
- Razvi, S. R. et Saatcioglu, M. (1999), "Confinement model for high strength concrete", *ASCE. Journal of Structural Engineering*, **125**(3), 281-289.
- Richard, R.M. et Abbott, B.J. (1975), "Versatile elastic-plastic stress-strain formula", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE.*, **101**(4), 511-515.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A. et Brown, R. L. (1928), "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses", University of Illinois, Urbana. Engineering experimental station. Bulletin No. 185, 104 pp.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A. et Brown, R. L. (1929), "The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression", University of Illinois, Urbana. Engineering experimental station. Bulletin No. 190, 74 pp.
- Rochette, P. et Labossiere, P. (2000), "Axial testing of rectangular column models confined with composites", *Journal of Composites Construction.*, **4**(3), 129-136.
- Rodriguez, M. et Park, R. (1994), "Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing", *ACI. Structural Journal*, **91**(2), 150-159.
- Rouaud, M. (2017), "Probabilités, statistiques et analyses multicritères", [www.lulu.com](http://www.lulu.com).

- Rousakis, T. et Tepfers, R. (2004), "Behavior of concrete confined by high E-modulus carbon FRP sheets, subjected to monotonic and cyclic axial compressive load", *Nordic Concrete Research Journal.*, **31**(1), 73-82.
- Rousakis, T., Rakitzis, T. et Karabinis, A. (2012), "Empirical modelling of failure strains of uniformly FRP confined concrete columns", In Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), Rome, Italy, 13–15 June.
- Rousakis, T.C. et Karabinis, A.L. (2008), "Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects", *Materials and structures*, **41**(9), 1595-1611.
- Rousakis, T.C., Rakitzis, T.D. et Karabinis, A.I. (2012), "Design-oriented strength model for FRP-confined concrete members", *Journal of Composites Construction.*, **16**, 615–625.
- Roy, H. E. M. et Sozen, M. A. (1963), "A model to simulate the response of concrete to multi-axial loading", Structures. Research. Ser. No. 268, Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, Ill, 238 pp.
- Roy, N., Labossière, P., Proulx, J., St-Georges, É. et Paultre, P. (2009), "FRP wrapping of RC structures submitted to seismic loads", Seismic Risk Assessment and Retrofitting, Geotechnical, *Geological and Earthquake Engineering, Springer Netherlands.*, **10**, 297-305.
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. et Li, M. W. (1994), "strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", *ACI Structural Journal*, **91** (4), 434-447.
- Saafi, M., Toutanji, H. A. et Li, Z. (1999), "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", *ACI Material Journal*, **96**(4), 500-509.
- Saatcioglu, M. et Razvi, S. R. (1992), "Strength and Ductility of Confined Concrete", ASCE. *Journal of Structural Engineering*, **118**(6).
- Saatcioglu, M., Salamat, A. H. et Razvi, S. R. (1995), "Confined columns under eccentric loading", ASCE. *Journal of Structural Engineering*, **121**(11), 1547-1556.
- Saatcioglu, M., Yalcin, C., Mes, D. et Beausejour, P. (2000), "Seismic retrofit of concrete columns by external prestressing", Research report of OCEERC, Earthquake Engineering Research Centre d'Ottawa-Carleton, Université d'Ottawa, Ottawa, Canada.
- Sadeghian, P. and Fam, A. (2015), "Improved design-oriented confinement models for FRP-wrapped concrete cylinders based on statistical analyses", *Engineering Structures.*, **87**, 162-182.
- Saiidi, M.S., Sureshkumar, K. et Pulido, C. (2005), "Simple carbon-fiber-reinforced-plastic confined concrete model for moment-curvature analysis", ASCE *Journal of Composites Construction.*, **9**(1), 101-104.
- Sargin, M. (1971), "Stress-strain relationship for concrete and analysis of structural concrete sections", Study No. 4, Solid Mech. Div., University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 167.

- Scott, B. D., Park, R. et Priestly, M. J. N. (1982), "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at high and low strain rates", *ACI. Journal.*, **79**(1), 13-27.
- Seible, F., Priestley, M.J.N., Hegemier G.A. et Innamorato D. (1997), "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *Composites Construction Journal*, **1**(2), 52-62.
- Seyni, A. (2008), "Propriété physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produit par co-broyage", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. France, 175 p.
- Shahawy, M., Mirmiran, A. et Beitelman, A. (2000), "Test and modeling of carbon-wrapped concrete columns", *Composites B. Engineering.*, **31**(6-7), 471-480.
- Shehata, I.A.E.M., Carneiro, L.A.V. et Shehata, L.C.D. (2002), "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets", *Materials and. Structures.*, **35**(1), 50-58.
- Sheikh, S. A. et Uzumeri, S. M. (1982), "Analytical model for concrete confinement in tied columns", *Journal of Structural Engineering, ASCE.*, **108**(5), 2703-2723.
- Sheikh, S.A. et Usumerie, S.M. (1980), "Strength and ductility of tied concrete columns", *Journal of Structural Division, ASCE*, **106**(5), 1079-1102.
- Shirmohammadi, F., Esmaily, A. and Kiaeipour, Z. (2015), "Stress-strain model for circular concrete columns confined by FRP and conventional lateral steel", *Engineering Structures.*, **84**, 395-405.
- Si Youcef, Y. (2010), "Contribution à la compréhension du comportement des poteaux élancés en béton armé confinés et renforcés par la fibre de carbone", Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, France, 157 p.
- Si Youcef, Y., Amziane.S. et Chemrouk.M. (2010), "Geometrical effect on the behavior of CFRP confined and unconfined concrete columns", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **29**(17), 2621-2635.
- Si Youcef, Y., Amziane.S. et Chemrouk.M. (2015), "CFRP confinement effectiveness on the behavior of reinforced concrete columns with respect to buckling instability", *Construction and Building Materials*, **81**, 81-92.
- Smith, S.T., Kim, S.J. et Zhang, H. (2010), "Behavior and effectiveness of FRP wrap in the confinement of large concrete cylinders", *Journal of Composites Construction.*, **14**(5), 573-582.
- Soliman, M. T. M. et Yu, C. W. (1967), "Flexural stress-strain relationship of concrete confined by rectangular transverse reinforcement", *Magazine of Concrete Research.*, **19**(61), 223-238.
- Spoelstra, M. R. et Monti, G., (1999), "FRP-Confined concrete model", *ASCE. Journal of Composites for Construction*, **3**(3), 143-150.

- Sun, Z., Seible, F. et Priestley, M.J.N. (1993), "Flexural retrofit of rectangular reinforced concrete bridge column by steel jacketing", Structural Systems Research Project, Report SSRP-93/07, University of California, San Diego.
- Tamuzs, V., Tepfers, R. et Sparnins, E. (2006), "Behavior of concrete cylinders confined by carbon composite II: prediction of strength", *Mechanics of Composite Materials.*, **42**(2), 109-118.
- Tamuzs, V., Tepfers, R., Zile, E. et Ladnova, O. (2006), "Behavior of concrete cylinders confined by a carbon composite III: deformability and the ultimate axial strain", *Mechanics of Composite Materials.*, **42**(4), 303-314.
- Teng, J. G. et Lam, L. (2002), "Compressive behavior of carbon fiber reinforced polymer-confined concrete in elliptical columns", ASCE. *Journal of Structural Engineering*, **128** (12), 1535 -1543.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. et Lam, L. (2002), "FRP-Strengthened RC structures", Chapters 6 and 7. John Wiley and Sons, Ltd. West Sussex, England, 245 pp.
- Teng, J. G., Huang, Y. L., Lam, L., et Ye, L. P. (2007). "Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete." *Journal of Composites Construction.*, **2**(201), 201-210, 10.1061/(ASCE) 1090-0268(2007)11.
- Teng, J.G., Jiang, T., Lam, L. et Luo Y. (2009), "Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", ASCE *Journal of Composites Construction.*, **13**(4), 269-278.
- Teng, J.G., Lin, G. and Yu, T. (2014), "Analysis-oriented stress-strain model for concrete under combined FRP-steel confinement", *Journal of Composites Construction.*, **19**(5), 04014084-1-14.
- Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. and Jensen, J.J. (1987), "Mechanical properties of high strength concrete and application in design", Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Tapir, Trondheim, Norway.
- Tobbi, H. (2012), "Comportement en compression de colonnes en béton renforcées d'armatures en PRF", Thèse de Doctorat, Université Sherbrooke (Québec), Canada, 171 p.
- Valdmanis, V., De Lorenzis, L., Rousakis, T. et Tepfers, R. (2007), "Behavior and capacity of CFRP-confined concrete cylinders subjected to monotonic and cyclic axial compressive load." *Structures and Concrete.*, **8**(4), 187-200.
- Vallenas, J., Bertero, V. V. et Popov, E. P. (1977), "Concrete confined by rectangular hoops and subjected to axial load", Rep. No. UCB/ EERC-77/13, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, Calif., 114.
- Vanek, T. (1985), "Strengthening old concrete beams", *Bâtiment International*, **13**(2), 115-121.
- Vanek, T. (1986), "Shear strengthening of old concrete beams", *Bâtiment International*, **14**(5), 311-316.

- Wang, L.M. et Wu, Y.F. (2008), "Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: test", *Engineering Structures.*, **30**(2), 493-505.
- Wang, Z.Y., Wang, D.Y., Smith, S.T. and Lu, D.G. (2012), "Experimental testing and analytical modeling of CFRP-confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression", *Engineering Structures.*, **40**, 64-74.
- Watanabe, K., Nakamura, H., Honda, T., Toyoshima, M., Iso, M., Fujimaki, T., Kaneto, M. et Shirai, N.(1997), "Confinement effect of FRP sheet on strength and ductility of concrete cylinders under uniaxial compression", Proc, 3rd international symposium on non-metallic FRP reinforcement for concrete structures, Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 233-240.
- Wei, Y.Y. et Wu, Y.F. (2012), "Unified stress-strain model of concrete for FRP-confined columns", *Constructions Building Material.*, **26**(1), 381-392.
- Wu, H. C. (2000), "Mechanical interaction between concrete and FRP", ASCE. *Journal of Composites for Construction*, **4**(2).
- Wu, Y.F. et Jiang, J.F. (2013), "Effective strain of FRP for confined cylindrical concrete columns", *Composites Structures.*, **95**, 479-491.
- Xiao, Q.G., Teng, J.G. et Yu, T. (2010), "Behavior and modeling of confined high-strength concrete", *Journal of Composites for Construction.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000070, 249–259.
- Xiao, Y. et Wu, H. (2000), "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets", *Journals of Materials in Civil Engineering*, **12**(2), 139-146.
- Xiao, Y. et Wu, H. (2003), "Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **22**(13), 1187-1201.
- Yeh, F.Y. et Chang, K.C. (2004), "Size and shape effect on FRP confinements for rectangular concrete columns", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 657, 15 pp.
- Youssef, M.N. (2003), "Stress strain model for concrete confined by FRP composites", Doctoral dissertation, University of California-Irvine, Irvine, 310 pp.
- Youssef, M.N., Feng M.Q. et Mosallam A.S. (2007), "Stress-strain model for concrete confined by FRP composites", *Composites: Part B*, **38**, 614-628.
- Zhang, H.Y., Hao, X. et Fan, W. (2016), "Experimental study on high temperature properties of carbon fiber sheets strengthened concrete cylinders using geopolymers as adhesive", *Proceeding. Engineering*, **135**, 47-55.