



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement LMGCE

Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Civil

# Influence du renforcement par matériaux composites sur le comportement des structures : Cas des Poteaux

Présenté par :

TOUHARI Mahfoud, Magister en construction et environnement, ENP

Sous la direction de Mme.

MITICHE-KETTAB Ratiba Professeur à l'ENP

Présentée et soutenue publiquement le 09/05/2017

## Composition du Jury :

Président	Mr. Abderrahim BALI,	Professeur	ENP
Directrice de thèse	Mme. Ratiba MITICHE-KETTAB,	Professeur	ENP
Examineurs	Mr. Smain BELKACEMI,	Professeur	ENP
	Mr. Mohamed CHABAAT,	Professeur	USTHB
	Mr. Rabeh CHAID,	Professeur	UMBB
	Mr. Said KENAI,	Professeur	USD Blida
Invité	Mr. Mouloud ABDESSEMED,	MC « A »,	USD Blida



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement LMGCE

Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Civil

# Influence du renforcement par matériaux composites sur le comportement des structures : Cas des Poteaux

Présenté par :

TOUHARI Mahfoud, Magister en construction et environnement, ENP

Sous la direction de Mme.

MITICHE-KETTAB Ratiba Professeur à l'ENP

Présentée et soutenue publiquement le 09/05/2017

## Composition du Jury

Président	Mr. Abderrahim BALI,	Professeur	ENP
Directrice de thèse	Mme. Ratiba MITICHE-KETTAB,	Professeur	ENP
Examineurs	Mr. Smain BELKACEMI,	Professeur	ENP
	Mr. Mohamed CHABAAT,	Professeur	USTHB
	Mr. Rabeh CHAID,	Professeur	UMBB
	Mr. Said KENAI,	Professeur	USD Blida
Invité	Mr. Mouloud ABDESSEMED,	MC « A »,	USD Blida

ENP 2017

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens tout d'abord à remercier et en premier lieu Dieu le Tout Puissant et Miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage à mener à bonne fin ce travail.*

*Je voudrais remercier Madame, Ratiba Mitiche-Kettab Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir accepté d'encadrer le présent travail de thèse, pour sa confiance, son accompagnement et ses encouragements pour son assistance et pour toutes les facilités mises à ma disposition pour réaliser les lourds essais requis par le présent travail.*

*Mes remerciements vont aussi, à tous ceux qui m'ont aidé par leur présence ou par leur soutien dans la réalisation de ce travail de recherche, en particulier Monsieur Abderrahim BALI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger dont la présence donne une dimension supplémentaire à ce travail.*

*J'exprime ma sincère gratitude à Monsieur BALI Abderrahim, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de cette thèse. Je remercie vivement Messieurs, BELKACEMI Smain Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, CHABAAT Mohamed Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE 'USTHB', CHAID Rabeh Professeur à l'université de Boumerdes et KENAI Said et ABDESSEMED Mouloud Professeurs à l'université de Blida, de m'avoir honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*Je remercie ensuite mes collègues Messieurs, Saleh NOUI, Yacine CHAOUCHI, TOUHARI Abdelahak et ZOUBIR Wali qui m'ont soutenu et m'ont encouragé dès le début de ce travail, malgré les conditions souvent difficiles avec d'exceptionnelles astreintes de temps.*

*Un grand merci enfin à ma famille pour son dévouement et sa présence chaleureuse, ses encouragements et son amour, mes filles Alaa et Oumaima et particulièrement ma femme sans laquelle après Dieu, ce travail n'aurait pas été possible.*

## ملخص :

بين التفاف الأعمدة الخرسانية بواسطة المواد المركبة من البوليمر المدعم بالألياف نجاعتها في تحسين أدائها من مقاومة وتشوه. خصص هذا العمل للتحقيق في سلوك الأعمدة الخرسانية الصغيرة المقياس الملقوفة بالمواد المركبة والتي تخضع تحت الضغط المحوري، و هذا من خلال دراسة تأثير العديد من الوسائط و المتمثلة في : عدد طبقات الالتفاف ( طبقة واحدة، طبقتين او ثلاث طبقات)، مقاومة الضغط المحوري للخرسانة المبدئية ( منخفضة، عادية أو عالية الضغط)، نوع المواد المركبة (كربون أو زجاج )، شكل المقطع العرضي للخرسانة ( دائري أو مربع)، وكذا معامل إنحاء الزاوية لدى الأعمدة المربعة الشكل، و أخيرا معامل الوتوب الهندسي. بينت النتائج المحصل عليها بأن الأعمدة الخرسانية المقواة خارجيا بالمواد المركبة تحسن بشكل ممتاز كل من الشد والتشوه مقارنة بالأعمدة العادية . برهنت نتائج جميع العينات المدروسة أنه كلما زادت درجة الالتفاف كلما تحسنت مقاومة وتشوه الأعمدة في حين كلما زادت مقاومة الضغط للخرسانة المبدئية كلما كانت فعالية الحصر بالمواد المركبة أقل . أظهرت النتائج التجريبية كذلك أن حصر العينات الدائرية الشكل يكون فعالا مقارنة بحصر العينات ذات الشكل المربع . من خلال الدراسة التجريبية والمعادلات النظرية تم اقتراح معادلة تحليلية جديدة للأعمدة المقواة خارجيا بالمواد المركبة و التي أسست على معامل التشوه المحيطي للمواد المركبة عند الانكسار و الضغط الأفقي الفعال للأعمدة الملقوفة بالمواد المركبة.

**الكلمات المفتاحية :** الحصر، المواد المركبة، المقاومة، التشوه، الضغط الأفقي الفعال.

## Abstract

Wrapping a reinforced concrete column by Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials primarily improves column performance. The present paper is devoted to investigate the behavior of small-scale FRP confined concrete columns subjected under axial compressive loading. The effects of several parameters such as number of FRP layers (1, 2, and 3 layers), concrete strength (low, normal and high strength), type of FRP materials (carbon and glass), cross-sectional shape (circular and square) and corner radius for square columns are investigated. The test results demonstrated that the FRP wrapped columns improved a significant increase in the ultimate conditions of both circular and square specimens compared to the unconfined concrete columns; however; the improvement for square specimens was not as prominent as that for circular specimens. The test results indicate that the ultimate strengths and strains increase significantly with the enhancement of the number of composite layers. However, the confinement effectiveness decreases with the increase of unconfined concrete strength. A new model is proposed to predict the compressive axial strength and corresponding strain of FRP confined concrete columns. This model is based on the effective circumferential FRP failure strain and the effective lateral confining pressure.

Key words: confinement, composites materials, strength, strain, effective lateral confining.

## Résumé

Le confinement des colonnes en béton par matériaux en polymère renforcé de fibres (FRP) améliore leurs performance. Le présent travail est consacré à l'étude du comportement de colonnes à petite échelle en béton confinées en FRP soumises sous charge de compression axiale, dans le but d'examiner l'effet de plusieurs paramètres sur l'efficacité de confinement des colonnes en béton de section circulaires et carrées par des enveloppes en FRP. Ces paramètres comprennent le degré de confinement (1, 2 et 3 couches), la résistance du béton (faible, normale et haute résistance), le type de matériaux composites (carbone et verre), la forme de la section transversale des spécimens confinés (circulaire ou carrée) et le rayon d'arrondissement pour les colonnes de section carrée. Les résultats ont démontré que les colonnes confinées par PRP amélioreraient significativement la performance des colonnes en termes de résistance et ductilité par rapport aux colonnes non confinées. Cependant, l'amélioration pour les spécimens carrés n'était pas aussi importante que pour les spécimens circulaires. Les résultats indiquent que l'augmentation de la rigidité du confinement entraîne à la fois, une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité. Un modèle analytique de confinement est présenté pour prédire la résistance axiale maximale de confinement et la déformation correspondante des colonnes confinées en PRF. Ce modèle est basé sur la déformation circonferentielle à la rupture du composite PRF et la pression de confinement latérale effective de colonne confinée.

**Mots clés:** confinement, matériaux composites, résistance, déformation, pression de confinement effective.

## Table des Matières

Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13

### Partie I : Synthèse bibliographique

#### Chapitre I: Pathologie des structures

I.1 Introduction.....	18
I.2 Altérations d'origine chimique .....	18
I.3 Action des chlorures.....	18
I.4 Action des sulfates .....	19
I.5 Action des eaux.....	20
I.6 Altérations microbiennes .....	21
I.7 Altérations d'origine physico-chimique.....	21
I.8 Retrait.....	21
I.9 Altérations dues aux forts gradients thermiques .....	22
I.10 Altérations d'origine sismique .....	23
I.11 Altérations dues aux erreurs d'exécution.....	24
I.12 Corrosion des armatures.....	25
I.13 Conclusion .....	26

#### Chapitre II : Différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages

II.1 Introduction .....	27
II.2 Méthodes non structurales de réparation des ouvrages en béton armé .....	27
II.2.1 Préparation de la surface de béton .....	27
II.2.2 Protection des armatures.....	28
II.2.3 Réparation du béton dégradé par apport de matériaux .....	28
II.3 Méthodes structurales de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé .....	29
II.3.1 Béton projeté.....	29
II.3.2 Précontrainte additionnelle .....	30
II.3.3 Renforcement par chemisage en acier ou en béton armé.....	31
II.3.4 Développement de la technique des plats collés.....	33
II.3.5 Utilisation de Bétons à Très Haute Performance.....	34
II.4 Renforcement et réparation par matériaux composites.....	36
II.4.1 Définitions .....	37
II.4.1.1 Matériau composite .....	37
II.4.1.2 Matrice et renfort .....	38
II.4.1.3 Stratifié .....	40
II.4.1.4 Adhésif.....	41
II.4.2 Propriétés mécaniques des polymères renforcés de fibres 'FRP' .....	41

## **Table des Matières**

II.4.3 Application des composites dans la construction en génie civil.....	43
II.4.3.1 Renforcement des poutres.....	43
II.4.3.2 Renforcement des dalles .....	45
II.4.3.3 Renforcement des murs .....	46
II.4.3.4 Renforcement des colonnes .....	46
II.5 Conclusion .....	49

---

### **Chapitre III : Travaux antérieurs portant sur les colonnes en béton confiné avec des matériaux composites ‘FRP’**

III.1 Introduction .....	51
III.2 Travaux expérimentaux .....	51
III.3 Modèles analytiques de béton confiné avec des matériaux composites «FRP» .....	69
III.4 Conclusion.....	79

---

### **Chapitre IV : Programme Expérimental**

IV.1 Introduction.....	81
IV.2 Programme Expérimental.....	81
IV.3 Identification des matériaux utilisés.....	82
IV.3.1 Béton .....	82
IV.3.2 Composites.....	83
IV.4 Confinement par FRP.....	84
IV.5 Essais et chargement .....	85
IV.6 Conclusion .....	86

---

## **Partie II : Etude Expérimentale**

### **Chapitre V : Résultats expérimentaux et observations**

V.1 Introduction .....	90
V.2 Résultats expérimentaux des spécimens confinés avec des enveloppes de FRP.....	90
V.2.1 Résultats expérimentaux des éprouvettes cylindriques $\varnothing 160 \times 320$ mm .....	90
V.2.2 Résultats expérimentaux des spécimens prismatiques carrés $150 \times 150 \times 300$ mm .....	97
V.2.3 Résultats expérimentaux des spécimens circulaires $\varnothing 80 \times 320$ mm et $\varnothing 80 \times 500$ mm .....	106
V. 3 Modes de Rupture.....	108
V.3.1 Modes de rupture des spécimens circulaire de type $\varnothing 160 \times 320$ confinés avec des FRP .....	108
V.3.2 Modes de rupture des spécimens de section carrée confinés avec FRP .....	110
V.3.3 Modes de rupture des spécimens circulaire de type $\varnothing 80 \times 320$ et de type $\varnothing 80 \times 500$ .....	111
V.4 Conclusion.....	112

---

## **Table des Matières**

---

### **Chapitre VI : Analyse et Interprétation des Résultats**

VI.1 Introduction.....	113
VI.2 Courbes Contrainte-Déformation.....	113
VI.2.1 Béton Non Confiné .....	113
VI.2.2 Béton Confiné .....	114
VI.3 Effet du degré de confinement de FRP sur les performances des spécimens confinés .....	116
VI.4 Effet de la résistance du béton.....	117
VI.5 Effet du type de composites .....	118
VI.6 Effet du type de la section transversale du béton confiné .....	121
VI.6.1 Capacité axiale et Déformation .....	127
VI.6.2 Courbes contrainte-Déformation.....	129
VI.6.3 Distribution des contraintes dans la section transversale des spécimens confinés.....	132
VI.6.4 Effet du rayon d'angle.....	135
VI.7 Effet du rapport volumétrique .....	137
VI.8 Conclusion .....	139

---

### **Partie III : Modèle Analytique**

#### **Chapitre VII : Modèle analytique de confinement**

VII.1 Introduction.....	141
VII.2 Mécanisme de confinement .....	142
VII.3 Coefficient de déformation effective du FRP .....	143
VII.4 Section circulaire .....	144
VII.4.1 Résistance maximale de confinement.....	144
VII.4.1.1 Critère de rupture Mohr-Coulomb .....	144
VII.4.1.2 Equation proposée.....	145
VII.4.2 Déformation maximale de confinement.....	146
VII.5 Section carrée.....	150
VII.5.1 Coefficient de la section effective.....	150
VII.5.2 Déformation maximale de confinement.....	152
VII.6 Validation du modèle proposé .....	153
VII.7 Conclusion .....	154

---

<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>160</b>
---	------------

---

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>165</b>
--	------------

---

<b>ANNEXE.....</b>	<b>172</b>
--------------------	------------

---

**Chapitre II : Différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages**

Tableau II.1 Avantages et inconvénients de voie sèche et voie mouillée [92].....	18
Tableau II.2 Une étude comparative des différentes techniques de renforcement .....	24
Tableau II.3 Caractéristiques essentielles des fibres de verre [52].....	28
Tableau II.4 Caractéristiques essentielles des fibres de carbone [52] .....	28
Tableau II.5 Propriétés mécaniques typiques des composites «GFRP», «CFRP» et «AFRP» [28] .....	30
Tableau II.6 Comparaison qualitative entre GFRP, CFRP et AFRP [75] .....	31
Tableau II.7 Comparaison entre les différentes méthodes de renforcement des colonnes [75] .....	31

**Chapitre IV : Programme Expérimental**

Tableau IV.1 Description des échantillons de la série C160/320-B-C .....	83
Tableau IV.2 Description des échantillons de la série C160/320-B- .....	83
Tableau IV.3 Description des échantillons de la série S150/300-B-C .....	84
Tableau IV.4 Description des échantillons de la série C80/320-B-C .....	84
Tableau IV.5 Description des échantillons de la série C80/500-B-C .....	85
Tableau IV.6 Description des échantillons de la série S150/300-B-C-arrondis.....	85
Tableau IV.7 Composition du béton pour les trois séries utilisées .....	78
Tableau IV.8 propriétés de la résine MEDAPOXY STR.....	79
Tableau IV.9 Caractéristiques mécaniques du composite «CFRP» .....	80

**Chapitre V : Résultats expérimentaux et observations**

Tableau V.1 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 1 ( $f'_{co}=25MPa$ ; CFRP)....	87
Tableau V.2 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 2 ( $f'_{co}=40MPa$ ; CFRP)....	88
Tableau V.3 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 3 ( $f'_{co}=60MPa$ ; CFRP)....	89
Tableau V.4 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 4 ( $f'_{co}=25MPa$ ; GFRP) ...	90
Tableau V.5 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 5 ( $f'_{co}=40MPa$ ; GFRP) ...	91
Tableau V.6 Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$ mm), série 6 ( $f'_{co}=60MPa$ ; GFRP) ...	92
Tableau V.7 Résultats des prismatique carrés (150x150x300 mm), série 7 ( $f'_{co}=25MPa$ ; CFRP) .....	94
Tableau V.8 Résultats des prismatique carrés (150x150x300 mm), série 8 ( $f'_{co}=40MPa$ ; CFRP) .....	95
Tableau V.9 Résultats des prismatique carrés (150x150x300 mm), série 9 ( $f'_{co}=60MPa$ ; CFRP) .....	96
Tableau V.10 Résultats des cylindres ( $\varnothing 80 \times 320$ mm), série 10 ( $f'_{co}=25MPa$ ; CFRP) .....	98
Tableau V.11 Résultats des s cylindres ( $\varnothing 80 \times 320$ mm), série 11 ( $f'_{co}=40MPa$ ; CFRP).....	99
Tableau V.12 Résultats des cylindres ( $\varnothing 80 \times 320$ mm), série 11 ( $f'_{co}=60MPa$ ; CFRP) .....	100
Tableau V.13 Résultats des cylindres ( $\varnothing 80 \times 500$ mm), série 13 ( $f'_{co}=25MPa$ ; CFRP) .....	101
Tableau V.14 Résultats des cylindres ( $\varnothing 80 \times 500$ mm), série 14 ( $f'_{co}=40MPa$ ; CFRP) .....	102
Tableau V.15 Résultats des cylindres ( $\varnothing 80 \times 500$ mm), série 15 ( $f'_{co}=60MPa$ ; CFRP) .....	103

**Chapitre VI : Analyse et Interprétation des Résultats**

Tableau VI.1 Résistance axiale ( $\varnothing 160 \times 320$ mm/ 150x150x300mm) .....	126
Tableau VI.2 Déformation axiale ( $\varnothing 160 \times 320$ mm/ 150x150x300mm) .....	126

**Chapitre VII : Modèle analytique de confinement**

Tableau VII.1 Données et résultats de cylindres $\varnothing 160 \times 320$ en béton confinés par «CFRP» .....	141
Tableau VII.2 Données et résultats de cylindres $\varnothing 160 \times 320$ en béton confinés par «GFRP» .....	142
Tableau VII.3 Données et résultats de spécimens prismatiques carrés 150x150x300 mm en béton confinés par CFRP .....	146
Tableau VII.4 Comparaison expérimentale/Modèle analytique de la série ‘Circulaire/CFRP’ .....	149
Tableau VII.5 Comparaison Expérimentale/Modèle analytique de la série ‘Circulaire/GFRP’ .....	150
Tableau VII.6 Comparaison Expérimentale/Modèle analytique de la série ‘carré/CFRP’ .....	151

**Chapitre I: Pathologie des structures**

Figure I.1 Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures [06] .....	6
Figure I.2 Fissuration d'une poutre en béton exposée aux eaux de mer [06].....	8
Figure I.3 Dégradation de la structure du supermarché d'Annaba (Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher) [67] .....	10
Figure I.4 Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher due à la chute des panneaux en maçonnerie de l'étage au dessus [30].....	11
Figure I.5 Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher due à la chute des panneaux en maçonnerie de l'étage au dessus [30].....	11
Figure I.6 Représentation schématique de la variation de l'adhérence avec la corrosion [31]. .....	13

**Chapitre II : Différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages**

Figure II.1 Réparation de poutre par béton projeté .....	17
Figure II.2 Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [25].....	19
Figure II.3 Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	19
Figure II.4 Courbes force-déplacement d'un poteau non renforcé [26]. .....	20
Figure II.5 Chemisage en acier appliqué aux poteaux.....	20
Figure II.6 Différents types de chemisage en acier .....	20
Figure II.7 Chemisage en béton armé [44].....	21
Figure II.8 Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite [47] .....	22
Figure II.9 Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées [65].....	23
Figure II.10 Détails du chemisage en BTHP fibré [74].....	23
Figure II.11 Graphiques Force-Déplacement du poteau (renforcé par béton fibré, et du poteau renforcé par BTHP fibré) [74].....	24
Figures II.12 Représentation schématique de la structure des matériaux FRP [52].....	26
Figures II.13 stratifié composite [52] .....	29
Figure II.14 Courbes contrainte-déformation typiques des GFRP, CFRP et des aciers doux [107] ...	31
Figure II.15 Différents éléments renforcés par matériaux composites [07]. .....	32
Figure II.16 renforcement d'une poutre en flexion et au cisaillement [102].....	32
Figure II.17 Réhabilitation du pont Blanc d'El Harrach, Alger [67]. .....	33
Figure II.18 renforcement d'une poutre par la méthode NSM [33]. .....	33
Figure II.19 Renforcement d'une dalle en béton armé [52] .....	34
Figure II.20 Réhabilitation d'un mur en maçonnerie [64].....	35
Figure II.21 Types de disposition des renforts sur un poteau.....	36
Figure II.22 Renforcement d'une colonne par ma méthode Stratification au contact.....	37
Figure II.23 Renforcement d'une colonne par ma méthode Enroulement filamenteaire .....	37
Figure II.24 Renforcement d'une colonne par la méthode coquille préfabriquée [79,81,117].....	38

**Chapitre III : Travaux antérieurs portant sur les colonnes en béton confiné avec des matériaux composites 'FRP'**

Figure III.1 Renforcement à la flexion de poteaux : (b) description du renforcement (a) réponses hystérétiques des poteaux non renforcés et renforcés par CFRP, (d) ainsi que la comparaison des courbes enveloppe d'un poteau non renforcé, par CFRP et chemisage acier [99]. .....	44
Figure III.2 Réponse aux cycles de chargement des tronçons non renforcés renforcés [83]. .....	46

Figure III.3 Courbes moment-courbure pour les corps d'épreuve renforcés par 1 couche (a), 2 couches (b) et 3 couches (c) de CFRP dans la zone de rotule plastique [51].	48
Figure III.4 Description de la technique de renforcement testée par Barros et al. et disposition des lamelles CFRP [14].	53
Figure III.5 Détails de la disposition des plats CFRP et du taux d'aciers longitudinaux [86].	54
Figure III.6 Schéma du renfort latéral secondaire en FRP 'Dense' pour les colonnes RC[20].	58
Figure III.7 Procédure de confinement de Feng et al.	58
<b>Chapitre IV : Programme Expérimental</b>	
Figure IV.1 Courbe de contrainte-déformation du béton non confiné (B25)	79
Figure IV.2 Eprouvette suivant les normes citées en référence	80
Figure IV.3 Essai et Chargement de différents types de spécimens testés	81
<b>Chapitre V : Résultats expérimentaux et observations</b>	
Figure V.1 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	87
Figure V.2 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	88
Figure V.3 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	89
Figure V.4 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B25-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	90
Figure V.5 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B40-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	91
Figure V.6 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B60-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	92
Figure V.7 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type S150/300-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	94
Figure V.8 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type S150/300-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	95
Figure V.9 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type S150/300-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	96
Figure V.10 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	98
Figure V.11 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	99
Figure V.12 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	100
Figure V.13 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/500-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	101
Figure V.14 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	102
Figure V.15 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.	103
Figure V.16 Modes de rupture des cylindres non confinés	104
Figure V.17 Modes de rupture des cylindres confinés avec GFRP (Ø160x320)	105

Figure V.18 Modes de rupture des cylindres confinés avec GFRP (Ø160x320) .....	106
Figure V.19 Arrachement du béton avec l'enveloppe CFRP .....	106
Figure V.20 Modes de rupture des prismatiques carrés non confinés.....	107
Figures V.21 Modes de rupture des prismatiques carrés confinés par CFRP .....	107
Figure V.22 Modes de rupture des spécimens cylindriques non confinés de type Ø80x320 et de type Ø80x500.....	108
Figure V.23 Arrachement du béton avec l'enveloppe CFRP.....	108

**Chapitre VI : Analyse et Interprétation des Résultats**

Figure VI.1 Comportement typique en compression du béton.....	110
Figure VI.2 Courbe Contrainte-déformation des spécimens de section carrée et de section circulaire.....	111
Figure VI.3 Effet du nombre de couches sur le gain de résistance (1) Cylindre Ø 160*320/CFRP, (2) Cylindre Ø160*320/GFRP, (3) Prismatique carré 150*150*300, (4) Cylindre Ø80*500/CFRP .....	113
Figure VI.4 Effet du nombre de couches sur le gain de déformation (1) Cylindre Ø 160*320/CFRP, (2) Cylindre Ø 160*320/GFRP, (3) Prismatique carré 150*150*300, (4) Cylindre Ø 80*500/CFRP.....	114
Figure VI.5 Variation de la résistance en fonction de nombre de couches (a) : Cylindres Ø160/320-CFRP, (b) Cylindres Ø160/320-GFRP, (c) Prismatiques carrés 150/300-CFRP .....	115
Figure VI.6 Variation de la déformation en fonction de nombre de couches (a) : Cylindres Ø160/320-CFRP, (b) Cylindres Ø160/320-GFRP, (c) Prismatiques carrés 150/300-CFRP.....	116
Figure VI.7 Rapports de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) vs. Résistance du béton ( $f'_{co}$ ) .....	117
Figure VI.8 Rapports de déformation ( $\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$ ) vs. Résistance du béton ( $f'_{co}$ ).....	117
Figure VI.9 Effet de la résistance du béton ( $f'_{co}$ ) sur le gain de résistance des spécimens confinés : (a) Cylindres160x320/CFRP, (b) Cylindres160x320/GFRP, (c) Prismatiques carrées/CFRP, (d) Cylindres 80x3600/CFRP.....	119
Figure VI.10 Effet de la résistance du béton ( $f'_{co}$ ) sur le gain de déformation des spécimens confinés : (a) Cylindres160x320/CFRP, (b) Cylindres160x320/GFRP, (c) Prismatiques carrées/CFRP, (d) Cylindres 80x3600/CFRP.....	120
Figure VI.11 Effet du type de composites sur la résistance du béton confiné.....	122
Figure VI.12 Effet du type de composites sur la déformation du béton confiné.....	123
Figure VI.13 Gain de résistance des spécimens de section carrée et de section circulaire .....	125
Figure VI.14 Gain de déformation des spécimens de section carrée et de section circulaire.....	125
Figure VI.15 Courbes Contrainte-Déformation cylindre Ø160x320mm / prismatique carré 150x150x300mm : (a) B25-1CFRP ; (b) B25-2CFRP ; (c) B25-3CFRP ; (d) B40-1CFRP ; (e) B40-2CFRP ; (f) B40-3CFRP ; (g) B60-1CFRP ; (h) B60-2CFRP ; (i) B60-3CFRP.....	128
Figure VI.16 Distribution des contraintes dans la section transversale d'un spécimen prismatique carrée confiné.....	129
Figure VI.17 schéma statique d'un spécimen prismatique carré arrondis.....	130
Figure VI.18 variation du rapport de résistance en fonction du rapport de rayon d'angle.....	130
Figure VI.19 variation du rapport de déformation en fonction du rapport de rayon d'angle .....	130
Figure VI.20 Allure des réponses contraintes déformations des spécimens prismatiques carrés avec différents rayon de coins. ....	131
Figure VI.21 : Trois types de colonnes cylindriques testées Ø160x320, Ø80x320 et Ø80x500 .....	132
Figure VI.22 Effet du diamètre sur le gain de résistance des cylindres confinés.....	132
Figure VI.23 Effet du diamètre sur le gain de déformation des cylindres confinés .....	133

**Chapitre VII : Modèle analytique de confinement**

Figure VII.1 Comportement en compression axiale du béton en termes de déformation axiale, latérale et volumétrique [7]. .....	136
Figure VII.2-a Mécanisme de confinement (section circulaire).....	137
Figure VII.2-b Mécanisme de confinement (section carrée).....	137
Figure VII.2-c Mécanisme de confinement (section carrée avec angles arrondis).....	137
Figure VII.3 Rapport de résistance /rapport de confinement effectif.....	140
Figure VII.4 Rapport de Déformation axiale / rapport de confinement effectif.....	143
Figure VII.5 Aire effective de confinement .....	145
Figure VII.6 Evolution du coefficient de la section effective de confinement en fonction rayon.....	145
Figure VII.7 Rapport de résistance vs. rapport de confinement effectif (section carée) .....	147
Figure VII.8 Rapport de rdeformation vs. rapport de confinement effectif (section carée).....	147

INTRODUCTION  
GÉNÉRALE

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur vie par vieillissement des matériaux ou par modification des conditions d'exploitation. Plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage: corrosion des aciers d'armatures, fissuration du béton, changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, mauvais dimensionnement, endommagement par un tremblement de terre, prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc.

Les méthodes de renforcement classique, telle l'augmentation de section par ajout de nouvelles barres d'armatures et un nouveau béton lié à l'ancien ouvrage, sont souvent très complexes à réaliser, très onéreuses, et nécessitent une intervention lourde sur la structure. Grâce aux progrès effectués dans le domaine des adhésifs au milieu du siècle passé, une nouvelle option se présentait aux ingénieurs : le renforcement de structure par collage externe. Dès le milieu des années soixante, est apparu en Afrique du sud le premier cas d'ouvrages renforcés par collage des lames d'acier sur des structures en béton [17]. Cette méthode constituait une avancée majeure dans le domaine de la réfection car elle simplifiait grandement le travail par rapport aux méthodes traditionnelles. Toutefois, des problèmes de corrosion de l'acier mettaient en péril la sécurité de ce type de renforcement.

Dès lors, la recherche dans le domaine de la réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, les matériaux composites se sont taillés une place importante en génie civil.

Dans une structure courante en béton armé, il est possible de renforcer par matériaux composites presque tous les éléments de construction: colonnes, poutres, dalles, murs. Cette technique permet d'améliorer: la capacité portante, la rigidité et la durée de vie de la structure. Les composites en polymères renforcés par la fibre de carbone (CFRP), par la fibre de verre (GFRP) ou par la fibre d'aramide (AFRP) sont des sujets d'actualité avec une attention grandissante dans l'industrie de la construction à cause de différents avantages, tel-que: le rapport résistance/poids élevé, la bonne résistance à la corrosion, un bon comportement vis-à-vis de la durabilité et la facilité de mise en place.

Durant les deux dernières décennies, les tissus en FRP ont été particulièrement utilisés dans le génie civil pour le renforcement et la réparation des structures, notamment pour augmenter la résistance des poteaux, des poutres, des dalles ou bien des tabliers et piles de ponts ainsi que pour corriger des erreurs localisées de conception ou de réalisation. Le but du renforcement par matériaux composites est d'étudier la possibilité de rehausser la capacité portante ainsi que la capacité à la déformation sans pour autant modifier en profondeur la forme architecturale des poteaux.

De nombreux travaux de recherches pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisés comme renforcement externe.

Les premières recherches ont vu le jour au début des années 80 [2], mais son application à grande échelle n'a commencé qu'après les séismes de Whittiers Narrows (1987), Loma Prieta (1989) aux USA et Kobe (1995) au Japon qui ont révélé la faiblesse des structures

dimensionnées avec d'anciens codes de calcul [1]. La littérature regorge d'études expérimentales et analytiques faites sur les colonnes circulaires confinées par enveloppe de PRF et leur comportement est maintenant bien connu, cependant, la quantité des travaux faits sur les colonnes de section carrée ou bien rectangulaire est beaucoup plus modeste.

Il est donc pertinent d'investiguer sur le comportement en compression axiale des colonnes en béton, renforcées avec des PRF si l'on considère le potentiel de ces matériaux en termes de performances mécaniques, durabilité et gains économiques sur la durée de vie des ouvrages.

### ▪ **Problématique**

Si on considère que la réhabilitation des infrastructures vitales, stratégiques ou même habitationnelles est d'une importance capitale pour l'économie d'un pays, le présent travail de recherche est prévu pour apporter une contribution scientifique pour mieux maîtriser l'utilisation des composites de FRP dans le domaine du renforcement et de la réparation de la construction en général, et des poteaux en béton armé en particulier.

En effet divers problèmes liés à la conception des éléments structuraux restent insuffisamment étudiés, tel que :

- *Le chargement sollicitant exercé sur les éléments structuraux:* Durant les deux dernières décennies, une quantité considérable de travaux expérimentaux et analytiques ont été réalisés concernant l'utilisation des PRF comme un confinement externe dans les structures en béton. La majorité de ces études concernait les éléments structuraux soumis à la flexion et/ou cisaillement. Peu de travaux existent sur le renforcement d'éléments soumis à la compression. Le confinement du béton augmente considérablement sa résistance à la compression ainsi que sa rigidité et le comportement élastique linéaire des PRF procure une pression de confinement croissante contrairement à l'acier.
- *la forme de la section transversale des colonnes confinées:* la forme de la section transversale dont la forme circulaire est la plus étudiée alors que les formes rectangulaire et carré restent insuffisamment étudiées, alors que pratiquement elles sont les plus usités.

### ▪ **Objectifs de la thèse**

Le but principal de cette thèse est de contribuer, à travers des investigations théoriques, expérimentales, à la compréhension du comportement en compression axiale des poteaux en béton renforcés à l'aide des enveloppes en matériaux composites FRP.

Les objectifs spécifiques consistent à:

- mettre en évidence et quantifier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement en compression axiale des colonnes en béton renforcées avec des enveloppes de FRP :
  - degré de confinement (nombre de couches);
  - résistance en compression du béton non confiné ;
  - type de matériaux composites ;
  - forme de la section transversale (circulaire ou carrée) des colonnes confinées ;
  - rayon de courbure des coins pour les colonnes de section carrée ;

- rapport volumétrique ( $\rho$ ).
- fournir une description précise du comportement des colonnes renforcées par matériaux composites à base de fibres sous compression axiale, et une visualisation claire de l'évolution de leurs performances en termes de résistances et de déformation.
- développer un modèle de confinement, compréhensible et rationnel pour la prédiction de la résistance et de la déformation des colonnes confinées avec des renforts externes en FRP sollicitées sous compression axiale. Ce modèle est calibré à l'aide des résultats expérimentaux.

La réalisation de ces objectifs reposait sur des investigations théoriques, menées à travers un état des connaissances exhaustif, et des investigations expérimentales, conduites à travers un programme expérimental réalisé sur des modèles réduits de colonnes confinées par matériaux composites.

#### ▪ **Organisation de la thèse**

La structure de la thèse est répartie en trois grandes parties :

- Partie I : synthèse bibliographique est consacrée à l'état des connaissances ;
- Partie II : étude expérimentale et
- Partie III : modèle analytique.

Ce travail commence par une introduction générale où on définit au préalable la problématique du sujet et les objectifs recherchés.

La synthèse bibliographique comporte trois chapitres :

- Le chapitre I revisite, à travers une revue des connaissances, la pathologie des structures confrontées durant leur vie à des agressions chimiques, physicochimique, mécaniques ou thermiques et, le plus souvent à des actions conjuguées.
- Le chapitre II cite les techniques employées dans les travaux de renforcement ou de réparation des structures en béton armé.
- Le chapitre III fait le point sur les connaissances actuelles concernant le renforcement des colonnes à l'aide de PRF. C'est une revue de la littérature sur les travaux expérimentaux antérieurs portant sur les colonnes en béton confiné avec des matériaux composites 'PRF'. Ce chapitre vise aussi, une étude bibliographique détaillée sur le développement des différents modèles de résistance établis pour le béton confiné avec des matériaux composites.

Cette partie bibliographique a servi dans la conception du programme expérimental: sélection plus éclairée des paramètres d'étude; choix plus rationnel des caractéristiques géométriques des spécimens mis à l'essai et dispositif d'instrumentation optimisé.

La deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale de ce travail comporte trois chapitres :

- Le chapitre II.1 descripti les essais expérimentaux dont les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (béton et composites) qui constituent les corps d'épreuve caractérisés, ils fourniront pour la suite de l'étude des informations indispensables à la

compréhension du comportement des spécimens confinés ainsi qu'à la proposition d'un modèle analytique. Dans ce chapitre le programme expérimental élaboré dans le cadre de ce travail a été également présenté. Les résultats obtenus pour la caractérisation des matériaux (béton, matériaux composites) ont été donnés sous forme de tableaux et graphiquement sous forme de courbes contrainte-déformation.

- Le chapitre II.2 récolte les résultats expérimentaux obtenus. Il est structuré en deux parties, la première concerne les résultats du programme sous formes de tableaux incluant les valeurs maximales de résistance et les déformations correspondantes et sous forme de graphes contrainte-déformation. La deuxième partie illustre les modes de rupture observés pour chaque série d'essai.
- Le chapitre II.3 est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux. Ces résultats sont analysés en termes de résistance et de déformation axiale et radiale tout en quantifiant l'influence des paramètres suivants: le degré de confinement, la résistance du béton non confiné, le type de matériaux composites, la forme de la section transversale des spécimens (circulaire/carrée), le rayon de courbure des coins pour les colonnes de section carré et l'élancement géométrique ( $L/D$ ).

La troisième partie propose un modèle analytique de confinement estimant la résistance maximale et la déformation correspondante. Ce modèle est basé sur la corrélation entre les résultats expérimentaux obtenus dans le présent travail et les considérations théoriques de confinement.

Ce travail se termine par une conclusion générale sur les résultats obtenus et des perspectives pour les travaux futurs de recherches.

Partie I :  
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre: I : Pathologie des structures

Chapitre II : Différentes techniques de réparation et de  
renforcement des ouvrages

Chapitre III : Travaux antérieurs portant sur les colonnes en  
béton confiné avec des matériaux composites 'FRP'

## Chapitre I: Pathologie des structures

### I.1 Introduction

L'intérêt de la construction est de bâtir des structures qui doivent résister aux charges afin d'assurer une fonction (loger des personnes, permettre à des véhicules de franchir un cours d'eau,...) résister aux agressions de l'environnement et être durables dans le temps. La structure doit garder un même niveau de performance le plus longtemps possible (capacité à répartir les charges, durabilité vis-à-vis du milieu extérieur, apparence esthétique...). Si le niveau de performance baisse, il faut la renforcer: c'est le principe de la rénovation.

L'état des constructions en béton est un sujet grandement discuté dans la littérature et les rencontres scientifiques, du fait qu'une grande proportion des constructions est âgée et nécessite des interventions à court terme. La détérioration dans le temps de ces constructions est principalement attribuable aux conditions d'exploitation de plus en plus exigeantes.

N'importe quelle structure se trouve confrontée durant sa vie à des agressions chimiques, physicochimiques, mécaniques ou thermiques et, le plus souvent, à des actions conjuguées.

Ces agressions se traduisent, dans la plupart des cas, par une diminution des propriétés mécaniques des matériaux utilisés et, par conséquent, par une diminution notable de la durée de vie de la structure dans laquelle ils sont incorporés.

Avant de procéder à toute réhabilitation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet, cette étape est nécessaire pour le choix de la réhabilitation optimale qui peut être définie comme la réparation la plus durable.

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les causes de ces problèmes sont multiples:

### I.2 Altérations d'origine chimique

Le béton est un matériau basique ( $\text{pH} > 13$ ), par conséquent vulnérable aux attaques acides qui agissent sur la pâte de ciment en entraînant soit la dissolution de certains hydrates (comme la portlandite), entraînant une perte d'alcalinité, soit la formation de composés nouveaux peuvent être expansifs. Dans certains cas, les réactions peuvent être internes et affecter les constituants du béton comme le ciment (ettringite différée) ou les granulats (alcali réaction) [91].

### I.3 Action des chlorures

Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit par le biais de ses constituants au moment de sa confection, soit ultérieurement, s'il est exposé à une atmosphère maritime ou en présence de sels de déverglaçage.

Une partie des chlorures, appelée *chlorures liés*, s'adsorbent physiquement sur les parois des capillaires ou réagissent avec les aluminates de calcium pour former des monochloro-aluminates hydratés. La quantité de chlorures liés dans un béton dépend des teneurs en aluminates et en sulfates du ciment utilisé (un ciment riche en  $\text{C}_3\text{A}$  est susceptible de fixer davantage d'ions chlore mais cette capacité diminue en présence de sulfates). Cependant, une

partie des chlorures liés peut être libérée lorsque le pH du béton diminue sous l'action de la carbonatation.

L'autre partie appelés chlorures libres, va pouvoir migrer à l'intérieur du béton et atteindre les armatures pour les dépassiver, puis les corroder. La quantité de chlorures libres augmente avec le rapport E/C et avec la concentration en sels du milieu environnant [6].



**Figure I.1** Poutre située en bord de mer sous l'effet de l'agression des chlorures [6].

La vitesse de pénétration des chlorures dépend essentiellement des conditions d'humidité ambiante. Généralement, en milieu saturé, on considère que la pénétration des chlorures se fait selon un processus de diffusion, et le calcul de la concentration à une profondeur et un temps donnés découle de la deuxième loi de Fick [91]. Ainsi, la vitesse de pénétration est directement liée à la porosité interconnectée de la pâte et à la concentration en sels environnants. Cependant, dans un milieu partiellement saturé, c'est-à-dire soumis à des cycles d'immersion-séchage, la pénétration des chlorures se produit surtout par convection [42].

Plus précisément, au cours d'un séchage du béton, l'eau s'évapore et les chlorures restent dans le matériau soit sous forme adsorbée sur les parois des pores, soit en formant des cristaux de sel. Si par la suite ce béton est ré-humidifié, ces sels sont de nouveau dissous dans l'eau entrante. Le profil de teneur en chlorure peut ainsi différer de ce qui correspond à une pénétration de chlorures en immersion constante [3].

#### **I.4 Action des sulfates**

Ce type d'agression a été observé dès 1887 par Candlot (observation faite sur les mortiers des fortifications de Paris au contact d'eaux gypseuses) [3]. Les sources de sulfates peuvent être externes ou internes. Dans le milieu extérieur au béton, les principales sources de sulfates sont :

- les sols : où la concentration en sulfates est généralement assez faible, (entre 0,01 et 0,05% du sol sec) mais peut aussi être localement très élevée (supérieure à 5% dans certains sols contenant du gypse). Les sols argileux sont également susceptibles de contenir des pyrites qui peuvent s'oxyder en sulfates au contact de l'air et de l'eau. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique.
- l'aérobiose de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes, etc.),
- les eaux souterraines séléniteuses : les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols contenant des sulfates (naturels ou issus de pollutions industrielles) se chargent en ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . La concentration en ions de l'eau dépend de la solubilité du sulfate et donc de la température et de la présence d'autres sels. Les sulfates présents sont souvent des sulfates alcalins ou de magnésium.

- l'eau de mer : l'eau de mer renferme des ions variés mais c'est l'action des sulfates de magnésium (à partir de 2,2 g/l de  $MgSO_4$ ) qui peut entraîner le plus de désordres d'origine chimique dans un béton [21].
- les environnements industriels (industrie chimique, usine d'engrais, combustion du charbon qui dégage du dioxyde de soufre...).
- les pluies acides emmenant avec elles le dioxyde de soufre contenu dans l'atmosphère
- Les sources internes de sulfates comme les granulats : essentiellement le cas des granulats contenant des pyrites (sulfures de fer) qui peuvent s'oxyder ou des granulats gypseux. Les sulfates peuvent être présents sur les granulats suite à une pollution accidentelle (déchets de plâtre par exemple dans des granulats recyclés).

### I.5 Action des eaux

#### ▪ Action des eaux naturelles

L'agressivité des eaux naturelles dépend de trois paramètres qui sont le pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif.

Le pH d'une eau indique son caractère acide ou basique. L'eau est acide lorsqu'elle renferme du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou des sels d'acides forts et de bases faibles ; elle est basique si elle contient des carbonates, des bicarbonates et des hydroxydes.

Les eaux agressives ont une action dissolvante vis-à-vis de certains hydrates de ciment (en particulier la portlandite) mais aussi des granulats calcaires. En présence de ces eaux, il conviendra d'utiliser des ciments pouzzolaniques et des granulats siliceux.

#### ▪ Action des eaux de pluies

Les pluies agressives sont les pluies dont le pH est voisin de 4. L'agressivité est due essentiellement à la formation d'acide sulfurique et d'acide nitrique à partir des  $SO_2$  et  $NO_2$  présents dans certaines atmosphères industrielles. Les dégradations peuvent être superficielles (dissolution) ou internes (comme l'expansion des sulfates).

#### ▪ Action des eaux de mer

L'eau de mer est l'un des milieux les plus agressifs pour le béton. Son attaque est le résultat de réactions plus au moins simultanées entre les sulfates, les chlorures et les constituants du ciment ( $C_3A$  et  $Ca(OH)_2$ ). Les sels de magnésium ( $MgCl_2$  et  $MgSO_4$ ) sont les plus agressifs ; la substitution  $Mg^{++} \rightarrow Ca^{++}$  se fait aisément dans la portlandite, mais aussi dans les C-S-H qui se transforment progressivement en M-S-H, silicate de magnésium sans propriétés liantes.



Figure I.2 Fissuration d'une poutre en béton exposée aux eaux de mer [6].

La cause de dégradation la plus importante reste cependant la formation d'ettringite qui engendre un gonflement puis fissuration du béton. L'attaque se fait d'abord en surface puis pénètre au cœur du matériau. La dégradation des bétons en milieu marin dépend aussi du degré d'immersion. Ainsi, alors qu'en immersion totale l'attaque chimique reste généralement modérée, en immersion alternée les actions des vagues, du sable et parfois du froid s'ajoutent à l'attaque chimique et conduisent à une forte et rapide dégradation des bétons.

### **I.6 Altérations microbiennes**

Pour les structures en contact avec les eaux usées (station d'épuration), il peut se produire une attaque en présence de bactéries de types Thiobacillus qui oxyde l'hydrogène sulfuré gazeux ( $H_2S$ ) qui se condense sur les parois en acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). Ce dernier attaque la portlandite formant le gypse.

### **I.7 Altérations d'origine physico-chimique**

Les causes physiques de la fissuration sont d'une part, le tassement qui accompagne le ressuage et, d'autre part, les retraits (retrait plastique, contraction thermique après prise, autodéshydratation), et le phénomène de gel-dégel. Ces retraits ne pouvant pas en général se développer librement, sont des générateurs de tensions.

### **I.8 Retrait**

#### ***Retrait lors du durcissement***

Le retrait hydraulique s'effectue sous l'action de l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage. Le retrait hydraulique peut être la cause de pré-fissuration du béton. La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur.

Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle. Les différents types de fissures de retrait sont classés chronologiquement suivant leur ordre d'apparition :

- Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage : elles sont parfois visibles à travers l'eau de ressuage (encore appelées cassures de béton frais). Ces fissures sont provoquées par le tassement du béton frais dans les coffrages et le ressuage qui l'accompagne, ou par une sédimentation du béton résultant d'un défaut de compacité et provoquant un gradient vertical de l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques. Elles sont relativement profondes et ouvertes (de l'ordre du millimètre), endommagent les surfaces horizontales et reproduisent souvent le tracé de la nappe supérieure de ferrailage (surtout lorsque les vibreurs ont touché les armatures). Elles s'accompagnent souvent de déflexions locales du béton au milieu des mailles du ferrailage.
- Fissures apparaissant juste après le décoffrage : Ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux. Elles forment un maillage de quelques décimètres de côté reproduisant ou non le ferrailage sous-jacent et sont généralement fines et peu profondes lorsqu'elles sont occasionnées par le retrait d'auto-déshydratation. Elles sont plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la

cause, et peuvent même être traversantes dans le cas de pièces massives lorsque le ciment utilisé a une chaleur d'hydratation particulièrement élevée (la répartition non-linéaire de la température au sein d'une même pièce en béton provoquant des gradients thermiques dans l'épaisseur des parois ou des écarts de température entre les parties minces et épaisses, et donc des contraintes internes de retrait thermique).

- Fissures apparaissant plusieurs jours ou plusieurs mois après le décoffrage : Ces fissures présentent un faciès analogue aux fissures précédentes, et sont créées par le retrait de dessiccation encore appelé retrait à long terme. Ce retrait résulte du départ de l'eau en excès dans le béton en raison de la mise en équilibre hygrométrique de la structure en béton avec son milieu extérieur [21]. La mise en équilibre dépend de l'épaisseur des pièces et nécessite de nombreuses années voire plusieurs décennies pour des tabliers de ponts.

Le phasage de bétonnage, l'existence de joints verticaux régulièrement espacés ou de supports horizontaux suffisamment lubrifiés, la qualité de la cure, la conception du ferrailage, la température et l'humidité relative du milieu environnant, le choix de la composition du béton (E/C, chaleur d'hydratation du ciment, adjuvants, ...) sont les facteurs les plus importants qui interviennent dans le développement de fissures de retrait.

### ***Gel-dégel***

L'altération des ouvrages en béton armé construits en montagne ou dans des régions à saison hivernale rigoureuse est due essentiellement aux cycles gel-dégel et à l'utilisation de sels anti-verglas.

Les symptômes courants sont écaillage présent à la surface de la structure, et gonflement accompagné d'une fissuration en réseau.

Jusqu'à ce jour, il ne semble y avoir de théorie expliquant le mécanisme de gel-dégel. Néanmoins on peut citer quelques points qui entrent en jeu dans le mécanisme de congélation :

- importance déterminante de la porosité et plus particulièrement de la taille et de la distribution des pores au sein du matériau.
- importance du degré de saturation critique ou rapport entre la quantité d'eau gelable et le volume effectivement disponible pour son expansion.
- transformation de l'eau en glace fonction de la température, de la pression locale, de la taille du capillaire dans lequel elle se trouve et de la teneur en sels.
- transformation de l'eau en glace se traduisant par une augmentation de volume de 9% qui provoque une expansion de l'eau hors des capillaires; ainsi les tensions locales dépassent la résistance à la traction.
- influence du taux de refroidissement et donc de la vitesse d'évolution du front de gel.

Tous ces paramètres interviennent dans le processus de gonflement du béton et provoquent sa fissuration.

### **I.9 Altérations dues aux forts gradients thermiques**

Les dégradations de béton par incendie provoquent un endommagement significatif du béton et des armatures ; l'incendie provoque des contraintes différentielles importantes dans le béton. La température atteinte par un point situé dans le talon d'une poutre à 5 cm du parement est d'environ 850° C après 30 min, 600° C après 2 heures et 150° C au bout de 4

heures. A une température de  $573^{\circ}\text{C}$ , les granulats contenant du quartz se fissurent et à  $800^{\circ}\text{C}$  les granulats calcaires de décarbonatent avec libération de  $\text{CaCO}_3$  [67].

Mécaniquement, la vaporisation brutale de l'eau induit des contraintes d'autant plus importantes que le béton est peu perméable. Ces contraintes induisent des fissurations, des éclatements et parfois la disparition du matériau béton (figure I.3).



**Figure I.3** Dégradation de la structure du supermarché d'Annaba (Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher) [67].

### I.10 Altérations d'origine sismique

Les séismes provoquent des mouvements vibratoires et des ruptures des sols qui excitent les constructions par déplacement de leurs fondations. Ces mouvements, variables dans le temps, ont une durée courte, souvent inférieure à une minute, et soumettent surtout les structures à des champs d'accélération et à des déplacements imposés.

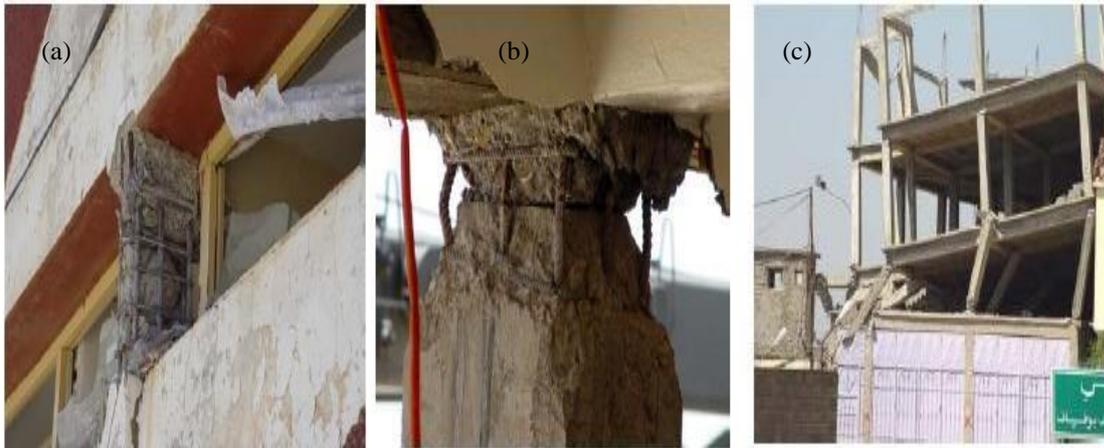
Généralement les poutres ne subissent pas directement des désordres dus à l'onde sismique horizontale, néanmoins la dislocation des panneaux de maçonnerie et leur chute sur les planchers peuvent provoquer des flèches excessives. Par contre, les poutres supportant des consoles (balcon) et des paliers d'escalier (type hélicoïdal) restent relativement vulnérables à l'accélération verticale d'un séisme (figure I.4).



**Figure I.4** Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher due à la chute des panneaux en maçonnerie de l'étage au dessus [30].

Les dommages des poteaux provoqués par un séisme sont principalement de deux types :

- Dommages dus à la flexion cyclique avec un faible effort de cisaillement sous un effort axial de compression très élevé, conduisant aux poteaux fragiles : Ce type de dommages se manifeste par la rupture dans la base et le sommet du poteau (Figure I.5). Il se produit dans les poteaux ayant un coefficient d'élançement moyen à élevé.
- Dommages en raison d'un effort de cisaillement cyclique avec un faible moment fléchissant sous un effort axial de compression très élevé conduisant au phénomène des poteaux courts.



**Figure I.5** (a) Destruction par cisaillement du poteau court (b) destruction de l'extrémité du poteau (c) cisaillement des poteaux de l'étage intermédiaire [30].

### I.11 Altérations dues aux erreurs d'exécution

L'utilisation de méthodes inadéquates ou la négligence pendant une phase quelconque de la construction peut affecter la qualité du béton ; ce béton se détériora plus facilement que celui obtenu conformément aux strictes règles de l'art. Bien qu'un défaut d'exécution puisse être la porte ouverte aux agents agressifs, il est rarement une cause directe de détérioration sauf dans les cas suivants [67]:

- Mauvaise formulation du béton qui engendre une porosité trop élevée, facilitant la circulation de l'eau et des agents agressifs.
- Mauvaise exécution des coffrages : mal calculés, déformables, trop minces.
- Mauvaise disposition des armatures.
- Absence d'armature de peau (pour répartir les contraintes dues au retrait).
- Mauvaise condition de transport du béton frais provoquant une ségrégation.

### I.12 Corrosion des armatures

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation précoce des structures en béton armé. Quand les agents agressifs ont atteint les armatures, à cause soit de la carbonatation du béton d'enrobage soit de l'attaque par les chlorures, la sécurité et l'état de service des structures se trouvent fortement altérés, tout d'abord par le comportement de l'acier. En effet, l'armature subit une perte de section ainsi qu'une modification de ses propriétés mécaniques. Ensuite, le comportement du béton d'enrobage évolue, il va se fissurer à cause des produits résultant de la corrosion. Enfin, la diminution de l'adhérence acier-béton est observée. La réaction de corrosion est un processus électrochimique qui se manifeste par la transformation graduelle du fer en oxydes de fer. Dans un premier temps, cette réaction engendre une perte de section d'acier. Cette perte de section se manifeste selon deux phénomènes : soit la corrosion par piqûre (locale), soit la corrosion généralisée sur toute la longueur de la barre. A ce stade, la corrosion provoque une dégradation de l'interface acier-béton. Cette dégradation fait diminuer l'adhérence entre les deux matériaux. L'expansion volumique des produits de corrosion provoque d'une part, la disparition des nervures et d'autre part, la fissuration du béton de recouvrement. Dans un second temps, ces pertes de section peuvent mener à une diminution de la ductilité et de la résistance des éléments armés [43].

### a) Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion

La corrosion des armatures d'acier des constructions est un problème coûteux bien connu. En présence de chlorures, d'humidité et d'oxygène, la corrosion progresse assez rapidement. Les produits de corrosion, qui occupent deux fois le volume de l'acier original, exercent des contraintes de traction dans le béton environnant.

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel (atmosphère, eaux ou sols) ; ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.

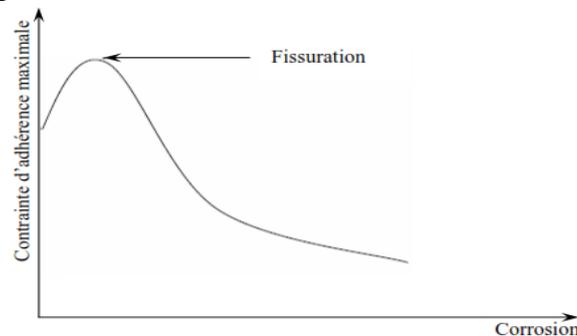
Le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes surtout la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) et abaisse le pH de la solution interstitielle environ 13 jusqu'à 9 ; ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe " concentration-profondeur " qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas) [43].

### b) Les conséquences de la corrosion sur l'adhérence entre l'acier et le béton

L'adhérence entre l'acier et le béton est un des facteurs essentiels pour obtenir de bonnes performances des structures en béton armé. Dans le cas des barres nervurées, la contrainte d'adhérence est principalement développée par l'interaction mécanique entre les nervures et le béton environnant. La corrosion a une double influence sur la fissuration, le développement de la fissuration longitudinale et la diminution des fissures primaires ou transversales. Ce mécanisme implique une altération de l'interaction entre l'acier et le béton, et donc affaiblit l'adhérence entre les deux matériaux.

Globalement, le comportement de l'adhérence comporte plusieurs phases dans son évolution avec la corrosion (voir figure I.6).



**Figure I.6** Représentation schématique de la variation de l'adhérence avec la corrosion [31].

A partir d'essais d'adhérence réalisés par de nombreux auteurs [10], [23], [11], [24], nous pouvons distinguer trois phases essentielles en relation avec la contrainte d'adhérence maximale.

1. Pour de faibles pourcentages de corrosion (avant la formation des fissures primaires), il apparaît une augmentation du frottement entre l'acier et le béton. Cette augmentation est causée par l'augmentation de la rugosité de la barre d'acier en raison de la formation d'une fine couche de rouille stable et adhérente. Ceci explique dans les études expérimentales le saut initial de l'adhérence maximale en fonction de la corrosion. A la fin de ce stade, l'apparition des fissures primaires va avoir pour effet de diminuer l'adhérence, mais le confinement de la barre par le béton est encore important.
2. Avec le développement de la corrosion, l'adhérence maximale va subir une chute importante. En effet, la dégradation très importante de la surface de l'acier va provoquer l'éroussement, voire la disparition, des nervures, rendant très faibles les interactions entre l'acier et le béton. De plus le confinement du béton environnant sera diminué par l'ouverture de fissures longitudinales.
3. Le dernier stade correspond à une très faible diminution de l'adhérence maximale en fonction de la corrosion. Le confinement de la barre est alors fortement diminué, et une augmentation de la corrosion n'aura quasiment plus d'effet sur la dégradation de l'interface. Il en restera une contrainte résiduelle.

### **I.13 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'établir un inventaire de différentes pathologies des structures en béton armé et de dresser un état de l'art sur leurs principales causes.

Une opération de réhabilitation exige un sérieux travail de recherche, tant au plan architectural que technique, et l'emploi de produits et de méthodes de mise en œuvre adaptés, entraînant, pour l'ensemble des corporations du bâtiment, de nouvelles responsabilités, qu'elles n'ont peut être pas encore toutes bien assimilées.

Il existe un certain nombre de recommandations relatives au choix d'une technique de remise en état et de renforcement d'un ouvrage existant :

- Il ne faut jamais engager de travaux destinés à lutter contre une dégradation, aussi peu onéreux soient-ils, sans avoir au préalable procédé (ou fait procéder) à un diagnostic sérieux permettant de déterminer le type de désordre à combattre.
- Lorsque le diagnostic démontre que plusieurs causes se conjuguent ou paraissent se conjuguer pour entraîner la dégradation d'un bâtiment, plusieurs interventions sont en général nécessaires. La sagesse commande alors de ne pas les engager ensemble mais successivement, en commençant par la moins onéreuse et en n'entamant la suivante qu'après avoir jugé les résultats de la précédente.
- Il ne faut pas confondre les remèdes s'attachant aux causes du mal à ceux n'ayant pour seul objet que camoufler ses effets.
- Avant d'entamer un traitement important, et donc coûteux, il est recommandé, chaque fois que cela est possible, de procéder à un essai pour juger de son efficacité dans le cas concerné. Avant de porter un jugement sur les résultats de cet essai, il convient d'attendre un délai raisonnable (par exemple pour le cas de l'humidité, plusieurs mois sont en effet nécessaires pour que l'eau accumulée avant traitement dans les maçonneries puisse s'évaporer ou pour que l'humidité réapparaisse après application d'un remède inefficace).

## Chapitre II : Différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages

### II.1 Introduction

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en l'adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitation, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de réparation).

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de *réhabilitation* de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion ; la notion de *réparation* visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de *renforcement* ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitation modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

Les constructions sont soumises à des agressions (vieillessement, agressions climatiques, physiques ou chimiques...etc) susceptibles d'affecter les matériaux qui les constituent et de provoquer l'apparition de dégradations ou désordres (fissuration, fléchissement excessif, corrosion des armatures...).

La recherche de nouveaux procédés de restructuration afin de réduire les coûts de réhabilitation, amène à réfléchir sur l'application des méthodes ponctuelles de réhabilitation. L'objectif du renforcement par des nouvelles techniques (mortier fibré haute performance et matériaux composites) est de rendre à l'ouvrage existant son état structurel initial et d'accroître sa capacité.

### II.2 Méthodes non structurales de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé

Ces méthodes nécessitent autant de soin que l'application de techniques de réparation et/ou de renforcement dites structurales. La réparation par reprise du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant :

- préparation de la surface de béton à réparer ;
- traitement des armatures éventuellement exposées ;
- mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux d'apport.

#### II.2.1 Préparation de la surface de béton

Avant de procéder à un ragréage, il est indispensable d'enlever toutes les parties de béton non adhérentes au support. Il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydrodémolition, le décapage au marteau pneumatique ou, dans les cas extrêmes, au brise-béton, le bouchardage, le burinage et le piquage au petit marteau pneumatique.

Dans des ordres consécutifs à la corrosion des armatures, il faut également effectuer un dégagement complet avec mise à nu de l'armature afin d'éliminer des zones de béton apparemment sain mais qui peuvent être polluées par chlorures ou atteintes de carbonatation. Différentes techniques existant pour éliminer le béton dégradé [45]. Les plus classiques sont le sablage (à sec ou humide) ainsi que le décapage à l'eau à très haute pression.

### II.2.2 Protection des armatures

En présence d'aciers apparents corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes. Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dépassivée du béton.

### II.2.3 Réparation du béton dégradé par apport de matériaux

#### ▪ Ragréage

Les produits de ragréages peuvent être classés en trois catégories :

- les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et, éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés.
- les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortiers), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxy ou polyuréthanes.
- les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymère.

Le choix du produit est fonction de l'objectif de la réparation et dépend de nombreux paramètres comme les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des produits, des conditions de mise en œuvre ou encore de la durabilité.

#### ▪ Traitement des fissures

Le traitement des fissures peut remplir plusieurs fonctions :

- une fonction d'étanchéité, en obstruant la fissure de façon à empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier l'eau ;
- une fonction de scellement, l'espace vide est alors rempli par un matériau adhérent ou non, déformable ou non ;
- une fonction mécanique, le matériau injecté rétablit alors le monolithisme de la structure, ses caractéristiques sont élevées et il adhère aux surfaces.

Les traitements sont alors effectués en surface ou dans la masse.

- **Traitement en surface :** Il permet de rétablir l'étanchéité (cas de corrosion, de cycles de gel-dégel). Trois techniques existant : le calfeutrement, le pontage et l'imprégnation [43].
- **Traitement dans la masse :** Le traitement dans la masse consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

Deux grandes familles de produits existent, utilisables en traitement de surface comme en traitement dans la masse selon leur origine (minérale ou organique). Cependant, aucune garantie n'est véritablement donnée quant au succès de l'opération de l'injection et aucune note de calcul n'accompagne l'intervention.

### II.3 Méthodes structurales de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé

Les différentes techniques structurales de renforcement et de réparation correspondent soit à la projection de béton fibré ou non fibré, soit au collage de tôles d'acier, soit au collage des plaques composites ou à l'insertion de barres composites dans des engravure préparées sur la surface de la poutre.

#### II.3.1 Béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires (Figure II.1). La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond.

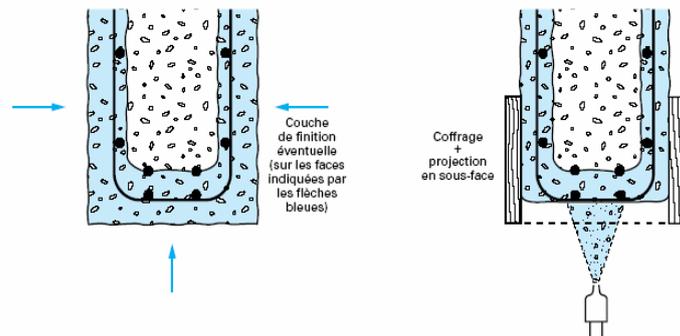


Figure II.1 Réparation de poutre par béton projeté

Le tableau II.1 illustre les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes.

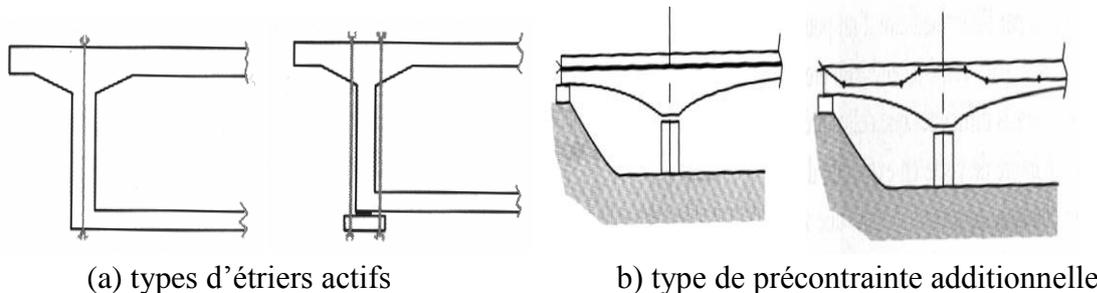
Une description détaillée de cette technique est donnée dans l'ouvrage de Resse [92]. Selon Resse, les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories: les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations. La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité).

**Tableau II.1** Avantages et inconvénients de voie sèche et voie mouillée [92].

	inconvénients	avantages
voie sèche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande souplesse d'utilisation.</li> <li>- grandes distances de transport.</li> <li>- possibilité de projeter de fortes épaisseurs en une seule couche même sans accélérateur.</li> <li>- résistance élevée.</li> <li>- obtention aisée de béton à haute performance.</li> <li>- robotisation possible pour augmenter les cadences et les conditions de travail.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une capacité de production limitée.</li> <li>- un dégagement de poussière.</li> <li>- une appréciation visuelle de la teneur en eau par la porte-lance.</li> <li>- une perte par rebond important.</li> <li>- dans le cas de béton fibré, un appauvrissement en fibres dans le béton placé.</li> <li>- un risque de détérioration des supports fragiles.</li> </ul>
voie mouillée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- capacité de production élevée.</li> <li>- diminution des poussières.</li> <li>- diminution des pertes par rebond.</li> <li>- meilleur contrôle de la qualité du béton.</li> <li>- composition du béton en place homogène dans l'épaisseur de la couche.</li> <li>- robotisation, amélioration des conditions de travail.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- moins de souplesse.</li> <li>- un transfert sur de grandes distances difficiles.</li> <li>- un compactage et une adhérence plus faible.</li> <li>- la nécessité d'un dosage initial en ciment élevé (minimum 400kg/m) pouvant entraîner des retraits importants.</li> </ul>

**II.3.2 Précontrainte additionnelle**

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. (Figure II.2). En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées [25].



**Figure II.2** Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [25].

### II.3.3 Renforcement par chemisage en acier ou en béton armé

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) (Figure II.3).

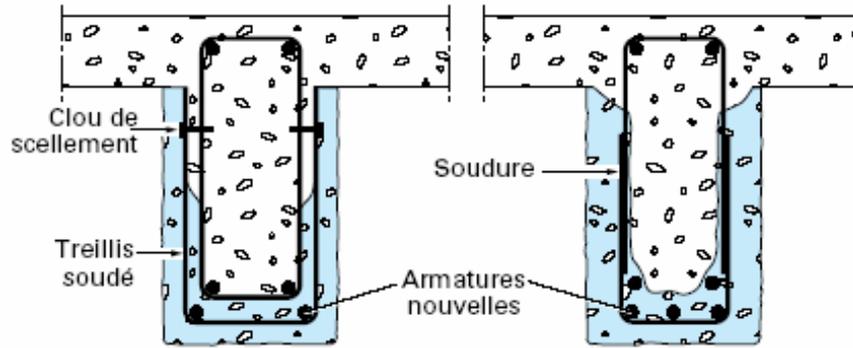


Figure II.3 Réparation de poutre par adjonction d'armature

Des recherches expérimentales menées sur des colonnes circulaires [26] ont montré que la technique du chemisage en acier permettait de conférer un comportement ductile en flexion aux colonnes confinées, en permettant une dissipation satisfaisante de l'énergie.

La figure II.4 présente les courbes d'évolution du déplacement lors de cycles d'application d'un effort de flexion, mesurées sur des poteaux non confinés (figure II.4.a) puis confinés par chemisage (Figure II.4.b). Durant ces essais, l'effort était appliqué latéralement au sommet de chaque poteau et suivait une évolution cyclique alternée. Sur ces figures, il est possible de constater que le chemisage 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.

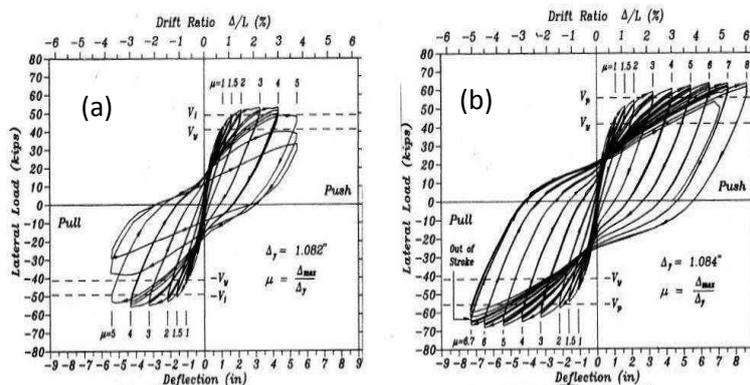


Figure II.4 Courbes force-déplacement d'un poteau non renforcé (a) et d'un poteau renforcé par chemisage en acier (b) [26].

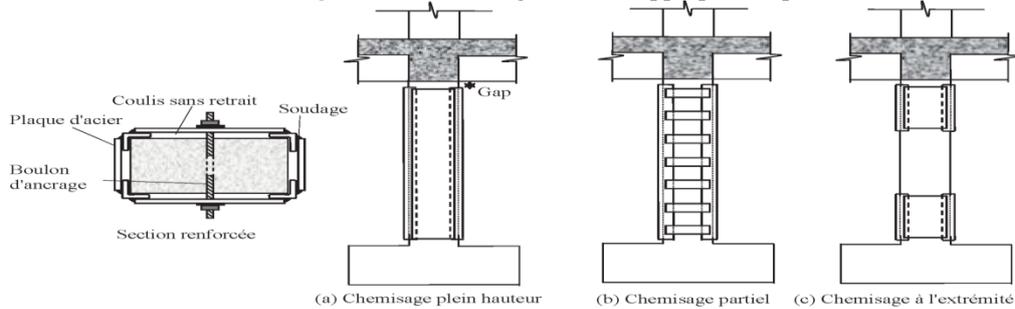
Le chemisage métallique appliqué aux colonnes vise à l'augmentation de la résistance au cisaillement et la capacité de ductilité. En 1987, l'université de Californie à San Diego a entrepris un important programme de recherche consistant à examiner diverses techniques de renforcement pour les poteaux en vue d'améliorer la performance sismique des ponts existants. L'université de Californie a effectuée des essais sur plusieurs poteaux enveloppés

d'acier afin d'examiner la possibilité d'utiliser les chemises en acier pour renforcer la résistance à la flexion et la résistance au cisaillement des poteaux et pour prévenir le décollage des barres de recouvrement dans les poteaux des ponts plus anciens. Les résultats de cette campagne d'essai sont résumés par Chail [26]; Priestley et al [89].

Les chemisages en acier disposés autour des poteaux rectangulaires sont généralement constitués de quatre cornières auxquelles sont soudées soit des plaques en acier continues, soit des bandes d'acier horizontales discontinues plus épaisses la (Figure II.5). Les cornières peuvent être collées au béton par l'intermédiaire d'un liant époxydique ou peuvent y être plaquées, sans aucun espace sur toute leur hauteur. Les bandes peuvent être soumises à un traitement thermique préalable au soudage, afin d'assurer par la suite un certain confinement positif sur le poteau [38]. Les différentes configurations de chemisage en acier sont illustrées sur la figure II.6.



Figure II.5 Chemisage en acier appliqué aux poteaux [6].



(a) Chemisage plein hauteur (b) Chemisage partiel (c) Chemisage à l'extrémité

Figure II.6 Différents types de chemisage en acier [6].

Cependant, le chemisage en acier présente l'inconvénient d'être sujet à la corrosion; c'est pourquoi il est à utiliser avec discernement, en étant conscient des sujétions d'entretien, pour le renforcement de poteaux d'ouvrages situés dans des environnements favorisant la corrosion (zone de marnage ou zone exposée à la houle ou aux embruns par exemple).

Des chemisages en béton armé peuvent alors être utilisés ; ce procédé a d'ailleurs longtemps été l'une des techniques de réhabilitation les plus courantes. Cette technique consiste, après repiquage du béton existant (et éventuellement élimination du béton dégradé), à disposer des aciers et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton coulé en place. Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la « règle des coutures », en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage.

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter les dimensions de la section du poteau en ajoutant une couche de béton ainsi que des aciers longitudinaux et transversaux (Figure II.7). De la même façon que pour les chemisages en acier, l'action de confinement est plus efficace dans le cas de poteaux à section circulaire qu'à section rectangulaire.

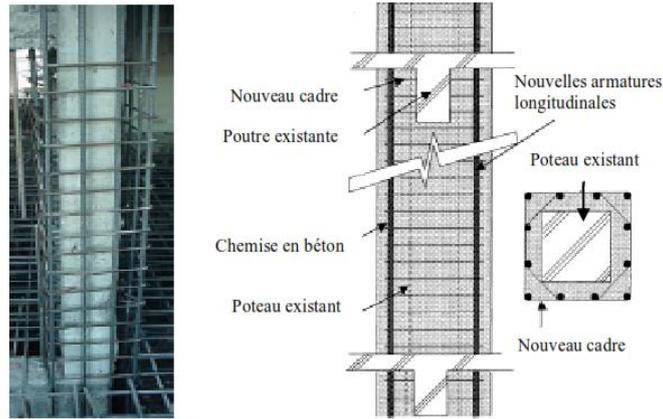


Figure II.7 Chemisage en béton armé [44].

Durant les dernières décennies, le béton et l'acier ont donc joué un rôle primordial pour le renforcement, tant de bâtiments que d'ouvrages d'art. Cependant, ces matériaux sont soumis à d'importantes sollicitations dans les infrastructures, à la pollution, à la corrosion, et à d'autres actions extérieures qui tendent à les détériorer. De plus, les techniques de renforcement par chemisage en acier ou béton armé présentent sont souvent très complexe à réaliser, très onéreuse et nécessitent une intervention lourde sur la structure. Il était donc nécessaire d'utiliser des matériaux plus durables et de les associer à de nouvelles méthodes de réhabilitation permettant de ralentir ces dégradations et de prolonger la durée de service des infrastructures existantes.

### II.3.4 Développement de la technique des plats collés

Les ingénieurs en structures ont d'abord utilisé des plaques d'acier pour le renforcement des structures. L'idée principale qui a guidé le dimensionnement des structures renforcées a été émise par L'Hermite [63]. C'est en 1967, en Afrique du Sud, que remonte le premier cas d'utilisation des plaques d'acier ancrées sur la surface tendue pour augmenter la résistance en flexion des poutres en béton armé d'un pont.

L'Hermite [63] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs polymérisant à froid pour associer du béton à des composants d'acier disposés extérieurement (Figure II.8). D'abord utilisée dans le « béton plaqué » (collage de béton sur des tôles d'acier jouant à la fois le rôle de coffrage et d'armatures externes), cette technique fut étendue, sous l'impulsion de Bresson [16], au renforcement et à la réparation des structures en béton armé.

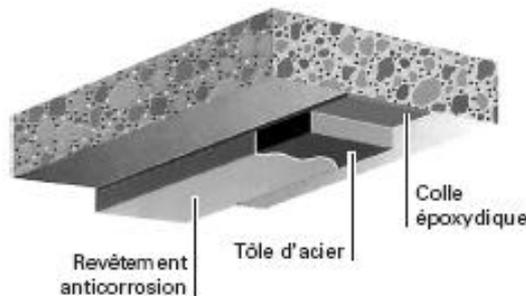


Figure II.8 Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite [47]

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances des structures en béton par des tôles d'acier collées en surface du béton. Il fut appliqué très rapidement pour des renforcements de poutres de pont-roulent dans une cimenterie, puis pour le renforcement d'ouvrages d'art dont le niveau de service n'était plus suffisant compte tenu de l'évolution du trafic supporté [104].

La technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel [16], s'est très vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art où dans bien des cas elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance.

Des emplois quelque peu hasardeux voir totalement inadaptés aux problèmes posés ont pu, durant quelque temps, laisser entendre que cette technique n'était pas fiable. Elle a cependant continué à être utilisée avec succès dans le domaine du bâtiment industriel et commercial où le faible encombrement de ce type de renforcement est un atout majeur et ceci malgré les précautions qu'il convient de prendre pour isoler le renforcement vis-à-vis des risques d'incendie.

Cependant, il reste des inconvénients pour l'utilisation de cette technique :

- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné) ;
- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face) ;
- nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif) ;
- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;
- impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.



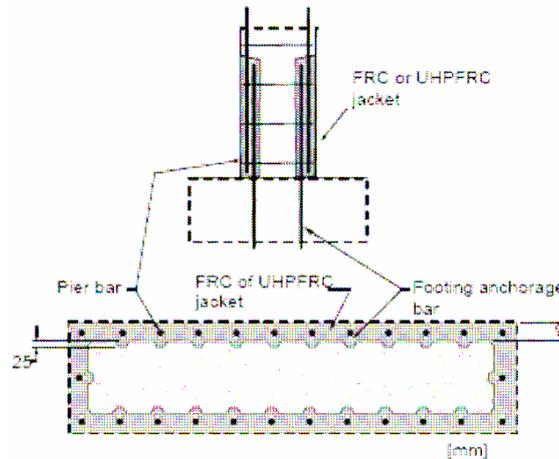
**Figure II.9** Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet- [65].

### II.3.5 Utilisation de Bétons à Très Haute Performance

Parmi les nouvelles solutions de protection et réhabilitation des structures pour la mise aux nouvelles normes qui se sont développées, on peut citer l'utilisation de Bétons à Très Haute Performance (BTHP) fibrés qui a fait l'objet de quelques expérimentations. Une étude a ainsi été récemment réalisée par *Massicotte et Boucher*, portant sur la réhabilitation de piles de ponts rectangulaires à l'aide d'un chemisage BTHP fibré. Cette étude concerne plus particulièrement les poteaux de section à rapport largeur/hauteur supérieur à 4 et possédant

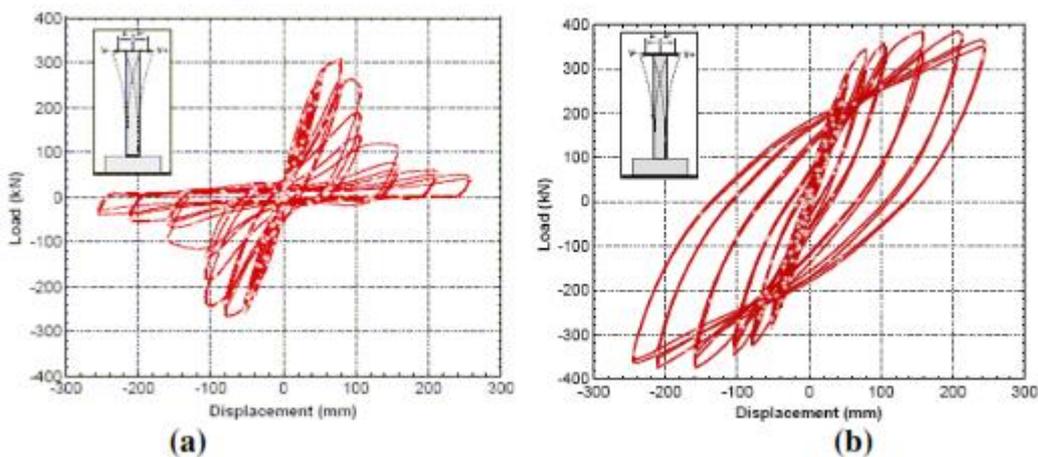
une zone de recouvrement des armatures longitudinales en pied. La campagne expérimentale a porté sur un corps d'épreuve de référence renforcé par un chemisage de béton fibré courant puis sur un poteau renforcé par un BTHP fibré présentant une résistance en compression de 130 MPa et contenant 3 % de fibres longues de 10 mm. Dans les deux cas, les chemisages ont été coulés sans augmentation de la section initiale du poteau. Ces deux poteaux ont été soumis à un effort latéral appliqué en tête de manière cyclique et incrémentale (aucun effort axial n'était exercé).

L'objet de ces renforts était d'améliorer les performances de l'ancrage des aciers et d'éliminer toute rupture par glissement des aciers, leur permettant ainsi de plastifier en dehors de la zone de recouvrement et donc d'apporter de la ductilité à la structure (Figure II.10).



**Figure II.10** Détails du chemisage en BTHP fibré [74].

L'essai réalisé sur le poteau de référence a montré une dégradation importante du béton d'enrobage lors des cycles, une diminution très nette et très rapide de la capacité du poteau à reprendre l'effort latéral (diminution par rapport à l'effort latéral maximal repris par le poteau durant l'essai), un comportement peu ductile et une faible dissipation d'énergie (Figure II.11-a). En revanche le poteau renforcé par BTHP fibré n'a montré aucune fissure sur le BTHP de recouvrement, un comportement écrouissant et une très bonne dissipation d'énergie (Figure II.11-b).



**Figure II.11** Graphiques Force-Déplacement du poteau (a) renforcé par béton fibré, et du poteau (b) renforcé par BTHP fibré [74].

Le chemisage par BTHP fibré a donc permis d'améliorer le comportement sous charges sismiques de poteaux subissant habituellement une rupture fragile par perte d'ancrage des armatures longitudinales, qui ne permettent pas une dissipation satisfaisante d'énergie.

Néanmoins, tout comme le chemisage en béton armé simple, cette technique de chemisage par BTHP présente l'inconvénient d'induire une augmentation importante de la masse de l'élément, ce qui peut être problématique pour un renforcement parasismique, l'action sismique étant directement proportionnelle à l'accélération du séisme ainsi qu'à la masse de la structure.

Le tableau II.2 présente une étude comparative des différentes techniques de renforcement présentées dans cette section.

**Tableau II.2** Une étude comparative des différentes techniques de renforcement

	Avantages	Inconvénients
Chemisage en acier	- faible augmentation des sections - assez rapide à mettre en œuvre	- nécessité d'une main d'œuvre qualifiée - sensibilité à la corrosion ; entretien régulier nécessaire
Chemisage en béton armé	- peu coûteux - ne nécessite pas de main d'œuvre hautement qualifiée	- augmentation de la section (et de l'encombrement) et du poids de la structure - corrosion et autres pathologies du béton armé - nécessité de coffrages ; travaux assez longs
Chemisage par BTHP fibré	- bonnes performances en termes de dissipation d'énergie - très bonne durabilité	- augmentation du poids de la structure - nécessite une main d'œuvre qualifiée - coût élevé

#### II.4 Renforcement et réparation par matériaux composites

Dans cette section, l'accent est mis sur la technique de renforcement par matériaux composites comme l'une des méthodes les plus représentatives d'intervention locale. Plusieurs études sur les éléments de structure renforcés par collage FRP sous de différentes configurations seront présentées. Le problème de la durabilité des bétons se situe à la frontière de la technologie actuelle des matériaux. Pour éviter des travaux d'entretien onéreux ou des dégâts provoqués par des événements exceptionnels (séismes, accident de véhicule roulant dans les ponts routier, etc.), un haut niveau de fiabilité est essentiel. Les colonnes en béton sont les composants structuraux fondamentaux en structures civiles.

Il a été mentionné au chapitre précédent que les techniques traditionnelles ont montré leurs mérites ainsi que leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de la réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites, restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil. On peut citer parmi ces raisons le développement qu'a connu l'industrie des composites durant les trois dernières décennies et la crise qu'a traversé l'industrie aéronautique depuis le début des années 90, ce qui avait comme conséquence une baisse des prix des composites.

Grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, les matériaux composites se sont taillés une place importante en génie civil [47]. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de réhabilitation les plus utilisées dans ce marché en pleine expansion. Plusieurs éléments de structure peuvent être renforcés par collage de plaques en matériaux composites ; ce sont essentiellement les poutres, les poteaux et les dalles. Il y a plusieurs axes de recherches dans ce domaine en pleine expansion qui ont pour but d'aboutir à un renforcement optimal des structures. Notons à titre d'exemple, des recherches sur la durabilité du renfort, les problèmes du délaminage au niveau de l'interface béton-composite et la modélisation du comportement de structures renforcées.

Depuis leurs premières applications en génie civil qui il y a maintenant 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentué ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement ce sujet.

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voire en fibres de verre pour certaines applications ; il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres sous forme de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

## **II.4.1 Définitions**

### **II.4.1.1 Matériau composite**

Toute matière première comportant des charges peut être appelée au sens général composite. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, différentes par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les performances globales sont supérieures à celles des composants pris séparément [15].

Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. Le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue [17].

Tous les matériaux composites présentent la même constitution:

- un renfort, qui joue le rôle d'ossature et assure la tenue mécanique,
- une matrice, qui a un rôle de liant et permet ainsi la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort (Figure II.12).



**Figures II.12** Représentation schématique de la structure des matériaux FRP [52]

On distingue deux grands types de matériaux composites :

- les composites « Grande Diffusion », notés GD,
- les composites « Haute Performance », notés HP.

Les composites GD sont les plus couramment utilisés, et sont en général des plastiques armés ou plastiques renforcés dont le taux de renforts est d'environ 30%. Les composites HP sont employés dans le domaine aéronautique ou aérospatial. Le coût de ce type de matériaux est très élevé en raison du pourcentage de renforts présents (>50%) ; ils présentent ainsi des propriétés mécaniques supérieures aux composites GD.

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et seront différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constituants,
- De la géométrie et de la distribution du renfort,
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Beaucoup d'industriels considèrent que les matériaux composites en FRP sont le produit de remplacement pour les matériaux traditionnels [32].

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « FRP » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément [111].

L'intérêt des utilisations des polymères renforcés de fibres dans le génie civil se trouve essentiellement dans sa faible densité, ses propriétés mécaniques longitudinales, l'absence de corrosion, sa très bonne tenue à la fatigue, sa facilité de manipulation [65].

#### **II.4.1.2 Matrice et renfort**

##### **▪ Matrice**

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis à vis des diverses conditions environnementales.

Les matrices peuvent être de trois formes: Organiques, Céramiques ou Métalliques.

Dans le cas des composites à matrices organiques (CMO) les principales matrices utilisées sont :

- Les résines polyester peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante ;
- Les résines époxy qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique ;
- Les résines phénoliques utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feu et flammes imposées par les normes dans les transports civils ;

Dans le cas des composites à matrices céramiques (CMC), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Dans le cas des composites à matrice métallique (CMM) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (aluminium, magnésium, zinc, nickel,...) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant...).

▪ **Renfort**

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction tandis qu'elles ont une faible résistance à la compression.

La fibre renfort, pouvant comporter plusieurs milliers de filaments, apporte toujours la tenue mécanique de la structure composite.

En fonction de la forme des renforts, les composites sont classés en deux grandes classes :

- Les composites à fibres : constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes .
- Les composites à particules : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux.

- **Fibres de verre**

La fibre est l'élément porteur de charge principal d'un composite. Par conséquent, la fibre influe fortement sur les caractéristiques mécaniques du composite. Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. La forme est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, oxyde de bore). Les caractéristiques essentielles de la fibre de verre sont données dans le tableau II.3.

**Tableau II.3** Caractéristiques essentielles des fibres de verre [52]

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- bonne résistance spécifique</li> <li>- bonne adhérence avec toutes les résines</li> <li>- tenue à température élevée (50% de la résistance conservée à 350°C)</li> <li>- dilatation et conductivité thermiques faibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible module (par rapport au carbone ou aramide)</li> <li>- vieillissement au contact de l'eau</li> </ul>

- **Fibres de carbone**

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance: pour une combustion de 1000 à 1500 °C.
- fibres haut module: pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

Les caractéristiques essentielles, avantages et inconvénients, de la fibre de carbone sont données dans le tableau II.4.

**Tableau II.4** Caractéristiques essentielles des fibres de carbone [52]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible densité ;</li> <li>- propriétés mécaniques longitudinales;</li> <li>- l'absence de corrosion ;</li> <li>- très bonne tenue à la fatigue ;</li> <li>- facilité de manipulation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une anisotropie très marquée ;</li> <li>- un comportement à la rupture de type fragile des composites ;</li> <li>- un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.</li> </ul>

- **Fibres d'aramide**

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidité différente : la fibre bas module est utilisée pour les câbles et les gilets pare-balles et la fibre haut module est employée dans le renforcement pour les composites hautes performances.

- **Fibres de polyéthylène de haut module**

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou de polyester.

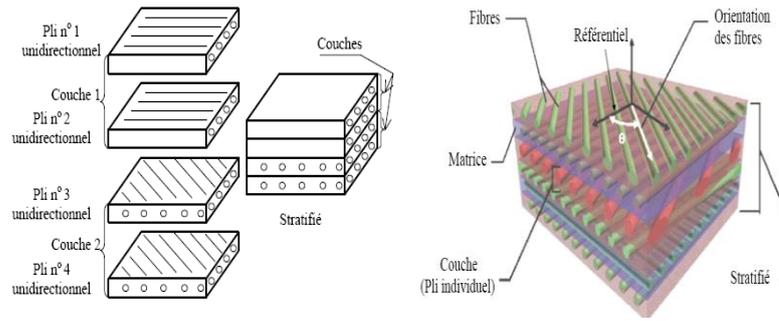
- **Fibres minérales artificielles siliceuses (FMA)**

Les fibres constituent de manière générale une grande famille subdivisée en une multitude de sous familles selon leur nature physico-chimique et leur origine. Elles sont utilisées principalement pour contrôler les pertes de chaleur, absorber l'énergie acoustique, filtrer les impuretés dans les gaz et les liquides, renforcer d'autres matériaux ou contrôler la condensation.

Selon leurs caractéristiques physicochimiques, on distingue plusieurs types de FMA: fibres céramiques réfractaires, les fibres de verre à usage spécial et filaments continus de verre.

**II.4.1.3 Stratifié**

C'est un ensemble de couches empilées et orientées de façon quelconque les unes par rapport aux autres (Figure II.13). Les structures stratifiées où le stratifié individuel est composé de matériaux hétérogènes, tels que les composites de fibre continue, peuvent être particulièrement utiles. Ces types de systèmes composites peuvent présenter beaucoup de caractéristiques favorables telles que le module spécifique haut, la résistance à la fatigue et aux dommages, la densité spécifique basse et les propriétés directionnelles.



Figures II.13 stratifié composite [52]

#### II.4.1.4 Adhésif

La principale fonction des adhésifs est de transmettre les efforts depuis l'élément à renforcer au FRP de la manière la plus effective possible. Le type de colle le plus employé reste l'époxy, mélange d'une résine époxy et d'un durcisseur. Des recommandations d'utilisation sont formulées au regard des analyses coût/performances de ces matériaux : mise en œuvre, effet sur la résistance de l'élément renforcé, durabilité. Il apparaît que la résine thermoactivée renforce mieux du fait de sa pénétration plus aisée dans les microfissures due à sa température d'application ; mais elle s'avère être la plus chère et nécessite pour son application du matériel bien spécifique. Le meilleur compromis est donc celui du choix de la résine photocatalytique.

#### II.4.2 Propriétés mécaniques des polymères renforcés de fibres 'FRP'

Les fibres peuvent être orientées dans une seule direction ce qui donne des composites unidirectionnels, ou dans plusieurs directions (bi ou multidirectionnels) afin d'optimiser la performance du composite [107,28]. La fabrication des composites peut être faite par plusieurs méthodes différentes : la stratification directe ou au contact, la pultrusion, et l'enroulement filamentaire. Carolin et al [28] classe les composites «FRP» en trois groupes en fonction des fibres utilisées:

- polymère renforcé de fibres de verre (*glass-fibre-reinforced polymer*) : GFRP
- polymère renforcé de fibres de carbone (*carbon-fibre-reinforced polymer*) : CFRP
- polymère renforcé de fibres d'aramide (*aramid-fibre-reinforced polymer*) : AFRP

Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent des fibres contenues dans le composite (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, du rapport volume-fibre le volume ou la dimension du composite lui-même ce qui donne une variété considérable de composites. En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre [28].

Teng et al. [28] résument les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil (Tableau II.5).

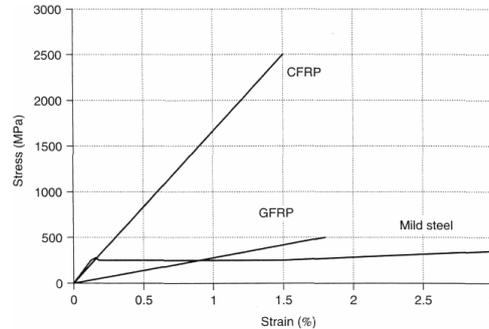
Tableau II.5 Propriétés mécaniques typiques des composites «GFRP», «CFRP» et «AFRP» [28]

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en Fibres (% par poids)	Densité (kg / m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
GFRP (verre)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
CFRP (carbone)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
AFRP (aramide)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Les composites «FRP» avec des fibres unidirectionnelles montre une large variété de résistances et de rigidités de ces matériaux.

En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre et fibres d’Aramide.

La figure II.14 montre des courbes (contraintes déformations) typiques pour des composites «GFRP», «CFRP», et des aciers doux [107].



**Figure II.14** Courbes contrainte-déformation typiques des GFRP, CFRP et des aciers doux [107]

A partir des observations faites sur ces courbes, on peut remarquer :

- (a) que ces composites sont caractérisés par des relations contraintes-déformations linéaires.
- (b) une différence entre le comportement fragile des composites «FRP» et le comportement ductile de l’acier doux, ce qui donne deux grandes conséquences structurales [107]:

- Premièrement, ces matériaux composites ne possèdent pas la ductilité des aciers, et leur fragilité va limiter le comportement ductile des éléments en béton armé renforcés par les composites «FRP». Néanmoins, lorsqu’on l’utilise pour le confinement du béton, ces matières peuvent rehausser grandement la force et la ductilité des poteaux.
- La deuxième implication du comportement fragile des composites «FRP» c’est que la redistribution des contraintes est restreinte à cause du manque de ductilité.

Par conséquent, le dimensionnement des structures en béton armé renforcées avec des matériaux composites «FRP» ne peut suivre les méthodes existantes pour le béton armé avec des «FRP» traitées tout simplement comme un renforcement en acier équivalent.

**Comparaison des performances pour le renforcement des structures**

Les composites «CFRP» ont des propriétés supérieures que celles des composites «GFRP», mais ces dernières ont l’avantage d’être moins chères. Le tableau II.6 établi par Meier et Winistorfer (1995) donne une comparaison qualitative des différents composites «FRP» couramment utilisés pour les applications de renforcement des structures en béton armé.

**Tableau II.6** Comparaison qualitative entre GFRP, CFRP et AFRP [75]

Critères	Tissus de composites		
	Fibres de Verre-E	Fibres de Carbone	Fibres d’Aramide
Force de traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Force de compression	Bonne	Très bonne	Inadéquate
Module de Young	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à long terme	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à la fatigue	Adéquat	Excellent	Bon
Densité apparente	Adéquate	Bonne	Excellent
Résistance à l’alcaline	Inadéquate	Très bonne	Bonne

### II.4.3 Application des composites dans la construction en génie civil

Les premières utilisations des FRP ont été effectuées principalement dans le domaine de l'aérospatial, du génie mécanique, des transports publics et dans la fabrication des articles de sport de haut niveau. C'est à la fin des années 60 que des recherches ont commencé pour l'utilisation de barre en FRP à base de fibre de verre comme substitut aux armatures d'acier à Rutgers University au New Jersey [07].

Les plaques de FRP à base de carbone ou de verre, ont été utilisées au départ comme protection contre la corrosion. Elles ont l'avantage d'éliminer le problème de limitation des longueurs, puisqu'elles peuvent a priori avoir n'importe quelle dimension. De plus, elles se sont avérées très efficaces pour augmenter la résistance en flexion et en cisaillement, quand elles sont collées en forme de plaques sur les faces extérieures des éléments en béton armé. Ainsi, plusieurs renforcements peuvent s'effectuer sur les poutres, murs, dalles et sur des colonnes en béton armé (Figure II.15).



Figure II.15 Différents éléments renforcés par matériaux composites [7].

#### II.4.3.1 Renforcement des poutres

##### ▪ Renforcement extérieur

Le renforcement des poutres par matériaux composites a connu une percée au cours de la dernière décennie, en réponse aux problèmes rencontrés avec l'usage de plaque d'acier. Le renforcement vis à vis de la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «FRP» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «FRP» sur le support de la poutre concernée (Figure II.16). Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres.

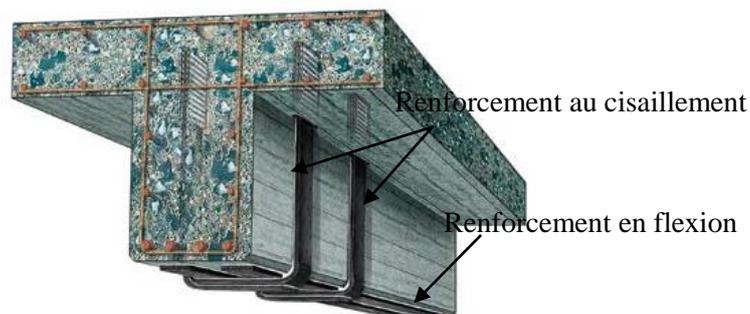


Figure II.16 Renforcement d'une poutre en flexion et au cisaillement [102].

En Algérie, le premier cas d'utilisation de ces produits a été effectué sur des consoles en béton armé du stade de la ville de Tlemcen 1999 [128]. Depuis cette réparation, de nombreux

autres cas d'utilisation de composite sont répertoriés (pont d'Hydra, pont de Oued Larbaâ, Pont Blanc d'El Harrach, etc.). Le Pont Blanc d'El Harrach a été aussi renforcé par le procédé (TFC). L'ouvrage permet le franchissement au niveau du centre ville, de l'oued El Harrach, construit au début du siècle (Figure II.17)



Figure II.17 Réhabilitation du pont Blanc d'El Harrach, Alger [67].

Plusieurs recherches ont été menées sur le renforcement des poutres par matériaux composites dont les paramètres les plus examinés sont le type de renfort, le type de colle, l'orientation des fibres et le type d'ancrage utilisé. Les principales conclusions de ces études sont les suivantes :

:

- l'augmentation de la quantité de renfort influe directement sur le type de rupture. Elle a tendance à augmenter de manière significative le moment ultime.
- L'augmentation de la longueur du renfort augmente la force ultime et diminue l'inclinaison des fissures;
- L'adhérence entre le renfort et le béton a une influence sur la charge à la rupture;
- La forme de l'extrémité du renfort permet également d'améliorer le comportement de la structure. Ainsi, un renfort aminci à l'extrémité apporte un meilleur comportement qu'une extrémité rectangulaire;

▪ **Utilisation des composites pour renforcer les poutres par la méthode NSM**

La technique NSM a été utilisée ces dernières années pour le renforcement des poutres ainsi que les poteaux en béton armé. Elle consiste à l'insertion de plats ou des joncs de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces correspondantes, remplies de résines époxydiques pour fixation (Figure II.18).

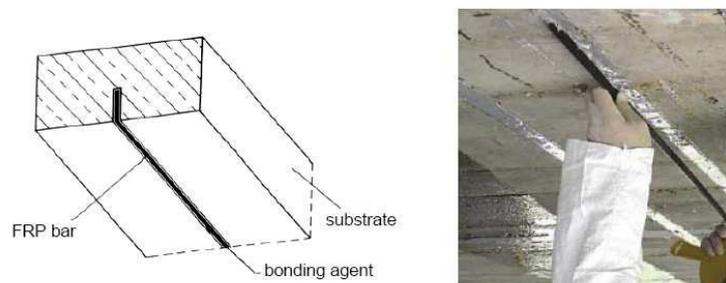


Figure II.18 renforcement d'une poutre par la méthode NSM [33].

Plusieurs littératures étudient l'utilisation des barres composites de NSM pour renforcer au cisaillement et en flexion de poutres en béton armé [14,33,79].

Hassan et al [49] ont effectué des essais de flexion sur des poutres en béton armé renforcées avec des barres de carbone nervurées et des bandes de carbone d'une longueur de scellement variable avec la technique de NSM. Ils ont conclu qu'il est peu probable que la ruine de la poutre soit due à la rupture en traction des barres composites, et que la déformation maximale de ces barres doit être limitée à  $0.7\div 0.8\%$ , et que la longueur de scellement ne doit pas être inférieure à 800 mm.

El-Hacha et al [36] ont effectué des essais de flexion sur des poutres en Té en béton armé renforcées avec des barres de carbone par la technique de NSM et par des bandes de verre de quantités équivalentes. Ils ont comparé l'efficacité des barres et des bandes entre eux et avec la technique de collages de plaques composite sur la surface extérieure du béton. Ils ont conclu que le renforcement avec les barres composites par la technique de NSM induit moins de capacité portante des poutres renforcées par rapport aux poutres renforcées par la même technique en utilisant des bandes composites. Ce résultat est imputé à la rupture précoce qui s'est produite à l'interface barre-résine et à la plus petite surface d'adhérence des barres de carbone comparée à celle des bandes.

#### II.4.3.2 Renforcement des dalles

La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «FRP» est de coller des bandes ou des lamelles «FRP» sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens, on utilise des lamelles croisées, ou bien des «FRP» avec des fibres dans les deux directions (Figure II.19). D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux selon les besoins de renforcement mais dans ce cas les bandes/lamelles de «FRP» sont terminées loin des bords de la dalle. Les techniques sont similaires à celles utilisées pour renforcer les poutres pour reprendre les efforts de flexion.



Figure II.19 Renforcement d'une dalle en béton armé [52]

Mosallam A.S. et al. [76] ont mené une étude expérimentale sur des dalles renforcées de dimensions (2670×2670×76 mm). Les renforts sont des bandes en composite carbone/époxy et verre/époxy de 0,46 m de largeur espacées de 0,46 m collées dans les deux directions, il en résulte un stratifié bidirectionnel ( $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ ).

Le chargement se fait sous forme de pression hydrostatique appliquée uniformément par le biais d'une membrane remplie d'eau et la pression augmente à une vitesse relativement faible (3,45 kPa/min). La rupture commence par apparition des fissures dans la zone non renforcée et par la suite la rupture en compression du béton et plastification des aciers. Le composite atteint 43% de sa déformation ultime et la charge ultime des dalles renforcées était 200% celle des dalles non renforcées. Les résultats expérimentaux ont été confrontés aux résultats des calculs par éléments finis et la corrélation fut assez bonne.

Les recherches réalisées sur le comportement des dalles renforcées par matériaux composites ont montré les bienfaits de la contribution du composite dans la résistance des dalles au poinçonnement, peut être considérée et s'explique par l'augmentation de la résistance du béton en traction ; et par conséquent l'augmentation de la résistance au poinçonnement.

#### II.4.3.3 Renforcement des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich en Suisse [64]. Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. Il a été collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages (Figure II.20).

Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.



Figure II.20 Réhabilitation d'un mur en maçonnerie [64].

#### II.4.3.4 Renforcement des colonnes

Les colonnes qui forment les structures ouvertes (ponts, parkings) sont très affectées par les conditions environnementales. Le béton de recouvrement est souvent fissuré par les cycles de gel-dégel, sans compter la participation des agents de déglacage qui ont pour effet d'accélérer le processus. Les étriers et les barres longitudinales ne sont pas épargnés et la corrosion amène des pertes de résistance de l'acier.

La technique de renforcement par matériaux composites, propre aux colonnes en béton armé, consiste à envelopper ces colonnes par des feuilles de FRP. Cette enveloppe crée un effet de confinement du béton qui augmente la résistance de la colonne aussi bien à la compression qu'au cisaillement. En plus de redonner à la structure une capacité supplémentaire, la colonne est maintenant protégée contre la corrosion accélérée surtout dans la zone de marnage. Cette méthode peut aussi servir à augmenter la résistance de certaines structures situées dans des zones sismiques très actives. Les bâtiments qui ne respectent plus les codes de construction en vigueur peuvent retrouver une résistance et une ductilité améliorées par l'emploi des feuilles de composites.

Les premières études de renforcement de porteurs verticaux ont débuté après le tremblement de terre de Loma Prieta dans la baie de San Francisco en Californie en 1989. Les premières publications sur ce sujet proviennent de Chai et al [26] et Priestley et al [89]. Ce type de renforcement est obtenu par confinement des éléments en béton armé par des bandes de renfort.

Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «FRP» avec une ou plusieurs couches. Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets (Figure II.21)



**Figure II.21** Types de disposition des renforts sur un poteau [33].

Différentes techniques ont été développées pour renforcer des colonnes en béton armé en utilisant des composites «FRP». En fonction de la méthode adoptée pour construire le composite «FRP», les méthodes de renforcement peuvent être classées dans trois groupes à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «FRP».

#### ▪ **Stratification au contact**

Sur chantier, la stratification au contact (stratification directe) est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites «FRP» (Figure II.22). Pour cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés par les résines du polymère et enveloppés ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement. Ce concept a été appliqué pour la première fois au renforcement de vraies colonnes en B.A au Japon au milieu des années 1980 [04] . Depuis il y a eu beaucoup de rapports sur l'application de cette technique dans le renforcement des colonnes des ponts ou des constructions civiles [04,103].



**Figure II.22** Renforcement d'une colonne par ma méthode *Stratification au contact* [33].

#### ▪ **Enroulement filamentaire**

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus

ou des lanières afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur (Figure II.23). Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du «FRP», l'orientation de la fibre et le contrôle de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. L'idée de confiner le béton par enroulement de fibres continues imprégnées par la résine a été mentionnée pour la première fois par Fardis et Khalili [40].

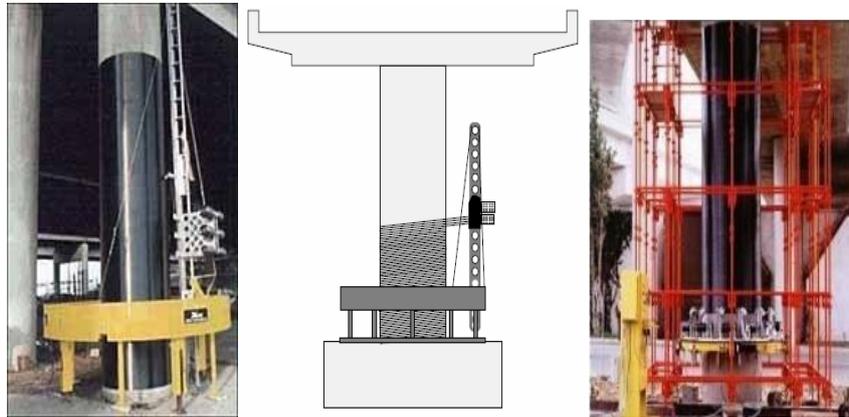


Figure II.23 Renforcement d'une colonne par ma méthode *Enroulement filamentaire* [33].

▪ **Chemisage par coquille préfabriquée en «FRP»**

Les colonnes en B.A peuvent aussi être renforcées en utilisant des chemises en «FRP» sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bandes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Elles peuvent être fabriquées en demi cercles ou demi rectangles, en cercles avec une fente ou en rouleaux continus, afin qu'elles puissent être ouvertes et puissent être placées autour des colonnes (Figure II.24).

Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en «FRP» est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésives ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne. Une application intéressante des coquilles préfabriquées en «FRP» est de les utiliser dans les travaux de modification de forme des colonnes comme partie des mesures de renforcement [79,81,117].

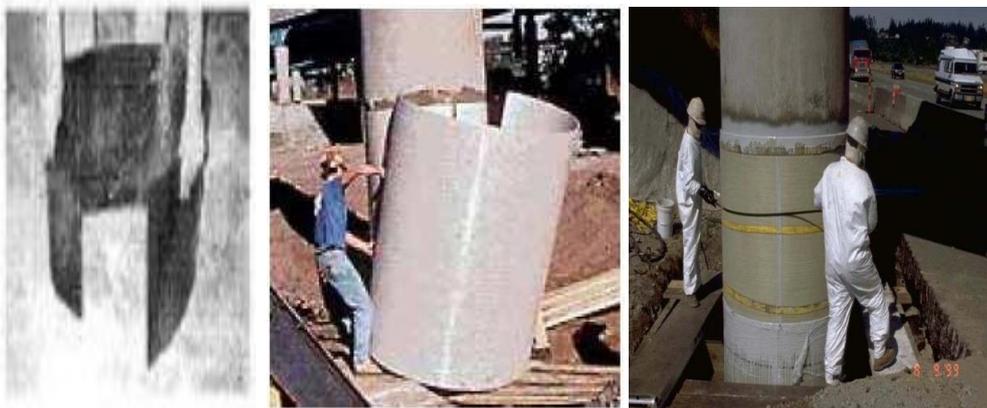


Figure II.24 Renforcement d'une colonne par la méthode coquille préfabriquée [79].

En général, le «FRP» avec une stratification au contact paraît être la méthode la plus populaire car elle possède des avantages pratiques tels que la flexibilité et la facilité de mise en œuvre. Le filament enroulé ressemble à la première méthode car les deux impliquent un processus de stratification directe [108]. Chacune des trois méthodes discutées ci-dessus à ses avantages et ses inconvénients (Tableau II.7).

**Tableau II.7** Comparaison entre les différentes méthodes de renforcement des colonnes.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Stratification au contact	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité d'adaptation avec les différentes formes de colonnes.</li> <li>- Facilité de manutention et de mise en œuvre sur chantier, sans le besoin d'équipements spéciaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un bas niveau de contrôle de la qualité.</li> <li>- Demande beaucoup de main d'œuvre par rapport aux autres techniques.</li> </ul>
Enroulement filamenteux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un contrôle amélioré de la qualité.</li> <li>- Une main d'œuvre réduite sur chantier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de flexibilité d'adaptation avec les différentes formes de colonnes.</li> <li>- Exige un équipement spécial.</li> </ul>
Coquille préfabriquée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleur contrôle de la qualité.</li> <li>- Une main d'œuvre réduite sur chantier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité d'adaptation limitée avec les différentes formes de colonnes.</li> </ul>

## II.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de préciser la nécessité d'une réduction de la vulnérabilité des structures existantes, et plus particulièrement la nécessité de renforcer les éléments structuraux que sont les poteaux de béton armé, dont leur rupture peut entraîner l'effondrement de l'ensemble de la structure. Il est donc primordial de disposer de solutions de renforcement des poteaux vis-à-vis des différentes sollicitations. Ce renforcement peut passer par une amélioration de la résistance en compression du béton, par une amélioration de la résistance en flexion de l'élément, ou encore par une amélioration de sa capacité à dissiper l'énergie (liée à sa ductilité).

Actuellement il existe plusieurs méthodes de renforcement en fonction du but recherché: augmentation de la capacité portante, de la ductilité ou les deux simultanément. On peut renforcer la stabilité générale des ouvrages par ajout de certains éléments de contreventement intérieurs comme les voiles, ou bien la stabilité de certains éléments structuraux : poteaux, poutres et voiles par chemisage en béton, confinement en acier ou tissus en matériaux composites ou renforcement en flexion par plaques en aciers.

La technique du chemisage des poteaux est une technique qui a largement été utilisée, en particulier les chemisages en béton et en acier. Cette méthode a prouvé son efficacité vis-à-vis de la ductilité et de la résistance de l'élément. Bien qu'assez efficace, elle présente des inconvénients tels que des problèmes de corrosion, de durabilité et de facilité/rapidité de mise en œuvre sur certains chantiers. Outre ces techniques, d'autres techniques innovantes impliquant les matériaux composites sont en pleine expansion, pour la réhabilitation des structures.

Le chemisage par FRP prend une place croissante vis-à-vis des autres solutions de confinement en raison de la résistance en traction élevée des composites (dans la direction des fibres) et de leur facilité d'installation qui nécessite très peu d'interruption d'exploitation. Les différentes recherches menées sur l'utilisation des FRP pour le chemisage de poteaux ont montré qu'outre les avantages cités précédemment, les FRP offraient de vrais gains en termes de performances mécaniques. De plus, les schémas de mise en place des renforcements sont aisément adaptables aux besoins spécifiques de l'élément défectueux.

## **Chapitre III : Travaux antérieurs portant sur les colonnes en béton confiné avec des matériaux composites 'FRP'**

### **III.1 Introduction**

Cette partie présente une revue de littérature des résultats de quelques travaux expérimentaux antérieurs reliés au renforcement de colonnes en béton ou en béton armé par d'enveloppes en matériaux composite à base de fibres «FRP» collés en surface. Ces études ont porté sur la plupart des paramètres critiques, physique et géométriques, comme le type de fibres du matériau composite (carbone, aramide, verre, ect.) et son épaisseur, l'influence de la résistance du béton non confiné et de la forme géométrique des spécimens (circulaire, carrée, rectangulaire, carrée avec rayons de coin). En revanche, plusieurs modèles analytiques ont été adaptés pour la prédiction des conditions ultimes, la résistance ultime et la déformation correspondante, et décrire le comportement des colonnes en béton confinés par matériaux composites. Pour dimensionner le renforcement externe des colonnes en béton, il est nécessaire d'estimer la pression interne développée par le mécanisme du confinement engendrée par les effets de réaction entre les matériaux : béton, acier et matériau composite. Bien qu'une grande base d'informations existe sur le béton confiné avec de l'acier [66,90], des études récentes ont révélées que les modèles existants pour la résistance à la compression axiale du béton confiné avec de l'acier donnent des sur estimation et ne peuvent être utilisés pour le béton confiné avec des «FRP» [70,71,100,59]. Par conséquent, les modèles de résistance spécialement développés pour le béton confiné avec des matériaux composites «FRP» ont été présentés par plusieurs chercheurs [55,70,71,72,100,13] et qui sont basés sur des essais expérimentaux réalisés sur des spécimens en béton confinés avec des matériaux composites «FRP».

### **III.2 Travaux expérimentaux**

Les matériaux composites à base de fibres «FRP» ne sont utilisés pour le confinement du béton que depuis le début des années 1980, bien que l'utilisation de tubes en plastique (PVC) remplis de béton, ait débuté dès la fin des années 1970. Au cours des dernières années, l'utilisation d'enveloppes externes de FRP est devenue de plus en plus populaire pour le renforcement des colonnes en béton armé.

#### **Fardis et Khalili (1981)**

Fardis et Khalili [40] entreprennent des essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions  $\varnothing 76$  mm x 152 mm et  $\varnothing 102$  mm x 204 mm enveloppés avec des tissus de matériaux composites à base de fibres de verre «GFRP». Ils rapportent une augmentation de la résistance en compression et une amélioration de la ductilité, grâce à l'effet du confinement.

#### **Katsumata et al. (1988)**

Katsumata et al. [53] présentent des résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement sismique des colonnes renforcées au moyen de matériaux composites «CFRP». Deux séries de modèles réduits de colonnes aux coins arrondis, de section carrée 200 mm x 200 mm, sont mises à l'essai pour évaluer l'efficacité de l'interface entre le béton et le «CFRP». Dans la première série, un isolant a été appliqué entre le béton et le matériau

composite, alors que dans la deuxième série le matériau composite a été collé directement en surface à l'aide d'une résine époxy. Suite à ces essais, les observations suivantes sont formulées :

- Le déplacement ultime ainsi que la capacité d'absorption d'énergie ont augmenté de façon linéaire avec la quantité de «CFRP».
- La résistance sismique des colonnes renforcées à l'aide de «CFRP» était proche de celle des colonnes confinées à l'aide de frettes hélicoïdales.
- Pour une même quantité de «CFRP», le déplacement ultime était très similaire dans les deux séries.

#### **Priestley et al. (1992)**

Priestley et al. [85] conduisent une investigation sur l'utilisation des enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre «GFRP» collés en surface pour améliorer la performance en flexion et en cisaillement des piles de pont en béton situées dans des régions sismiques. Ils présentent tout d'abord des modèles de design simples pour le calcul de la ductilité et du cisaillement résultant de la réhabilitation ou du renforcement en question. Sept piles de pont sont réhabilitées à l'aide du système décrit plus haut et sont mises à l'essai pour valider les modèles. Trois piles sont renforcées au niveau de la zone de rotule plastique avant d'être testées en flexion, alors que les quatre autres piles sont renforcées sur toute leur longueur avant d'être soumis à des essais de flexion en courbure double. Les résultats expérimentaux ont montré que le système de matériaux «GFRP» collés peut empêcher la rupture prématurée par l'insuffisance de la longueur de chevauchement dans la zone de rotule plastique. Ils ont également montré que le système procure une augmentation appréciable de la résistance au cisaillement aux piles et aux colonnes qui présentent des insuffisances en matière de cisaillement.

#### **Saadatmanesh et al. (1994)**

Saadatmanesh et al. [93] conduisent une analyse paramétrique portant sur le comportement de colonnes circulaires et rectangulaires renforcées à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de carbone. Ils modélisent le confinement procuré par les lamelles à l'aide du modèle de Mander et al. (1988). Quatre paramètres sont considérés en particulier : la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en «FRP», l'espacement des lamelles et les propriétés des lamelles.

#### **Nanni et Bradford (1995)**

Nanni et Bradford [78] étudient le comportement de cylindres normalisées en béton de 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur, confinés à l'aide de trois types d'enveloppe en matériaux composites : des câbles précontraints en aramide, des plaques hybrides en verre-aramide, et un enroulement filamenteux en fibres de verre. Pour la première série d'essais, 16 échantillons sont testés avec comme paramètres d'étude, le diamètre et l'espacement des câbles. La deuxième et la troisième série compte respectivement 4 et 15 échantillons. Les cylindres de la troisième série sont coulés avec une tige centrale leur permettant d'être placés sur une machine d'enroulement filamenteux pour être enroulés avec 1, 2, 4, ou 8 couches de fibres de verre de type E et de résine (ou polyester pour quelques-uns des spécimens). La

résistance du béton est respectivement de 35,8, de 45,5 et de 36,5 MPa pour les trois séries. Les auteurs concluent qu'en général, la réponse contrainte-déformation du béton enveloppé de matériau composite pourrait être modélisée par une simple courbe bilinéaire, le point de cassure de la courbe étant celui correspondant à la contrainte du béton non confiné pour une déformation de 3‰.

### **Saadatmenash et al. (1996)**

Saadatmenash et al. [94] étudient le comportement sismique de colonnes en béton armé conçu conformément aux normes en vigueur avant 1971 et réhabilitées à l'aide d'un confinement unidirectionnel assuré par des lamelles en «GFRP». Dix modèles réduits de colonnes à l'échelle 1/5, dont 5 circulaires et 5 rectangulaires, sont mis à l'essai. Les paramètres suivants sont étudiés : (a) la forme de la section (circulaire et rectangulaire); (b) le pourcentage d'armature longitudinale; (c) les détails de l'armature dans la zone plastique; et (d) le type de confinement (actif ou passif). Les modèles circulaires sont de 305 mm de diamètre, alors que les modèles rectangulaires ont une section de 241 mm x 368 mm. Les modèles réduits sont réhabilités à l'aide de lamelles sur une longueur de 635 mm au-dessus du niveau de la fondation (zone plastique). Ils sont ensuite soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une force statique de compression simulant les charges de gravité. Les résultats montrent que la réhabilitation à l'aide de lamelles «GFRP» pré-imprégnées améliore grandement la ductilité des colonnes. Elle permet également de contrôler le flambement de l'armature longitudinale dans la zone plastique, ainsi que la rupture par manque d'adhérence dans les zones de recouvrement d'armature. Les observations suivantes ont également été énoncées :

- Des colonnes de pont ayant des recouvrements d'armature dans la zone plastique potentielle et construites avant la mise en vigueur des nouvelles normes de design ont cédé prématurément à un niveau de ductilité bas variant entre 1,2 et 1,5.
- L'utilisation de barres longitudinales continues traversant une zone plastique améliore le comportement de la colonne empêchant une rupture de l'adhérence. La rupture de la colonne dans ce cas est due au flambement des barres longitudinales par insuffisance de support latéral dans la zone plastique.
- La réhabilitation de colonnes à l'aide de «FRP» extérieurement collés améliore de façon significative non seulement la capacité en flexion mais aussi la ductilité. Jusqu'à un facteur de ductilité de 6, des courbes d'hystérésis stables sans dégradation significative due à des problèmes d'ancrage ou de flambement sont atteintes.
- L'amélioration obtenue grâce à la technique de confinement actif par «FRP», comparé à celui passif, ne semble pas justifier le coût additionnel associé au confinement actif.

### **Xiao et al. (1996)**

Xiao et al. [117] présentent les résultats d'une étude expérimentale sur trois modèles réduits (échelle 1/2) de diamètre 610 mm et de hauteur 2440 mm. L'étude est proposée pour valider l'efficacité du système composite préfabriqué en «GFRP» comme enveloppe pour colonnes. Les modèles simulent les colonnes de l'autoroute I-10 '*Santa Monica Freeway/Fairfax, Washington Under Crossing*', qui ont cédées lors du tremblement de terre de Northridge en 1994 (amplitude de 6,8 sur l'échelle de Richter). Le nouveau système utilise une série de

coques cylindriques préfabriquées en composite de fibres de verre «GFRP» et ayant des fentes. Lors de la réhabilitation d'une colonne, les coques sont placées autour de la colonne en séquences et collées ensemble pour former une enveloppe continue. Les modèles sont ensuite soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une force de compression simulant la charge de gravité. Les conclusions suivantes sont énoncées suite à l'étude :

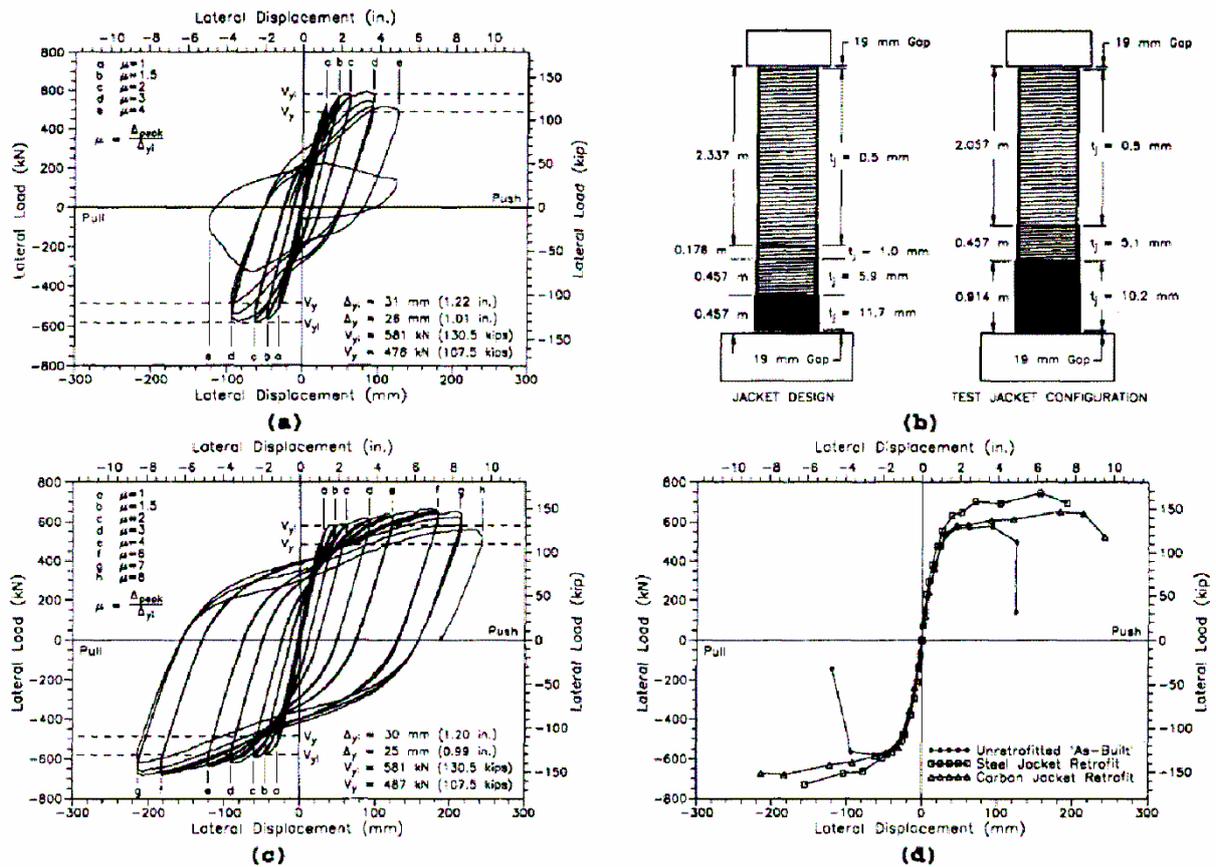
- Le modèle « tel que construit » développe des courbes d'hystérésis instables qui se dégradent rapidement avant que l'acier n'atteigne sa limite d'élasticité. Cette dégradation est due à la rupture prématurée de l'ancrage de l'armature longitudinale au niveau du recouvrement.
- Comparé au modèle « tel que construit », le comportement sismique des modèles réhabilités est considérablement amélioré puisque leurs courbes d'hystérésis sont stables jusqu'à un facteur de ductilité en déplacement de 5,7.
- La réparation du modèle « tel que construit » résulte en une amélioration de la capacité portante de la colonne qui a atteint celle correspondant à la limite élastique de la section vierge. Le modèle réhabilité montre une courbe d'hystérésis stable jusqu'à un facteur de ductilité en déplacement de 4, suivi ensuite par une dégradation graduelle de 50 % de la capacité maximale à un facteur de ductilité en déplacement de 8.
- Un design rationnel de colonnes de pont ayant des chevauchements d'armature doit tenir compte de la dégradation due au glissement des armatures longitudinales des colonnes réhabilitées.

#### **Pico (1997)**

Pico [87] étudie l'effet de la section des tubes en «FRP» remplis de béton en mettant à l'essai de compression axiale 9 spécimens de dimensions carrées 150 mm x 150 mm x 300 mm constitués de tubes carrés en «FRP» remplis de béton. Aucune adhérence n'est pourvue entre le béton et le tube en «FRP». Une augmentation marginale de la résistance à la compression est observée indépendamment de l'épaisseur de l'enveloppe. Les paramètres qui contrôlent le confinement sont : le rayon de courbure des coins de l'échantillon et la pression de confinement.

#### **Seible et al. (1997)**

La campagne expérimentale de Seible [99] a notamment porté sur la vérification des performances de poteaux sollicités en flexion. Les essais ont permis de montrer les performances d'un chemisage par CFRP. En effet, la Figure III.1-a montre la courbe force-déplacement latéral d'un poteau non renforcé et la Figure III.1-c indique la courbe force-déplacement latéral d'un poteau renforcé par chemisage FRP: on constate que le seuil d'initiation de l'endommagement est retardé et que la ductilité est augmentée, tout en conservant une certaine résistance sans dégradation réversible pendant les cycles de chargement. D'autre part, si l'on compare les performances de corps d'épreuve identiques renforcés par chemisage FRP d'une part ou par chemisage acier d'autre part, on constate (Figure III.1-d) de très bonnes performances dans les deux cas ; le chemisage acier (dimensionnement conventionnel) permet d'atteindre un niveau de résistance légèrement supérieur mais rend le poteau un peu moins ductile.



**Figure III.1** Renforcement à la flexion de poteaux : (b) description du renforcement (a) réponses hystériques des poteaux non renforcés et renforcés par CFRP, (d) ainsi que la comparaison des courbes enveloppe d'un poteau non renforcé, renforcé par CFRP et renforcé par chemisage acier [99].

### Monti et Spoelstra (1997)

Monti et Spoelstra [69] proposent un modèle de confinement pour des colonnes circulaires enveloppées avec des matériaux composites «FRP». La procédure est approximativement la même que celle proposée par Ahmad et Shah (1982). Pour une certaine déformation axiale  $\varepsilon_{ci}$ , on suppose une valeur de pression de confinement ( $f_{ri}$ ). La contrainte axiale  $f_{ci}$  est alors calculée moyennant le modèle de Mander et al. (1988) pour un confinement actif. La déformation latérale  $\varepsilon_r$ , quant à elle, est calculée à l'aide de l'expression développée par Pantazopoulou (1995). Avec  $\varepsilon_r$ , et la relation constitutive de l'enveloppe, une nouvelle valeur de  $f_r$  est calculée et comparée avec la valeur précédente. La procédure est répétée jusqu'à ce que  $f_r$  converge vers une valeur stable.

### Lavergne et Labossière (1997)

Lavergne et Labossière [58] entreprennent une investigation expérimentale sur deux modèles de colonnes circulaires de dimensions  $\text{Ø } 300 \text{ mm} \times 2150 \text{ mm}$  renforcées à l'aide de matériau composite «FRP». Trois essais sont entrepris sur ces deux spécimens. Le premier modèle est d'abord testé comme référence sans l'enveloppe «FRP». Il est ensuite réparé à l'aide de matériau composite unidirectionnel de type «CFRP» collé autour de la zone plastique et mis à l'essai de nouveau. Le deuxième modèle (D) est renforcé avec un matériau composite «CFRP» de la même manière que le modèle mais contrairement à ce dernier, il ne fut pas testé avant renforcement.

Tous les modèles sont soumis à un chargement horizontal alterné en plus d'une charge statique de compression constante. Les observations suivantes sont énoncées :

- Les colonnes avec des recouvrements d'armature situés dans la zone plastique et ont été conçues selon les anciennes normes (20 ans et plus) subissent une rupture à un niveau faible de ductilité (facteur de ductilité = 1,5). Ceci est dû à une rupture prématurée de l'adhérence au niveau des armatures d'attente et à une insuffisance de l'armature transversale et de la longueur de développement des barres longitudinales.
- Les colonnes en béton armé, réhabilitées à l'aide de matériau «CFRP» dans la zone plastique, montrent une petite augmentation de la résistance mais une amélioration appréciable de la ductilité. Une courbe d'hystérésis stable jusqu'à un facteur de ductilité de 8 est atteinte.
- Les colonnes en béton armé présentant des dommages initiaux et réhabilitées à l'aide de matériau composite «CFRP» dans la région plastique, ont vu leur résistance excéder la résistance initiale avant endommagement et leur ductilité grandement améliorée.
- L'application d'une épaisseur de «FRP» dans la direction verticale n'améliore pas la résistance en flexion de la colonne mais semble atténuer le développement des fissures horizontales.

#### **Shahawy et al. (2000)**

Shahawy et al [95] testent 45 éprouvettes cylindriques confinées avec des polymères renforcés de fibres de carbone et 10 non confinées de dimensions Ø 152,2 mm x 305 mm, les paramètres considérés sont la résistance du béton et l'épaisseur de renfort (nombre de plis «FRP»), deux types de bétons ont été utilisés, le premier à une résistance en compression de 20,7 MPa et le deuxième 41,4 MPa (tandis que les résistances en compression moyenne obtenues étaient respectivement de 19,4 et de 49,0 MPa). Les éprouvettes de 20,7 MPa de résistance ont été confinées avec 1, 2, 3, 4 et 5 plis de «CFRP», et celles de 41,4 MPa avec 1, 2, 3 et 4 plis de «CFRP». Pour chaque série d'essai, 5 éprouvettes ont été testées, les tissus unidirectionnels de fibres de carbone avaient une épaisseur de 0,5 mm, sa résistance à la traction était de 3654 MPa et son module d'élasticité de 207 GPa (valeurs du fournisseur), tandis que les essais de caractérisation au laboratoire ont donné 2275 MPa pour la résistance à la traction et 82,7 GPa pour le module élastique. La résine utilisée avait une résistance en traction de 65 MPa avec un module élastique de 3,1 GPa. Pour le béton 20,7 MPa, les auteurs ont remarqué qu'un seul pli de carbone suffit pour bloquer la dilatation du béton, alors que pour celui de 41,4 MPa, même deux plis n'ont pas pu bloquer la dilatation, ce phénomène est lié au rapport de confinement  $f'_c/f'_{co}$  qui représente le rapport de la pression de confinement latérale sur la résistance en compression du béton non confiné. Donc, plus le béton à renforcer est résistant et plus la pression latérale de confinement doit être grande pour que le confinement soit efficace, ce qui se traduit par un grand nombre de plis, ou de changement du type de fibres. D'autre part, Shahawy et al. (2000) ont donné comme conclusions que :

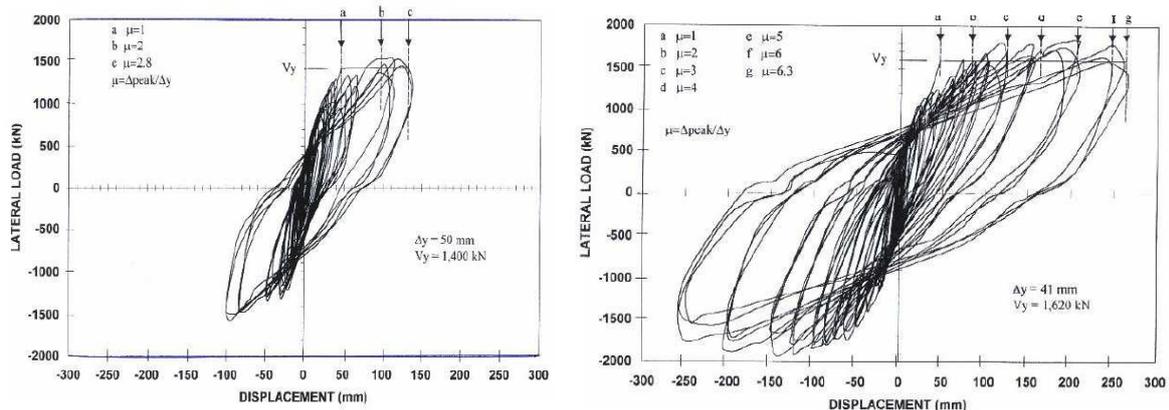
- les contraintes d'adhérence entre le béton et le tissu composite n'ont pas un effet significatif sur le comportement de confinement.
- la déformation circonférentielle de rupture des tissus composites est inférieure à la déformation ultime obtenue par essai de traction uni-axiale sur des coupons de fibres.

Cette rupture prématurée doit être évitée en plaçant les niveaux de confiance appropriés dans une analyse de fiabilité pour la déformation efficace de rupture.

- le modèle de Drucker-Prager ne peut pas représenter les caractéristiques de dilatation du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» dues à sa prétention d'élastique-parfaitement plastique.

### Pantelides et al. (2000)

**Pantelides et al** [83] ont réalisé des tests sur le South Temple Bridge aux Etats-Unis. L'objectif était alors de comparer le comportement de 2 tronçons transversaux du pont, le premier restant tel qu'il avait été construit (la construction datant de 1962) et le deuxième tronçon étant renforcé par matériaux composites (les tronçons sont composés de 3 piles et 2 travées). Les renforts en matériaux composites ont été dimensionnés de manière à doubler la ductilité de l'ensemble testé ; ils ont été disposés afin de renforcer la jonction pile/poutre, à confiner les piles et à renforcer au cisaillement les piles et chevêtres. Le chargement latéral était appliqué au niveau des chevêtres. La ductilité (rapport déplacement ultime obtenu/déplacement à la limite élastique) obtenue pour le tronçon non renforcé fut de 2,8, contre 6,3 pour le tronçon renforcé. Les réponses hystérétiques sont données sur la Figure III.2.



**Figure III.2** Réponse aux cycles de chargement des tronçons non renforcés (a) et renforcés (b) [83].

Les essais menés sur ouvrages réels démontrent l'efficacité des renforts en matériaux composites. Ces renforts externes ont permis d'améliorer significativement la ductilité des tronçons d'ouvrages qui n'avaient pas été dimensionnés pour résister à de tels déplacements (et plus généralement à des sollicitations sismiques).

### Lam et Teng (2002)

Lam et Teng [59] présentent les résultats expérimentaux de 199 éprouvettes en béton. La résistance à la compression du béton non confiné était comprise entre 18 et 100 MPa, les spécimens testés étaient confinés avec des «FRP» de carbone, de verre et d'aramide, dont le mode de rupture observé était par traction des «FRP». Pour les propriétés mécaniques des «FRP» des 199 éprouvettes, à peu près les deux tiers ont été établis par les chercheurs eux-mêmes soit par essai de traction sur éprouvettes planes (*flat coupon tensile test*) ou bien par traction circonférentielle obtenue par dilatation d'éprouvettes annulaires (*ring splitting test*). Pour le reste des éprouvettes, les propriétés sont celles données par le fabricant. Les auteurs montrent que la relation entre le gain en résistance et le niveau de confinement est linéaire

pour les groupes étudiés. La majorité des éprouvettes cylindriques en béton ont été confinées par stratification manuelle ou par enroulement filamentaire, cependant il existe aussi un nombre important de tubes en «FRP» remplis avec du béton, la différence principale entre ces éprouvettes est que l'enveloppe en «FRP» est colée au béton avec la résine, ce qui n'est pas le cas des tubes en «FRP» remplis de béton.

#### **Shehata et al. (2002)**

Shehata et al. [96] conduisent un programme expérimental comprenant des essais sur 54 colonnes courtes en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité de colonnes en béton confiné sur la face externe en les recouvrant de tissus en «CFRP». Les variables étudiées étaient la quantité de renforcement caractérisée par le nombre de couche de «CFRP» appliquées aux spécimens (une ou deux couches). Les auteurs ont testé en compression uniaxiale des cylindres en béton de dimensions 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur, des prismes de béton de dimensions 150 mm x 150 mm x 300 mm et des colonnes rectangulaires de dimensions 94 mm x 188 mm x 300 mm (de section égale à celle des éprouvettes cylindriques) enveloppés par un matériau en «CFRP». En prenant comme base, les résultats obtenus, des équations ont été proposées pour calculer la résistance du béton confiné et sa déformation spécifique ultime en fonction de la contrainte latérale de confinement pour chaque forme de section transversale utilisée, circulaire, carrée et rectangulaire. Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité de confinement est très influencée par la géométrie de la section des colonnes (circulaire, carrée et rectangulaires) et la pression de confinement exprimée par le nombre de plis de l'enveloppe «CFRP».

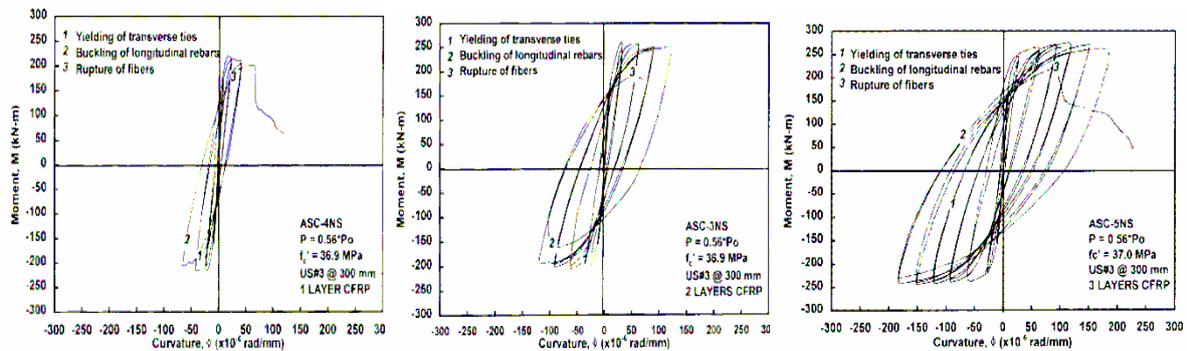
#### **Xiao et Wu (2003)**

Xiao et Wu [115] présentent les résultats expérimentaux d'un programme de recherche concernant l'étude de comportement fondamental (contrainte-déformation) d'un béton confiné avec divers type de matériaux composites en «FRP». Dans cette recherche plus de 200 colonnes cylindriques en béton de dimension de 152 mm diamètre et 300 mm de hauteur, avec 9 types de composite «FRP» ont été sollicitées en compression axiale. Différents paramètres de conception ont été considérés dans cette étude à savoir : la résistance à la compression du béton non confiné, le type et l'épaisseur du composite «FRP» utilisé. En outre, un nouveau modèle contrainte-déformation a été proposé pour prédire le comportement en compression axiale des colonnes en béton confinées avec des matériaux composites. A la lumière de cette étude les conclusions suivantes sont formulées par les auteurs:

- Une augmentation significative de la résistance et la ductilité du béton peut être réalisée par un confinement en «FRP».
- En plus des propriétés des matériaux telles que la résistance en compression du béton, les auteurs suggèrent que la performance du béton confiné est dominée par le module de confinement  $C_j$ .
- La résistance ultime du béton confiné est déterminée par la rupture de l'enveloppe composite.

**Iacobucci et al (2003)**

Une étude menée [51] sur 8 poteaux, représentatifs de poteaux de bâtiments et de ponts construits avant 1971, renforcés par CFRP (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 GFRP (FRP de Verre, fabriqué à base de tissu de fibre de verre) sur le reste de la hauteur du poteau, montre également une augmentation de la ductilité et de la capacité de dissipation d'énergie. Le paramètre principal d'étude est le nombre de couches de CFRP dans la zone de rotule plastique. La Figure III.3 indique clairement que les renforts appliqués permettent bien d'améliorer les performances des corps d'épreuve, en termes de ductilité et de capacité à dissiper l'énergie ; ils permettent également de meilleures capacités à reprendre un moment de flexion de par la réponse du spécimen rendue plus ductile. En outre, le comportement cyclique s'améliore avec le nombre de couches de CFRP appliquées. Cependant, des efforts axiaux importants causent plus d'endommagement aux poteaux et sollicitent davantage le chemisage CFRP ; davantage de couches de CFRP en zone critique sont donc nécessaires en cas de charges axiales importantes.



**Figure III.3** Courbes moment-courbure pour les corps d'épreuve renforcés par 1 couche (a), 2 couches (b) et 3 couches (c) de CFRP dans la zone de rotule plastique [51].

**Thériault et al. (2004)**

Thériault et al [109] étudient expérimentalement l'influence de l'élançement et l'effet d'échelle des spécimens sur le comportement des colonnes en béton confinées avec des matériaux composites «FRP» chargées axialement. Les auteurs ont testé 42 cylindres en étudiant les paramètres suivants : trois diamètres différents et deux rapport longueur/diamètre ( $\text{Ø}51 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$  ;  $\text{Ø}152 \text{ mm} \times 304 \text{ mm}$  ;  $\text{Ø}304 \text{ mm} \times 608 \text{ mm}$  ;  $\text{Ø}152 \text{ mm} \times 902 \text{ mm}$  et  $\text{Ø}304 \text{ mm} \times 1824 \text{ mm}$ ) combinés avec deux matériaux composites de confinement (CFRP et GFRP). Les résultats ont été comparés aux modèles théoriques et aux résultats expérimentaux recueillis de la littérature. Le but de cette étude était de valider les résultats expérimentaux et de vérifier quelques modèles empiriques existants obtenus à partir des essais sur des spécimens courts. Selon l'analyse statistique des résultats, les auteurs ont montré que des cylindres conventionnels en béton confinés avec des matériaux composites «FRP» peuvent efficacement être utilisés pour modéliser le comportement axial des colonnes courtes.

**Berthet et al. (2005)**

Berthet et al [13] réalisent des essais sur des bétons de 5 classes de résistance différentes, allant du béton ordinaire (25 MPa) au béton à hautes performances BHP (170 MPa), selon les classes de résistance visées au départ, les bétons sont appelés C20 ( $f' = 20 \text{ MPa}$  à 28 jours),

C40, C50, C100 et C200. Les éprouvettes cylindriques étudiées ont des dimensions de Ø160 mm x 320 mm pour les trois premières classes et Ø70 mm x 140 mm pour les deux dernières. Les trois premiers bétons ont été choisis pour étudier le confinement du béton dans le cadre de la réhabilitation, et les deux derniers pour les nouvelles constructions avec des poteaux à hautes performances. Les éprouvettes ont été confinées avec des enveloppes composites à base de fibres de carbone ou des fibres de verre allant de 2 à 12 plis de tissus unidirectionnels dont les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, les plis sont dit orientés à 0° (zéro degré). Les remarques suivantes sont énoncées suite aux résultats de cette étude:

- le confinement augmente d'une manière significative la résistance et la déformation ultime du béton, les diagrammes contrainte-déformation sont bilinéaires pour tous les spécimens. D'autre part, les auteurs ont remarqué que les premières branches (partie élastique) des diagrammes contrainte-déformation du béton confiné et non confiné sont confondues, ce qui veut dire que la première branche ne dépend que des propriétés du béton, tandis que la deuxième branche semble dépendre des propriétés du «FRP», notamment sa rigidité. Cette observation explique l'augmentation de la pente de la deuxième branche des diagrammes contrainte-déformation en fonction de l'augmentation du nombre de plis du composite «FRP».
- Le mode de rupture du béton ordinaire est caractérisé par la propagation des microfissures initiées dans l'interface pâte-granulats qui s'ouvrent et se transforment en macro-fissures est complètement différent de celui du béton à hautes performances (BHP) qui présente au moment de la rupture des fissures verticales.
- Le mode de rupture du béton ordinaire est caractérisé par la propagation des microfissures initiées dans l'interface pâte-granulats qui s'ouvrent et se transforment en macro-fissures est complètement différent de celui du béton à hautes performances (BHP) qui présente au moment de la rupture des fissures verticales.
- La résistance et la déformation ultime en compression axiale est liée directement à la pression de confinement latérale, le gain de résistance augmente linéairement avec le rapport de confinement  $f_l / f'_{co}$ .
- A rigidité égale, l'enveloppe composite en fibres de verre ou de carbone a le même comportement, les éprouvettes confinées avec un pli de carbone ou trois plis de verre (rigidité équivalente du renfort) ont pratiquement le même diagramme contrainte-déformation.
- Le gain de résistance augmente linéairement avec le rapport de confinement quelque soit la résistance du béton. Cependant, le coefficient d'efficacité du confinement  $k_l$  varie avec la résistance en compression du béton. Par contre, pour les bétons à hautes performances  $k_l$  enregistre une diminution. Pour les bétons ordinaires ( $f'_{co} \leq 50$  MPa), l'augmentation de la résistance à la compression ne dépend que de la pression de confinement latérale ( $k_l$  est constant) alors que pour les bétons à hautes performance elle dépend aussi de la classe de résistance.

### **Matthys et al. (2005)**

Matthys et al. [66] étudient le comportement sous chargement axial de colonnes à grande échelle en béton armé confiné avec des matériaux composites «FRP» (confinement total,

partiel et sous forme partielle elliptique). Le travail expérimental a été réalisé sur 8 colonnes circulaires de diamètre 400 mm par 2000 mm de hauteur. Les auteurs ont présentés les résultats analytiques et expérimentaux de leur étude toute en montrant l'effet de la déformation effective de rupture circonférentielle du «FRP» sur l'exactitude des modèles de confinement existants dans la littérature. Une révision d'un modèle existant développé précédemment par le second auteur de ce travail (Toutanji, 1999) a été présentée.

#### **Chaallal et al. (2006)**

Chaallal et al. [19] présentent les résultats d'une recherche expérimentale sur des colonnes en béton non armé confiné avec des tissus en «FRP» de carbone collés en surface. Un total de 24 essais ont été réalisés sur des colonnes circulaires de diamètre 150 mm et 200 mm par 1000 mm de hauteur. Deux bétons commerciaux ordinaires ont été utilisés avec des résistances à la compression de 15 MPa et 35 MPa. A travers cette étude, les auteurs passent en revue six modèles de confinement choisis et trois guides de conception nord-américains pour des colonnes circulaires renforcées avec des «CFRP» et fournissent une comparaison détaillée entre les résultats expérimentaux, les prévisions de modèles, et les valeurs obtenues par le biais des trois guides de conception.

La comparaison a été déterminée en termes du rapport de la résistance à la compression du béton confiné sur celle du béton non confiné ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ), mais également en terme de gain sur la charge ultime des colonnes. Les paramètres suivants ont été considérés: Le coefficient de confinement du «FRP», la résistance en compression du béton non confiné et les propriétés élastiques et mécaniques du «FRP». Les résultats de cette recherche ont indiqué que pour des colonnes faites de béton de faible résistance, les modèles et guides de conception existants surestiment la résistance du béton confiné, et par conséquent, la charge ultime des colonnes.

#### **Pan et al. (2007)**

Pan et al. [82] présentent les résultats d'une étude expérimentale en compression axiale conduite sur 6 colonnes élancées de béton armé de section rectangulaires (120 mm x 150 mm) modifiées en section elliptiques enveloppées avec des composite en «FRP», avec un rapport L/b variant entre 4,5 et 17,5. Le résultat d'essai a montré que l'effet de l'élancement sur la charge ultime des colonnes en béton enveloppées par «FRP» est plus significatif que celui des colonnes de béton armé ordinaires. En conclusion : l'effet de renforcement diminue avec l'augmentation de l'élancement. D'autre part, les auteurs ont confirmé que si la proportion de l'élancement est inférieure à 17,5, la charge ultime des colonnes enveloppées par «FRP» est toujours 20 % plus haute que celle des colonnes en béton armé ordinaire.

#### **Youssef et al. (2007)**

Youssef et al. [119] développent un modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites «FRP». Le modèle est basé sur les résultats d'un large programme expérimental incluant des colonnes courtes circulaires ( $\emptyset$  406 x 813 mm et  $\emptyset$  152 x 305 mm), carrées (381 mm x 381 mm x 762 mm) et rectangulaires (254 mm x 381 mm x 762 mm) confinées en utilisant deux types de matériaux composites (CFRP et GFRP) avec une vaste gamme de rapport de confinement. Un total de 117 spécimens a été testé sous chargement axial. L'analyse des résultats d'essai montre que:

- La contrainte ultime, la déformation de rupture, les paramètres de l'enveloppe composite et la géométrie de la section sont les facteurs significatifs affectant le comportement contrainte-déformation du béton confiné avec des matériaux composites «FRP».
- Les courbes contrainte-déformation du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» sont bilinéaires ascendantes ou descendantes en fonction de la géométrie de la section et du rapport de confinement.

#### **Kumutha et al. (2007)**

Kumutha et al. [54] présentent les résultats d'une recherche expérimentale sur le comportement des colonnes rectangulaires axialement chargées qui ont été renforcées avec des enveloppes en polymère renforcé de fibres de verre «GFRP». Cette étude a été prévue pour examiner plusieurs aspects relatifs à l'utilisation des composites «GFRP» pour renforcer les colonnes rectangulaires soumises à la compression axiale. Les objectifs de l'étude étaient comme suit : (1) évaluer l'efficacité de l'enveloppe en «GFRP» renforçant des colonnes rectangulaires en béton armé, (2) évaluer l'effet du nombre de couches du composite sur la charge ultime et la ductilité du béton confiné et (3) évaluer l'effet du rapport des dimensions de la section (a/b) sur la section du béton effectivement confinée. Pour couvrir un intervalle plus au moins important des sections transversales, trois rapports a/b ont été étudiés (où a et b sont respectivement, la largeur et la longueur de la section rectangulaire):  $a/b = 1,0$  ; 1,25 et 1,66. Des spécimens avec zéro, une, et deux couches «GFRP» ont été étudiés. Neuf spécimens ont été soumis à la compression axiale jusqu'à la rupture toute en enregistrant le comportement axial et radial sous forme de diagramme contrainte-déformation.

#### **Al-Salloum (2007)**

Al-Salloum [09] présente des résultats expérimentaux concernant l'influence du rayon des coins des sections carrées sur la résistance en compression axiale du béton confiné avec des «CFRP». L'auteur a testé 8 spécimens carrés de dimension 150 mm x 150 mm x 500 mm et deux cylindriques ( $\emptyset 150$  x 300 mm) pour la comparaison. En conclusion l'auteur a montré que : la meilleure performance en matière de résistance à la compression était celle des éprouvettes cylindriques suivi respectivement par les colonnes carrées avec des coins arrondis d'un rayon égale à 38, 25 puis 5 mm. Cette différence d'efficacité de confinement peut être expliquée, selon l'auteur, par le fait que l'enveloppe composite offre une pression de confinement uniforme dans le cas des sections circulaires, ce qui n'est pas le cas pour les sections carrées.

#### **Wang et Hsu (2008)**

Wang et Hsu [112] proposent une méthode de dimensionnement et un programme expérimental pour évaluer la résistance axiale ultime et la déformation correspondante en compression des colonnes rectangulaires et carrés en béton armé confiné avec des enveloppes en polymère renforcé de fibres de verre «GFRP». Trois colonnes carrées de dimensions 300 mm x 300 mm x 900 mm et trois autres rectangulaires de dimensions 450 mm x 300 mm x 900 mm ont été testées à la compression axiale jusqu'à la rupture. Les résultats d'essai ont clairement montré l'efficacité des enveloppes «FRP» dans l'amélioration de la déformation ultime et de la résistance en compression des colonnes en béton armé.

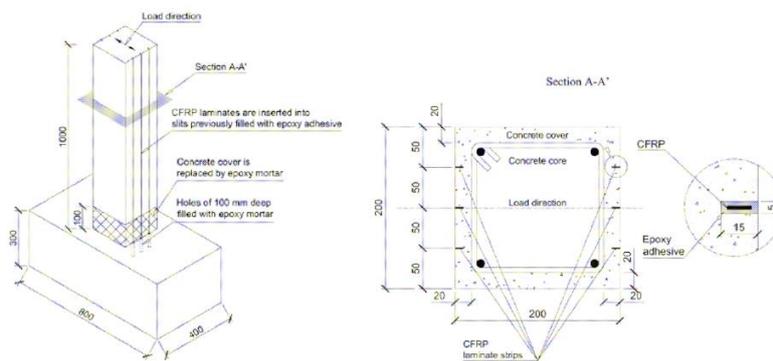
**Wang et Wu (2008)**

Wang et Wu [113] testent 108 colonnes courtes de section carrée (150 mm x 150 mm x 300 mm) en béton confinées avec du «CFRP». Le but principal de l'étude était d'examiner l'effet des rayons de courbure des coins sur le confinement effective fournis par l'enveloppe composite, particulièrement pour des colonnes carrées avec des coins à 90°. Les variables d'essai ont inclus les rayons de courbure des coins, l'épaisseur de l'enveloppe composite et la classe de résistance du béton (résistance en compression de 30 et 50 MPa). Les résultats d'essai ont montré que le niveau de confinement est très influencé par le rayon de courbure des coins. En conclusion les auteurs ont montré que :

- Au début de chargement, le confinement efficace de colonnes carrées avec des coins à 90° est insuffisant pour augmenter la résistance des ces dernières. Cependant, ce confinement augment après le pic de la charge maximale du béton non confiné et devient assez significatif pour améliorer la ductilité des colonnes.
- Pour un béton de résistance en compression de l'ordre de 50 MPa : le confinement a augmenté efficacement la ductilité de toutes les colonnes. Cependant, un niveau de confinement élevé ne peut pas fournir une ductilité élevée pour des colonnes avec un rayon de courbure des coins de l'ordre de 45 ou 60 mm.
- Pour un béton de résistance en compression égale à 30 MPa, et à l'exception des spécimens carrées à 90° et ceux avec un faible rayons de courbure des coins ( $r = 15$  ou 30 mm), le confinement avec des «FRP» n'a pas une influence sur la ductilité.

**Barros et al. (2008)**

Ainsi, la campagne expérimentale menée par Barros [14] a permis de tester une technique consistant à insérer des plats CFRP dans des rainures pré-créusées sur les faces de poteau (technique NSM). 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 III.4).



**Figure III.4** Description de la technique de renforcement testée par Barros et al. et disposition des lamelles CFRP [14].

La campagne porte sur 8 poteaux et 12 essais : 4 poteaux sont non renforcés (série NON), testés, renforcés puis testés à nouveau (série POS) et 4 poteaux sont renforcés sans avoir été endommagés, puis testés (série PRE). Pour chaque série, 2 poteaux contiennent des aciers longitudinaux de diamètre 10 mm, et 2 autres des aciers de diamètre 12 mm. Les corps d'épreuves sont testés en flexion composée avec un effort latéral alterné et d'amplitude croissante. Les séries PRE et POS affichent un comportement similaire, avec un gain en

résistance à la flexion (par rapport à la série NON) de 92 % pour les poteaux présentant des aciers de 10 mm et de 34 % pour les poteaux présentant des aciers de 12 mm. Par ailleurs, aucun phénomène de décollement des lamelles n'est observé ; la résistance en traction des lamelles est donc pleinement exploitée (la déformation ultime des lamelles est quasiment atteinte). Cette technique constitue donc une très bonne disposition pour l'amélioration de la résistance en flexion des poteaux ; cependant cette technique ne confine pas le béton et améliore peu la capacité à dissiper l'énergie du poteau.

### **Rousakis et karabinis (2008)**

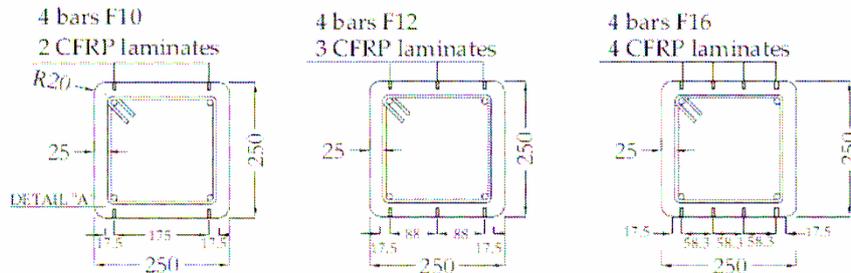
Rousakis et karabinis [90] ont étudié l'efficacité du confinement des polymères renforcés de fibres «FRP» dans l'amélioration de la ductilité et la résistance des éléments en béton armé soumis à une compression axiale monotone. Un programme expérimental a été réalisé pour traiter le comportement des 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 «FRP» en fibres de carbone ou de verre. D'autres spécimens en béton confinés avec des matériaux composites «FRP» ont été réalisés et testés pour évaluer comparativement les effets de confinement des étriers en acier, des composites «FRP», ou le double confinement (étriers en acier plus «FRP»). La résistance à la compression, la ductilité et le niveau d'absorption d'énergie des spécimens ( $E/E_0$ ) ont été quantifiés pour évaluer l'effet des barres longitudinales. Enfin, un modèle empirique de dimensionnement a été proposé. Selon l'approche proposée par Rousakis et karabinis (2008), aucune estimation de la contrainte effective ou de la déformation à la rupture de l'enveloppe «FRP» n'est nécessaire. La précision satisfaisante des prédictions du modèle proposé a été démontrée par comparaison avec des modèles existants et sur une grande base de données des résultats expérimentaux sur des spécimens entièrement confinés avec des «FRP» et aussi par comparaison avec les résultats expérimentaux de leurs programmes expérimentaux.

A travers leur étude les auteurs ont montré que le confinement avec des matériaux composites «FRP» 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 «FRP», 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 «FRP» additionnelle a procuré une restriction latérale suffisante pour retarder ou même empêcher le flambement prématuré des armatures longitudinales. Selon les résultats expérimentaux de Rousakis et karabinis, la ductilité axiale et radiale des spécimens en béton armé confiné avec des matériaux composites «FRP» a été presque du même niveau que celle des spécimens en béton confinés seulement avec des matériaux composites «FRP».

### **Perrone et al., (2009)**

Perrone et al. [86] complètent les essais décrits précédemment par Barros [14] en étudiant le comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites selon une

technique dite hybride. En effet, cette technique combine l'action de bandes de tissus de CFRP (chemisage) et de plats CFRP insérés dans des rainures pré-creusées sur les faces de poteau (Figure III.5), comme présenté précédemment. Encore une fois, des poteaux aux taux d'aciers longitudinaux différents sont testés. Les lamelles sont ancrées dans la semelle (profondeur 120 à 150 mm) et ont pour objectif d'améliorer la résistance en flexion des poteaux.



**Figure III.5** Détails de la disposition des plats CFRP et du taux d'aciers longitudinaux [86].

Quant aux bandes de tissus (chemisage appliqué sur 430 mm en pied de poteau, puis bandes de 150mm appliquées entre les cadres existants), elles permettent d'améliorer le confinement du béton, la résistance au cisaillement, d'éviter tout décollement des plats CFRP et d'améliorer la liaison entre les aciers de recouvrement à la jonction poteau-semelle. Cette technique a été testée sur huit corps d'épreuve ; des paramètres tels que la résistance en compression du béton, le nombre de couches de tissus et le taux d'aciers longitudinaux ont également été évalués, l'objectif étant d'analyser les performances en termes de résistance (effort ultime) et de dissipation d'énergie. Les essais menés ont consisté à appliquer aux corps d'épreuve un effort axial constant de 120 kN ainsi que des cycles latéraux alternés d'amplitude croissante. Ils 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, ces tests ont révélé que l'énergie dissipée par les poteaux renforcés augmente avec le taux d'aciers longitudinaux ainsi qu'avec le nombre de bandes de tissu CFRP. Cette technique hybride s'avère donc efficace et répond aux critères que l'on cherche à obtenir pour un renforcement performant, à savoir une meilleure capacité portante et une importante capacité à dissiper l'énergie.

### **Abbasnia et Ziaadiny (2009)**

Abbasnia et Ziaadiny [01] ont présenté les résultats d'une série d'essais de compression axiale cyclique sur 10 spécimens prismatiques carrés (152 x 152 x 305 mm) avec un rayon de coins  $R = 29$  mm. Les échantillons ont été soumis à divers modes de chargement cyclique pour examiner différents aspects du comportement cyclique du béton confiné avec des matériaux composites «FRP». Les résultats des essais ont montré que la courbe enveloppe de la courbe contrainte-déformation cyclique des spécimens prismatiques carrés en béton confinés avec des matériaux composites «FRP» est approximativement la même que la celle du même béton sous chargement axiale monotone. L'étude indiquait également d'autres résultats importants, tels que, la linéarité de la relation entre la déformation plastique et la déformation enveloppe

au déchargement et l'effet cumulatif de chargement sur l'histoire de la déformation plastique et la contrainte de rupture du béton.

### **Benzaid (2010)**

Benzaid et al. [12] étudient le comportement des colonnes de section carrée confinées par matériaux composites à base de fibres de verre (GFRP). Les auteurs analysent des résultats expérimentaux en termes de la résistance ultime et de la déformation correspondante. Les paramètres pris en compte sont le nombre de couches composites et le rayon de coin pour une forme carrée. Un total de vingt-et-un des prismes de taille de  $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$  ont été testés sous chargement uni-axial.

Les auteurs ont cités les conclusions suivantes :

1. Les résultats expérimentaux démontrent clairement que le confinement par matériaux composites à base de fibres de verre peut améliorer la performance structurelle des colonnes en béton sous chargement axial.
2. Le nombre de couches de GFRP et le rayon de coin sont les principaux paramètres ayant une influence significative sur le comportement des échantillons.
3. Les résultats des essais ont montré que le bénéfice de confinement pourrait être amélioré en augmentant la rigidité de confinement externe (application de plusieurs couches) et par l'élimination des angles aigus de la section carrée (application d'un rayon de coin).

### **Wang et al. (2011)**

Wang et al. [114] étudient le comportement de 34 colonnes en béton armé de grande échelle, de section carrée et circulaire, confinées avec des tissus en fibres de carbone chargées à la compression uni-axiale. Les auteurs estiment l'influence des dimensions de la section de poteaux, renfort interne en acier et l'épaisseur des enveloppes de FRP sur le comportement de courbes contrainte-déformation.

Les conclusions ont été tirées à travers de ce travail expérimental:

- Le confinement des enveloppes externes de CFRP a entraîné une augmentation significative de la contrainte axiale et la déformation des colonnes circulaires, tandis que une amélioration remarquable de la déformation axiale mais légèrement en contrainte axiale pour les colonnes de section carrée.
- L'efficacité de confinement diminue avec l'augmentation de la section des colonnes.
- L'acier interne influe considérablement sur les réponses de contrainte-déformation des deux colonnes avec CFRP.

### **Quiertant et Clément, (2011)**

Le comportement de poteaux renforcés par matériaux composites et soumis à une charge axiale excentrée de 20 mm par rapport à l'axe du poteau a également été étudié PAR Quiertant et Clément [125]. Quatre configurations sont examinées et chaque configuration est testée sur deux corps d'épreuve (deux corps d'épreuve témoins sont également testés sans renforcement). Chaque configuration combine renforts longitudinaux à la flexion et confinement. Les essais ont montré que l'augmentation en termes de capacité portante n'est pas très importante. En revanche, on constate une augmentation très significative de la

capacité de déformation (qui varie néanmoins selon le procédé de renforcement du poteau, certains étant beaucoup plus efficaces que d'autres).

#### **Islam (2011)**

Islam [50] étudie l'effet de confinement en fibres des colonnes circulaires et carrées en béton de granulats recyclés (gravier recyclé). Les colonnes de béton étudiées ont eu une faible résistance (14 MPa-17 MPa). L'approche est pertinente dans le contexte de la modernisation des éléments structurels qui sont déficients en force par la dégradation de matériaux. Deux types de tissus (carbone CFRP/verre GFRP) et quatre types de granulats recyclés ont été utilisés qui sont la pierre concassée, la brique pilée, la pierre recyclée et agrégats de briques recyclées. Les auteurs concluent qu'en général, le renforcement par matériaux composite collés à l'extérieure du béton peut empêcher la défaillance des structures qui ont été dégradés dans leurs de matériaux. Les auteures recommandent de mettre un rayon de courbure dans les colonnes de section carrée afin d'augmenter la capacité portante des colonnes.

#### **Micelli et Modarelli (2013)**

Micelli et Modarelli [122] étudient expérimentalement et analytiquement les propriétés affectant sur le comportement des colonnes en béton armé renforcées par matériaux composites à base de fibres de carbone. Les auteurs présentent les résultats d'un grand programme expérimental dans le but d'examiner l'effet de divers paramètres expérimentaux sur l'efficacité de confinement en matériaux composites FRP des colonnes de béton armé de section circulaires et rectangulaires avec des noyaux plein ou creux. Les paramètres expérimentaux ont été inclus compris: différentes résistance de béton, le type de fibres, nombre de couches de FRP, la géométrie de la colonne, rayon de coins, noyau plein / creux. 128 spécimens ont été préparés et testés dont 89 d'entre eux ont été renforcés par fibre de carbone (CFRP) et Verre (GFRP), les 39 autres ont été testés sans renforcement (spécimens de référence)

Les observations les plus importantes citées par les auteurs sont :

- Les colonnes de section circulaire présentent une bonnes résistance et ductilité par rapport à celles de section carrées et rectangulaires.
- L'efficacité de confinement diminue avec l'augmentation de la résistance du béton.
- Le rayon de coin de colonnes prismatiques a une forte influence tant en termes de résistance à la rupture et la déformation; il est toujours recommandé d'éviter les coins sans surface arrondie puisque l'effet de confinement peut diminuer considérablement, en raison de la forte concentration des contraintes aux niveaux des coins pointus.

#### **Vincent and Ozbakkaloglu (2013)**

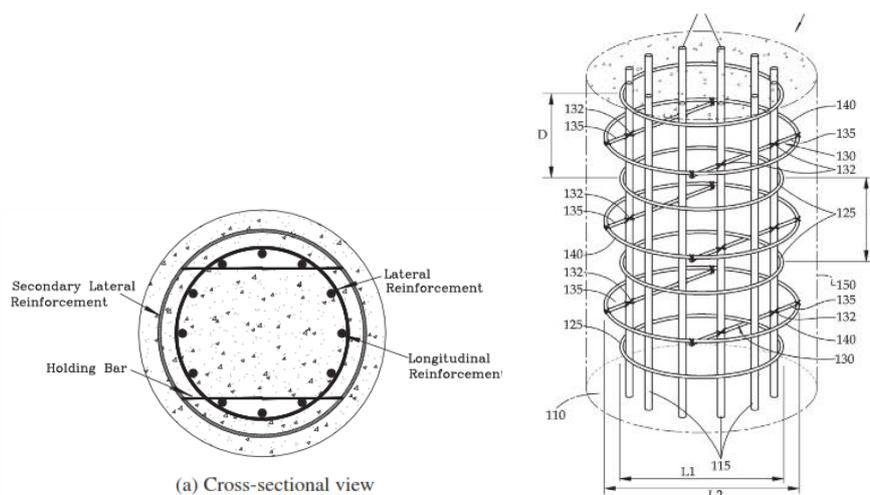
Thomas and Ozbakkaloglu [110] étudie l'influence de la résistance du béton et la méthode de confinement sur le comportement des colonnes circulaires. Un total de 55 spécimens cylindriques de 152 mm de diamètre et de 305 mm de hauteur confinées par des matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP) ont été testées sous compression uni-axiale. Trois formulations différentes de béton ont été utilisées, avec des résistances à la compression moyenne de 35, 65 et 100 MPa et deux méthodes de confinement ont également été examinées avec des enveloppes en FRP et des tubes de FRP.

Les conclusions ont été tirées de ce travail:

- Pour le même ratio de confinement réel ( $f_{l,ud}/f'_{co}$ ), le taux d'amélioration de la résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et le taux d'amélioration de la déformation ( $\epsilon'_{cc}/\epsilon'_{co}$ ) augmentent à mesure que la compression du béton non confiné ( $f'_{co}$ ) diminue.
- L'épaisseur de la couche de CFRP et la méthode de confinement n'ont pas un effet significatif sur le facteur de réduction  $k_e$ , alors que la résistance du béton à une importante influence. Le facteur de réduction  $k_e$  diminue avec une augmentation de la résistance à la compression du béton.
- A partir des gammes de la résistance du béton et le niveau de confinement testés dans cette étude, les échantillons d'enveloppes de FRP présentent même performance avec ceux confinés par des tubes de FRP

### Choi et al. (2014)

Choi et al. [20] étudient le comportement à la compression axiale des colonnes cylindriques de béton confinées par des anneaux en FRP. Les auteurs suggèrent une nouvelle méthode s'appelle 'Dense', qui signifie un renforcement latéral secondaire par des anneaux en FRP des colonnes en béton armé qui sont situés entre l'armature latérale primaire et la surface du béton (Figure III.6), ce qui permet de retarder le flambage longitudinal de l'armature et augmenter la ductilité des colonnes.



**Figure III.6** Schéma du renfort latéral secondaire en FRP 'Dense' pour les colonnes RC[20]

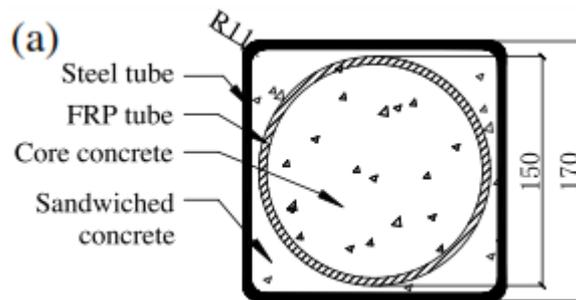
Les auteurs ont utilisé des cylindres normalisés en béton de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur, confinés à l'aide des anneaux en FRP de 140 mm de diamètre et 7.5 mm d'épaisseur. Deux types d'échantillons avec des emplacements variés de renfort latéral ont été étudiés. Les emplacements entre les anneaux de FRP étaient 20 et 30 mm avec une distance de 30 mm de haut et en bas d'un échantillon. En conséquence, 13 et 9 anneaux en FRP ont été utilisés pour les échantillons de 20 mm et 30 mm, respectivement.

Les observations suivantes ont également été énoncées :

- Comme les enveloppes externes de FRP ou tubes en FRP, les anneaux de FRP ont augmenté la résistance ultime et la déformation correspondante du béton.
- L'estimation du coefficient de confinement des colonnes en béton armé par la méthode 'Dense', anneaux en FRP, était 2.0, qui a été inspiré par des données expérimentaux.

**Feng et al. (2015)**

Feng et al. [41] étudient le comportement des colonnes confinées avec une nouvelle méthode de confinement soumettent sous chargement axial, cette méthode consiste à confiner des colonnes par trois étapes (1), la première étape consiste à confiner des colonnes circulaire de 150 mm diamètre et 300 mm de hauteur par des enveloppes en FRP (2) la deuxième étape consiste à préparer des coffrage en tube d'acier de section carrée 170 mm x 170 mm et de 300 de hauteur, (3) la troisième étape consiste à remplir le béton entre les cylindres confinées par des enveloppes en FRP et les tubes carrés en acier. La colonne produise peut être considéré comme un tube d'acier carré (CFST) avec un noyau en béton confiné en FRP. La figure III.7 montre la procédure de confinement.



**Figure III.7** Procédure de confinement de Feng et al. [41]

Le mode de rupture, les réponses contrainte-déformation, les effets des paramètres clés de conception sur les principales caractéristiques mécaniques, à savoir la rigidité initiale de compression, déformation ultime, la capacité résiduelle, et de ductilité, ont été évalués dans ce travail. Les conclusions suivantes sont tirées:

Les auteurs ont montré que :

- La couche d'enveloppe FRP intérieure engendre étroitement une pression effective de confinement au cœur de béton, tandis que la couche de tube d'acier externe fourni une bonne réponse ductile avec une capacité portante résiduelle après le pic.
- La déformation initiale, le coefficient de confinement, l'épaisseur de la paroi en acier et le nombre de couche de FRP sont les propriétés les plus importantes dans la caractérisation de la résistance ultime et la déformation correspondante du ce système de confinement proposé.

### III.3 Modèles analytiques de béton confiné avec des matériaux composites «FRP»

La plupart des modèles de résistance du béton confiné avec des matériaux composites FRP [40,55,70,94,72,100,105,106,59,13,123] sont basées sur l'expression bien connue proposé par Richart et al.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_l$$

Où  $f'_{cc}$  and  $f'_{co}$  sont respectivement la résistance à la compression axiale du béton confiné et non confiné,  $f'_l$  est la pression de confinement latérale et  $k_1$  est le coefficient d'efficacité de confinement. Cette formule a été proposée en premier par Richart et al. [90] pour un béton confiné par pression hydrostatique (confinement actif) avec une valeur de  $k_1 = 4,1$ .

Richart et al. [90] ont montré par la suite que leur modèle est aussi valable pour un béton confiné avec des aciers en spirales continues (confinement passif). Fardis et Khalili [40] ont

suggéré que le model de Richart et al. [90] pourrait être utilisé directement pour le béton confiné avec des matériaux composites «FRP». En 1994 Saadatmanesh et al. [93] ont étendu le modèle de Mander et al. [66] au béton confiné avec des matériaux composites «FRP».

**Fardis et Khalili (1982)**

Comme on l’a déjà mentionné, Fardis et Khalili [40] ont développé une formule empirique pour estimer l’augmentation de la résistance à la compression axiale d’un béton soumis à une pression triaxiale constante (pression de confinement active):

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.1 \frac{f_l}{f'_{co}}$$

Fardis et Khalili ont validé les équations de leur modèle par des résultats expérimentaux obtenus en 1981 sur des éprouvettes cylindriques courtes (76x152 mm et 102x204 mm) confinées avec des polymères en fibres de verre avec un rapport de confinement ( $f_l / f'_{co}$ ) compris entre 0,1 et 0,6. Pour cette valeur de ( $f_l / f'_{co}$ ) les auteurs ont observé une concordance raisonnable entre l’expérimentation et les valeurs prédites par leur modèle (Fardis et Khalili 1981). Par contre aucune comparaison n’a été établie entre la valeur expérimentale de la déformation axiale maximale et les prédictions de l’équation (I.5.7), qui a été étalonnée empiriquement avec une valeur de  $\epsilon_{co}$  égale à 0,002.

**Saadatmanesh et al. (1994)**

Saadatmanesh et al. [93] ont étendu le modèle de confinement de Mander et al. [66], proposé pour le béton confiné avec de l’acier, au béton confiné avec des matériaux composites «FRP». Le modèle de Mander suggère une relation non linéaire entre la résistance du béton confiné et la pression de confinement.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[ -1.254 + 2.254 \times \sqrt{1 + \frac{7.94 \times f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}} \right]$$

La déformation axiale  $\epsilon'_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée par l’équation suivante :

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$$

Ce modèle n’a pas été comparé avec des résultats expérimentaux mais il a seulement été utilisé pour faire une étude paramétrique.

Pour les colonnes partiellement confinées avec un grand espacement entre les bandes de «FRP», Saadatmanesh et al. (1994) ont proposé d’utiliser l’équation précédente mais en remplaçant  $f_l$  par  $f'_l$  tel que :

$$f'_l = k_g \cdot f_l$$

Où  $f'_l$  est la pression de confinement latérale effective,  $k_g$  le coefficient d’espacement qui est égale à :

$$k_g = 1 + \frac{(1 - \frac{s_{prf}}{2d})^2}{1 - \rho_{sc}}$$

$s_{FRP}$  est l'espacement vertical entre les bandes de 'FRP',  $\rho_{sc}$  est le rapport de la section des armatures longitudinales à la section de la colonne.

### Karbhari et Gao

Karbhari et Gao [55], Comme plusieurs autres modèles celui de Karbhari et Gao a été inspiré du modèle de Richart et al. (1928) en modifiant la valeur du coefficient d'efficacité de confinement  $k_l$  comme suit :

$$k_1 = 2.1 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.13}$$

Par conséquent le modèle de Karbhari et Gao est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.1 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.87}$$

Dans ce modèle la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est calculée comme suit :

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + 0.01 \frac{f_l}{f'_{co}}$$

### Samaan et al. (1998)

Samaan et al. [97] ont modifié le modèle de Richart [90] pour qu'il soit adapté au béton confiné avec des matériaux composites «FRP» en proposant une nouvelle valeur au coefficient d'efficacité de confinement  $k_l$  :

$$k_1 = 6f_l^{-0.3}$$

Par conséquent le modèle de Samaan et al. (1998) s'écrit comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6 \frac{f_l^{0.7}}{f'_{co}}$$

Concernant la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP», Samaan et al. ont proposé l'équation suivante :

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f'_{cc} - 0.872f'_{co} - 0.371f_l - 6.258}{245.61 f'_{co} + 1.3456 \left( \frac{E_{prf} \varepsilon_{prf}}{d} \right)}$$

Ce modèle a été calibré avec des résultats expérimentaux sur des tubes en «FRP» remplis de béton, avec un niveau de confinement variait entre 0,31 et 0,84. La déformation circonférentielle enregistrée à la rupture était très proche de la déformation ultime de traction des tubes en «FRP» utilisés dans les essais et, par conséquent, ce modèle ne tient pas compte du phénomène de la rupture prématurée du «FRP».

### Kono et al. (1998)

Kono et al. [56] ont développé deux équations empiriques pour l'évaluation de la résistance à la compression des cylindres en béton confinés avec des matériaux composites «FRP» et la déformation correspondante. Dans ces équations, les rapports  $(f'_{cc}/f'_{co})$  et  $(\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co})$  sont

linéairement liés à la pression de confinement latérale ( $f_l$ ), au lieu du rapport de confinement ( $f'_{co}$ ), comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.0572f_l$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + 0.28f_l$$

Dans les travaux de Kono et al, le rapport de confinement des spécimens utilisés pour valider le modèle proposé est compris entre 0,37 et 1,19, ce qui est un peu élevé par rapport à ceux des modèles précédents. La résistance en compression du béton non confiné est comprise entre 32,3 MPa et 34,8 MPa. D'autre part les mesures des déformations circonférentielles ont montré que la rupture survenait pour des déformations de l'ordre de 38 à 59 % de la déformation ultime du composite «FRP». Il faut noter que les équations de ce modèle prennent en compte le phénomène de la rupture prématurée du «FRP».

#### **Mirmiran et Shahawy (1997), Mirmiran et al. (1998)**

En 1997 Mirmiran et Shahawy [70] ont suggéré la formule suivante pour estimer la résistance à la compression d'un tube en «FRP» rempli de béton dans lequel le tube agit simultanément comme coffrage et comme confinement pour le béton:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4,269 \frac{f_l^{0.587}}{f'_{co}}$$

Dans un autre travail et pour tenir compte de l'effet de l'élanement ( $L/d$ ) des spécimens testés, Mirmiran et al ont proposé en 1998 une nouvelle équation pour estimer la résistance à la compression maximale du béton confiné en fonction de la résistance à la compression d'un spécimen de référence avec un élanement  $L/d = 2$  notée  $f'_{cc\ 2:1}$ , l'équation qui permet cette transition est la suivante (71) :

$$f'_{cc} = f'_{cc\ 2:1} \left[ 0.0288 \left( \frac{L}{d} \right)^2 - 0.263 \left( \frac{L}{d} \right) + 1.418 \right]$$

#### **Miyauchi et al (1999)**

Miyauchi et al [72] ont proposé l'équation suivante pour estimer la résistance à la compression axiale maximale d'un béton confiné avec des matériaux composites «FRP» :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4,1k_e \left( 2 \frac{f_{frp} \cdot t_{frp}}{f'_{co} \cdot d} \right)$$

On remarque que cette équation ne diffère de celle de Fardis et Khalili [40] que par l'addition d'un « coefficient d'efficacité » empirique  $k_e$ . Ce coefficient a été calibré par les auteurs à partir de leurs propres résultats expérimentaux et a été pris égal à 0,85 ce qui donne  $k_e = 3,485$ .

En 1999 cette valeur de  $k_e$  a été révisée et le coefficient  $k_l$  devient 2,98. On note que les essais ont été conduits sur des spécimens confinés avec des «FRP» de carbone avec un rapport de confinement ( $f_l/f'_{co}$ ) compris entre 0,1 et 0,5 et une résistance en compression du béton non

confiné  $f'$  variait entre 20 et 100 MPa. Finalement l'expression de Miyauchi pour le calcul de  $f'_{co}$  s'écrit comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.98 \frac{f_l}{f'_{co}}$$

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé les équations suivantes pour le calcul de la déformation axiale  $\varepsilon'_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» :

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + 10.6 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.373} \quad \text{pour } f'_{co} = 30 \text{ MPa}$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + 10.5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.525} \quad \text{pour } f'_{co} = 50 \text{ MPa}$$

### Toutanji (1999)

Pour établir son modèle Toutanji [105] a adapté celui de Richart et al. [90] pour le béton confiné avec des matériaux composites «FRP» en modifiant la valeur du coefficient d'efficacité de confinement  $k_1$ , il proposa ainsi pour ce dernier la valeur suivante :

$$k_1 = 3.5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.15}$$

Par conséquent le modèle de Toutanji exprime la résistance à la compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.85}$$

Tandis que la déformation axiale  $\varepsilon'_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + (310.57 \varepsilon_{r,rep} + 1.9) \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$$

$E_{h,rep}$  représente la déformation circonférentielle du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» au moment de la rupture.

La résistance à la compression axiale maximale de ce modèle a été révisée en 2005 par Matthys et al. [66] en ajustant le coefficient d'efficacité de confinement  $k_1$  par :

$$k_1 = 2.3 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.15}$$

Donc la résistance ultime prend la relation suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.3 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.85}$$

### Saafi et al. (1999)

Le modèle de Saafi et al. [100] est identique à celui de Toutanji [105], avec la seule différence que les travaux de Saafi et al ont été réalisés sur des tubes en «FRP» remplis de béton

contrairement à Toutanji qui a étudié des éprouvettes cylindriques en béton confinées avec des matériaux composites «FRP» stratifié manuellement (stratification directe). Des coefficients différents ont été observés entre les deux modèles et cette différence a été attribuée à l'adhérence entre le tissu en «FRP» et le béton. Cette dernière est supposée plus forte en comparant à celle développée par les tubes en «FRP».

La valeur du coefficient d'efficacité de confinement  $k_1$  donnée par Saafi et al est la suivante :

$$k_1 = 2.2 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.16}$$

Par conséquent, l'expression de la résistance à la compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.84}$$

L'expression de la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée comme suit :

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + (537\varepsilon_{fu} + 2.6) \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$$

### **Spoelstra et Monti (1999)**

**Spoelstra et Monti** [98] ont proposé un nouveau modèle de type contrainte-déformation pour les bétons confinés avec des «FRP». Les valeurs de la contrainte axiale maximale et de la déformation axiale correspondante sont données par les formules suivantes:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.5}$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 2 + 1.25 \frac{E_{co}\varepsilon_{fu}}{f'_{co}} \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.5}$$

Avec  $E_{co}$ : Module d'élasticité du béton non confiné

$\varepsilon_{fu}$ : Déformation ultime du composite «FRP»

### **Xiao et Wu (2000, 2003)**

Le modèle contrainte-déformation de Xiao et Wu [117] comprend une formule pour les conditions ultime de rupture du «FRP» qui peut être utilisée pour prédire la résistance à la compression axiale maximale lorsque l'effet de confinement est substantiel. Cependant l'équation proposée par Xiao et Wu est la suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}}$$

Les valeurs de  $\alpha$  pour tous les spécimens testés par les auteurs varient autour d'une valeur moyenne de 1,10. D'autre part, en se basant sur une analyse de régression, l'équation suivante a été obtenue par les auteurs pour le coefficient d'efficacité de confinement  $k_1$  :

$$k_1 = 4.1 - 0,75 \frac{f'_{co}}{C_j}$$

Comme le comportement de l'enveloppe composite est essentiellement linéaire-élastique, un module de confinement constant basé sur l'épaisseur de l'enveloppe,  $t_{FRP}$ , le diamètre de la

colonne,  $d$ , et le module d'élasticité de l'enveloppe,  $E_{FRP}$ , est défini de la manière suivante :

$$C_j = 2 \frac{t_{prf}}{d} \cdot E_{prf}$$

Cette équation a été validée empiriquement avec les résultats expérimentaux obtenus par les auteurs sur des spécimens confinés avec des 'FRP' et dont le rapport de confinement variait entre 0,14 et 0,70. Les mesures des déformations circonférentielles ont montré que la rupture du «FRP» survenait pour des déformations entre 50 et 80 % de la déformation ultime obtenue par essai de traction sur des coupons du «FRP» utilisé. Cependant ce modèle de Xiao et Wu a été validé par les valeurs des déformations latérales mesurées expérimentalement et par conséquent, il ne tient pas compte de la rupture prématurée du «FRP» par traction. Selon Teng et al [107], l'estimation de la résistance donnée par l'équation de Xiao et Wu ne représente pas convenablement les résultats expérimentaux pour de faibles niveaux de confinements.

En 2003, Xiao et Wu [116] ont révisé le coefficient  $k_1$  suite à une série complémentaire de spécimens, ce qui a donné la valeur suivante :

$$k_1 = 4.1 + 0.45 \left( \frac{f'_{co}}{C_j} \right)^{1.4}$$

Par conséquent, le nouveau modèle a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 80% par rapport à l'expérimentation.

L'expression de la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée comme suit :

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\varepsilon_{fu} - 0.0005}{7 \left( \frac{f'_{co}}{C_j} \right)^{0.8}}$$

#### **Matthys et al. (2005)**

A partir des résultats expérimentaux réalisés sur des colonnes en béton armé, Matthys et al [66] ont estimé que la résistance à la compression axiale maximale d'un béton confiné avec des matériaux composites «FRP» peut être prédit par l'équation suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.3 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.85}$$

#### **Berthet et al. (2005)**

Dans une étude expérimentale réalisée en 2005, Berthet et al, [13] ont montré que pour les bétons à hautes résistances ( $f'_{co} > 50$  MPa) confinés avec des «FRP», la valeur du coefficient d'efficacité du confinement  $k_1$  baisse quand la résistance à la compression maximale du béton  $f'_{co}$  augmente. Cependant, pour des bétons de résistance similaire, la valeur de  $k_1$  est constante quel que soit le rapport de confinement et le gain de résistance est fonction non seulement du rapport de confinement mais aussi de la résistance à la compression maximale du béton  $f'_l$ . Néanmoins, pour les bétons ordinaires avec une résistance à la compression maximale comprise entre 20 et 50 MPa, le gain de résistance dépend seulement de la pression de confinement générée par le «FRP».

En tenant compte de l'influence de la résistance à la compression du béton  $f'_{co}$  sur le comportement ultime du béton confiné avec des matériaux composites «FRP», Berthet et al. (2006) ont proposé le modèle suivant :

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \cdot f_{l,r}$$

Où  $f_{l,r}$  est la pression de confinement latérale réelle. Dans ce modèle le coefficient d'efficacité de confinement  $k_1$  est donné par les relations suivantes en fonction de la résistance à la compression du béton :

$$k_1 = 3.45 \quad ; \text{ pour } 20 \leq f'_{co} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 9.5 / (f'_{co})^{1/4} \quad ; \text{ pour } 50 \leq f'_{co} \leq 200 \text{ MPa}$$

Par conséquent, le modèle de Berthet et al, s'écrit comme suit :

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.45 f_{l,r} \quad \text{pour } 20 \leq f'_{co} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + 9.5 / (f'_{co})^{1/4} f_{l,r} \quad \text{pour } 50 \leq f'_{co} \leq 200 \text{ MPa}$$

$$\text{Avec : } f_{l,r} = \frac{2 t_{frp} \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{r,rep}}{d}$$

L'expression de la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» est donnée comme suit :

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_{co} + 1 + \sqrt{2} \left( \frac{E_1}{f'^2_{co}} \right)^{2/3} (\varepsilon_{fu} - \gamma_c \varepsilon_{co})$$

$$\text{Avec : } E_1 = (t_{prf} \cdot E_{prf}) / r$$

$\gamma_c$ : coefficient de Poisson du béton ;

$\varepsilon_{fu}$ : déformation ultime du composite «FRP» ;

$\varepsilon_{co}$ : déformation du béton correspondante à  $f'_{co}$  ;

$E_{FRP}$ : module d'élasticité en traction du composite «FRP» ;

$\varepsilon_{r,rep}$ : déformation radiale du béton confiné avec des «FRP» au moment de la rupture.

### Youssef et al. (2007)

Youssef et al. [119] ont réalisé 87 essais en compression axiale sur des spécimens en béton ( $f'$  variait entre 28 et 34 MPa) confiné avec deux matériaux composites différents 'CFRP' et «GFRP». Le programme expérimental contenait des spécimens de section rectangulaire et de section carrée (254x 381 mm de section x 762 mm de hauteur et 381 x 381 mm de section x 762 mm de hauteur) et des spécimens de section circulaire (Ø406 x 813 mm et Ø152 x 305 mm). Les auteurs ont proposé les équations suivantes pour l'estimation de la contrainte ultime et de la déformation correspondante pour des spécimens de section circulaire :

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 1 + 2.25 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{4/5}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.003368 + 0.259 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \left( \frac{f_{frp}}{E_{frp}} \right)^{0.5}$$

### Teng et al. 2009

Teng et al. 2009 [126] ont proposé un nouveau model de résistance pour les colonnes de section circulaire confinées avec des enveloppes de FRP. Le model inclus tous les paramètres physiques des matériaux attribués dans le mécanisme de confinement. La déformation réelle à

la rupture et le module de rigidité du matériau composite sont des paramètres clés pour déterminer la résistance axiale ultime et la déformation correspondante.

La résistance axiale ultime  $f'_{cc}$  peut prendre la relation suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left( \frac{E_l}{f'_{co}/f_{co}} - 0.01 \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rep}}{\varepsilon_{co}} \right)$$

Les auteurs ont proposé l'équation suivante pour le calcul de la déformation axiale  $\varepsilon'_{cc}$  correspondante à la résistance axiale ultime du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» :

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1.75 + 6.5 \left( \frac{E_l}{f'_{co}/f_{co}} \right)^{0.8} \left( \frac{\varepsilon_{h,rep}}{\varepsilon_{co}} \right)^{1.45}$$

### **Pellegrino et Modena (2010) :**

Pellegrino et Modena [84] ont proposé un modèle analytique pouvant être utilisé autant pour des poteaux circulaires que ceux qui sont rectangulaires. La pression de confinement pour une section circulaire diffère de celle d'une section rectangulaire. Les auteurs utilisent un coefficient d'efficacité basé sur des données expérimentales. Ce coefficient permet d'ailleurs de tenir compte de l'effort supplémentaire amené par le flambage des barres.

Lorsque le détail des étriers est déficient, seule la rigidité du confinement apportée par le FRP peut empêcher les barres de flamber. Dans ce cas, une rupture prématurée des fibres survient. Conséquemment, plus les étriers sont espacés, plus les efforts causés par le flambage sur le FRP sont grands. Le coefficient d'efficacité du FRP ( $k_c$ ) (équation 2.1) dépend donc du détail d'acier. Ce paramètre résulte de  $C$  selon l'équation 2.2 représentant le rapport de rigidité de l'armature longitudinal sur celle du FRP et de  $\gamma$  qui correspond à des valeurs respectives de 0,7 et 1,5 pour un renforcement de carbone et de verre. Le paramètre  $C$  est fonction du module de Young ( $E_{y,long}$ ) et du ratio ( $\rho_{y,long}$ ) des barres longitudinales ainsi que du module de Young ( $E_f$ ) et du ratio ( $\rho_f$ ) du FRP.

$$k_c = \gamma C^{-0.7}$$

$$C = \frac{E_{y,long} \rho_{y,long}}{E_f \rho_f}$$

Le modèle proposé est bilinéaire pour les poteaux circulaires. La valeur de la contrainte ( $\sigma$ ) est de la forme suivante :

$$\sigma = \frac{(E_o - E_1)\epsilon}{\left(1 + \left(\frac{(E_o - E_1)\epsilon}{f_{ul}}\right)^n\right)^{1/n}} + E_1\epsilon$$

### **Ozbakkaloglu et Jian (2013)**

Ozbakkaloglu et Jian [84] ont utilisé un grand nombre d'études expérimentales qui ont été menées au cours des deux dernières décennies (publiés dans la littérature) pour comprendre le comportement des colonnes en béton confinées par matériaux composite FRP. Les auteurs ont présenté une base de données construite à partir des résultats des tests de compression axiale sur 832 colonnes circulaires en béton confinées par FRP. La base de données a été assemblée

par le biais d'un examen approfondi de littératures qui a environ 3042 résultats de test de 253 études expérimentales publiées entre 1991 et le milieu de 2013. Les auteurs ont conduit à un certain nombre d'observations importantes sur l'influence des paramètres importantes sur le comportement des colonnes circulaires confinées par matériaux composites. Un nouveau modèle a été développé afin déterminer les conditions ultimes de colonnes confinée par FRP. L'expression proposée pour évaluer la résistance ultime à la compression intègre plusieurs paramètres importants, cette résistance peut prendre la relation suivante :

$$f'_{cc} = C_1 f'_{co} + k_1 (f_{lu,a} - f_{lo})$$

$$C_1 = \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.0058 \frac{k_1}{f'_{co}}$$

$$f_{lo} = k_1 \varepsilon_{l1}$$

$$\varepsilon_{l1} = \left( 0.43 + 0.009 \frac{k_1}{f'_{co}} \right) \varepsilon_{co}$$

$$k_1 = \frac{2 E_f t_f}{D} \text{ et } K_1 \leq f'_{co}{}^{1.65}$$

La déformation correspondante à la résistance ultime proposée par Ozbakkaloglu et Jian est sous la forme suivante :

$$\varepsilon_{cu} = C_2 \varepsilon_{co} + k_2 \left( \frac{k_2}{f'_{co}} \right)^{0.9} \varepsilon_{H,rep}^{1.35}$$

$$C_2 = 2 - \frac{f'_{co} - 20}{100} \text{ et } C_2 \geq 1$$

$$\varepsilon_{co} = (-0.067 f_{co}^2 + 29.9 f'_{co} + 1053) \cdot 10^{-6}$$

Il est démontré que les prédictions du modèle proposé sont en accord avec les résultats des autres modèles.

### Choi et al. (2014)

Choi et al. [20] ont utilisé la formule de Ricart et al. [90] pour déterminer la résistance ultime d'un béton confiné avec des anneaux en FRP où :

$$f_l = \frac{2 A f_{yH}}{s D}$$

Dans cette relation :

$f_{yH}$  et  $A$  sont respectivement, la contrainte ultime de confinement et la surface des anneaux de PFR ;

$D$  est le diamètre d'anneau de FRP.

Les auteurs ont utilisé l'hypothèse qui a été prouvé par Mander et al. L'hypothèse indique que la pression latérale de confinement peut considérer comme suit :

$$f'_l = k_e f_l \text{ avec } k_e = \frac{1-s'/2D}{1-\rho_{cc}}$$

où :  $f'_l$  est la pression latérale de confinement effective

$s'$  : l'espacement entre les anneaux de FRP

$\rho_{cc}$  : le ratio d'acier longitudinal

### **III.4 Conclusion**

Les différentes recherches menées sur l'utilisation des FRP pour le confinement de colonnes ont montré une meilleure performance mécanique en termes de résistance et de déformation. De plus, les schémas de mise en place des renforcements sont aisément adaptables aux besoins spécifiques de l'élément défectueux.

Actuellement, les données expérimentales disponibles concernant le renforcement de colonnes par confinement sont peu nombreuses pour fournir une base de données assez large ou même raisonnablement extrapolable à l'ensemble des situations courantes.

Or vis-à-vis de la calibration de méthodes de dimensionnement, il est nécessaire de pouvoir distinguer et quantifier spécifiquement l'action de chaque mode de confinement considéré indépendamment. Il est possible d'en conclure que le renforcement d'un élément vis-à-vis de différentes sollicitations, nécessite de confiner la colonne de manière à ce qu'il résiste mieux aux charges gravitaires et qu'il présente un comportement plus ductile.

# Partie II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre IV: Programme Expérimental

Chapitre V: Résultats expérimentaux et observations

Chapitre VI : Analyse et Interprétation des Résultats

## Chapitre IV : Programme Expérimental

### IV.1 Introduction

Dans cette partie du travail, nous nous sommes intéressés à l'effet du confinement sur le comportement des colonnes en béton. La campagne expérimentale comprenant des essais sur des spécimens cylindriques et des spécimens prismatiques carrés a été menée en vue de déterminer la performance en termes de résistance et de ductilité du béton confiné par collage externe de composites en polymère renforcé de fibres FRP.

Ce travail expérimental s'intéresse à six paramètres qui sont :

- Le degré de confinement, exprimé par le nombre de couches de FRP appliqué aux spécimens ;
- La résistance à la compression du béton non confiné  $f'_{co}$ ,
- Le type de matériaux composites (CFRP et GFRP);
- La section transversale des spécimens confinés ;
- La variation du rayon de coin des spécimens prismatiques carrés et
- le rapport volumétrique ( $\rho$ ).

### IV.2 Programme Expérimental

Pour cause de limitation de la dimension en hauteur de la machine d'essais, la hauteur maximale de 600 mm pour les poteaux est imposée. Le programme expérimental mené dans cette étude comporte par conséquent six séries de spécimens, à savoir:

- La première série comporte vingt sept (27) éprouvettes cylindriques de dimensions  $\text{Ø}160 \times 320 \text{ mm}$  confinées avec des enveloppes de matériaux composites en polymère renforcés de fibres de carbone CFRP ;
- La deuxième série comporte vingt sept (27) éprouvettes cylindriques de dimensions  $\text{Ø}160 \times 320 \text{ mm}$  confinées avec des enveloppes de matériaux composites en polymère renforcés de fibres de carbone GFRP ;
- La troisième série est constituée par vingt sept (27) éprouvettes prismatiques carrées de dimensions  $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}$  confinées avec des enveloppes de matériaux composites en polymère renforcés de fibres de carbone CFRP ;
- La quatrième série comporte vingt sept (27) éprouvettes cylindriques de dimensions  $\text{Ø}80 \times 320 \text{ mm}$  confinés avec des enveloppes en CFRP ;
- La cinquième série comporte vingt sept (27) éprouvettes cylindriques de dimensions  $\text{Ø}80 \times 500 \text{ mm}$  confinés avec des enveloppes en CFRP ;
- Dans la sixième série, douze (12) échantillons prismatiques carrés en béton de dimensions  $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}$  sont arrondis avec différents rayons de coins 0, 15, 30, 45, 60 et 75 mm et confinés avec deux couches de CFRP.

Ces échantillons étaient soit confinés à l'aide d'une couche, deux couches ou trois couches de polymère renforcé de fibres de verre GFRP ou bien de carbone CFRP.

Un système d'identification des échantillons a été adopté par SecD/H-B-NMAT-R. La signification des différentes lettres est comme suit :

- Sec : design le type géométrique de la colonne (C circulaire ; S carrée),
- D : le diamètre pour les cylindres ou bien l'arête pour les prismatiques carrées,

- H : la hauteur du spécimen ;
- B : la résistance caractéristique du béton non confiné (B25, B40 et B60 sont respectivement 25 MPa, 40 MPa et 60 MPa) ;
- N : nombre de couches (0, 1, 2 ou 3 couches) ;
- MAT : le type du matériau composite (C pour le CFRP et G pour le CFRP) ;
- R : est le rang de spécimen testé (on a pris pour chaque série trois spécimens identiques par type de renforcement).

Par exemple, l'échantillon *S150/300-B25-3C-2* est un spécimen prismatique de section carrée (150X150X300) en béton de 25 MPa de résistance et confinée avec trois couches de 'CFRP', c'est le 2<sup>ème</sup> échantillon. La description des échantillons est donnée dans les Tableaux IV.1 à IV.6

### IV.3 Identification des matériaux utilisés

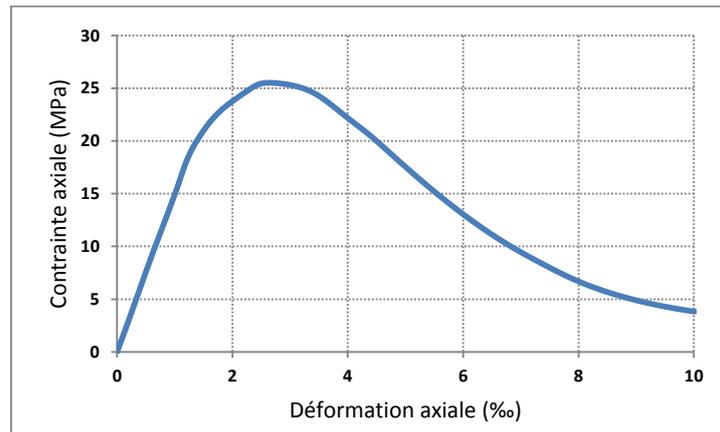
#### IV.3.1 Béton

Pour répondre aux objectifs fixés initialement par cette recherche, trois classes différentes de béton ont été formulées : normale (B25), moyenne (B40) et haute résistance (B60), soient 25, 40 et 60 MPa de résistance, respectivement. Les compositions de bétons utilisées sont détaillées dans le Tableau IV.7. Les échantillons de béton ont été confectionnés au sein de laboratoire du département de génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Après 28 jours de cure du béton, des essais de compression ont été réalisés sur trois éprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm et hauteur 32 cm) afin d'évaluer le module d'élasticité et la résistance en compression du béton.

**Tableau IV.7** Composition du béton pour les trois séries utilisées

Série de béton	B25	B40	B60
<b>Composition (Kg/m3)</b>			
Sable 0/5	781	740	735
Gravier 3/8	341	330	330
Gravier 8/15	531	609	581
Gravier 15/25	368	365	412
Ciment CPJ CEM II/A 32.5	350	-	-
Ciment CPA CEM I (52.5 N)	-	400	450
Eau	210	180	165
Adjuvant BASF MICRO-AIR 1200.3 % (Sika viscocrete-Tempo 12- Sika)	1.125	-	-
E/C	0.56	0.45	0.37
Slump-test (cm)	12	11	9.5

Afin déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson  $\nu$ ) et le comportement du béton, des éprouvettes normalisés Ø160x320mm sont testés sous compression simples selon le mode opératoire défini dans la norme ASTM C39/C39M-03. Les essais ont été réalisés sur une presse de compression de capacité 5000kN, à une vitesse de chargement de 0,24 MPa/s. La figure IV.1 présente le comportement typique en compression simple du béton de type B25.



**Figure IV.1** Courbe de contrainte-déformation du béton non confiné (B25)

### IV.3.2 Composites

Les colonnes sont confinées par deux types de renforts GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) et CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Le GFRP est un tissu unidirectionnel en fibre de verre d'une densité surfacique de  $500 \text{ g/m}^2$  du fabricant GRANITEX, alors que le CFRP est un tissu unidirectionnel en fibre de carbone SIKA WRAP HEX 230 C du fabricant SIKA. La résine d'imprégnation utilisée est la MEDAPOXY STR. C'est une résine époxy sans solvant à deux composants, A (résine) et B (durcisseur). Les proportions en poids du mélange fournies par le fabricant sont 3 et 2 respectivement pour la résine et le durcisseur.

Les propriétés de la résine MEDAPOXY STR sont données dans le tableau IV.8 (les données sont fournies par le fabricant).

**Tableau IV.8** propriétés de la résine MEDAPOXY STR

Caractéristiques	
Densité	$0 \pm 0,05$
viscosité	11000 mPaS à 25°C
Temps de durcissement	6h
Resistance à la compression	25 MPa

Bien que des données du fabricant soient disponibles, nous avons repris des mesures afin de confirmer ces valeurs. Un essai de traction pure était réalisé sur cinq échantillons de chaque type de composites fabriqués.

#### *Prélèvement des éprouvettes*

Les principes généraux sont ceux décrits dans les normes ISO 527-1, ISO 527-2, ISO 527-5.

- Les bords de la plaque seront éliminés suivant une bande de 5 cm sur tout le contour.
- Les éprouvettes seront testées dans des conditions normales d'humidité et de température (20°C, 50 % HR).

**Dimensions des éprouvettes :** Les éprouvettes sont de géométrie parallélépipédique

- La longueur totale des éprouvettes est fixée à 250 mm (L3),
- La largeur des éprouvettes est fixée à 25 mm (b1),
- L'épaisseur correspond à l'épaisseur des plaques,
- La distance entre talons est de 150 mm,
- Les talons ont une longueur de 50 mm (LT),

- L'épaisseur des talons est de 2 mm (ht).

Les talons sont en aluminium suivant les recommandations de la norme EN ISO 527-5.

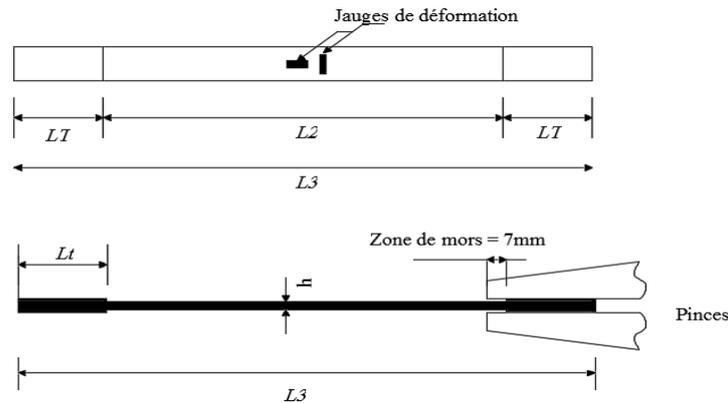


Figure IV.2 Eprouvette suivant les normes citées en référence

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à la rupture en vue de déterminer ses caractéristiques mécaniques. La machine est constituée d'un système de traction, d'un système de mesure précise des allongements et d'un système de mesure précise des efforts engendrés. Un extensomètre est installé sur l'échantillon afin de mesurer sa déformation et de contrôler le déplacement de la presse. Toutes les éprouvettes ont des comportements linéaires élastiques jusqu'à la rupture.

Les résultats obtenus de cinq éprouvettes de CFRP sous traction simple sont regroupés dans les tableaux IV.9 et IV.10.

Tableau IV.9 Caractéristiques mécaniques du composite «CFRP»

N° d'éprouvette	Résistance à la traction $f_{fip}$ (MPa)	Déformation longitudinale à la rupture du CFRP $\varepsilon_{fip,u}$ (‰)	Modules d'élasticité en traction $E_{fip}$ (GPa)	Coefficient de Poisson $\nu_{fip}$
01	481,26	14,5	33.102	0,2931
02	468,59	13,5	34.650	0,2911
03	469,14	13,7	34.154	0,2865
04	472,33	13,8	34.114	0,2901
05	502,33	14,8	33.825	0,2887

Tableau IV.10 Caractéristiques mécaniques du composite «GFRP»

N° d'éprouvette	Résistance à la traction $f_{fip}$ (MPa)	Déformation longitudinale à la rupture du GFRP $\varepsilon_{fip,u}$ (‰)	Modules d'élasticité en traction $E_{fip}$ (GPa)	Coefficient de Poisson $\nu_{fip}$
01	520,22	19,56	26,41	0,2814
02	511,28	19,11	26,18	0,2913
03	489,23	18,86	25,78	0,2888
04	490,11	18,62	25,83	0,2921
05	508,77	19,01	26,04	0,2889

#### IV.4 Confinement par FRP

Le fonctionnement d'un renfort dépend de la transmission correcte des efforts entre le béton existant et l'élément additionné. Il doit exister une adhérence parfaite dans l'interface béton-composites. La préparation des surfaces consiste à éliminer la laitance superficielle du béton, à nettoyer les particules de poussière (graisses ou saletés), à éliminer les cloques, à créer le degré d'humidité adapté pour accueillir les éléments qui seront ajoutés. Afin d'obtenir une surface de béton légèrement rugueuse et propre, les surfaces des échantillons destinées au

collage du composite sont par la suite séchées, brossées avec un papier sablé N°50 et par la suite nettoyées.

La longueur d'un pli de confinement correspond au périmètre (pour une couche) ou à  $n$  fois le périmètre de l'éprouvette considérée (pour  $n$  couches). De plus, la couche extérieure est prolongée de  $1/4$  du périmètre (recouvrement dans la direction longitudinale des fibres) afin d'assurer un chevauchement, ce qui permet de développer une pleine résistance des fibres, sans glissement ni décollement de la couche composite.

#### IV.5 Essais et chargement

Le chargement axial des spécimens a été effectué à l'aide d'une presse mécanique de type Controls de capacité 5000 KN reliée à un système d'acquisition automatique de données (Figure IV.3).



**Figure IV.3** Essai et Chargement de différents types de spécimens testés

Le socle à la base de la presse était fixe, alors que celui de la tête était muni d'une rotule ce qui réduisait au minimum le transfert de moment fléchissant aux colonnes. Toutes les colonnes sont soumises à un chargement uni-axial en compression jusqu'à la rupture. La vitesse de chargement était constante et elle a été ajustée afin que la presse exerce une

pression moyenne de 0,24 MPa/seconde pendant tout le chargement, conformément à la norme ASTM C39/C39M-03.

La planéité des colonnes a été assurée par mise des plaques néoprènes posées juste avant d'entamer les essais de compression. L'ensemble des spécimens prismatiques carrés ont été coulés à l'horizontale, ce qui fait que la planéité des surfaces est assurée par le coffrage lui-même. La perpendicularité des spécimens est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaires au fond du moule.

#### **IV.6 Conclusion**

Le travail présenté dans ce chapitre avait pour objectif de clarifier le programme expérimentale établi dans cette étude, ainsi que d'étudier les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la compagne expérimentale à savoir : les bétons et les matériaux composites FRP à base de fibres de verre et de fibres de carbone. Les résultats obtenus, sur chaque constituant, ont permis de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés. La caractérisation mécanique en traction par des essais de traction montre toutes les éprouvettes ont des comportements linéaires élastiques jusqu'à la rupture. Ces caractéristiques mécaniques susceptibles de jouer un rôle important sur le comportement de colonnes confinées par matériaux composites comme nous le verrons dans les prochains.

Tableau IV.1 Description des échantillons de la série C160/320-B-C

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	confinement	Degré de confinement
C160/320-B25-1C-1	Cylindres C160 x 320	24	CFRP	1
C160/320-B25-1C-2				1
C160/320-B25-1C-3				1
C160/320-B25-2C-1				2
C160/320-B25-2C-2				2
C160/320-B25-2C-3				2
C160/320-B25-3C-1				3
C160/320-B25-3C-2				3
C160/320-B25-3C-3				3
C160/320-B40-1C-1				Cylindres C160 x 320
C160/320-B40-1C-2	1			
C160/320-B40-1C-3	1			
C160/320-B40-2C-1	2			
C160/320-B40-2C-2	2			
C160/320-B40-2C-3	2			
C160/320-B40-3C-1	3			
C160/320-B40-3C-2	3			
C160/320-B40-3C-3	3			
C160/320-B60-1C-1	Cylindres C160 x 320	61.5	CFRP	
C160/320-B60-1C-2				1
C160/320-B60-1C-3				1
C160/320-B60-2C-1				2
C160/320-B60-2C-2				2
C160/320-B60-2C-3				2
C160/320-B60-3C-1				3
C160/320-B60-3C-2				3
C160/320-B60-3C-3				3

Tableau IV.2 Description des échantillons de la série C160/320-B-G

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	confinement	Degré de confinement
C160/320-B25-1G-1	Cylindres C160 x 320	26.2	GFRP	1
C160/320-B25-1G-2				1
C160/320-B25-1G-3				1
C160/320-B25-2G-1				2
C160/320-B25-2G-2				2
C160/320-B25-2G-3				2
C160/320-B25-3G-1				3
C160/320-B25-3G-2				3
C160/320-B25-3G-3				3
C160/320-B40-1G-1				Cylindres C160 x 320
C160/320-B40-1G-2	1			
C160/320-B40-1G-3	1			
C160/320-B40-2G-1	2			
C160/320-B40-2G-2	2			
C160/320-B40-2G-3	2			
C160/320-B40-3G-1	3			
C160/320-B40-3G-2	3			
C160/320-B40-3G-3	3			
C160/320-B60-1G-1	Cylindres C160 x 320	61.7	GFRP	
C160/320-B60-1G-2				1
C160/320-B60-1G-3				1
C160/320-B60-2G-1				2
C160/320-B60-2G-2				2
C160/320-B60-2G-3				2
C160/320-B60-3G-1				3
C160/320-B60-3G-2				3
C160/320-B60-3G-3				3

**Tableau IV.3** Description des échantillons de la série S150/300-B-C

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	confinement	Degré de confinement
S150/300-B25-1C-1	Prismatiques carrés S150 x 150x 300	25.5	CFRP	1
S150/300-B25-1C-2				1
S150/300-B25-1C-3				1
S150/300-B25-2C-1				2
S150/300-B25-2C-2				2
S150/300-B25-2C-3				2
S150/300-B25-3C-1				3
S150/300-B25-3C-2				3
S150/300-B25-3C-3				3
S150/300-B40-1C-1	Prismatiques carrés S150 x 150x 300	39.5	CFRP	1
S150/300-B40-1C-2				1
S150/300-B40-1C-3				1
S150/300-B40-2C-1				2
S150/300-B40-2C-2				2
S150/300-B40-2C-3				2
S150/300-B40-3C-1				3
S150/300-B40-3C-2				3
S150/300-B40-3C-3				3
S150/300-B60-1C-1	Prismatiques carrés S150 x 150x 300	55.75	CFRP	1
S150/300-B60-1C-2				1
S150/300-B60-1C-3				1
S150/300-B60-2C-1				2
S150/300-B60-2C-2				2
S150/300-B60-2C-3				2
S150/300-B60-3C-1				3
S150/300-B60-3C-2				3
S150/300-B60-3C-3				3

**Tableau IV.4** Description des échantillons de la série C80/320-B-C

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	confinement	Degré de confinement
C80/320-B25-1C-1	Cylindres C80x 320	21.45	CFRP	1
C80/320-B25-1C-2				1
C80/320-B25-1C-3				1
C80/320-B25-2C-1				2
C80/320-B25-2C-2				2
C80/320-B25-2C-3				2
C80/320-B25-3C-1				3
C80/320-B25-3C-2				3
C80/320-B25-3C-3				3
C80/320-B40-1C-1	Cylindres C80 x 320	38	CFRP	1
C80/320-B40-1C-2				1
C80/320-B40-1C-3				1
C80/320-B40-2C-1				2
C80/320-B40-2C-2				2
C80/320-B40-2C-3				2
C80/320-B40-3C-1				3
C80/320-B40-3C-2				3
C80/320-B40-3C-3				3
C80/320-B60-1C-1	Cylindres C80 x 320	60	CFRP	1
C80/320-B60-1C-2				1
C80/320-B60-1C-3				1
C80/320-B60-2C-1				2
C80/320-B60-2C-2				2
C80/320-B60-2C-3				2
C80/320-B60-3C-1				3
C80/320-B60-3C-2				3
C80/320-B60-3C-3				3

**Tableau IV.5** Description des échantillons de la série C80/500-B-C

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	confinement	Degré de confinement
C80/500-B25-1C-1	Cylindres C80x 500	22	CFRP	1
C80/500-B25-1C-2				1
C80/500-B25-1C-3				1
C80/500-B25-2C-1				2
C80/500-B25-2C-2				2
C80/500-B25-2C-3				2
C80/500-B25-3C-1				3
C80/500-B25-3C-2				3
C80/500-B25-3C-3				3
C80/500-B40-1C-1				
C80/500-B40-1C-2	1			
C80/500-B40-1C-3	1			
C80/500-B60-1C-1	Cylindres C80 x 500	59.5	CFRP	1
C80/500-B60-1C-2				1
C80/500-B60-1C-3				1
C80/500-B60-2C-1				2
C80/500-B60-2C-2				2
C80/500-B60-2C-3				2
C80/500-B60-3C-1				3
C80/500-B60-3C-2				3
C80/500-B60-3C-3				3

**Tableau IV.6** Description des échantillons de la série S150/300-B-C-arrondis

Identification de l'échantillon	Dimension de spécimen (mm)	Résistance de béton (MPa)	Confinement	Degré de confinement	Rayon de coins
S150/300-B25-1C-R0-1	Prismatiques carrés S150 x 150x300	25	CFRP	2	0
S150/300-B25-1C-R0-2					0
S150/300-B25-1C-R15-1					15
S150/300-B25-1C-R15-2					15
S150/300-B25-1C-R30-1					30
S150/300-B25-1C-R30-2					30
S150/300-B25-1C-R45-1					45
S150/300-B25-1C-R45-2					45
S150/300-B25-1C-R60-1					60
S150/300-B25-1C-R60-2					60
S150/300-B25-1C-R75-1					75
S150/300-B25-1C-R75-2					75

## Chapitre V : Résultats expérimentaux et observations

### V.1 Introduction

Cette partie présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. Elle est organisée en deux sections. La première partie présente les résultats des différents spécimens confinés, et la deuxième présente les modes de rupture observés. Ces résultats sont présentés en fonction de deux paramètres : section des spécimens et résistance en compression du béton dans les tableaux V.1 à V.15 et dans les graphes V.1 à V.15.

Les courbes des contraintes sont tracées en fonction des déformations axiales et latérale dans le même repère. Dans ces figures, le comportement du béton confiné par GFRP et CFRP est comparé au comportement du béton non confiné. Toutes les quantités de contrainte et de déformation sont normalisées par rapport à la résistance du béton non confiné  $f'_{co}$  et la déformation axiale  $\varepsilon'_{co}$ .

Les tableaux présentés donnent les principaux résultats des colonnes testées. Les essais sont divisés en 15 séries où plusieurs variantes ont été étudiées à savoir : type de matériaux composites, résistance du béton non confiné, type de section des spécimens, et degré de confinement.

Pour chaque série d'essais, la résistance à la compression  $f'_{cc}$  et la déformation correspondante du béton confiné  $\varepsilon'_{cc}$  sont mesurées sur la même population du béton confiné et au moment des tests sur les colonnes non confinées.

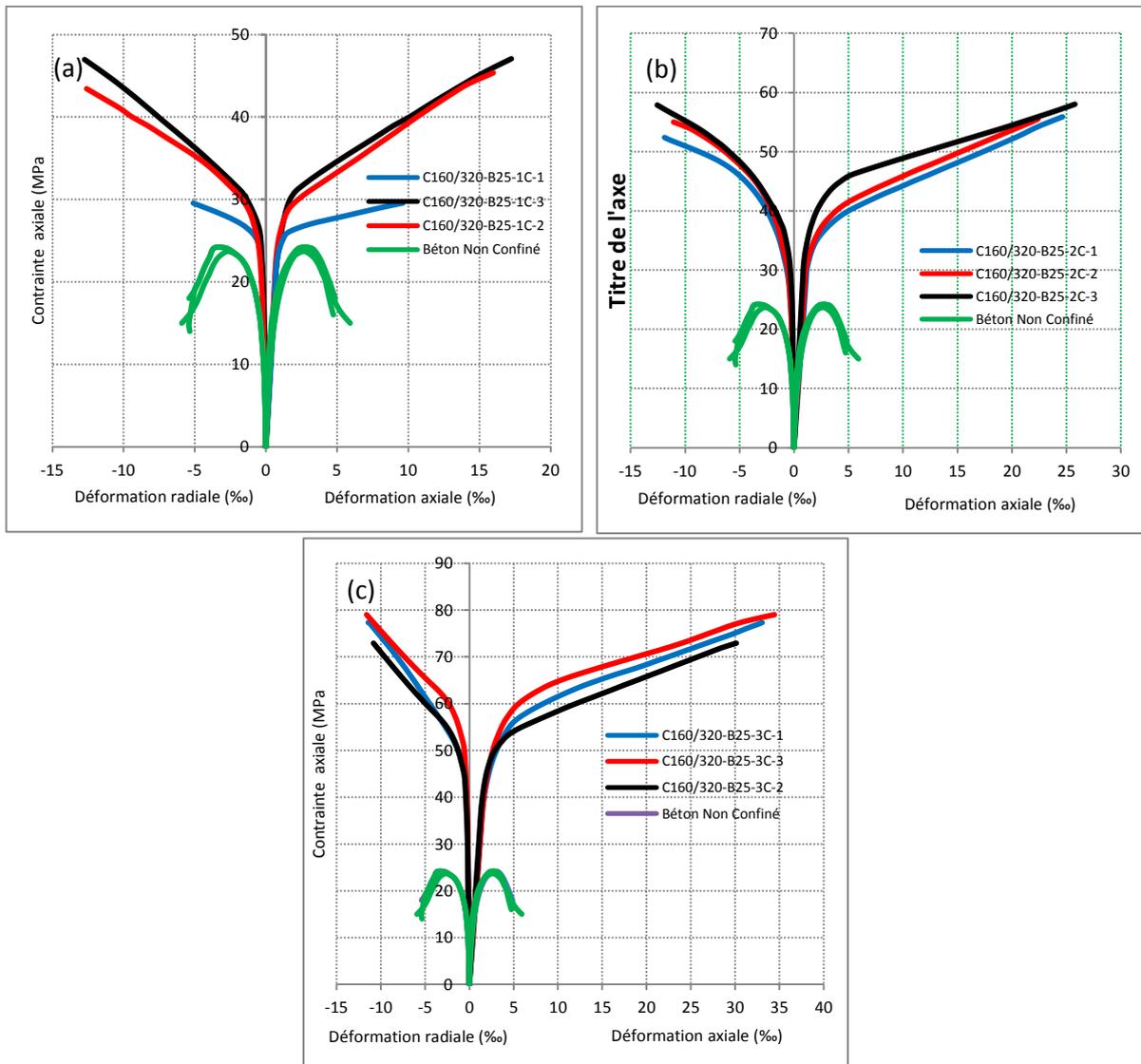
### V.2 Résultats expérimentaux des spécimens confinés avec des enveloppes de FRP

#### V.2.1 Résultats expérimentaux des éprouvettes cylindriques Ø160x320 mm

Les tableaux V.1 à V.6 présentent les résultats obtenus des cylindres de type Ø160x320 mm où s'y trouve les valeurs maximales des résistances en compression, des déformations axiales et radiales, des gains en résistance à la compression, des gains en déformation axiale et radiale des cylindres confinés avec des matériaux composites de type «CFRP» et «GFRP» par rapport aux cylindres non confinés pour les trois classes de béton, ainsi que le ratio de dilatation. Ces résultats sont présentés graphiquement sur les figures V.1 à II.6 sous forme de courbes contrainte-déformation. Les figures V.1 à II.3 présentent les résultats des colonnes confinées avec des composites de type CFRP, alors que les figures V.4 à V.6 ceux des colonnes confinées avec des composites de type GFRP.

**Tableau V.1** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 1 ( $f'_{co} = 25 \text{ MPa}$  ; CFRP)

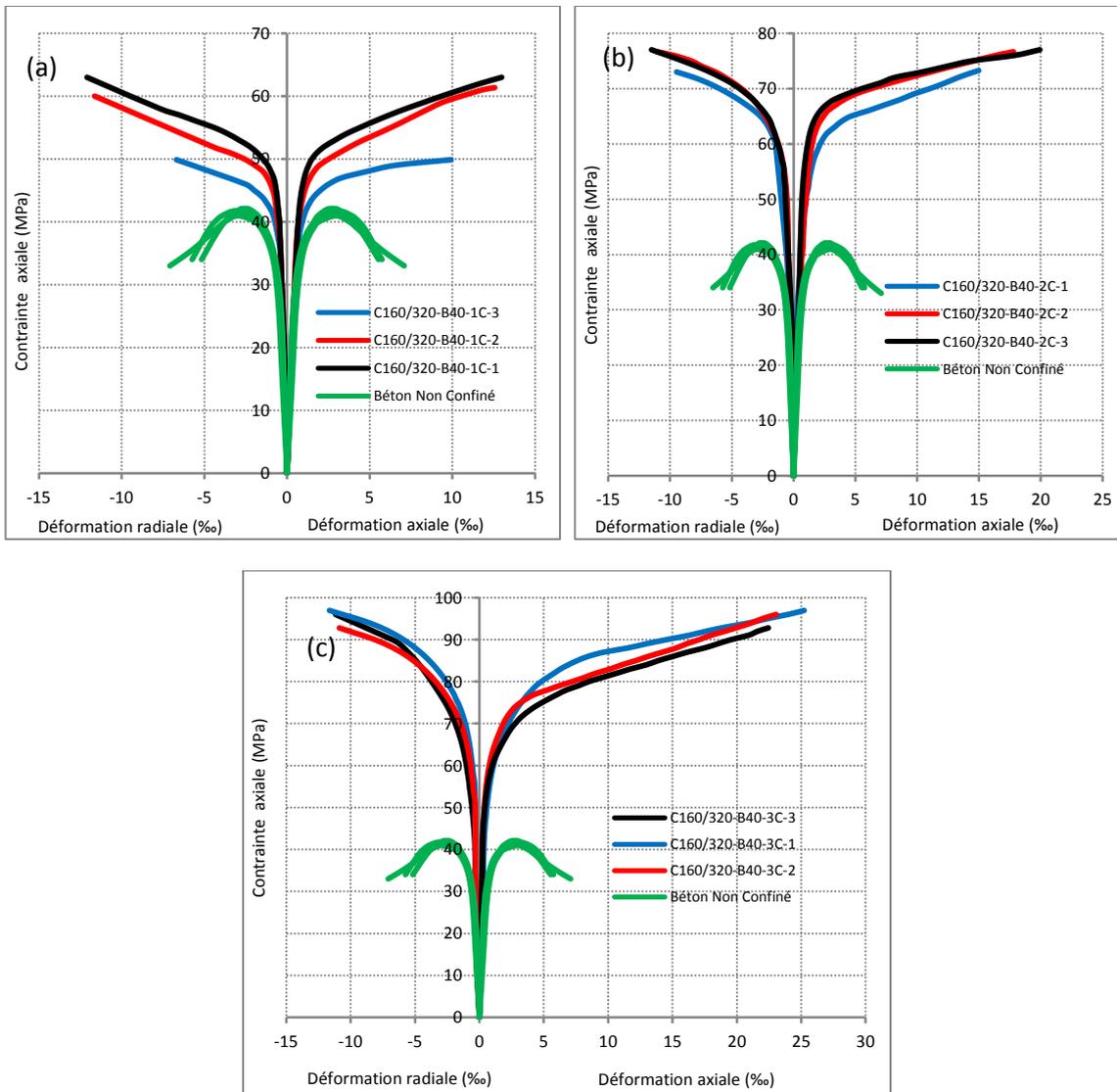
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
C160/320-B25-0-1	23.83			2.71			2.73		
C160/320-B25-0-2	24.65			2.63			2.75		
C160/320-B25-0-3	23.52			2.79			2.66		
C160/320-B25-1C-1		47.06	1.961		16.94	6.251		12.74	4.70
C160/320-B25-1C-2		45.36	1.89		15.67	5.782		12.6	4.65
C160/320-B25-1C-3		29.55	1.231		9.31	3.435		5.11	1.89
C160/320-B25-2C-1		55.88	2.328		24.15	8.911		11.98	4.42
C160/320-B25-2C-2		55.5	2.313		21.89	8.077		12.36	4.56
C160/320-B25-2C-3		58.01	2.417		25.28	9.328		12.56	4.63
C160/320-B25-3C-1		77.33	3.222		32.06	11.83		11.42	4.21
C160/320-B25-3C-2		79.01	3.292		33.45	12.34		11.61	4.28
C160/320-B25-3C-3		72.92	3.038		29.14	10.75		10.83	4.00



**Figure V.1** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.2** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 2 ( $f'_{co} = 40 \text{ MPa}$  ; CFRP)

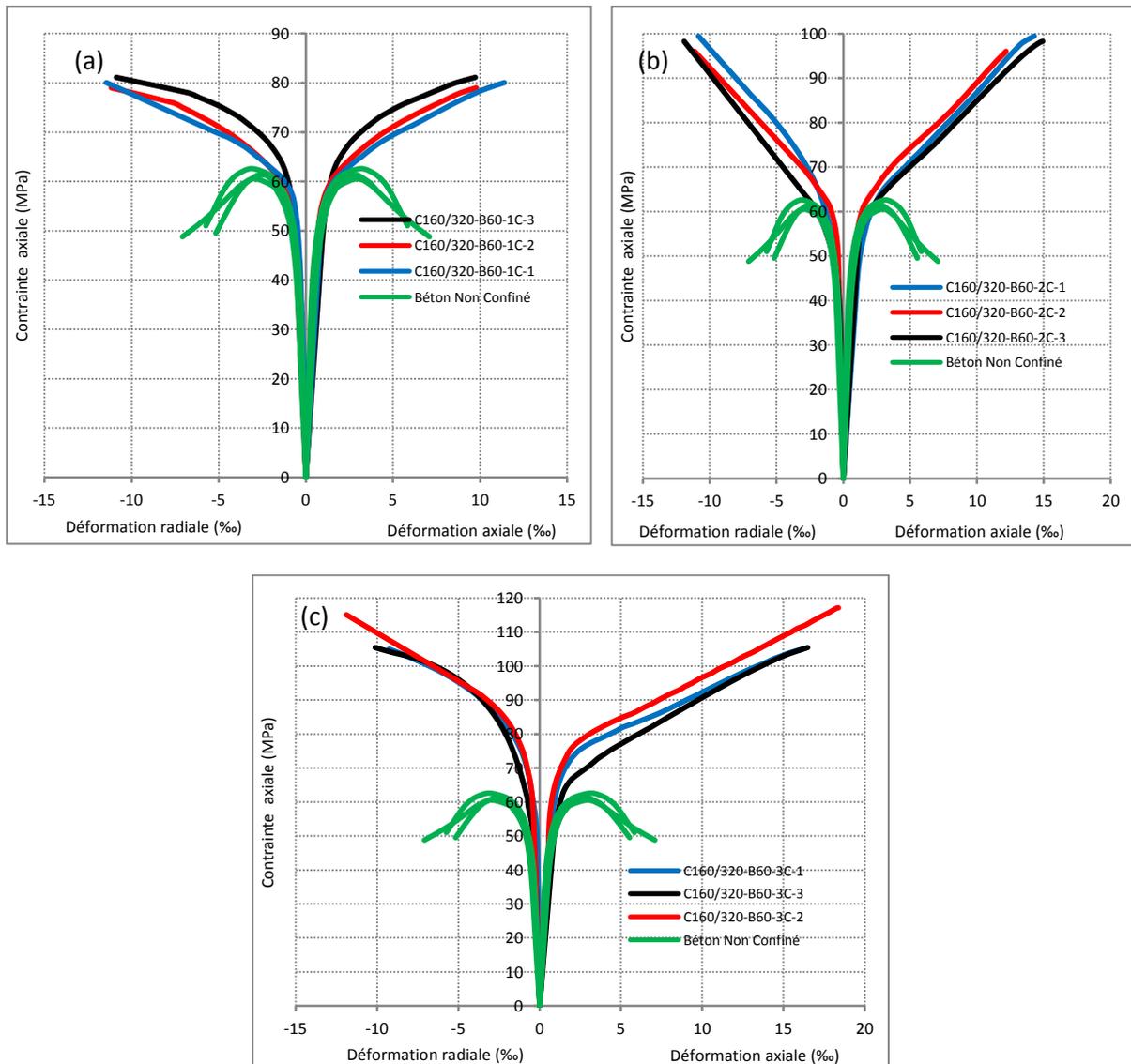
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{ro}$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{ro}$
C160/320-B40-0-1	41.88			3.12			3.09	
C160/320-B40-0-2	42.05			3.15			3.23	
C160/320-B40-0-3	40.86			3.08			3.01	
C160/320-B40-1C-1		49.88	1.199		9.92	3.19	6.69	2.15
C160/320-B40-1C-2		61.34	1.475		12.56	4.039	11.64	3.74
C160/320-B40-1C-3		62.99	1.514		12.98	4.174	12.1	3.89
C160/320-B40-2C-1		73.25	1.761		15.78	5.074	10.05	3.23
C160/320-B40-2C-2		76.66	1.843		18.49	5.945	11.88	3.82
C160/320-B40-2C-3		77.01	1.851		19.93	6.408	11.91	3.83
C160/320-B40-3C-1		96.93	2.33		25.23	8.113	11.45	3.68
C160/320-B40-3C-2		95.98	2.307		23.06	7.415	11.17	3.59
C160/320-B40-3C-3		92.77	2.23		22.45	7.219	10.88	3.50



**Figure V.2** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.3** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 3 ( $f'_{co}=60\text{MPa}$  ; CFRP)

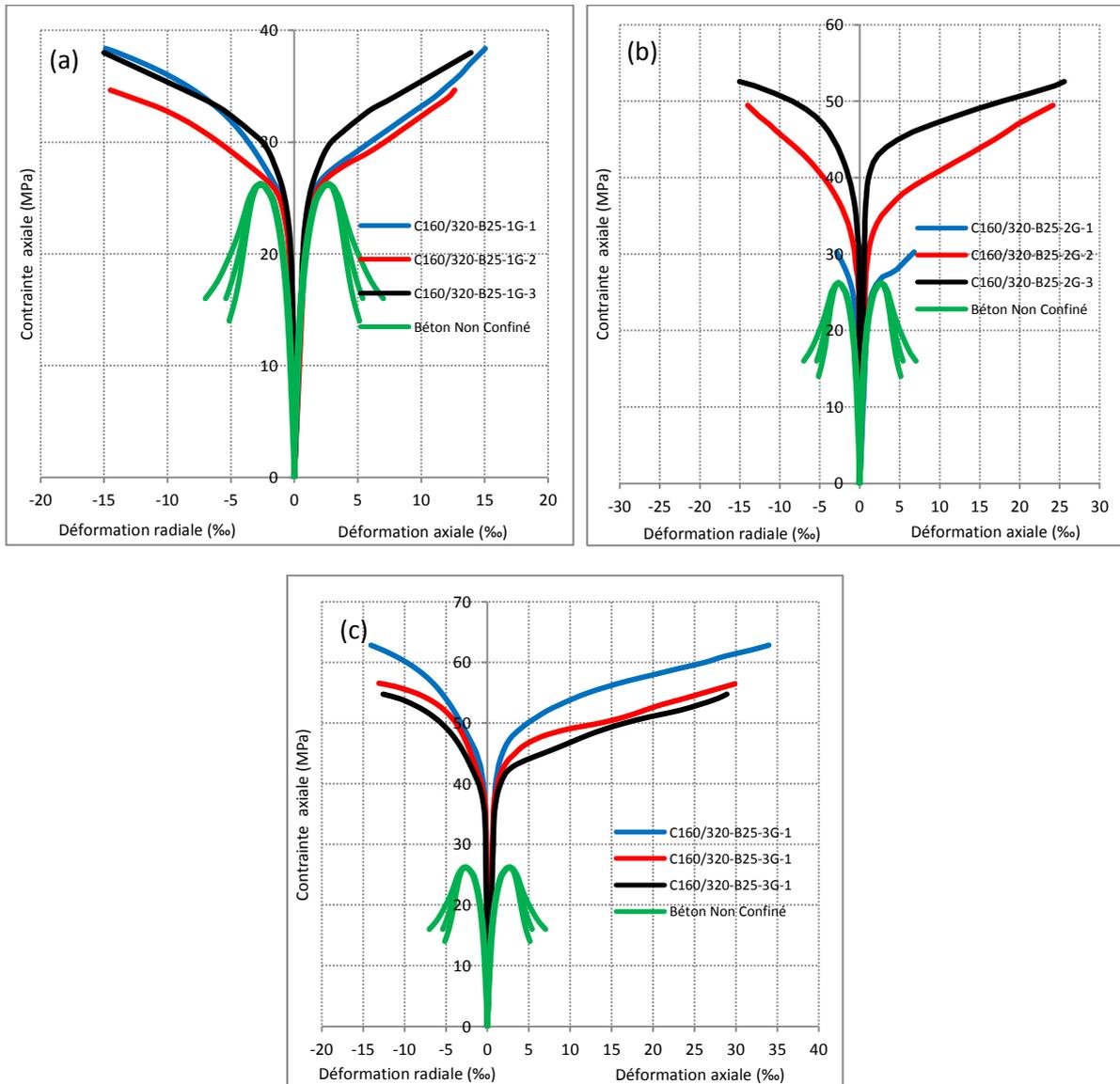
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cd}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cd}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
C160/320-B60-0-1	62.61			3.07			3.09		
C160/320-B60-0-2	60.56			2.98			2.95		
C160/320-B60-0-3	61.33			3.01			3.03		
C160/320-B60-1G-1		80.05	1.302		10.99	3.639		11.96	3.96
C160/320-B60-1G-2		78.99	1.284		9.78	3.238		10.69	3.54
C160/320-B60-1G-3		81.11	1.319		9.72	3.219		11.75	3.89
C160/320-B60-2G-1		96.02	1.561		11.68	3.868		10.89	3.61
C160/320-B60-2G-2		99.44	1.617		13.79	4.566		11.13	3.69
C160/320-B60-2G-3		98.25	1.598		14.92	4.94		11.91	3.94
C160/320-B60-3G-1		104.9	1.707		15.67	5.189		9.26	3.07
C160/320-B60-3G-2		117.1	1.905		17.88	5.921		11.89	3.94
C160/320-B60-3G-3		105.4	1.714		15.99	5.295		10.12	3.35



**Figure V.3** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.4** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 4 ( $f'_{co} = 25 \text{ MPa}$  ; GFRP)

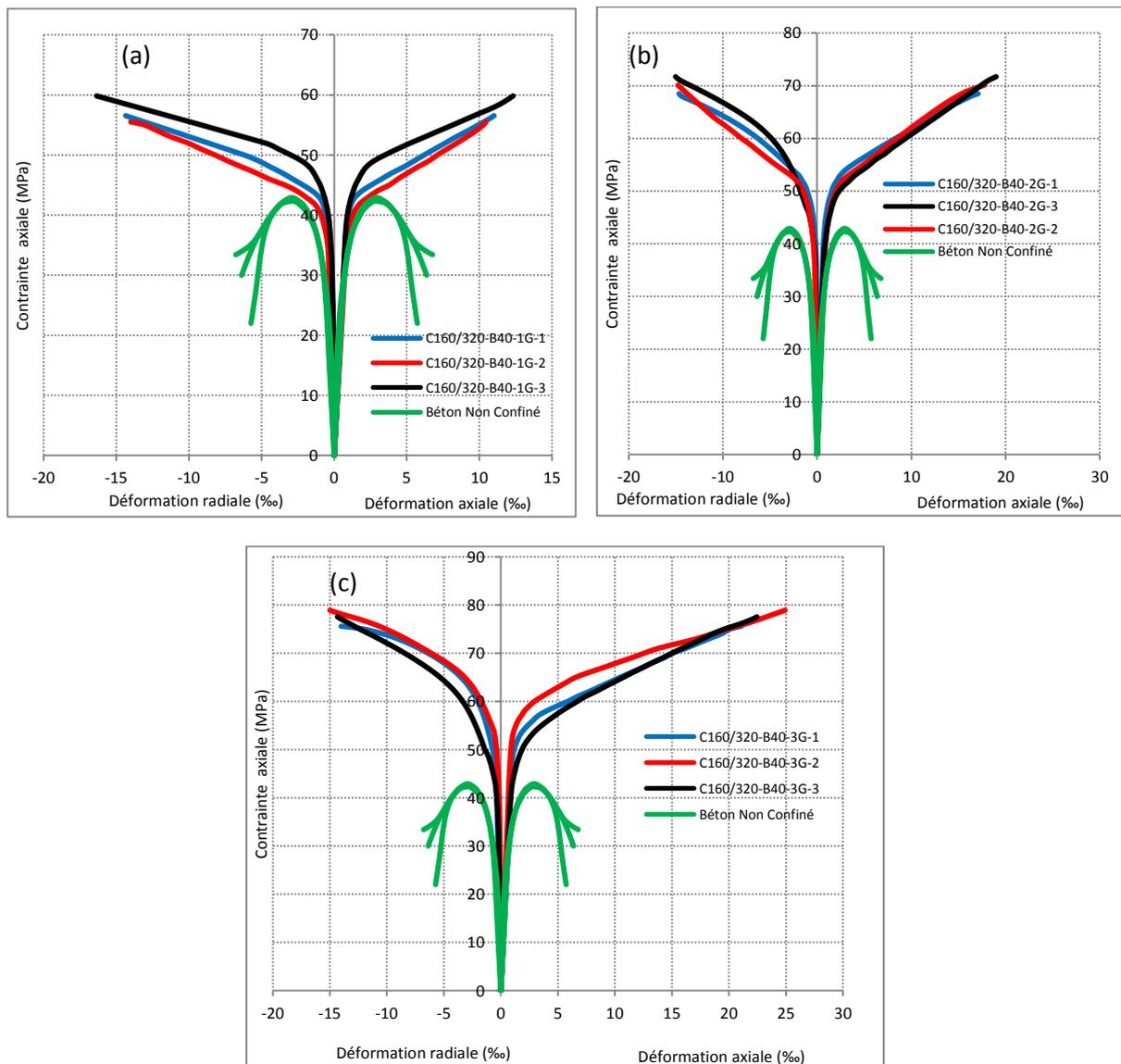
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{ro}$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{ro}$
C160/320-B25-0-1	27.25			2.67			2.79	
C160/320-B25-0-2	25.98			2.71			2.54	
C160/320-B25-0-3	26.63			2.62			2.68	
C160/320-B25-1G-1		38.37	1.465		15.05	5.637	14.88	5.57
C160/320-B25-1G-2		34.65	1.323		12.64	4.734	14.5	5.43
C160/320-B25-1G-3		38	1.45		13.92	5.213	15.01	5.62
C160/320-B25-2G-1		30.28	1.156		6.81	2.551	2.87	1.07
C160/320-B25-2G-2		49.45	1.887		24.16	9.049	14.5	5.43
C160/320-B25-2G-3		52.58	2.007		25.55	9.569	15.01	5.62
C160/320-B25-3G-1		62.83	2.398		33.98	12.72	14.06	5.27
C160/320-B25-3G-2		56.46	2.155		29.88	11.19	13.09	4.90
C160/320-B25-3G-3		54.76	2.09		28.91	10.82	12.95	4.85



**Figure V.4** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B25-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.5** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 5 ( $f'_{co} = 40 \text{ MPa}$  ; GFRP)

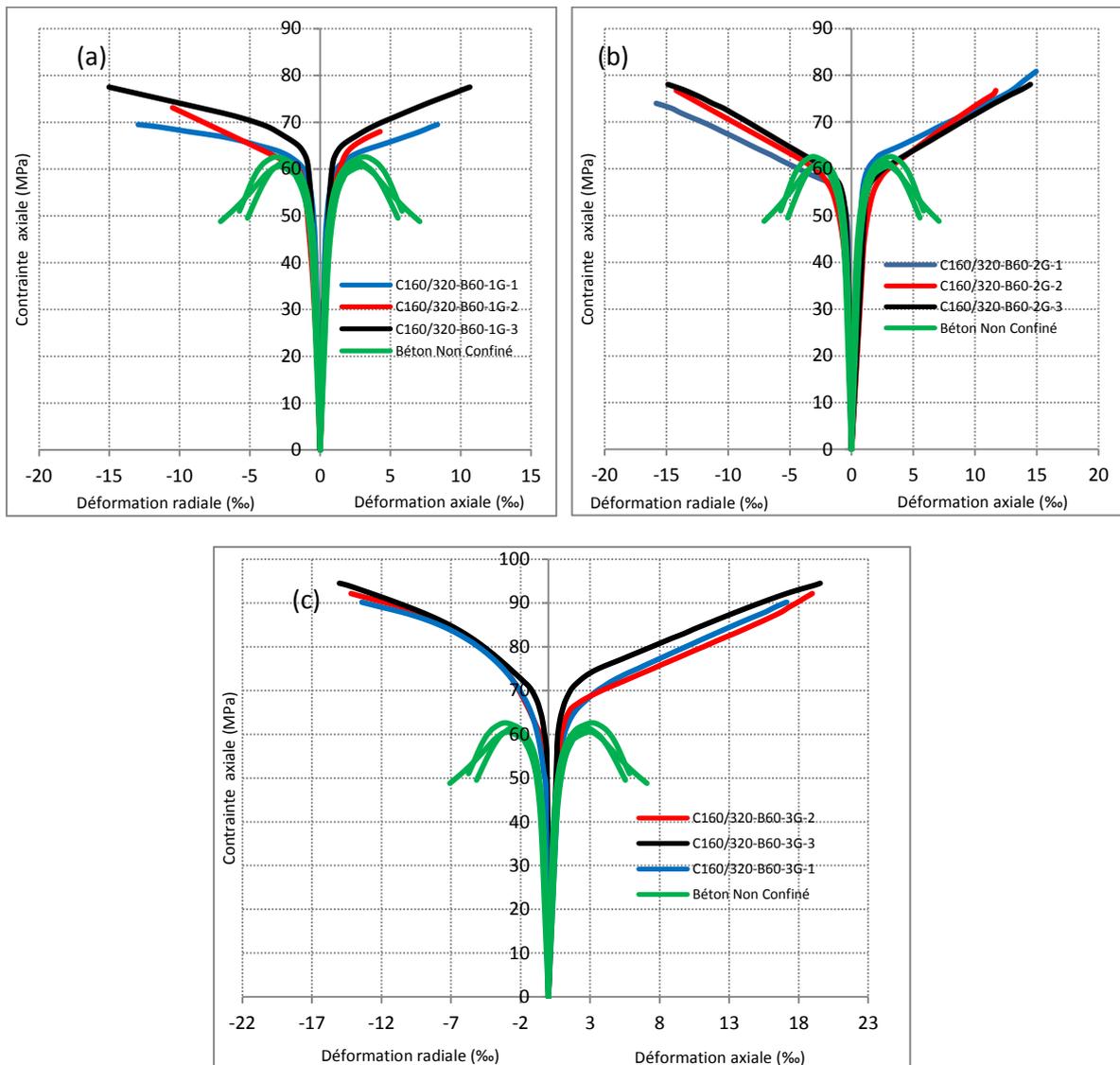
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{ro}$ (‰)	$\varepsilon_r$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{ro}$
C160/320-B40-0-1	43.01			2.91			3.09		
C160/320-B40-0-2	42.45			2.89			2.98		
C160/320-B40-0-3	42.32			2.85			2.61		
C160/320-B40-1G-1	56.54	1.327		11.01	3.81		14.36	4.97	
C160/320-B40-1G-2	55.51	1.303		10.46	3.619		14.01	4.85	
C160/320-B40-1G-3	59.83	1.404		12.32	4.263		16.36	5.66	
C160/320-B40-2G-1	68.5	1.608		16.59	5.74		14.66	5.07	
C160/320-B40-2G-2	70.01	1.643		17.23	5.962		14.78	5.11	
C160/320-B40-2G-3	71.72	1.684		18.15	6.28		15.03	5.20	
C160/320-B40-3G-1	75.58	1.774		21.09	7.298		14.01	4.85	
C160/320-B40-3G-2	78.89	1.852		24.93	8.626		15	5.19	
C160/320-B40-3G-3	77.53	1.82		22.46	7.772		14.33	4.96	



**Figure V.5** Allure des réponses contraintes-déformations des spécimens de type C160/320-B40-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.6** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), série 6 ( $f'_{co}=60\text{MPa}$  ; GFRP)

Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r/\epsilon'_{ro}$
C160/320-B60-0-1	60.93			3.13			3.05	
C160/320-B60-0-2	61.16			2.98			3.02	
C160/320-B60-0-3	63.02			3.19			3.27	
C160/320-B60-1G-1		69.49	1.126		8.85	2.846	12.95	4.16
C160/320-B60-1G-2		73.11	1.185		9.37	3.013	10.5	4.66
C160/320-B60-1G-3		77.5	1.256		11.15	3.585	16.02	5.15
C160/320-B60-2G-1		80.83	1.31		14.95	4.807	15.06	4.84
C160/320-B60-2G-2		76.75	1.244		13.59	4.37	14.21	4.57
C160/320-B60-2G-3		78.06	1.265		14.49	4.659	14.88	4.78
C160/320-B60-3G-1		90.15	1.461		17.15	5.514	13.5	4.34
C160/320-B60-3G-2		92.14	1.493		18.88	6.071	14.22	4.57
C160/320-B60-3G-3		94.49	1.531		19.55	6.286	15.03	4.83



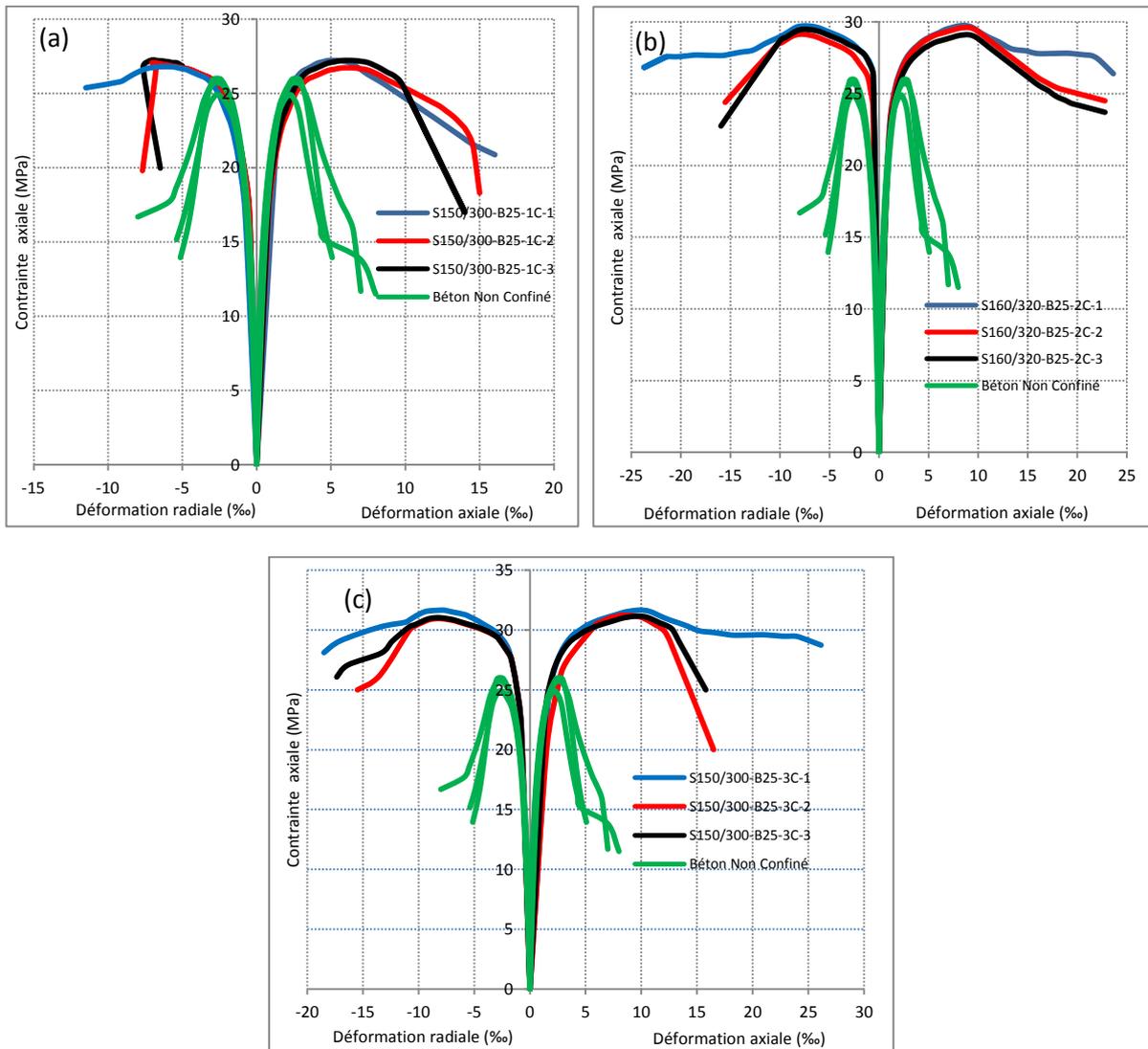
**Figure V.6** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C160/320-B60-G (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**V.2.2 Résultats expérimentaux des spécimens prismatiques carrés 150x150x300 mm**

Les tableaux V.7 à V.9 présentent les résultats obtenus des spécimens prismatiques carrés de type 150x150x300 mm confinés avec des enveloppes de CFRP (1 à 3 couches). Ils donnent les valeurs maximales obtenues des résistances en compression, les déformations axiales et radiales, les gains en résistance à la compression, et des gains en termes de déformation axiale et radiale des spécimens confinés avec des matériaux composites de type CFRP par rapport aux spécimens non confinés pour les trois séries de béton utilisées. Ces résultats sont présentés graphiquement dans les figures V.7 à V.9 sous forme de courbes contrainte-déformation.

**Tableau V.7** Résultats des essais sur les prismatique carrés (150x150x300 mm), série 7 ( $f'_{co}=25MPa$  ; CFRP)

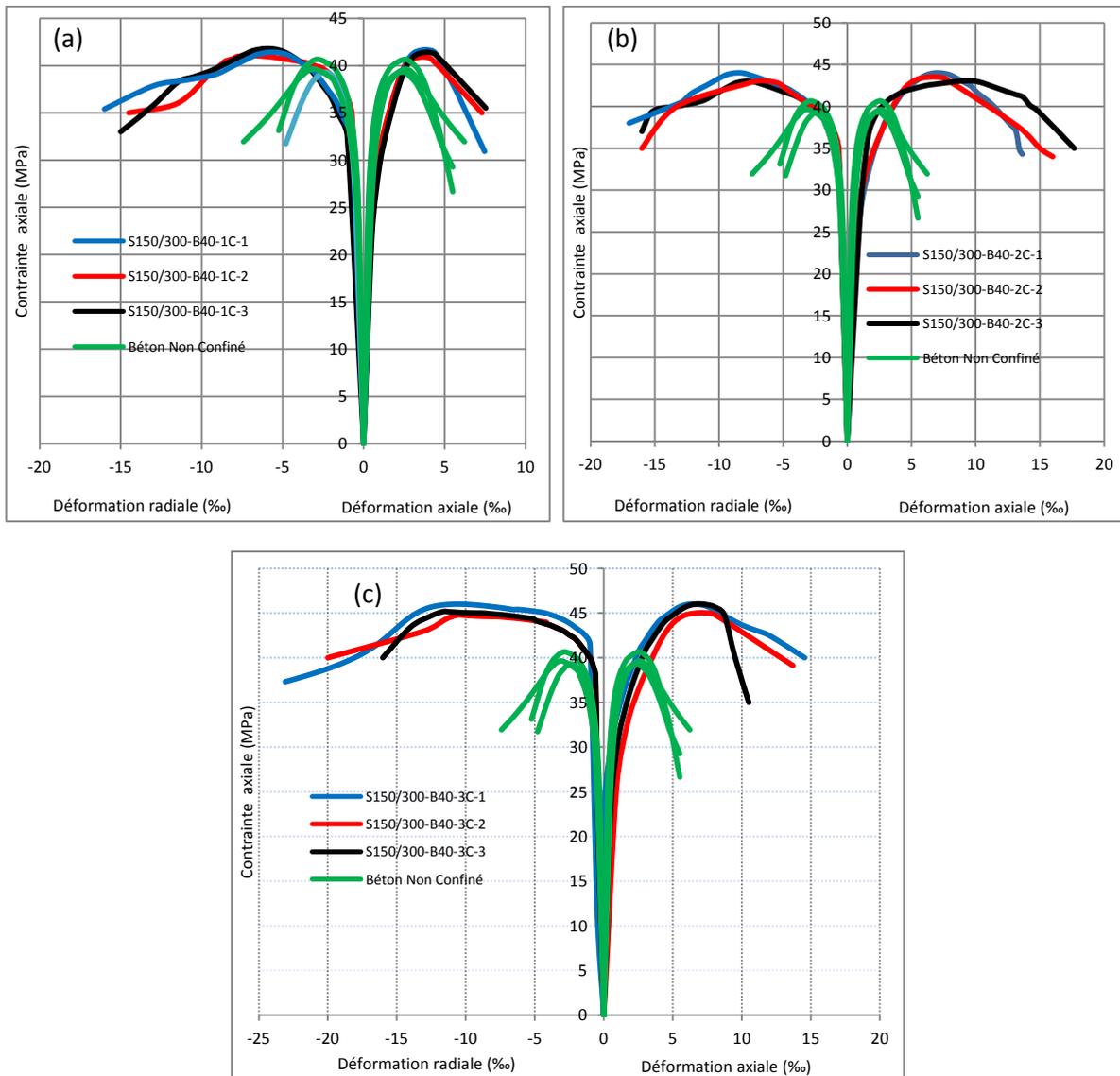
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
S150/300-B25-0-1	25,72			2,59			2,66		
S150/300-B25-0-2	24,91			2,38			2,56		
S150/300-B25-0-3	26,01			2,62			2,77		
S160/320-B25-1C-1		27,22	1,07		7,11	2,81		7,14	2,68
S160/320-B25-1C-2		27,05	1,06		7,34	2,90		7,05	2,65
S160/320-B25-1C-3		26,79	1,05		7,19	2,84		6,55	2,46
S160/320-B25-2C-1		29,72	1,16		8,80	3,48		7,74	2,91
S160/320-B25-2C-2		29,14	1,14		9,12	3,60		7,50	2,82
S160/320-B25-2C-3		29,49	1,15		8,03	3,17		7,69	2,89
S160/320-B25-3C-1		30,95	1,21		9,94	3,93		7,96	2,99
S160/320-B25-3C-2		31,65	1,24		9,95	3,93		8,11	3,04
S160/320-B25-3C-3		31,02	1,21		9,89	3,91		8,02	3,01



**Figure V.7** Allure des réponses contraintes-déformations des spécimens de type S150/300-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.8** Résultats des essais sur les prismatique carrés (150x150x300 mm), série 8 ( $f'_{co}=40MPa$  ; CFRP)

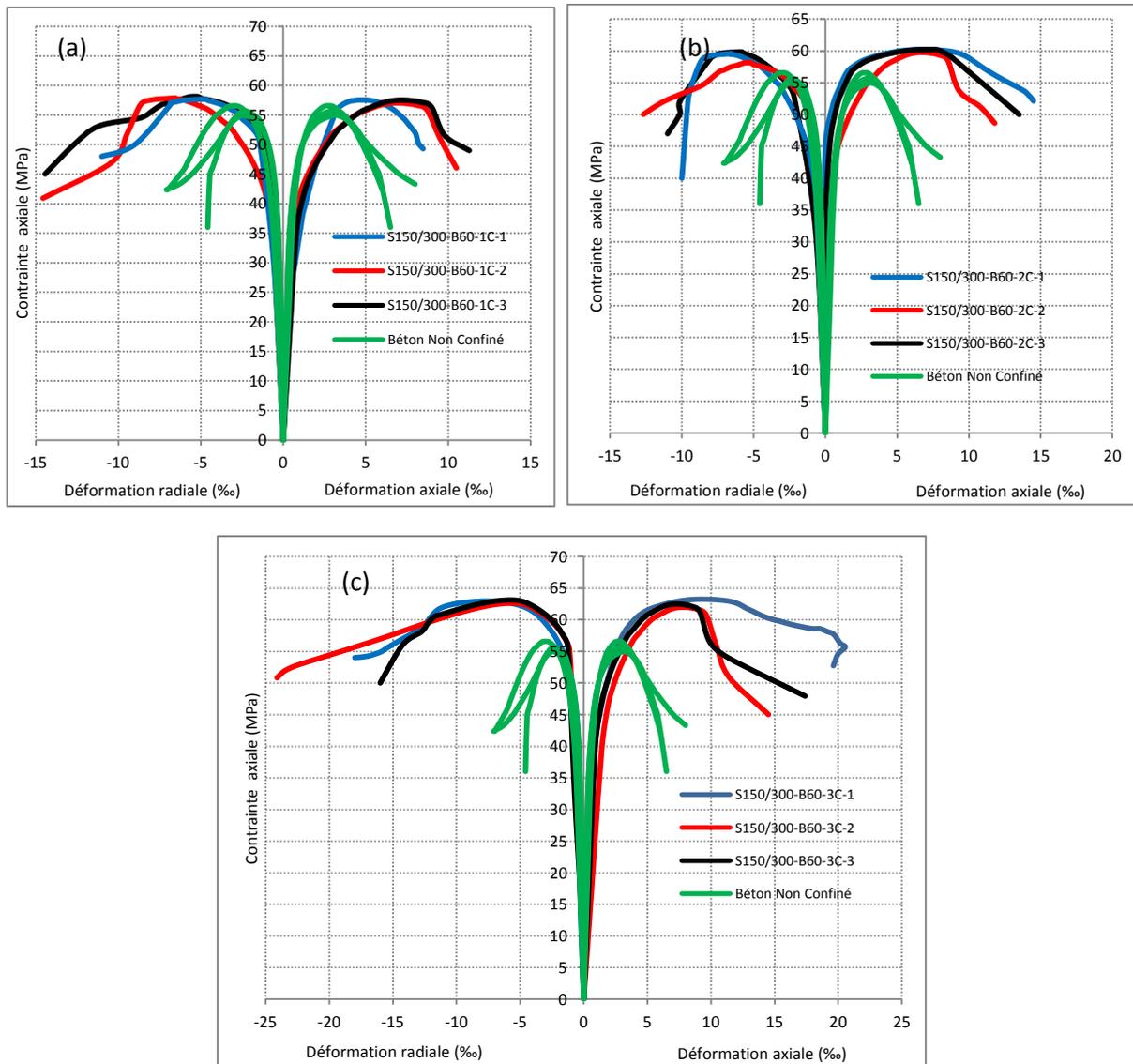
Code de Spécimen	$f'_{co}(MPa)$	$f'_{cc}(MPa)$	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}(\%)$	$\epsilon'_{cc}(\%)$	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}(\%)$	$\epsilon_t(\%)$	$\epsilon'_t/\epsilon'_{ro}$
S150/300-B40-0-1	40,66			2,66			2,78		
S150/300-B40-0-2	39,29			2,29			2,68		
S150/300-B40-0-3	38,75			2,47			2,49		
S160/320-B40-1C-1		41,78	1,06		6,50	2,63		7,14	2,69
S160/320-B40-1C-2		41,05	1,04		6,74	2,73		6,67	2,51
S160/320-B40-1C-3		41,41	1,05		7,19	2,91		6,21	2,34
S160/320-B40-2C-1		43,02	1,09		7,83	3,17		7,85	2,96
S160/320-B40-2C-2		43,06	1,09		7,58	3,07		7,95	3,00
S160/320-B40-2C-3		44,02	1,11		7,53	3,05		8,57	3,23
S160/320-B40-3C-1		45,99	1,16		8,31	3,37		9,59	3,99
S160/320-B40-3C-2		45,02	1,14		8,81	3,57		8,98	3,76
S160/320-B40-3C-3		44,76	1,13		7,82	3,17		9,65	4,02



**Figure V.8** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type S150/300-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.9** Résultats des essais sur les prismatique carrés (150x150x300 mm), série 9 ( $f'_{co}=60MPa$  ; CFRP)

Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
S150/300-B60-0-1	54,97			2,42			3,02		
S150/300-B60-0-2	55,72			2,34			2,71		
S150/300-B60-0-3	56,56			2,56			2,54		
S160/320-B60-1C-1		57,50	1,03		6,28	2,57		6,58	2,38
S160/320-B60-1C-2		57,90	1,04		6,41	2,63		6,83	2,48
S160/320-B60-1C-3		57,70	1,03		6,14	2,52		6,85	2,49
S160/320-B60-2C-1		58,98	1,06		6,91	2,83		6,58	2,68
S160/320-B60-2C-2		60,22	1,08		6,88	2,82		7,78	2,82
S160/320-B60-2C-3		59,58	1,07		6,94	2,84		6,56	2,68
S160/320-B60-3C-1		62,47	1,12		7,62	3,12		8,24	2,98
S160/320-B60-3C-2		62,88	1,13		7,54	3,09		8,11	2,94
S160/320-B60-3C-3		61,97	1,11		7,44	3,05		8,51	3,08



**Figure V.9** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type S150/300-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

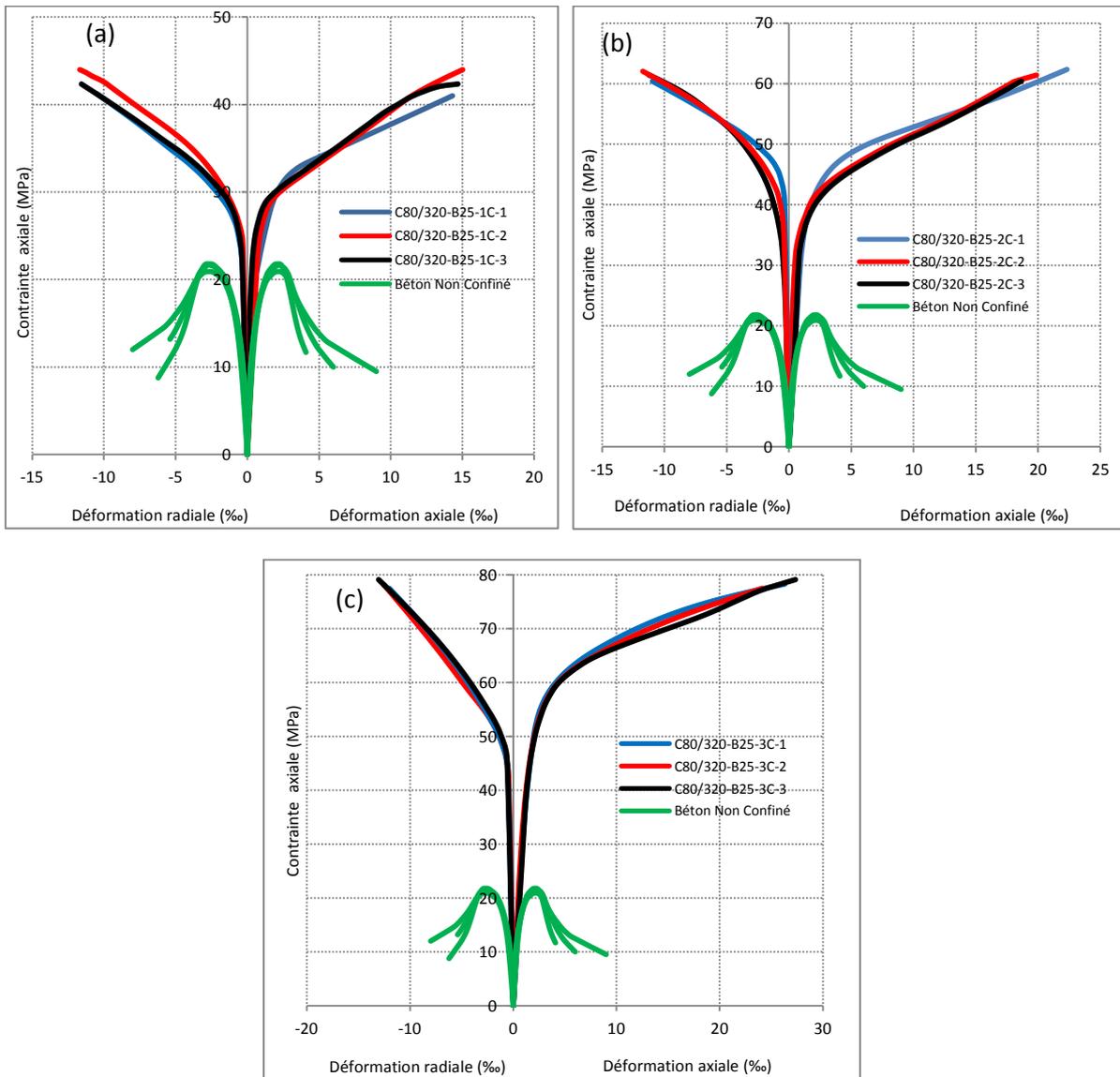
**V.2.3 Résultats expérimentaux des spécimens de section circulaires Ø80x320 mm et Ø80x500 mm**

Les résultats expérimentaux des cylindres de type Ø80x320 confinés avec des enveloppes de CFRP sont représentés sur les tableaux V.10 à V.12. Les réponses expérimentales contrainte-déformation de cette série sont représentées sur les figures V.10 à V.12.

Les tableaux V.13 à V.15 présentent les résultats des spécimens de section circulaire de type Ø80x500 mm : les valeurs maximales obtenues des résistances en compression, des déformations axiales et radiales, des gains en résistance à la compression, des gains en déformation axiale et radiale des cylindres confinés avec des matériaux composites de type CFRP par rapport aux cylindres non confinés. Ces résultats sont présentés graphiquement sur les Figures V.13 à V.15 sous forme de courbes contrainte-déformation.

**Tableau V.10** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x320 mm), série 10 ( $f'_{co}=25MPa$  ; CFRP)

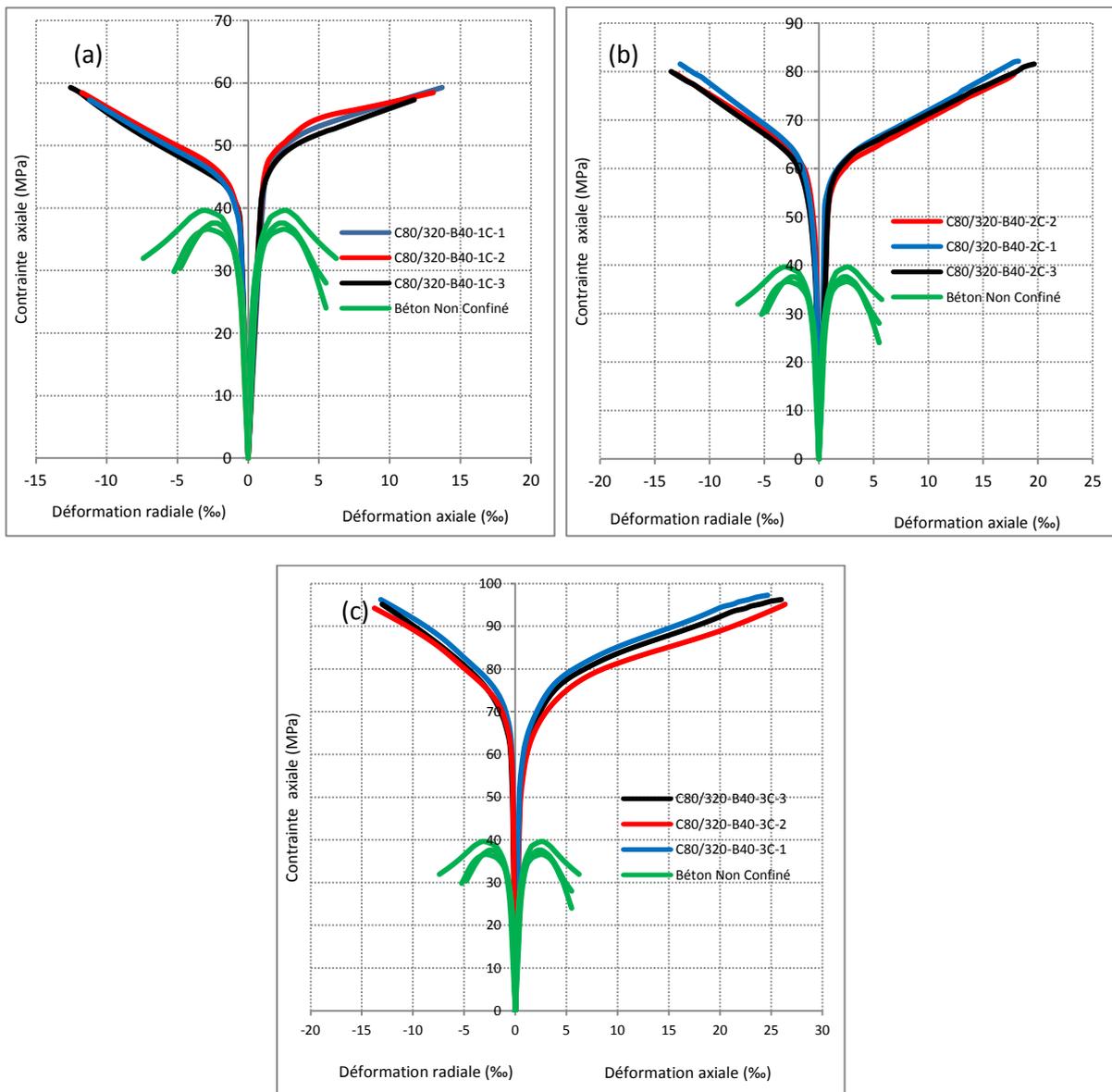
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{ro}$ (‰)	$\varepsilon_r$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{ro}$
C80/320-B25-0-1	20.91			2.16			2.65		
C80/320-B25-0-2	21.66			2.27			2.71		
C80/320-B25-0-3	21.78			2.11			2.58		
C80/320-B25-1C-1		41.23	1.92		14.61	6.70	10.48	3.96	
C80/320-B25-1C-2		43.99	2.05		15.08	6.92	12.08	4.56	
C80/320-B25-1C-3		42.35	1.97		14.96	6.86	11.57	4.38	
C80/320-B25-2C-1		61.42	2.86		19.88	9.12	11.23	4.24	
C80/320-B25-2C-2		60.41	2.82		18.67	8.56	10.96	4.14	
C80/320-B25-2C-3		62.05	2.89		22.33	10.24	11.74	4.44	
C80/320-B25-3C-1		78.21	3.65		26.32	12.07	12.56	4.75	
C80/320-B25-3C-2		77.48	3.61		24.14	11.53	12.01	4.54	
C80/320-B25-3C-3		79.11	3.69		27.35	12.55	13.05	4.93	



**Figure V.10** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.11** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x320 mm), série 11 ( $f'_{co}=40MPa$  ; CFRP)

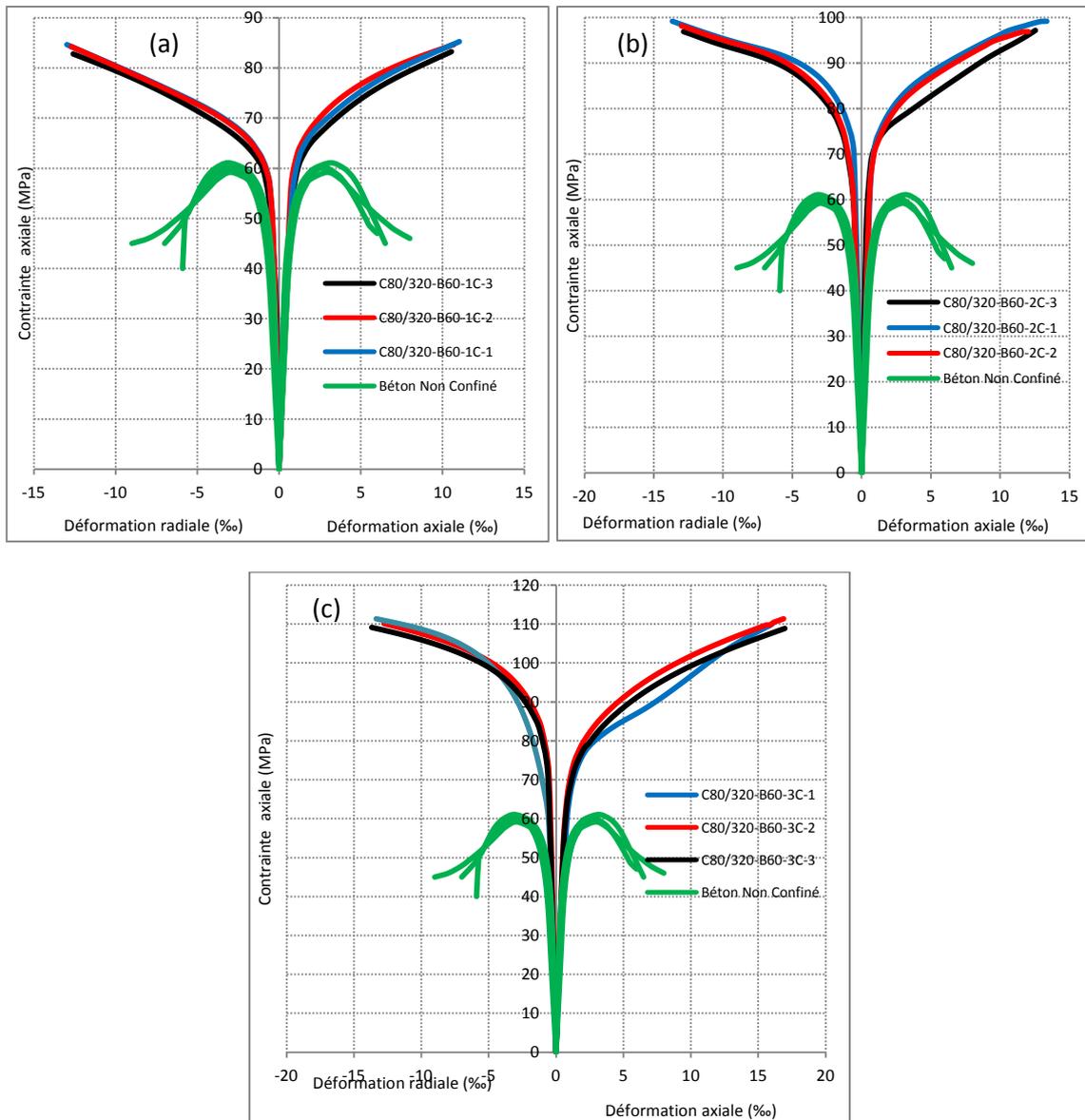
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
C80/320-B40-0-1	36.61			2,55			2.85		
C80/320-B40-0-2	39.64			2,61			3.11		
C80/320-B40-0-3	37.59			2,49			2.95		
C80/320-B40-1C-1		59.28	1.56		13.21	5.18		12.55	4.23
C80/320-B40-1C-2		58.46	1.54		12.58	4.93		11.75	3.96
C80/320-B40-1C-3		57.32	1.51		11.24	4.41		11.21	3.77
C80/320-B40-2C-1		80.01	2.11		18.69	7.33		12.07	4.06
C80/320-B40-2C-2		82.13	2.16		18.23	7.15		13.01	4.38
C80/320-B40-2C-3		81.55	2.15		19.22	7.71		12.68	4.27
C80/320-B40-3C-1		96.23	2.54		25.98	10.19		13.15	4.43
C80/320-B40-3C-2		95.14	2.51		26.35	10.33		13.01	4.38
C80/320-B40-3C-3		97.25	2.56		24.64	9.67		13.77	4.69



**Figure V.11** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.12** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x320 mm), série 11 ( $f'_{co}=60MPa$  ; CFRP)

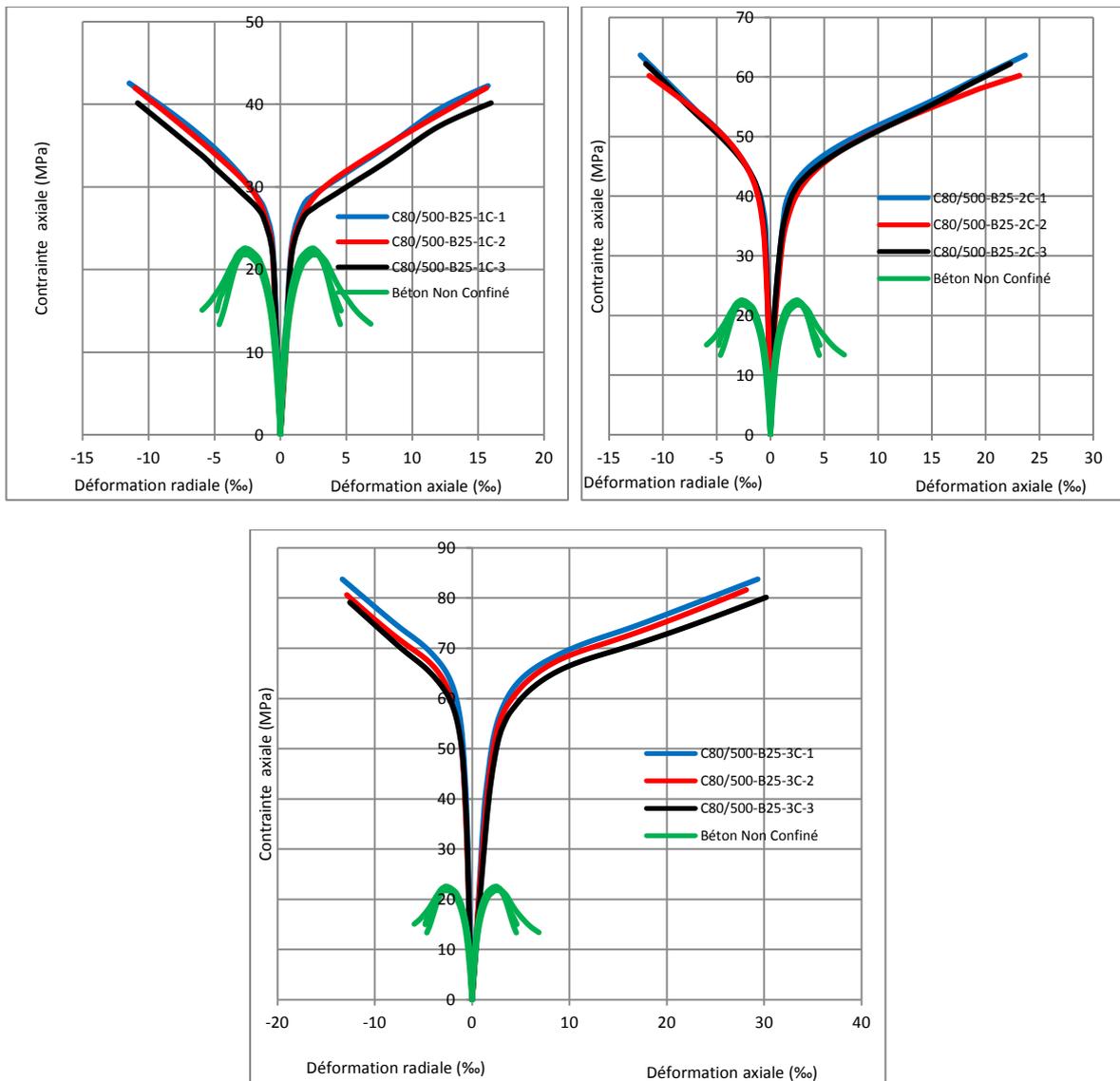
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
C80/320-B60-0-1	61.08			2,95			3.11		
C80/320-B60-0-2	59.19			2,96			2.85		
C80/320-B60-0-3	60.07			2,77			3.14		
C80/320-B60-1C-1		83.25	1,38		10.54	3.65		12.65	4.17
C80/320-B60-1C-2		84.65	1,41		10.69	3.70		12.98	4.28
C80/320-B60-1C-3		84.26	1,40		11.03	3.82		12.71	4.19
C80/320-B60-2C-1		99.15	1,65		12.14	4.16		13.66	4.56
C80/320-B60-2C-2		97.15	1,62		12.54	4.34		13.01	4.29
C80/320-B60-2C-3		96.87	1,61		13.36	4.62		12.85	4.24
C80/320-B60-3C-1		110.12	1,83		16.07	5.56		12.77	4.21
C80/320-B60-3C-2		111.36	1,85		16.89	5.84		13.35	4.40
C80/320-B60-3C-3		109.87	1,83		16.98	5.88		12.34	4.07



**Figure V.12** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B60-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.13** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x500 mm), série 13 ( $f'_{co}=25MPa$  ; CFRP)

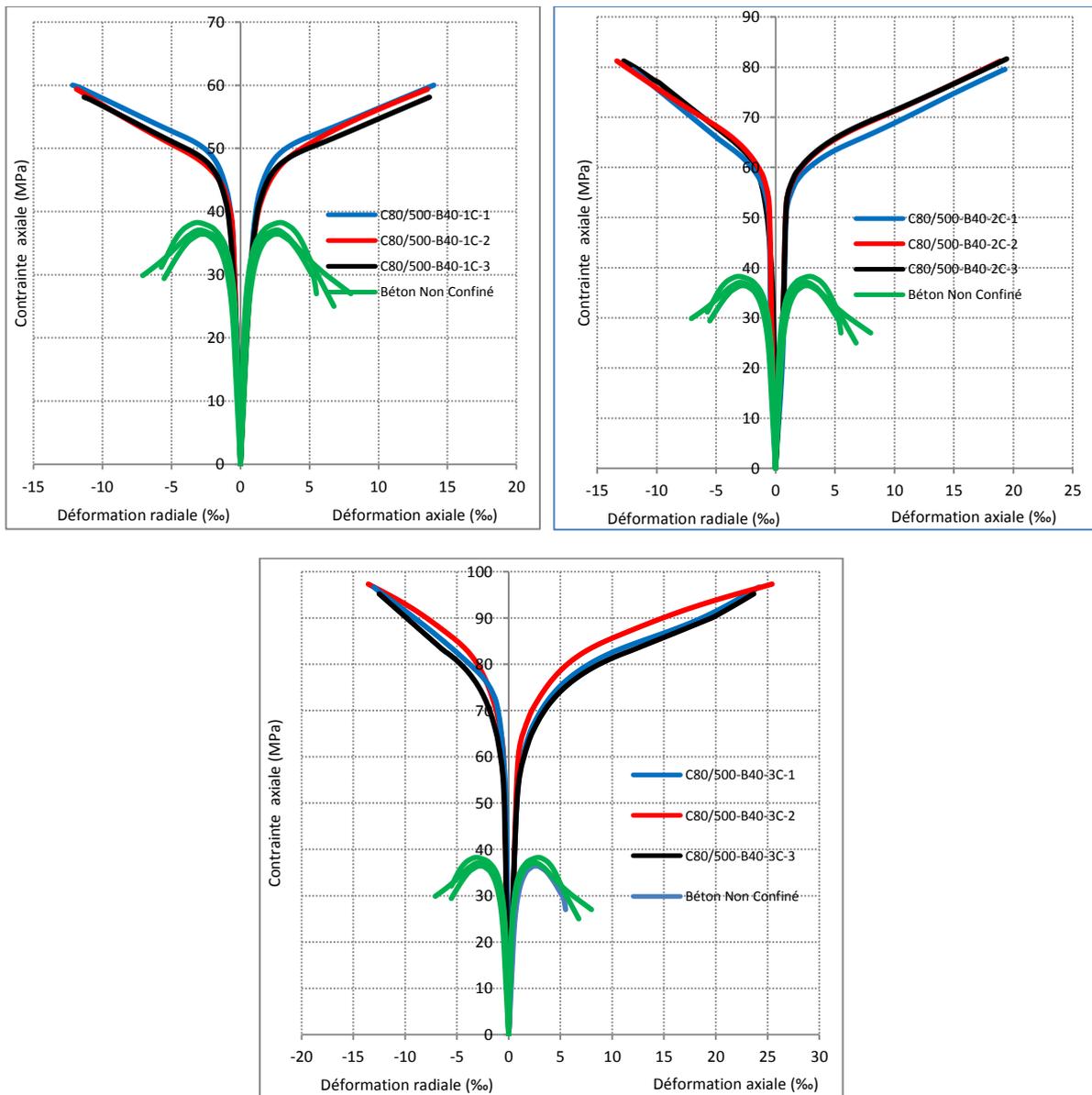
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{co}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}$ (‰)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{ro}$ (‰)	$\epsilon_r$ (‰)	$\epsilon'_r/\epsilon'_{ro}$
C80/500-B25-0-1	21.95			2.41			2.62		
C80/500-B25-0-2	22.58			2.48			2.73		
C80/500-B25-0-3	21.61			2.34			2.59		
C80/500-B25-1C-1		42.55	1.93		16.22	6.73		11.47	4.33
C80/500-B25-1C-2		41.98	1.90		15.64	6.49		11.03	4.17
C80/500-B25-1C-3		40.15	1.82		15.98	6.63		10.83	4.09
C80/500-B25-2C-1		63.67	1.89		23.65	9.61		12.08	4.56
C80/500-B25-2C-2		60.23	2.73		23.15	9.82		11.27	4.26
C80/500-B25-2C-3		62.22	2.82		22.30	9.25		11.58	4.38
C80/500-B25-3C-1		83.76	3.80		29.35	12.18		13.33	5.04
C80/500-B25-3C-2		81.63	3.69		28.17	11.69		12.87	4.86
C80/500-B25-3C-3		80.14	3.63		30.21	12.54		12.56	4.75



**Figure V.13** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/500-B25-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.14** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x500 mm), série 14 ( $f'_{co}=40MPa$  ; CFRP)

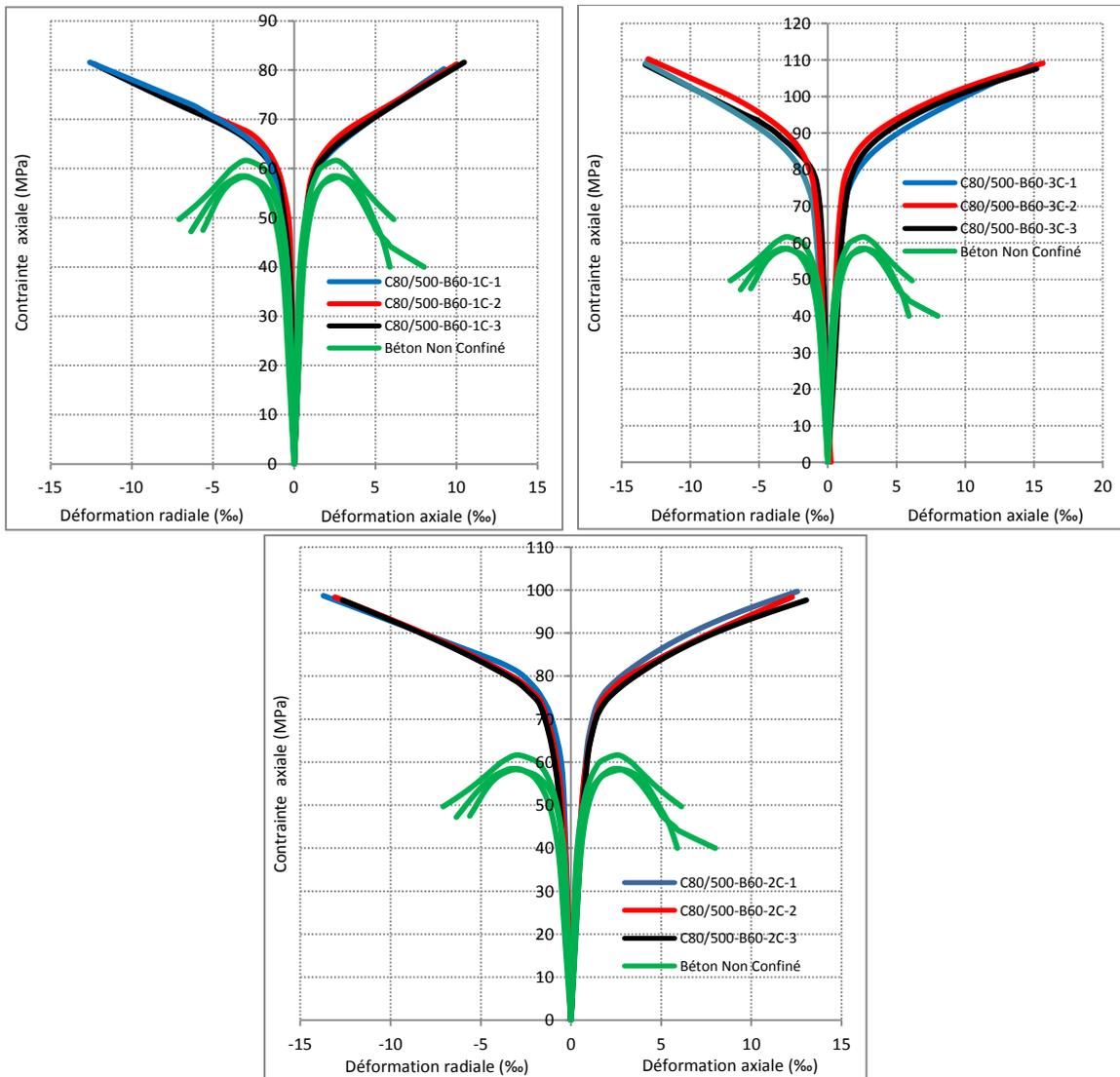
Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{r0}$ (‰)	$\varepsilon_r$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{r0}$
C80/500-B40-0-1	38.26			2.88			3.26		
C80/500-B40-0-2	37.07			2.78			3.11		
C80/500-B40-0-3	36.41			2.76			2.88		
C80/500-B40-1C-1		60.02	1.61		14.01	4.99		12.26	3.98
C80/500-B40-1C-2		59.37	1.58		13.55	4.82		11.88	3.85
C80/500-B40-1C-3		58.12	1.56		13.69	4.87		11.33	3.67
C80/500-B40-2C-1		79.55	2.14		18.77	6.68		12.00	3.75
C80/500-B40-2C-2		81.23	2.18		18.62	6.63		12.97	4.21
C80/500-B40-2C-3		81.64	2.19		19.14	6.81		13.25	4.3
C80/500-B40-3C-1		96.66	2.59		24.16	8.60		13.02	4.22
C80/500-B40-3C-2		97.33	2.61		25.44	9.05		13.55	4.39
C80/500-B40-3C-3		95.22	2.56		23.67	5.70		12.50	4.05



**Figure V.14** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

**Tableau V.15** Résultats des essais sur les cylindres ( $\varnothing$  80x500 mm), série 15 ( $f'_{co}=60MPa$  ; CFRP)

Code de Spécimen	$f'_{co}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{ro}$ (‰)	$\varepsilon'_r/\varepsilon'_{ro}$
C80/500-B60-0-1	58.29			2.83			3.05	
C80/500-B60-0-2	61.65			2.57			2.97	
C80/500-B60-0-3	58.47			2.65			3.29	
C80/500-B60-1C-1		80.26	1.35		9.23	3.44	11.93	3.84
C80/500-B60-1C-2		81.25	1.37		10.02	3.74	12.61	4.06
C80/500-B60-1C-3		81.59	1.37		10.47	3.44	12.58	4.05
C80/500-B60-2C-1		99.68	1.68		12.56	4.69	13.87	4.47
C80/500-B60-2C-2		98.36	1.65		12.27	4.69	13.23	4.26
C80/500-B60-2C-3		97.65	1.64		13.05	4.87	12.66	4.08
C80/500-B60-3C-1		108.69	1.83		15.25	5.69	13.28	4.28
C80/500-B60-3C-2		109.11	1.83		16.05	5.99	13.53	4.36
C80/500-B60-3C-3		107.59	1.81		15.19	5.67	13.29	4.11



**Figure V.15** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens de type C80/320-B40-C (a) 1 couche, (b) 2 couches, (c) 3 couches.

### V. 3 Modes de Rupture

#### V.3.1 Modes de rupture des spécimens de section circulaire de type Ø160x320 confinés avec des matériaux composites

Tous les spécimens ont une rupture brusque à cause du comportement fragile des matériaux composites. Dans la totalité des spécimens testés, la rupture s'est produite avant que les enveloppes composites n'atteignent leurs capacités de déformations ultimes obtenues dans les essais de traction standard. Selon le type de section confinée (circulaire ou carrée) et le niveau de confinement du spécimen défini par le nombre de couches de «PRFC», différentes observations peuvent être tirées de l'examen des échantillons testés.

Les spécimens non confinés (25, 40 et 60 MPa) ont tous subi des ruptures de cisaillement associées à des degrés de fissuration plus ou moins importants.



Figure V.16 Modes de rupture des cylindres non confinés

Les colonnes confinées ont toutes subi une rupture du tissu de fibres (horizontale et verticale). Pour tous les spécimens, le béton de l'enrobage a été arraché dans les zones de rupture dont l'épaisseur du béton arraché variait de 2 à 25 mm.

Aucune rupture ni glissement du tissu FRP n'ont été observés dans les recouvrements. Par ailleurs, aucun glissement entre le tissu FRP et la surface de béton ne s'est produit.

La rupture des spécimens était graduelle, et s'est terminée avec une explosion de l'éprouvette d'une manière "brutale" due à l'énergie de déformation emmagasinée dans l'enveloppe composite au cours du chargement, associée à une fissuration dans le noyau du béton. La fissuration du noyau de béton a été catégorisée en trois intensités, soit: la fissuration importante, la fissuration moyenne et la fissuration faible. Une fissuration importante (*C160/320-B25-3C*) signifie que le béton est complètement broyé. La fissuration faible signifie que les fissures sont filiformes et peu nombreuses (*C160/320-B25-1C*). Tandis que la fissuration moyenne est l'état intermédiaire entre le degré de fissuration importante et faible (*C160/320-B25-2C*).

Le mode de rupture pour tous les cylindres en béton confinés par GFRP était une rupture continue du tissu de haut vers le bas (figures V.17), tandis que la rupture du tissu dans le cas des cylindres en béton confinés par CFRP peut être divisée en deux modes, rupture en spirale

et rupture localisée dans la section basse, moyenne et dans la section supérieure (figures V.18). Cette différence entre les modes de rupture de spécimens confinés par CFRP et ceux confinés par GFRP est probablement due à la nature chimique des composites utilisées. La rupture et les modes d'endommagement des colonnes confinées dépendent fortement du type et de la nature de l'enveloppe composite.



Figure V.17 Modes de rupture des cylindres confinés avec GFRP ( $\text{\O}160 \times 320$ )



Figure V.18 Modes de rupture des cylindres confinés avec CFRP ( $\text{\O}160 \times 320$ )

Pour tous les spécimens testés, le béton a été arraché dans les zones de rupture. L'épaisseur du béton arraché avec les enveloppes de CFRP détachées au moment de la rupture variait de 2 à 25 mm. (Figure V.19).

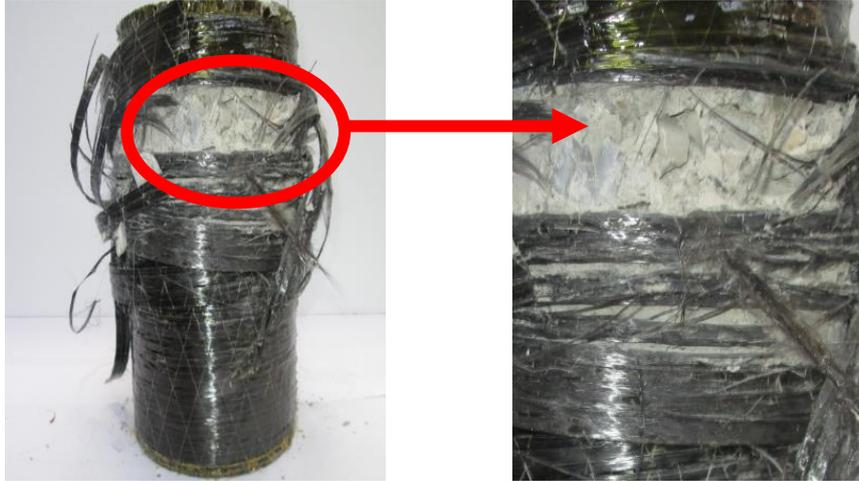


Figure V.19 Arrachement du béton avec l'enveloppe CFRP

### V.3.2 Modes de rupture des spécimens de section carrée confinés avec des matériaux composites

Les spécimens non confinés (26, 40 et 60 MPa) ont tous subi des ruptures normales de cisaillement associées à des degrés de fissuration plus ou moins importants.



Figure V.20 Modes de rupture des prismatiques carrés non confinés

Les spécimens de section carrée (150x150x300 mm) en béton armé confinés avec des «CFRP» ont tous subi une rupture de l'enveloppe composite qui survient toujours au niveau des coins. En général, la rupture des composites est nette et perpendiculaire aux fibres avec un arrachement du béton dans les zones de rupture. D'autre part, aucune rupture ni glissement du tissu composite n'ont été observés dans les zones de recouvrement du composite.

Dans tous les cas, la rupture de l'enveloppe composite survient au niveau des coins à cause de la présence d'une forte concentration de contrainte dans ces régions, et ce pour n'importe quel niveau de confinement du spécimen. Dans le cas des spécimens faiblement confinés (une couche de «CFRP»), l'enveloppe composite se rompt sur une longueur de l'ordre de 70 à 120mm environ. Par contre, dans le cas des spécimens fortement confinés (trois couches de

«CFRP») le confinement cède sur une longueur plus importante (supérieure ou égale à la moitié de la hauteur du spécimen), comme le montre la figure V.21.



Figures V.21 Modes de rupture des prismatiques carrés confinés par CFRP

### V.3.3 Modes de rupture des spécimens de section circulaire de type Ø80x320 et de type Ø80x500

Les spécimens non confinés des séries Ø80x320 et de type Ø80x500 ont tous subi des ruptures de cisaillement associées à des degrés de fissuration plus ou moins importants (figure V.22).

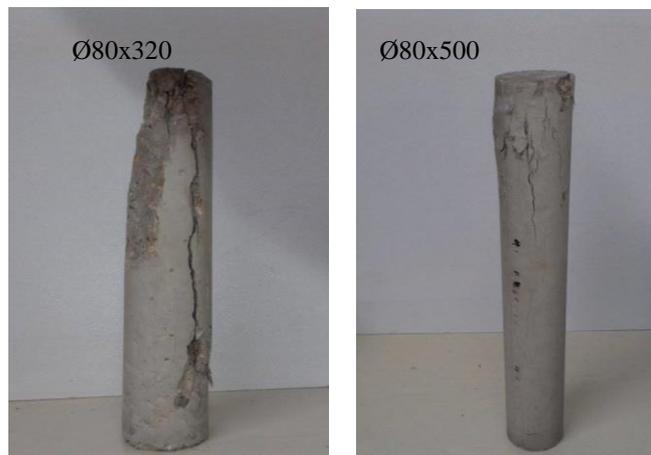
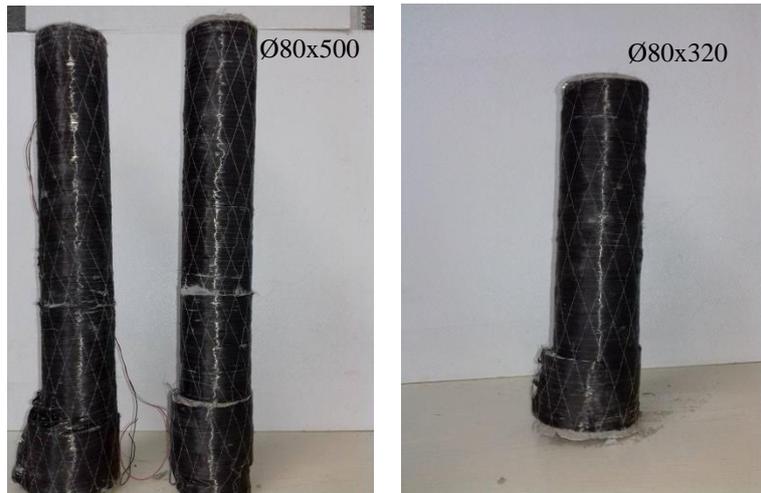


Figure V.22 Modes de rupture des spécimens cylindriques non confinés de type Ø80x320 et de type Ø80x500

Les colonnes de section circulaire de type Ø80x320 et de type Ø80x500 en béton confinées avec des enveloppes en CFRP ont toutes subi une rupture de l'enveloppe composite qui survient dans le tiers (1/3) supérieur ou inférieur de la hauteur de la colonne (Figure V.23) due à la formation de la rotule plastique ( $l_p$ ) aux extrémités des colonnes. Pour toutes les colonnes testées, le béton a été arraché dans les zones de rupture. L'épaisseur du béton arraché variait de 5 mm à 25 mm environ (figure V.24). D'autre part, aucune rupture, ni glissement du tissu composite n'ont été observés dans les zones de recouvrement du composite. Au niveau des zones de recouvrement ou des interfaces, le tissu composite n'a subi ni rupture ni glissement apparent.



**Figure V.23** Modes de rupture des spécimens cylindriques confinés de type et de type Ø80x320 et de type Ø80x500



**Figure V.24** Arrachement du béton avec l'enveloppe CFRP

#### V.4 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude et rapporte les modes de ruptures des colonnes confinées. Les spécimens de sections circulaires en béton confinées avec des matériaux composites ont présenté une allure ascendante, tandis que les diagrammes contrainte-déformation des spécimens de sections carrées présentent une branche post-pic descendante. La rupture des cylindres confinés est marquée par une rupture des fibres. Elle se produit prématurément, pour un niveau de contrainte inférieur à la contrainte ultime du composite.

## Chapitre VI : Analyse et Interprétation des Résultats

### VI.1 Introduction

Les résultats sont analysés en termes du niveau de confinement, de résistance en compression du béton non confiné, du type de la section transversale des spécimens confinés, du type de matériau composite, du diamètre des spécimens et de l'élançement géométrique.

A la lumière des résultats présentés numériquement et graphiquement dans le chapitre précédent, il est clair que le confinement des colonnes avec des enveloppes de FRP en général a eu un effet significatif sur leurs performances, résistance maximales et déformation correspondante, cependant, celle-ci est variable selon les séries de confinement adoptées. Pour l'ensemble des résultats obtenus, on a pu constater un accroissement de la capacité portante et de la déformabilité, que ce soit le type du matériau composite ou à la section transversale de la colonne confinée.

L'état ultime des colonnes en béton confinées en FRP se réfère à sa résistance à la compression et à sa déformation correspondante. Une grande capacité de charge et une large déformation latérale ont été observées pour tous les spécimens confinés par rapport aux spécimens non confinés. Pour les cylindres de béton confiné par CFRP, les échantillons offrent un gain moyen de 93% et 523% en termes de capacité de charge et de ductilité, respectivement.

Pour les spécimens confinés du béton de section carrée, le gain moyen était respectivement de 12% et 220% en termes de résistance et de ductilité. Comme nous pouvons s'y attendre, une augmentation significative de la capacité axiale et de la ductilité pour les colonnes confinées a été atteinte et ces propriétés mécaniques augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur des composites. Une valeur maximale de la résistance à la compression de 128 MPa a été enregistrée pour l'échantillon C160/320-B60-3C-2.

La moyenne de la résistance du béton confiné ( $f'_{cc}$ ) pour les échantillons circulaires est supérieure à celle des échantillons prismatiques carrés. Le gain en capacité axiale est plus important pour un béton faible qu'un béton normal ou bien à haute résistance.

Les réponses expérimentales contrainte-déformation des colonnes confinées ont été représentées sur les figures V.1 à VI.15. Elles sont formées de courbes à deux branches principales et distinctes dont la branche post-pic dépend principalement du taux de confinement du FRP (nombre de couches) ainsi que du type de la section transversale des spécimens confinés (circulaire ou carrée).

### VI.2 Courbes Contrainte-Déformation

#### VI.2.1 Béton Non Confiné

Le comportement en compression axiale du béton est essentiellement linéaire élastique jusqu'à ce que la charge atteigne environ 30% de la force de compression maximale  $f'_{cc}$  (zone OA). Dans la seconde zone, avec une contrainte de compression comprise entre 0.3 et 0.5  $f'_{co}$ , la rigidité présente une certaine réduction en raison d'une augmentation significative des fissures dans la zone de transition (zone AB). La troisième zone (zone BC, entre 0.5  $f'_{co}$  et

$0.75f'_{co}$ ) exhibe une nouvelle réduction de la rigidité due à l'amorçage de nouvelles fissures dans la pâte de ciment et de la propagation de la fissure instable qui continue à croître. Au-delà de ce niveau de contrainte, la déformation en compression augmente sous charge constante. Ceci résulte de la croissance de la fissure spontanée dans la zone de transition de la pâte de ciment ainsi que de la consolidation des micro-fissures (zone CD). Dans la dernière étape, la contrainte est réduite et provoque la localisation de la fissuration (zone DE) (Figure VI.1).

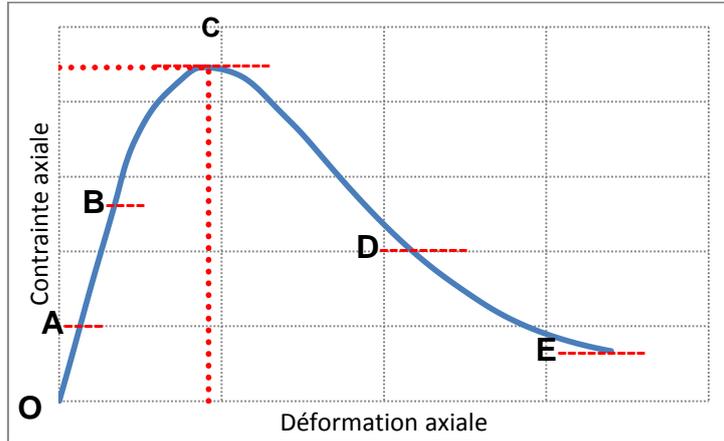


Figure VI.1 Comportement typique en compression du béton

### VI.2.2 Béton Confiné

Comme le béton non confiné se dilate latéralement, une pression de confinement s'opposant à cette dilatation améliore remarquablement sa performance. Typiquement, les courbes présentent une pente initiale qui suit celle du béton non confiné jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de grande déformation plastique. Selon l'efficacité du confinement, le niveau de contrainte de la zone plastique varie considérablement d'un essai à l'autre.

A partir des courbes contrainte-déformation (Figures V.1-V.15), on peut observer que les cylindres en béton confinés par GFRP et CFRP montrent une branche ascendante, alors que pour les spécimens de section carrée confinés par CFRP après que le béton atteint sa résistance, il se dégrade selon une branche de perte de résistance montrant une branche descendante.

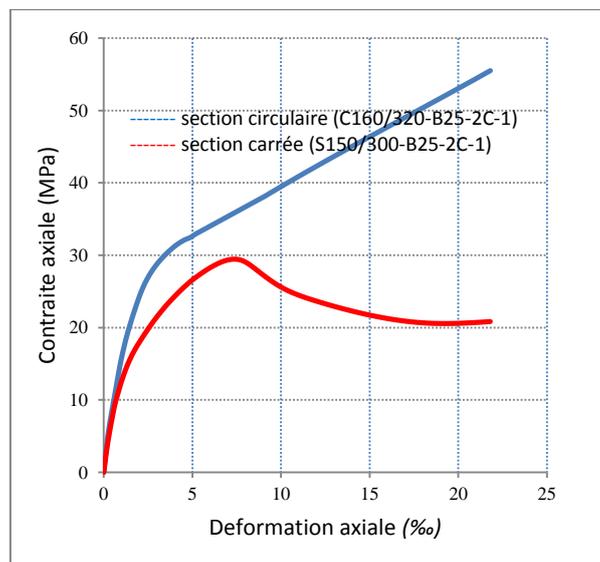
D'après les réponses des contraintes-déformation, on note que la réponse en compression du béton est largement influencée par le confinement. L'effet du confinement augmente la limite élastique du béton en compression ainsi que la déformation à la rupture, donc il retarde la dégradation du béton. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent leur propagation.

Les comportements contrainte-déformation des cylindres en béton confinés avec matériaux composites à base de fibres de carbone et à base de fibres de verre, suivent un comportement tri-linéaire. La première zone présente une zone élastique, la seconde comme une zone de transition avec un point d'inflexion, et la troisième zone en tant que zone plastique.

La première zone est une réponse approximativement linéaire gouvernée par la rigidité du béton non confiné, ce qui indique qu'aucun confinement n'est activé par les enveloppes de

composites. Après avoir atteint la résistance à la compression du béton non confiné, les relations contrainte-déformation des cylindres confinés changent de direction présentant une zone de transition où le point d'inflexion se trouve. Dans cette phase, le béton est fissuré et la force de confinement du «FRP» est activée. Dans la dernière étape, le béton est entièrement fissuré et la contrainte du béton confiné augmente linéairement avec l'augmentation de la contrainte dans le composite et atteint son maximum à la rupture de l'enveloppe «FRP» montrant une tendance ascendante.

Les allures de comportements des colonnes confinées par des enveloppes en matériaux composites à base de fibres de carbone ont montré une réponse typique bilinéaire avec une zone de transition. Dans la première phase, le comportement est linéaire, semblable à celui du béton non confiné ; ce qui montre que le comportement est peu affecté par l'enveloppe composite. La déformation résiduelle du béton est nulle durant cette phase de chargement. Lorsque la résistance de confinement et la déformation correspondante atteignent le point d'inflexion, les courbes indiquent que les paramètres de forme ont un effet significatif sur le comportement au stade post-élastique, ce qui signifie le début de la troisième zone. Dans cette étape, les courbes présentent un comportement linéaire jusqu'à la rupture de l'enveloppe où les courbes contrainte-déformation des échantillons prismatiques carrés montrent une tendance descendante, ce qui implique que la résistance à la compression ultime du béton confiné  $f'_{cu}$  est inférieure à sa résistance à la compression maximale  $f'_{cc}$ , d'où cette dernière est atteinte avant la rupture complète du composite «FRP» (figure VI.2).



**Figure VI.2** Courbe Contrainte-déformation des spécimens de section carrée et de section circulaire

**VI.3 Effet du degré de confinement de FRP sur les performances des spécimens confinés**

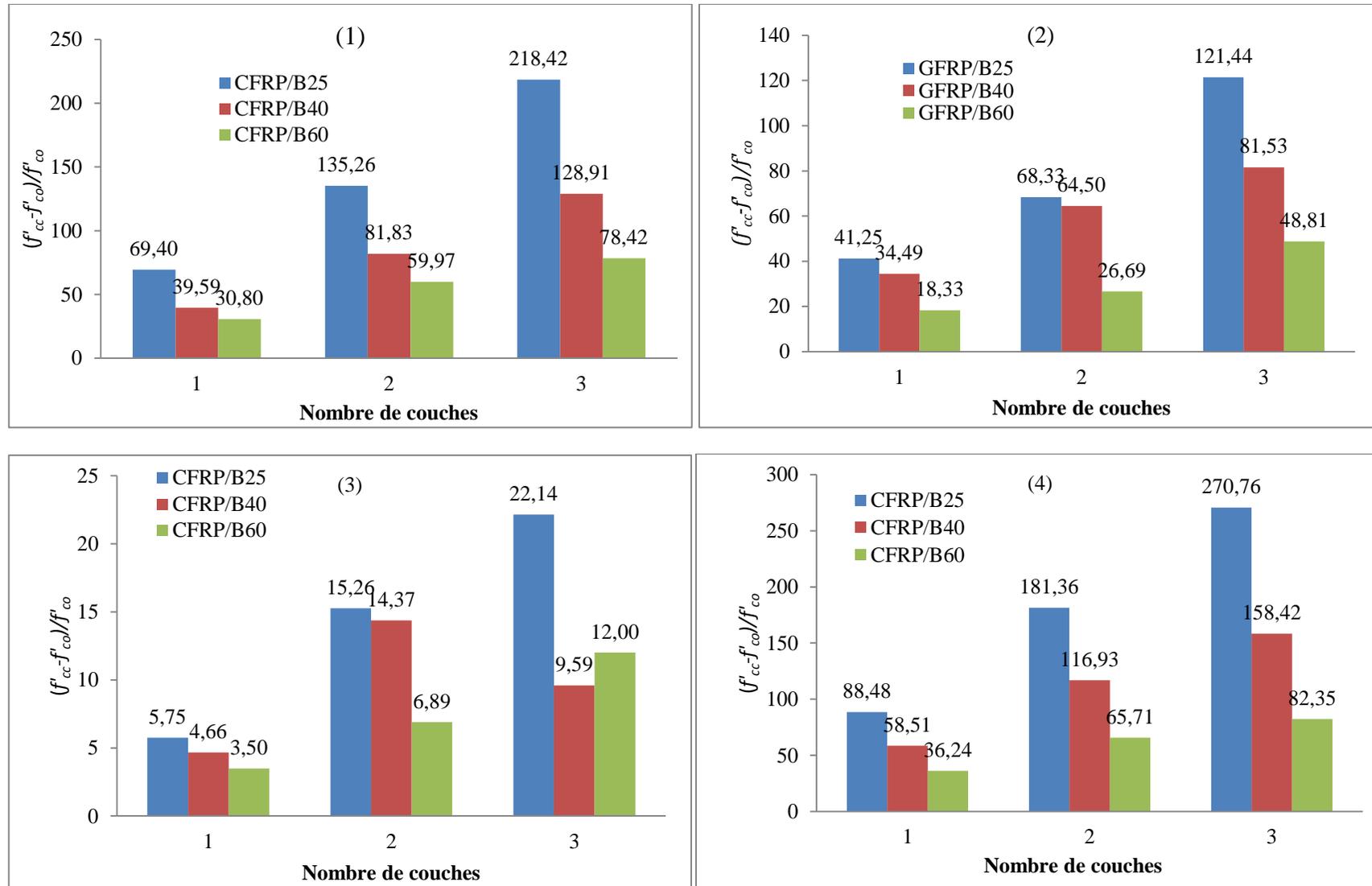
Les courbes Contrainte-Déformation montrent l'effet de la variation de la rigidité du confinement exprimée par le type du matériau composite utilisé et par le nombre de couches appliquées sur le comportement de spécimens de différentes dimensions. Sur chaque figure, les courbes contrainte-déformation de spécimens d'une même série de béton et de dimensions identiques (mêmes sections et même type de résistance) sont présentées.

La rigidité de la première branche des courbes de contrainte-déformation pour la majorité des colonnes reste constante en fonction du nombre de plis de confinement (une augmentation du nombre de couches du composite «FRP» n'affecte pas la pente de la branche initiale de la relation contrainte-déformation). La deuxième est variable en fonction du nombre de plis de confinement. La rigidité a tendance à augmenter avec le nombre de plis de confinement. Le confinement par matériaux composites inverse la tendance observée dans les colonnes non confinées.

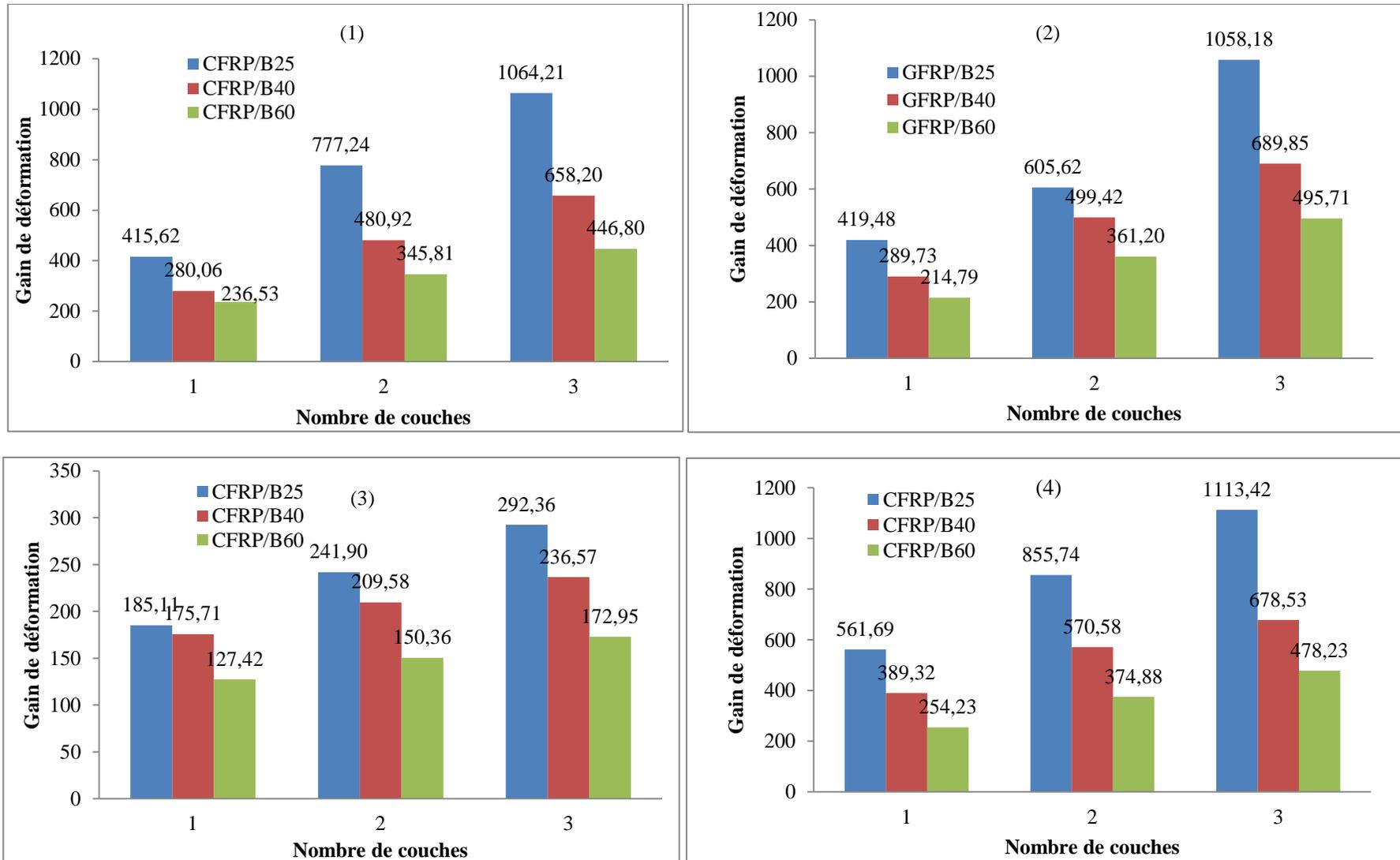
Les histogrammes représentés dans les figures VI.3 et VI.4 montrent l'augmentation des gains de résistance et de déformation en fonction du nombre de couches appliquées. Les cylindres confinés avec une couche de CFRP présentent des gains de résistance et de déformation variant entre 30 % à 80% et 200 % à 350%, respectivement. Tandis que, les mêmes cylindres confinés à l'aide de deux couches présentent des augmentations de résistance variant entre 70 % à 150 % et 320 % à 600%, respectivement. Les cylindres confinés à l'aide de trois plis présentent des augmentations de résistance variant entre 150 % à 220 % et 400 % et 950%, respectivement.

Les spécimens de section carrée confinés par CFRP présentent moins de gain en termes de résistance et de ductilité par rapport aux cylindres. Les spécimens enveloppés par une couche de CFRP variant entre 4 % à 8% et 140%et 160%, respectivement. Tandis que, les spécimens confinés à l'aide de deux couches présentent des augmentations de résistance variant entre 8 % à 15 % et 160 %et 240%, respectivement. Les spécimens confinés à l'aide de trois couches présentent des augmentations de résistance variant entre 13 % à 22 % et 160% et 300%, respectivement.

Donc, pour l'ensemble des spécimens testés, l'augmentation de la rigidité du confinement entraîne à la fois, une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité.



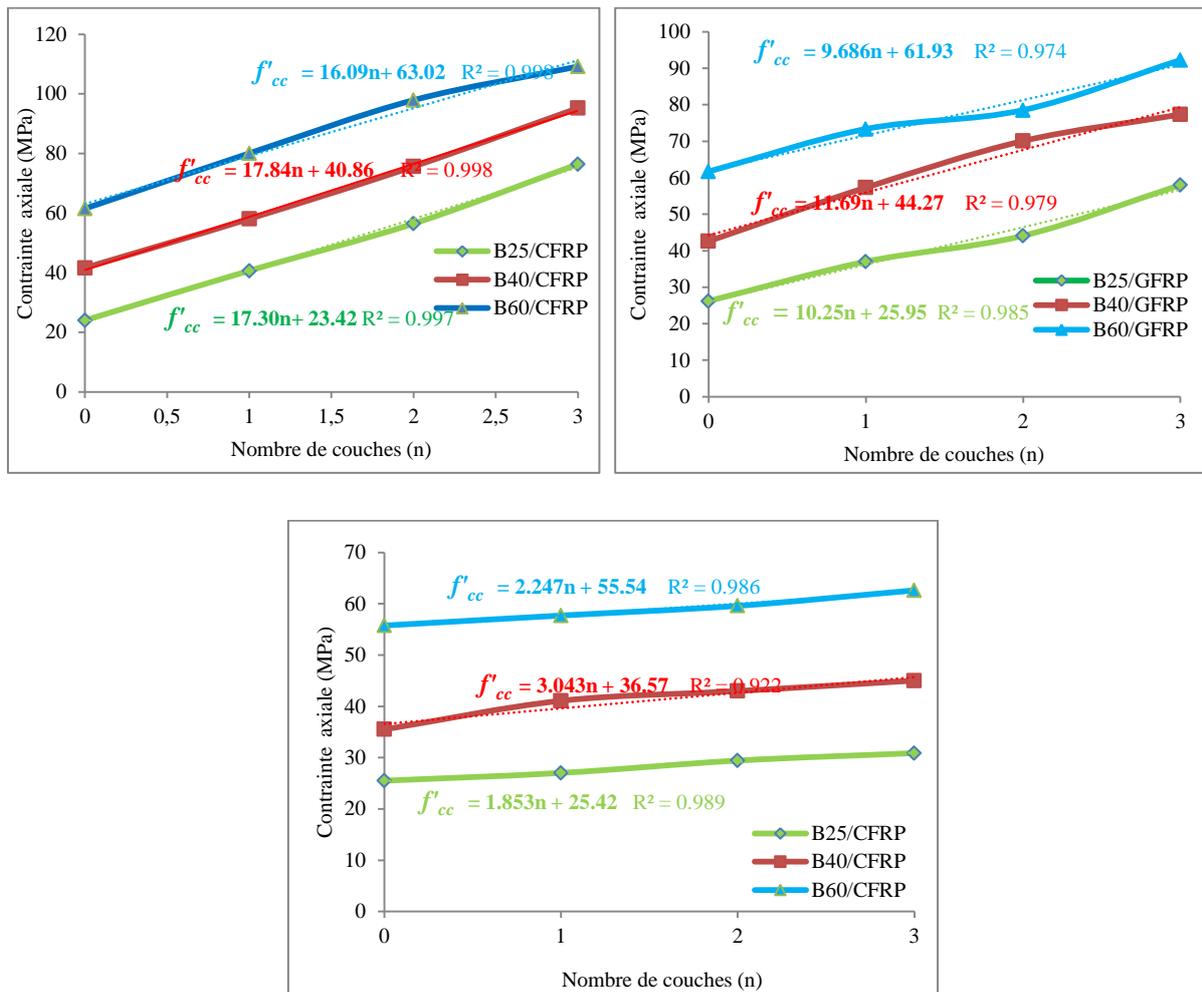
**Figure VI.3** Effet du nombre de couches sur le gain de résistance (1) Cylindre Ø 160\*320/CFRP, (2) Cylindre Ø160\*320/GFRP, (3) Prismatique carré 150\*150\*300, (4) Cylindre Ø80\*500/CFRP



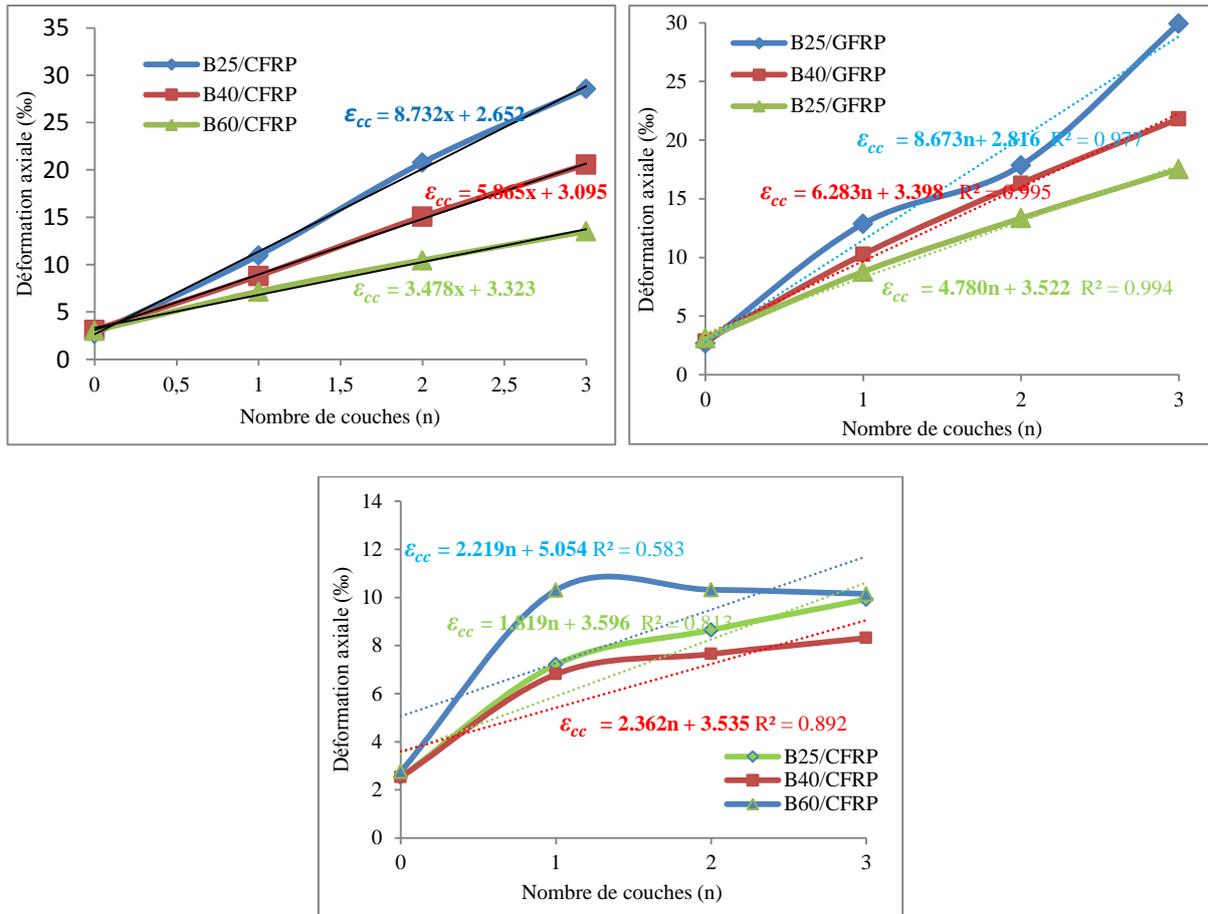
**Figure VI.4** Effet du nombre de couches sur le gain de déformation (1) Cylindre Ø 160\*320/CFRP, (2) Cylindre Ø 160\*320/GFRP, (3) Prismatique carré 150\*150\*300, (4) Cylindre Ø 80\*500/CFRP

D'autre part, les corrélations obtenues à partir des figure VI.5 et VI.6, montrent que les variations de la résistance maximale en compression ( $f'_{cc}$ ) et de la déformation axiale correspondante ( $\epsilon'_{cc}$ ) en fonction du nombre de couches [n] du composite «FRP» sont linéaires dans la majorité des cas.

A partir de l'analyse de ces corrélations, on peut conclure que l'augmentation du nombre de feuilles conduit non seulement à une augmentation de la résistance à la compression mais également à une augmentation notable de la capacité de déformation. Les corrélations montrent que dans la plupart des cas, la résistance maximale et la déformation correspondante ont des tendances linéaires avec le nombre de couches du composite.



**Fig.VI.5** Variation de la résistance en fonction de nombre de couches (a) : Cylindres Ø160/320-CFRP, (b) Cylindres Ø160/320-GFRP, (c) Prismatiques carrés 150/300-CFRP



**Fig .VI.6** Variation de la déformation en fonction de nombre de couches (a) : Cylindres Ø160/320-CFRP, (b) Cylindres Ø160/320-GFRP, (c) Prismatiques carrés 150/300-CFRP

#### VI.4 Effet de la résistance du béton

L'influence de la résistance initiale du béton (résistance du béton non confiné) est étudiée en comparant la performance axiale des spécimens confinés par FRP avec trois classes de résistance de béton différentes (B25, B40 et B60).

Les figures VI.7 et VI.8 illustrent respectivement l'évolution des rapports de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et de déformation ( $\epsilon'_{cc}/\epsilon'_{co}$ ) des cylindres Ø160x320 mm en fonction de la résistance du béton non confiné.

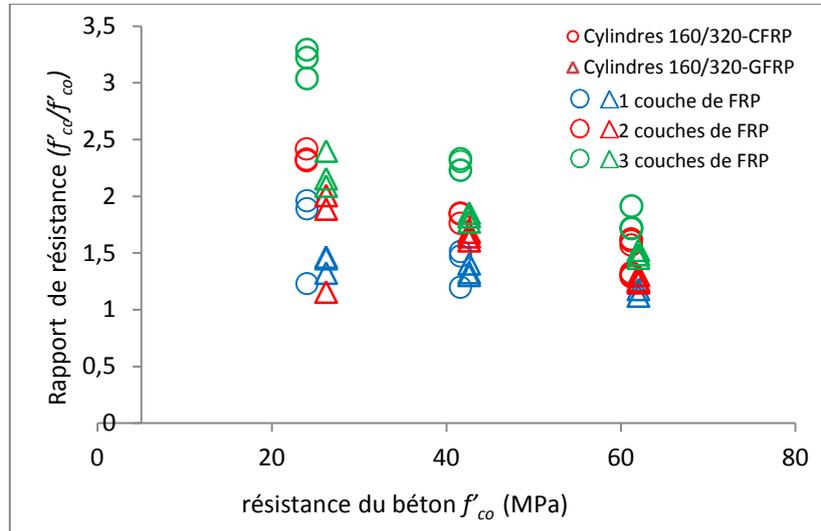


Figure VI.7 Rapports de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) vs. Résistance du béton ( $f'_{co}$ )

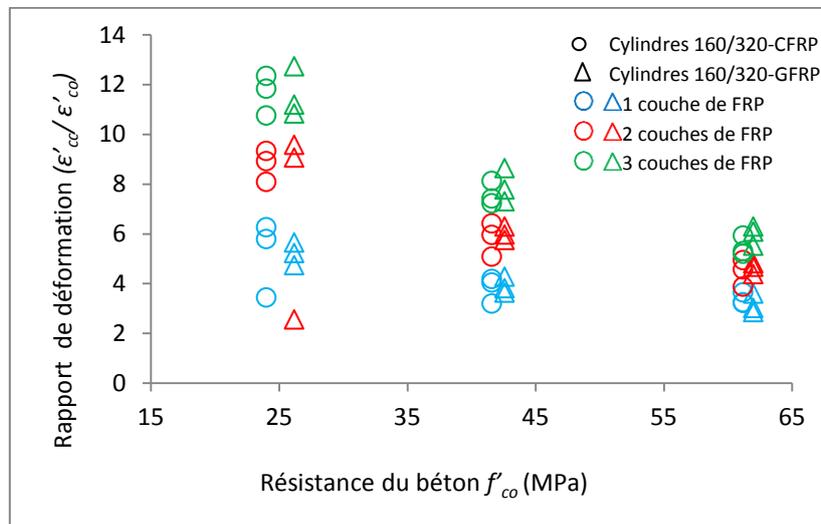


Figure VI.8 Rapports de déformation ( $\epsilon'_{cc}/\epsilon'_{co}$ ) vs. Résistance du béton ( $f'_{co}$ )

Ces figures montrent que l'influence du paramètre 'résistance du béton non confiné' sur les rapports de résistance et de déformation des colonnes confinées en fixant tous les autres paramètres à savoir : le type de matériaux composites (CFRP et GFRP), le degré de confinement (une couche, deux couches et trois couches) et le type de la section des spécimens, a été remarquable pour toutes les séries de confinement.

Pour les trois types de béton étudiés, les spécimens confinés présentent des résistances à la rupture et des déformations axiales plus élevées que celles obtenues à partir des spécimens non confinés.

On peut le voir sur ces figures que, en général, une augmentation de la résistance à la compression du béton  $f'_{co}$  entraîne une diminution globale à la fois du rapport d'augmentation de la résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et du rapport d'augmentation de la déformation ( $\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$ ).

Les histogrammes établis dans les figures VI.9 et VI.10 mettent en évidence l'efficacité du confinement en termes de résistance et de déformation des trois séries de béton utilisés. Tous les résultats des séries de confinement ont été présentés en fonction de la résistance du béton non confiné pour illustrer l'influence de la résistance du béton non confiné sur les gains en termes de résistance et de déformation des spécimens confinés par matériaux composites.

Pour les trois types de béton étudiés, les spécimens confinés présentent des résistances à la rupture et des déformations axiales plus élevées que celles obtenues à partir des spécimens non confinés.

On peut le voir sur ces figures que, en général, une augmentation de la résistance à la compression du béton  $f'_{co}$  entraîne une diminution globale à la fois du rapport d'augmentation de la résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et du rapport d'augmentation de la déformation ( $\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$ ).

Les histogrammes établis dans les figures VI.9 et VI.10 mettent en évidence l'efficacité du confinement en termes de résistance et de déformation des trois séries de béton utilisés. Tous les résultats des séries de confinement ont été présentés en fonction de la résistance du béton non confiné pour illustrer l'influence de la résistance du béton non confiné sur les gains en termes de résistance et de déformation des spécimens confinés par matériaux composites.

Les cylindres Ø160 x 320 confectionnés par un béton B25 et confinés avec une couche de CFRP offrent des gains moyens de résistance et de déformation axiale de 69 % et de 415 %, respectivement. Tandis que pour deux couches de CFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 135%, et 777%, respectivement. Cependant, le confinement par trois couches de CFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 218%, et 1064%, respectivement.

Pour un béton de résistance moyenne B40 confinés par CFRP, les résultats montrent que :  
 Pour une couche de CFRP, les cylindres ont fourni des gains moyens de résistance et de déformation axiale respectivement de 39 %, et de 280 %. Cependant, pour deux couches de CFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 81 % et 480%. Tandis que, le confinement par trois couches de CFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 128%, et 658%, respectivement.

Dans le cas du béton de haute résistance et pour une couche de CFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de : 30 % et de 230 %. Cependant, pour deux couches de CFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 59 % et 341%. Tandis que, le confinement par trois couches de CFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 78%, et 446%, respectivement.

Les cylindres Ø160 x 320 confectionnés par un béton B25 et confinés avec une couche de GFRP offrent des gains moyens de résistance et de déformation axiale de 41 % et de 419 %, respectivement. Tandis que pour deux couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 68 %, et 605 %, respectivement. Cependant, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 121%, et 1058%, respectivement.

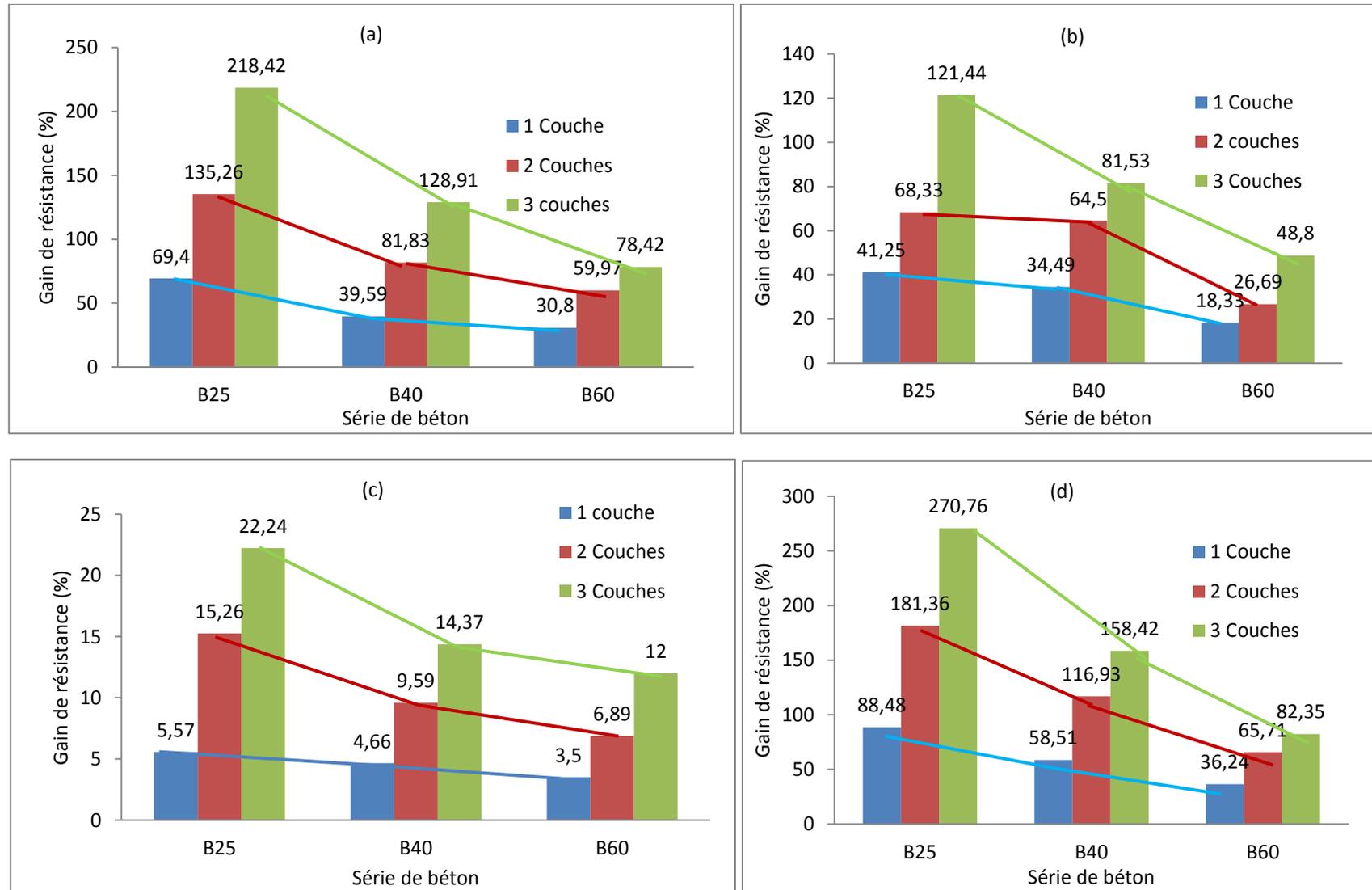
Pour un béton de résistance moyenne B40 confinés par GFRP, les résultats montrent que :  
Pour une couche de GFRP, les cylindres ont fourni des gains moyens de résistance et de déformation axiale respectivement de 34 %, et de 289 %. Cependant, pour deux couches de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 64 % et 499%. Tandis que, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 81%, et 689%, respectivement.

Dans le cas du béton de haute résistance et pour une couche de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de : 18 % et de 214 %. Cependant, pour deux couches de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 26 % et 361 %. Tandis que, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 48%, et 495 %, respectivement.

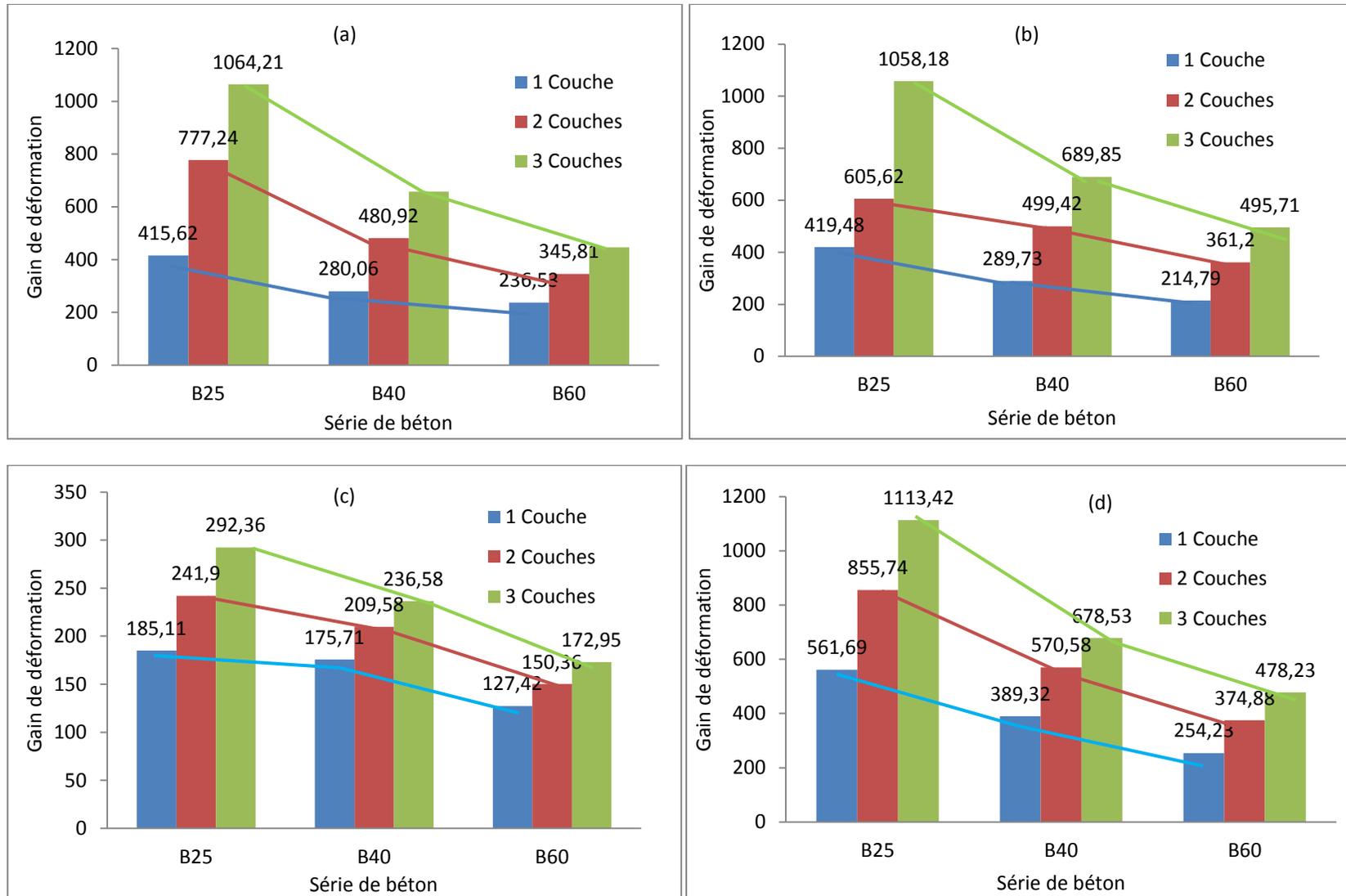
Les spécimens prismatiques carrés 150X150X300 confectionnés par un béton B25 et confinés avec une couche de GFRP offrent des gains moyens de résistance et de déformation axiale de 69 % et de 415 %, respectivement. Tandis que pour deux couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 135 %, et 777 %, respectivement. Cependant, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 218 %, et 1064%, respectivement.

Pour un béton de résistance moyenne B40 confinés par GFRP, les résultats montrent que :  
Pour une couche de GFRP, les cylindres ont fourni des gains moyens de résistance et de déformation axiale respectivement de 39 %, et de 280 %. Cependant, pour deux couches de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 81 % et 480 %. Tandis que, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 128 %, et 658 %, respectivement.

Dans le cas du béton de haute résistance et pour une couche de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de : 30 % et de 230 %. Cependant, pour deux couches de GFRP, des gains moyens de résistance et de déformation axiale ont été respectivement de l'ordre de 59 % et 341 %. Tandis que, le confinement par trois couches de GFRP, les gains moyens de résistance et de déformation axiale sont environ 78 %, et 446 %, respectivement.



**Figure VI.9** Effet de la résistance du béton ( $f'_{co}$ ) sur le gain de résistance des spécimens confinés : (a) Cylindres 160x320/CFRP, (b) Cylindres 160x320/GFRP, (c) Prismatiques carrées/CFRP, (d) Cylindres 80x3600/CFRP



**Figure VI.10** Effet de la résistance du béton ( $f'_{co}$ ) sur le gain de déformation des spécimens confinés : (a) Cylindres 160x320/CFRP, (b) Cylindres 160x320/GFRP, (c) Prismatiques carrées/CFRP, (d) Cylindres 80x3600/CFRP

Certaines observations importantes peuvent être faites à la base des résultats présentés. On peut noter que pour la même série de confinement, les cylindres de béton faible *B25* ont produit des gains plus élevés en termes de résistance et de déformation que ceux des cylindres de béton *B40* et *B60*. L'augmentation de la capacité de charge et de la ductilité est toujours plus élevée pour la résistance inférieure du béton non confiné.

À la lumière de ces résultats, il est évident que l'efficacité de confinement pour les prismatiques carrées de béton à faible résistance est plus élevée et l'influence de la résistance du béton non confiné sur la résistance maximale et la déformation correspondante des spécimens prismatiques carrées en béton de FRP ne peut être négligée.

En général, les gains en termes de résistance et de déformation des spécimens en béton confinés en FRP diminuent lorsque la résistance du béton non confiné augmente. En d'autres termes, une plus grande résistance initiale à la compression du béton réduit l'effet de confinement par matériaux composites. Cela pourrait s'expliquer par le fait que plus la résistance du béton non confiné est élevée; moins le rapport eau/ciment est important. En conséquence, la densité de la matrice de ciment augmente, ce qui empêche la formation de fissures verticales. Donc, le béton ayant une résistance à la compression plus élevée présente une dilatation latérale inférieure sous compression par rapport au béton ayant une résistance à la compression inférieure. Comme l'action de confinement des feuilles de FRP dépend de l'expansion latérale du béton, une résistance à la compression du béton plus élevée réduit l'effet de confinement.

Cela suggère que l'amélioration de la résistance du béton par le confinement du FRP dépend au moins partiellement de la résistance du béton non confiné. Cela serait dû à des dilatations latérales plus faibles des bétons à plus forte résistance, ainsi qu'à d'autres caractéristiques physiques fondamentales du mélange de béton se comportant comme un matériau granulaire. Il est probable que le développement et le déplacement des plages de cisaillement seront différents dans les bétons de résistance à la compression non confinée différente. Ce phénomène est probablement dû à la réduction bien connue de la déformabilité du béton à haute résistance par rapport au béton de faible résistance. Cette rigidité plus élevée du béton de haute résistance limite l'expansion latérale du noyau qui active les enveloppes de FRP.

### VI.5 Effet du type de composites

Les figures VI.11 et VI.12 illustrent l'influence du type de FRP sur la résistance maximale et la déformation correspondante des spécimens de section circulaire et carrée. On a utilisé deux types différents d'enveloppes en PRF, matériaux composites à base de fibres de carbone CFRP et matériaux composites à base de fibres de verre GFRP. Les résultats montrent que les conditions ultimes, les résistances à la compression ( $f_{cc}$ ) et les déformations correspondantes ( $\varepsilon_{cc}$ ), sont fortement influencées par le type du matériau composite FRP.

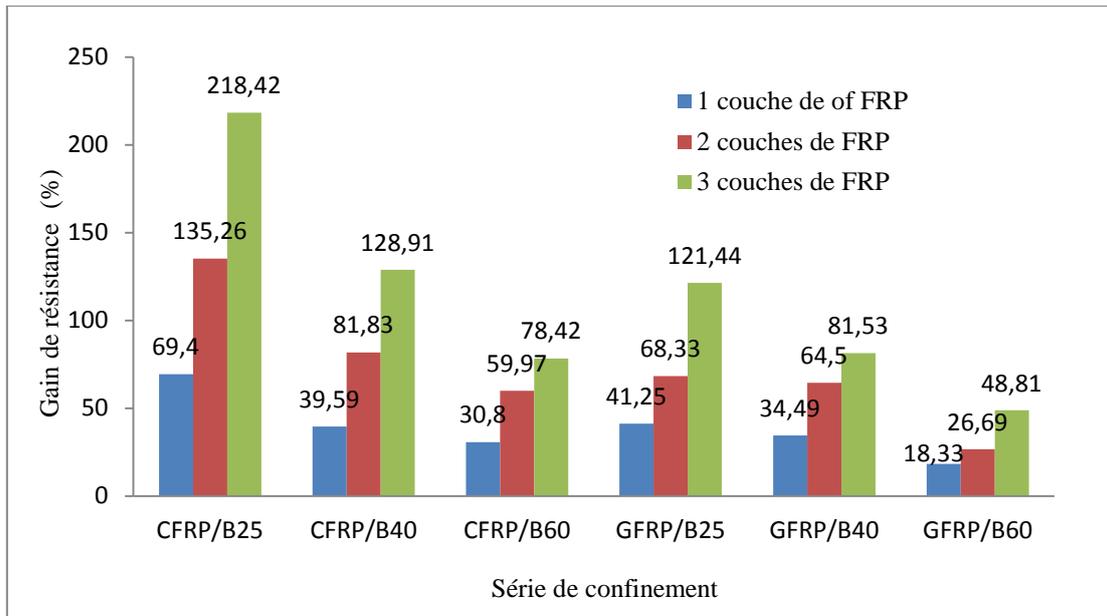
Les histogrammes montrent que l'augmentation de la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques confinées avec une couche de CFRP pour les trois séries de béton étudiées ayant des classes de résistances de B25 MPa, de B40 MPa et de B60 MPa est de l'ordre respectivement de : 69%, 39% et 30%. Tandis que pour deux couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 135%, 81% et 59%. Cependant, pour trois couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 218 %, 128 % et 78%.

L'augmentation de la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques confinées avec une couche de GFRP pour les trois séries de béton étudiées B25, B40 et B60 est de l'ordre respectivement de : 41%, 34% et 18%. Tandis que pour deux couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 68 %, 64 % et 26 %. Cependant, pour trois couches de GFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 121 %, 81 % et 48 %.

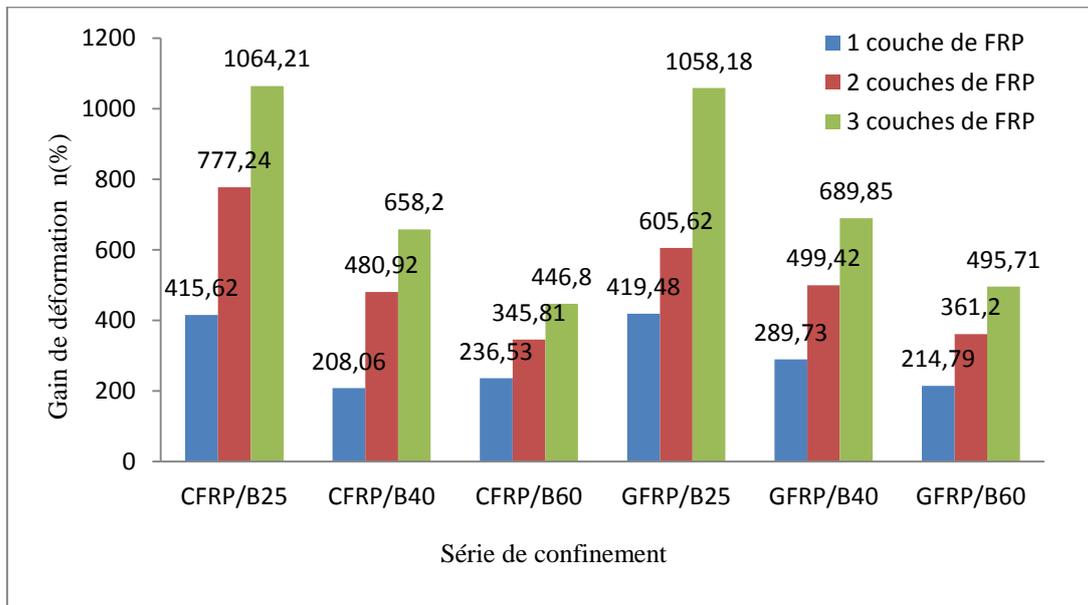
215%, 208% et 236%,

Les histogrammes montrent que l'augmentation de la déformation à la compression des éprouvettes cylindriques confinées avec une couche de CFRP pour les trois séries de béton étudiées ayant des classes de résistances de B25 MPa, de B40 MPa et de B60 MPa est de l'ordre respectivement de : 215%, 208% et 236%. Tandis que pour deux couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 605%, 480% et 345%. Cependant, pour trois couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 1064%, 658%, 446%.

L'augmentation de la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques confinées avec une couche de GFRP pour les trois séries de béton étudiées B25, B40 et B60 est de l'ordre respectivement de : 419%, 289% et 214%. Tandis que pour deux couches de CFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 777 %, 499 % et 31 %. Cependant, pour trois couches de GFRP, l'augmentation de la résistance pour les bétons B25, B40 et B60 l'ordre respectivement de : 1059 %, 690 % et 496%.



**Figure VI.11** Effet du type de composites sur la résistance du béton confiné



**Figure VI.12** : Effet du type de composites sur la déformation du béton confiné

Les CFRP offrent une meilleure performance en termes de résistance par rapport aux GFRP, tandis que les GFRP offrent des augmentations supérieures en termes de déformation axiale et radiale par rapport aux CFRP.

Comme on peut s'y attendre selon l'équation de conception (1), on peut voir que plus le module d'élasticité du composite FRP est élevé, plus la contrainte de confinement latérale est grande, et plus le confinement des échantillons de béton est meilleur. Par conséquent, comme les fibres de verre ont un module d'élasticité inférieur à celui des fibres de carbone, l'épaisseur du GFRP doit être environ deux fois celle du CFRP.

Par conception, le CFRP doit être utilisé pour apporter une plus forte augmentation de la résistance et une ductilité modérée, alors que le GFRP devrait être utilisée pour fournir une plus grande ductilité et une augmentation modérée de la résistance.

## VI.6 Effet du type de la section transversale du béton confiné

### VI.6.1 Capacité axiale et déformation

Les figures VI.13 et VI.14 et les tableaux VI.1 et VI.1 reflètent l'effet du paramètre de forme (section transversale) des spécimens en béton sur le comportement des spécimens de section circulaire et de section carrée confinés par matériaux composites «CFRP». On peut clairement remarquer que les contraintes maximales à la rupture et les déformations correspondantes des spécimens confinés étaient plus élevées que celles des spécimens non confinés.

Pour le béton non confiné, les spécimens de section carrée présentent des contraintes à la compression presque identique à celles des éprouvettes cylindriques, sachant que les bétons utilisés pour la confection des deux formes sont identiques, cependant cette égalité n'est pas respectée dans le cas du béton confiné avec CFRP.

Dans le cas du béton confiné, les résultats montrent que les gains en termes de résistances maximales et de déformations correspondantes sont inversées au profit des éprouvettes cylindriques après confinement par matériaux composites à base de fibres de carbone CFRP. Cette différence observée après confinement est inévitablement due à l'influence de la forme géométrique de la section transversale du fait que les autres paramètres sont fixés dans chaque comparaison.

Les histogrammes établis dans les figures VI.13 et VI.14 montrent que l'augmentation de la résistance maximale à la compression des éprouvettes cylindriques ( $\varnothing 160 \times 320$ ) confinées avec 1 couche, 2 couches ( ) et 3 couches ( ( ) ) de CFRP pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes de résistances de 25 MPa, de 40 MPa et de 60 MPa, a été de l'ordre respectivement de : 69%, 40% et 31%, (135%, 82% et 60%) et ((218%, 129% et 78%)). Tandis que pour les spécimens de section carrée (150x150x300), cette augmentation de résistance a été respectivement de l'ordre de : 6%, 5% et 3%, (15%, 10% et 7 et ((22%, 14% et 12%)).

Les histogrammes établis dans les figures VI.13 et VI.14 montrent les augmentations de la résistance maximale à la compression des éprouvettes cylindriques ( $\varnothing 160 \times 320$ ) suivant :

- Pour une (1) couche de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 69%, 40% et 31%.
- Pour deux (2) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 135%, 82% et 60%.
- Pour trois (3) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 1218%, 129% et 78%.

Tandis que pour les spécimens de section carrée (150x150x300), cette augmentation variait:

- Pour une (1) couche de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 6%, 5% et 3%
- Pour deux (2) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 15%, 10% et 7 et
- Pour trois (3) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 22%, 14% et 12%.

Les augmentations de la déformation axiale correspondante à la résistance maximale des éprouvettes cylindriques ( $\varnothing 160 \times 320$ ) confinées variaient:

- Pour une (1) couche de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 416%, 280% et 236%.
- Pour deux (2) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 777%, 480% et 345%.
- Pour trois (3) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 1064%, 658% et 446%.

Cependant pour les spécimens de section carrée ( $150 \times 150 \times 300$ ), cette augmentation variait:

- Pour une (1) couche de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 185%, 175% et 127%,
- Pour deux (2) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 241%, 209% et 150%
- Pour trois (3) couches de CFRP et pour les trois séries de béton étudiés ayant des classes B25, B40 et B60 sont de l'ordre respectivement de : 292%, 236 et 173%.

Les résultats ont également montré que les valeurs moyennes des déformations radiales ( $\epsilon_r$ ) enregistrées au moment de la défaillance des spécimens pour les trois séries de béton testées sont de l'ordre de 10,47 ‰ pour les spécimens de section carrée ( $150 \times 150 \times 300$  mm) et d'environ 11,06 ‰ pour les éprouvettes cylindriques ( $\varnothing 160 \times 320$  mm), respectivement. Ces déformations moyennes représentent un rapport de déformation ( $\epsilon_{h,rep}/\epsilon_{fu}$ ) de l'ordre de 74,81 et 79,04 % de la déformation ultime du composite  $\epsilon_{fu}$  14 ‰. Ce qui montre que la capacité de déformation du confinement est plus bénéfique dans les spécimens de section circulaire que dans le cas des spécimens de section carrée.

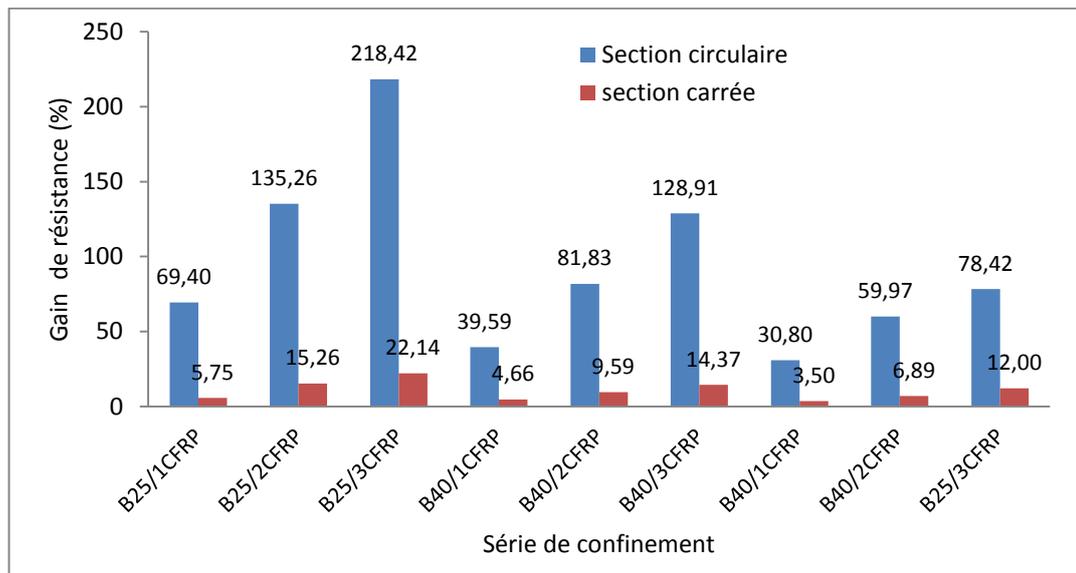


Figure VI.13 Gain de résistance des spécimens de section carrée et de section circulaire

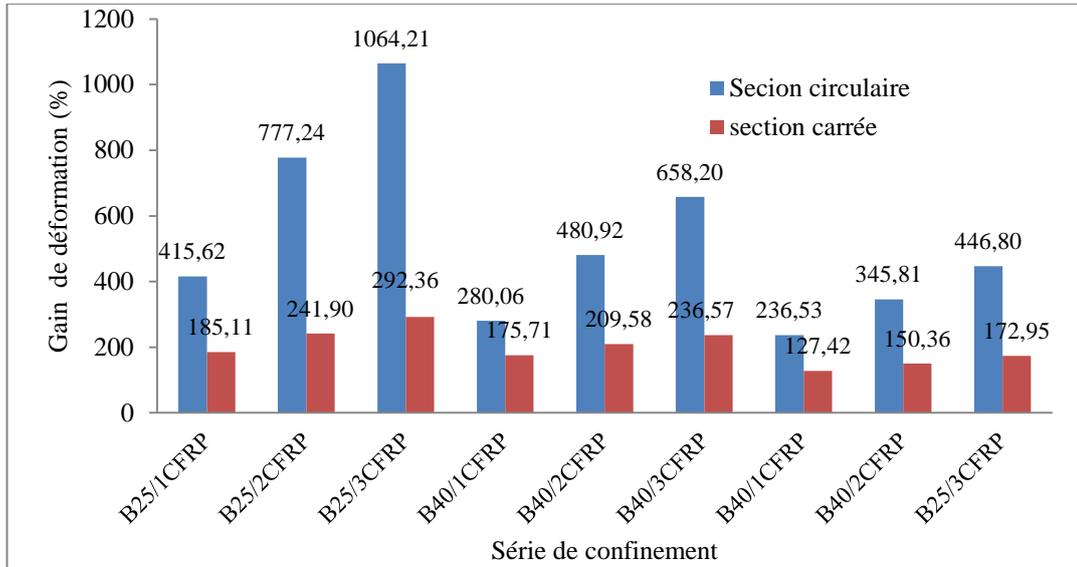


Figure VI.14 Gain de déformation des spécimens de section carrée et de section circulaire

Les tableaux VI.1 et VI.2 comparent respectivement la résistance maximale et la déformation axiale correspondante des spécimens de section circulaire et de section carrée. La réduction moyenne de la résistance et de la ductilité des échantillons carrés par rapport aux spécimens circulaires est d'environ 90% et 65%, respectivement. L'augmentation de la résistance et de la contrainte due au confinement est beaucoup plus importante pour les spécimens circulaires que pour les spécimens carrés.

Tableau VI.1 Résistance axiale (spécimen circulaire Ø160x320mm et spécimen prismatique carré 150x150x300mm)

Specimen	Résistance moyenne $f_{cc}$ (Mpa)	$f_{cc}/f_{co}$	Specimen	Résistance moyenne $f_{cc}$ (Mpa)	$f_{cc}/f_{co}$	% diminution de la résistance des spécimens carrés par rapport aux spécimens circulaires
C160/320-B25-1C	40.66	16.66	C160/320-B25-1C	27.01	1.51	-90.94
C160/320-B25-2C	56.46	32.46	C160/320-B25-2C	29.43	3.93	-87.89
C160/320-B25-3C	76.42	52.42	C160/320-B25-3C	30.87	5.37	-89.76
C160/320-B40-1C	58.07	16.47	C160/320-B40-1C	41.08	1.58	-90.41
C160/320-B40-2C	75.64	34.04	C160/320-B40-2C	42.98	3.48	-89.78
C160/320-B40-3C	95.23	53.63	C160/320-B40-3C	45.01	5.51	-89.73
C160/320-B60-1C	80.05	18.55	C160/320-B60-1C	57.70	1.95	-89.48
C160/320-B60-2C	97.90	36.4	C160/320-B60-2C	59.59	3.84	-89.45
C160/320-B60-3C	109.13	47.63	C160/320-B60-3C	62.44	6.96	-85.39

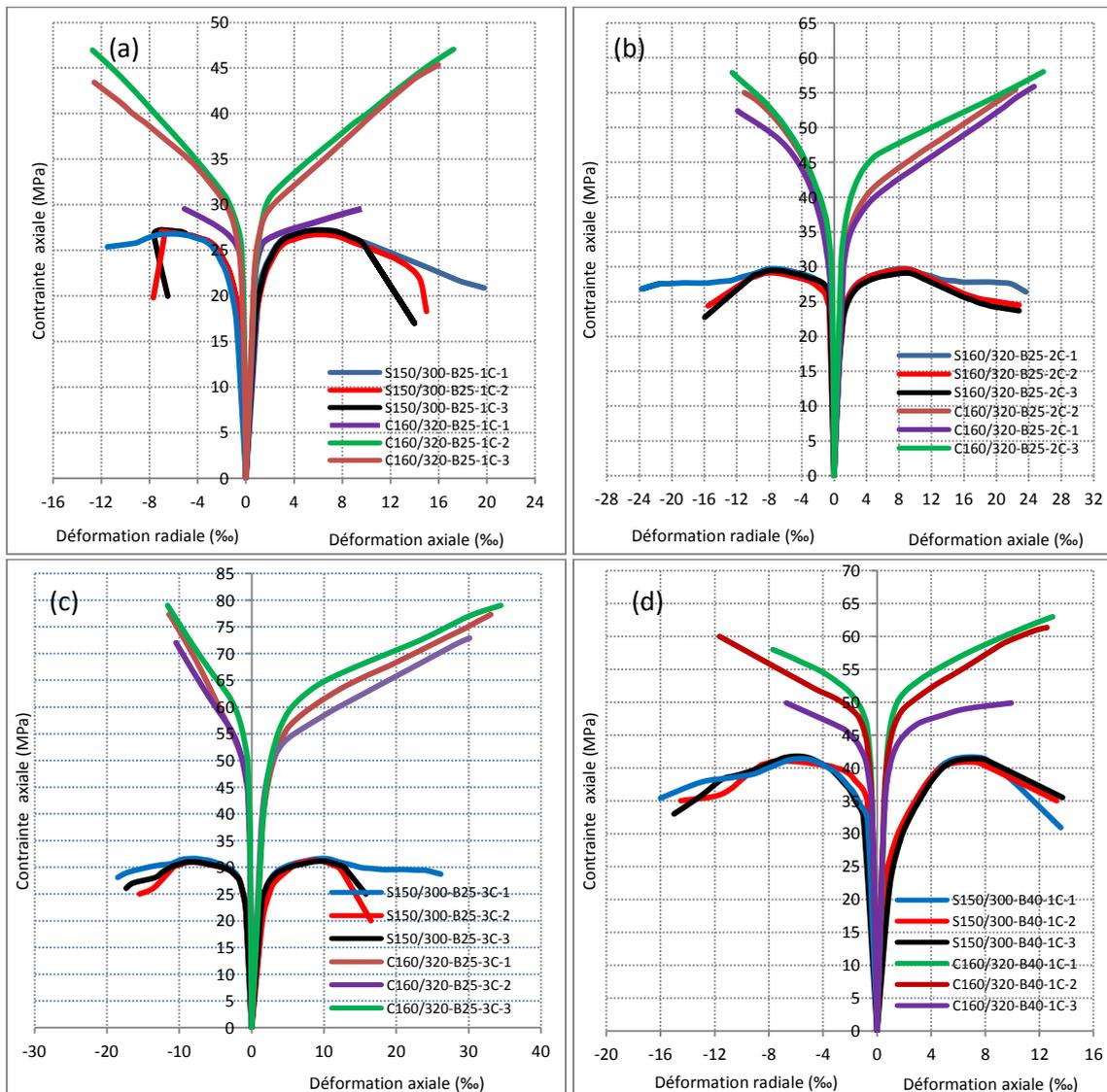
Tableau VI.2 Déformation axiale (spécimen circulaire Ø160x320mm et spécimen prismatique carré 150x150x300mm)

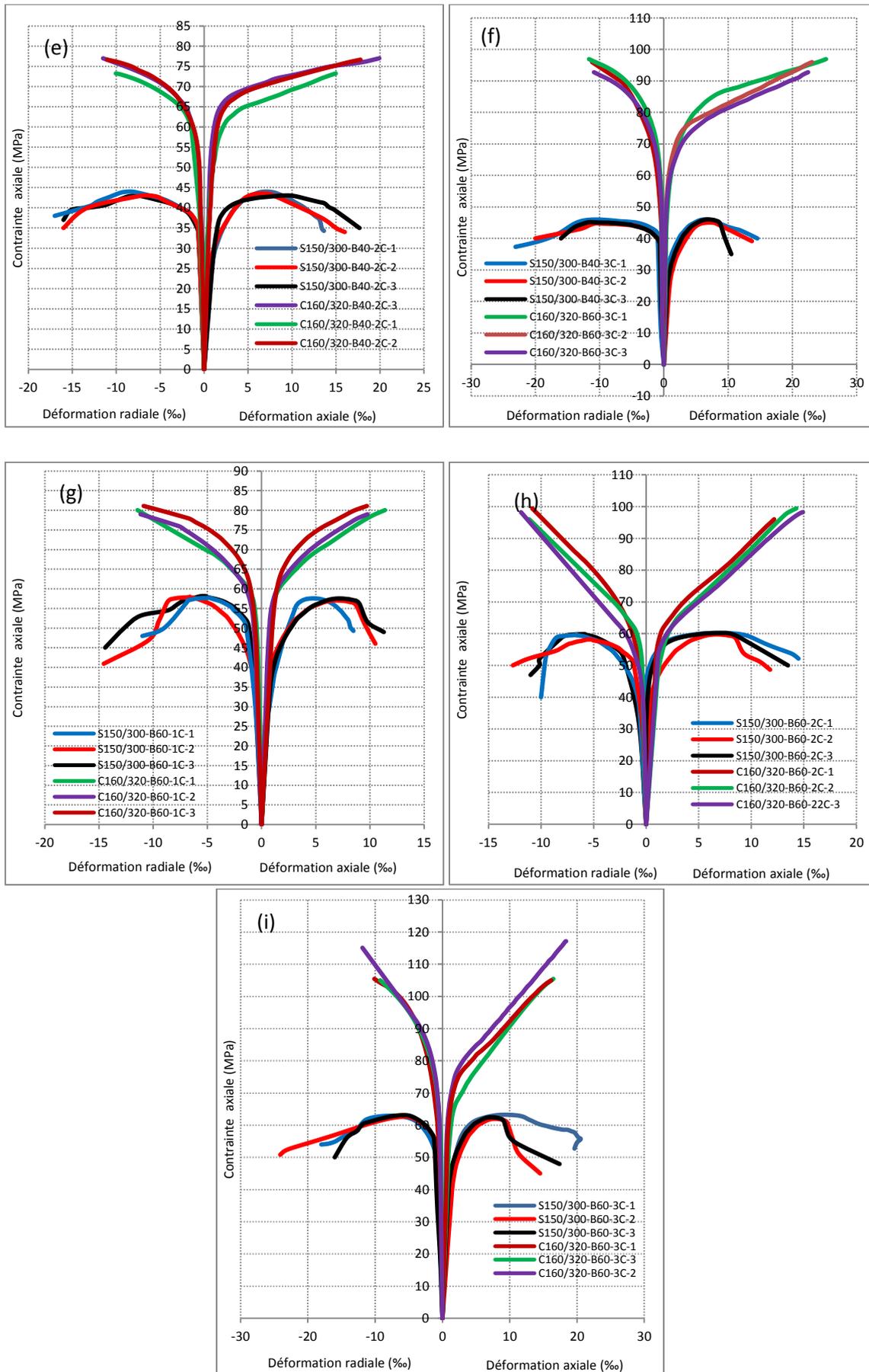
Specimen	Déformation moyenne ( $\epsilon_{cc}$ )	$\epsilon_{cc} - \epsilon_{co}$	Spécimen	Déformation moyenne ( $\epsilon_{cc}$ )	$\epsilon_{cc} - \epsilon_{co}$	% diminution de la déformation des spécimens carrés par rapport aux spécimens circulaires
C160/320-B25-1C	13.97	11.26	C160/320-B25-1C	7.21	4.68	-58.44
C160/320-B25-2C	23.77	21.06	C160/320-B25-2C	8.65	6.12	-70.94
C160/320-B25-3C	31.55	28.84	C160/320-B25-3C	9.92	7.39	-74.38
C160/320-B40-1C	11.82	8.71	C160/320-B40-1C	6.81	4.28	-50.86
C160/320-B40-2C	18.06	14.95	C160/320-B40-2C	7.645	5.11	-65.79
C160/320-B40-3C	23.58	20.47	C160/320-B40-3C	8.314	5.784	-71.74
C160/320-B60-1C	11.47	8.44	C160/320-B60-1C	6.75	4.00	-52.61
C160/320-B60-2C	11.91	8.89	C160/320-B60-2C	6.97	4.22	-52.53
C160/320-B60-3C	10.42	7.40	C160/320-B60-3C	8.29	5.53	-25.27

## VI.6.2 Courbes Contrainte-Déformation

Dans la figure VI.15, nous avons superposé les courbes contraintes-déformation des spécimens de sections circulaires (cylindres  $\text{\O}160 \times 320$  mm) avec celles des spécimens prismatiques carrés ( $150 \times 150 \times 300$  mm) confinés avec la même série de confinement (type de composite, degrés de confinement et classe de résistance du béton non confiné).

Les courbes de tous les spécimens de béton confiné par CFRP sont pseudo-bilinéaires où la première zone est une zone élastique, la deuxième zone de transition et la troisième zone plastique. La pente de la première partie de la courbe (c'est-à-dire celle de la zone élastique) n'est pas sensiblement altérée par la présence de l'enveloppe de FRP, puisque les spécimens confinés et non confinés se comportent de la même manière, quel que soit le nombre de couches de FRP. Cette première réponse linéaire du béton confiné est gouvernée par la rigidité du béton non confiné, ce qui indique qu'aucun confinement n'est activé par les enveloppes CFRP.





**Figure VI.15** Courbes Contrainte-Déformation cylindre  $\varnothing 160 \times 320 \text{mm}$  / prisme carré  $150 \times 150 \times 300 \text{mm}$  : (a) B25-1CFRP ; (b) B25-2CFRP ; (c) B25-3CFRP ; (d) B40-1CFRP ; (e) B40-2CFRP ; (f) B40-3CFRP ; (g) B60-1CFRP ; (h) B60-2CFRP ; (i) B60-3CFRP

La deuxième zone non linéaire peut être considérée zone de transition où se trouve le point d'inflexion. Au cours de cette étape, les enveloppes CFRP sont activées après avoir atteint la résistance maximale du béton non confiné et appliquent une pression croissante continue, accompagnée de la croissance de micro-fissures.

L'effet de confinement par FRP ne commence qu'après l'aboutissement de la résistance du béton non confiné. A ce stade, existe une dilatation latérale importante du béton endommagé, de sorte que les déformations transversales sont capables d'activer la pression élastique de confinement du FRP.

Lorsque la résistance et la contrainte correspondante atteignent le point d'inflexion, les courbes indiquent que les paramètres de forme ont un effet significatif sur le comportement dans l'étape post-élastique, signifiant le début de la troisième zone.

Dans cette étape, les courbes présentent un comportement linéaire jusqu'à la rupture de la chemise où la courbe contrainte-déformation de l'échantillon circulaire montre une tendance ascendante, tandis que l'échantillon carré montre une tendance descendante prouvant que la rigidité plastique est en fonction de la courbe géométrie de la section transversale des spécimens confinés.

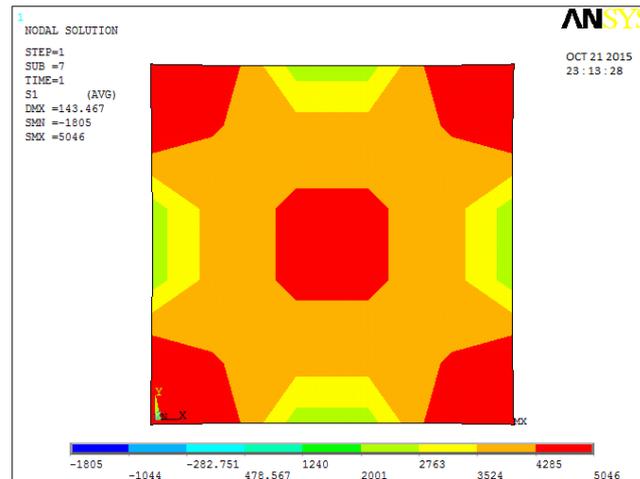
Dans le cas de la forme circulaire, la section est entièrement confinée fournissant une branche ascendante de la seconde partie de la courbe contrainte-déformation, montrant la capacité de la pression de confinement latérale pour limiter les effets de la détérioration mécanique du noyau de béton, ce qui donne des contraintes plus élevées. En revanche, dans le cas des spécimens carrés, la contrainte maximale est semblable à celle du béton non confiné fournissant une branche descendante, ce qui indique une action de pression de confinement insuffisante afin de surmonter l'effet de dégradation du béton.

### **VI.6.3 Distribution des contraintes dans la section transversale des spécimens confinés**

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous souhaitons expliquer le comportement des colonnes circulaires confinés en FRP chargées axialement. Pour cela, nous devons comprendre la distribution des contraintes dans la section transversale.

Cette section s'attache à modéliser le comportement de ces poteaux au moyen d'un logiciel d'analyse non linéaire, afin d'approfondir la compréhension de leur comportement.

Une simulation numérique a été faite par le logiciel ANSYS version 14 sur des spécimens de section circulaire et de section carrée. La figure VI.16 montre la distribution des contraintes dans la section transversale d'un spécimen prismatique carrée confiné avec une enveloppe de CFRP. Il ressort clairement de cette figure que la concentration dans le centre du spécimen et dans les coins de la section carrée est plus élevée qu'ailleurs.



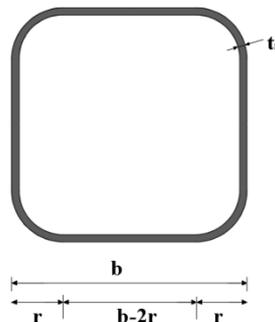
**Figure VI.16** Distribution des contraintes dans la section transversale d'un spécimen prismatique carré confiné

La concentration des contraintes au niveau de coins ne permet pas à l'enveloppe de composite de se développer de façon significative car les fibres sont sujettes à une rupture prématurée le long des angles aigus.

#### VI.6.4 Effet du rayon d'angle

##### a) Conditions ultimes

Une série de spécimens prismatiques carrés 150x150x300 mm, confectionnés par un béton de classe B25 et confinés avec des enveloppes de CFRP ont été réalisés dans le but d'étudier l'effet du rayon du coin sur le comportement des spécimens prismatiques carrés. Cinq spécimens ont été utilisés avec différents rayons d'angle 0, 15, 30, 45, 60 et 75 mm (figure VI.17).



**Figure VI.17** Schéma statique d'un spécimen prismatique carré arrondi

Les figures VI.18 et VI.19 comparent respectivement le rapport de gain moyen de résistance  $f_{cc}/f_{co}$  et le rapport de gain moyen de déformation  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  des spécimens carrés ayant des rayons d'angle différents (0, 15, 30, 45, 60 et 75 mm) renforcés Avec 1, 2 et 3 couches d'enveloppes CFRP. Ces figures montrent que la résistance et la déformation des spécimens de section carrée confinés par CFRP sont fortement influencées par le changement de rayon d'angle. Il est montré que l'augmentation du rayon d'angle améliore la résistance maximale et la déformation correspondante des spécimens carrés. Ceci est dû au changement de la position de la concentration de contraintes localisées aux angles vers le centre. D'autre part, l'augmentation du rayon de courbure des coins augmente la surface de la région du noyau de béton effectivement confiné.

A partir de ces figures, on voit clairement que les évolutions de rapport de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et de rapport de déformation  $\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$  sont presque linéaires en fonction du rapport de rayon d'angle ( $2r/b$ ).

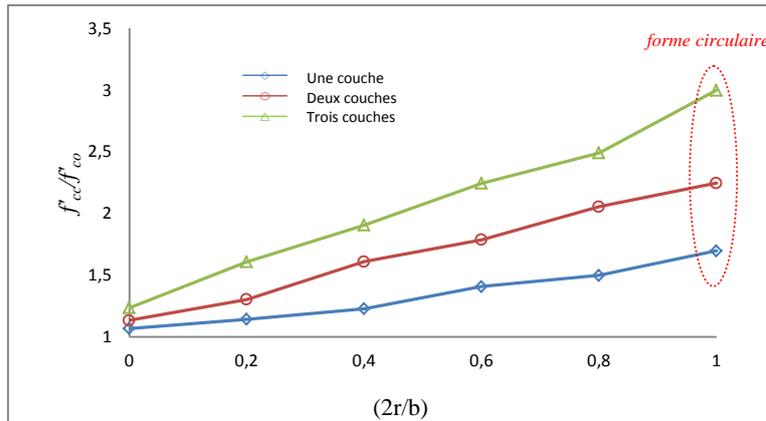


Figure VI.18 Variation du rapport de résistance en fonction du rapport de rayon d'angle

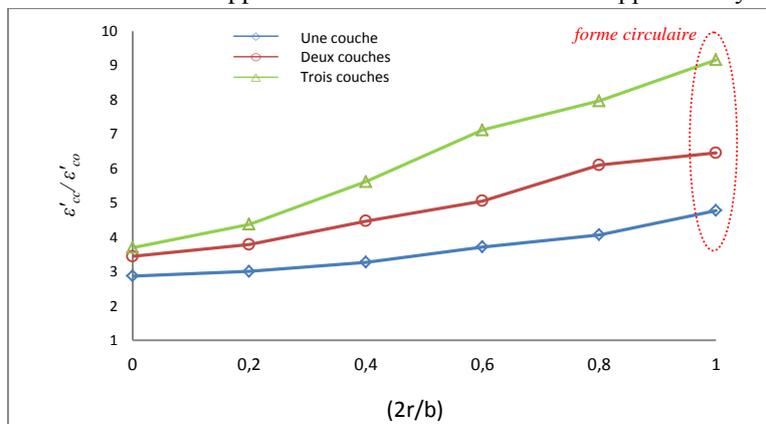
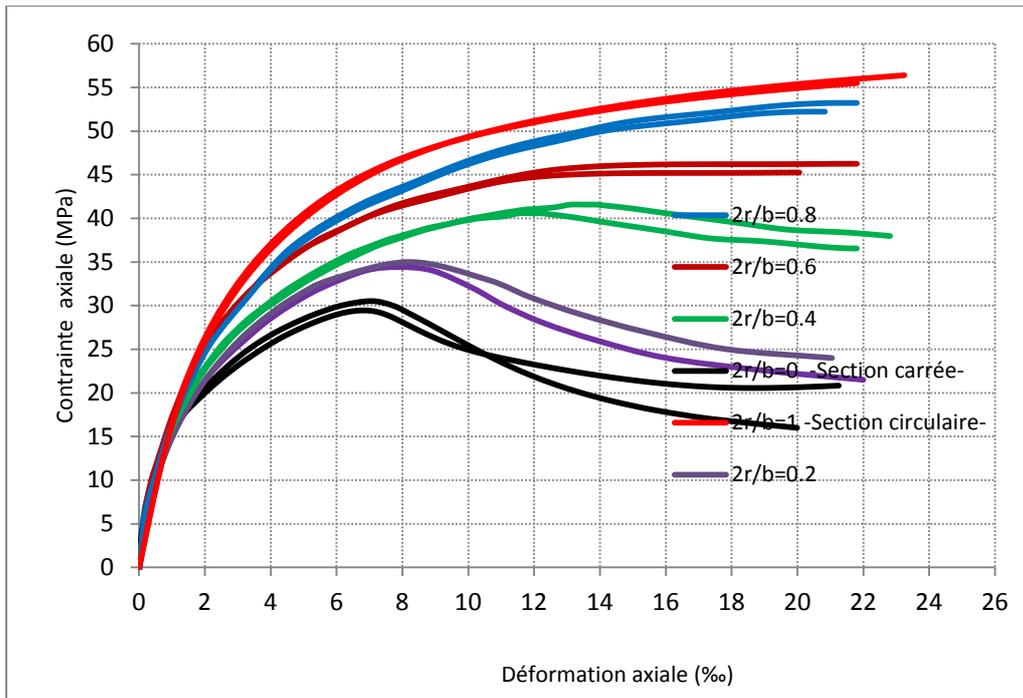


Figure VI.19 Variation du rapport de déformation en fonction du rapport de rayon d'angle

Il ressort clairement de ces résultats que l'augmentation de la résistance fournie par le confinement est très sensible à la géométrie de la section transversale des spécimens confinés et que la quantité de cette augmentation diminue fortement lorsque la géométrie s'écarte de la géométrie circulaire.

### b) Réponse contrainte-déformation

La figure VI.20 montre le comportement typique des courbes contrainte-déformation des échantillons carrés arrondis avec des rapports d'angle différents ( $2r/b=0$  ;  $2r/b=0,2$  ;  $2r/b=0,4$  ;  $2r/b=0,6$  ;  $2r/b=0,8$  ,  $2r/b=1$ ). Les courbes de spécimens carrés arrondis à des rayons d'angle différents montent trois zones différentes; elles indiquent que le rayon d'angle n'a pas une grande influence sur la première plage d'élasticité, mais il pourrait avoir un effet important sur le comportement des spécimens confinés après le point d'inflexion. Pour CR15, après avoir la contrainte du béton non confiné, la courbe présente une tendance descendante. Pour CR30, la deuxième branche est presque un plateau avec une pente nulle tandis que pour CR45 et CR60 les courbes montrent une tendance ascendante.



**Figure VI.20** Allure des réponses contraintes déformations des spécimens prismatiques carrés avec différents rayon de coins.

Pour CR15, à cause de la forte concentration de contraintes aux coins, quand le béton commence à écraser et perd sa capacité portante, la pression de confinement des feuilles de CFRP commence à s'activer avec une manière lente et ne contribue pas grandement à l'amélioration de capacité de chargement, résultant d'une courbe descendante. Pour CR30, CR45 et CR60, les rayons ont été suffisants pour éviter la concentration de contraintes aux angles, résultant en une courbe ascendante. Donc, un rayon de 30 mm semble efficace et pratique.

### VI.7 Effet du rapport volumétrique ( $\rho$ )

Dans ce qui suit, nous étudions l'effet du rapport volumétrique ( $\rho$ ) sur l'efficacité de confinement des colonnes de section circulaire pour les série de béton testés (B25, B40 et B60) et confinées par des enveloppes en CFRP.

Trois types de colonnes cylindriques ont été testées à savoir :  $\varnothing 160 \times 320$ ,  $\varnothing 80 \times 320$  et de  $\varnothing 80 \times 500$  correspond respectivement des élancements géométriques  $L/D = 2, 4$  et  $6.25$  (figure VI.21).



**Figure VI.21** : Trois types de colonnes cylindriques testées  $\varnothing 160 \times 320$ ,  $\varnothing 80 \times 320$  et  $\varnothing 80 \times 500$

En comparons les résultats obtenus pour les colonnes en béton de sections circulaires Ø160x320, Ø80x320 et de Ø80x500 mm correspond respectivement des élancements géométriques (L/D) de 2, 4 et de 6.25.

Les histogrammes établis dans les figures VI.22 et VI.23 montrent respectivement les gains de résistance et de déformation des colonnes confinées avec trois degrés de confinement (1, 2 et 3 couches) de CFRP.

Pour les spécimens non confinés, des résistances et des déformations supérieures ont été enregistrées pour les spécimens de Ø160x320 par rapport aux spécimens Ø80x320. Cette meilleure performance des colonnes Ø160x320 mm par rapport à celle de Ø80x320 mm est observée pour toutes les classes de béton. Donc, un plus grand diamètre de la section transversale offre une meilleure performance en termes de résistance et de déformation.

Les histogrammes suivants montrent que la performance des spécimens confinés avec des enveloppes de CFRP (1, 2, et trois couches) et pour toutes les séries de béton est inversé au profite des spécimens de sections inferieures (Ø80x320 et Ø80x500). Pour les trois séries de béton et pour les différents degrés de confinement, les histogrammes montrent qu'il y a des résistances et des déformations supérieures des spécimens de diamètre Ø80 par rapport aux spécimens de diamètres de Ø160.

Dans le cas spécimens de même diamètre et de différentes hauteurs de type Ø80x320 et de type Ø80x500, les résultats obtenus montrent que les deux types de spécimens présentent la même performance en terme de résistance et de déformation.

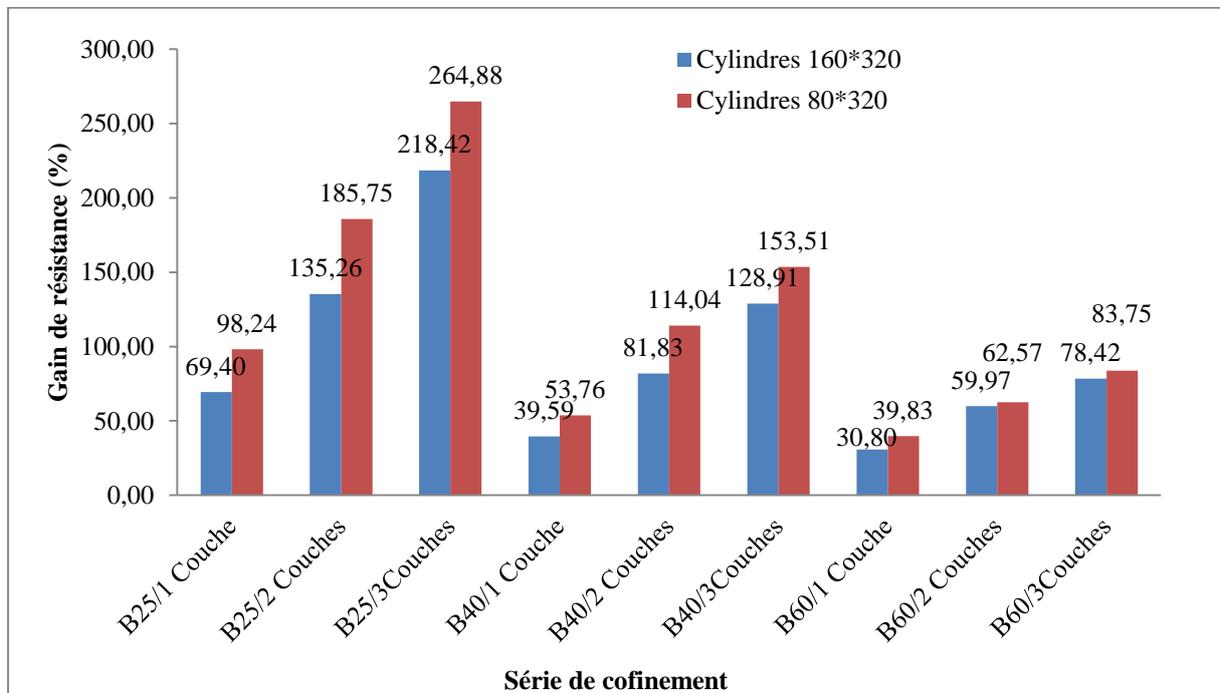


Figure VI.22 Effet du rapport volumétrique sur le gain de résistance des cylindres confinés

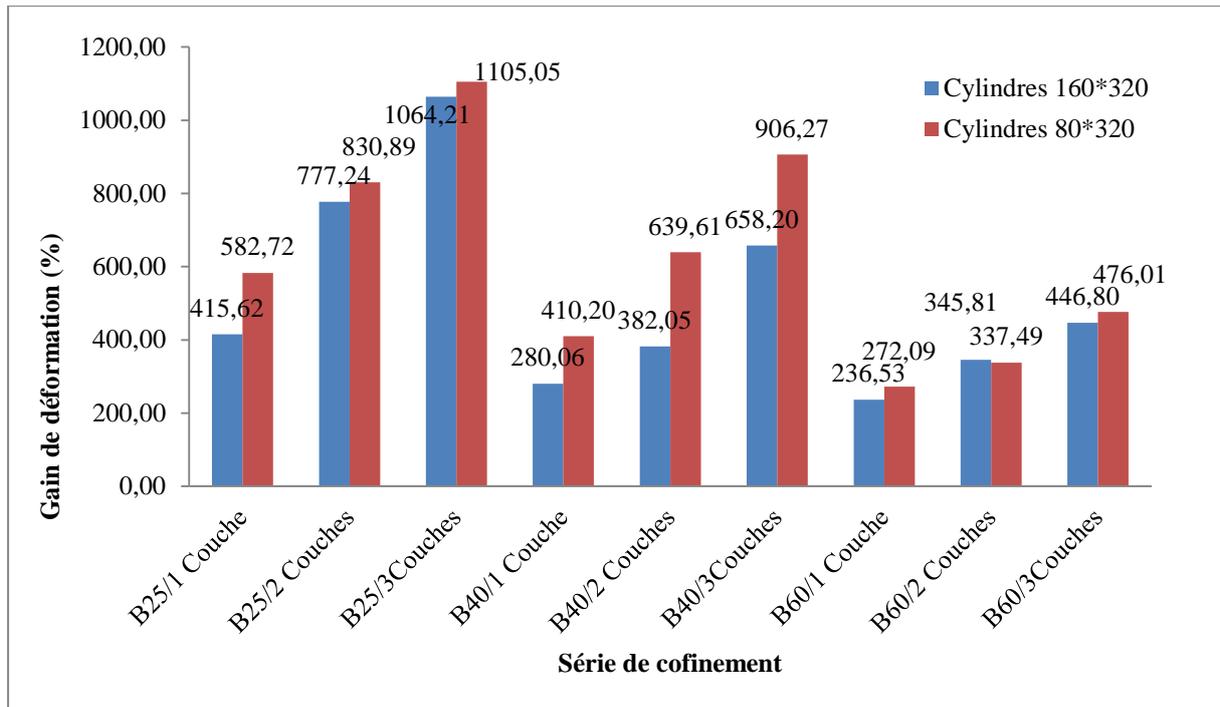


Figure VI.23 Effet du rapport volumétrique sur le gain de déformation des cylindres confinés

De ces résultats on peut constater que pour la même série de béton et le même degré de confinement, la variation du rapport volumétrique (le rapport entre la section transversale du noyau du béton et la section transversale des composites et par conséquent le rapport entre le diamètre du béton et l'épaisseur du composite) a un effet significatif sur l'efficacité du confinement.

Il s'agit que plus le rapport volumétrique est élevé, plus la pression latérale de confinement est grande et par conséquent la performance en termes de résistance et de déformation est améliorée.

## VI.8 Conclusion

Les essais de compression axiale réalisés dans le cadre de cette étude ont permis de mieux appréhender le comportement des colonnes renforcées extérieurement par matériaux composites en polymère renforcé de fibres (FRP), et de mettre en évidence l'influence de paramètres tels que le degré de confinement, la résistance à la compression du béton non confiné ( $f'_{co}$ ), le type de matériaux composites, la section transversale des spécimens confinés, la variation du rayon de coin des spécimens prismatiques carrés et le rapport volumétrique ( $\rho$ ).

Pour l'ensemble des spécimens testés, l'augmentation du degré de confinement entraîne à la fois une augmentation significative de la résistance à la compression axiale et de la rigidité des spécimens confiné par rapport aux ceux non confiné. En revanche, Il s'est avéré que plus la résistance du béton ( $f'_{co}$ ) est élevée, moins le gain procuré par le confinement est important. L'augmentation du rayon des coins d'un spécimen prismatique carré confiné avec des matériaux composites FRP réduit la concertation de contraintes au niveau des coins et par conséquent améliore la performance des colonnes confinées.

# PARTIE III : PARTIE ANALYTIQUE

Chapitre VII: Modèle Analytique de Confinement

## Chapitre VII : Modèle analytique de confinement

### VII.1 Introduction

Malgré les nombreuses recherches effectuées, un outil analytique approprié pour prédire le comportement du béton confiné par FRP n'a pas encore été établi pour la diversité des configurations de renforts. La plupart des modèles disponibles sont de nature empirique et ont été calibrés par rapport aux données expérimentales disponibles. Un bilan des différents modèles simples permettant de prédire ce comportement a été réalisé par De Lorenzis et Tepfers [134]. Ces modèles peuvent être classés en deux catégories:

- a) modèles de conception orientée (Karbhari and Gao [55]; Lam and Teng [59]; Saafi et al. [100]; Samaan et al. [97], et
- b) modèles d'analyse orientée (Jiang and Teng [137]; Mirmiran and Shahawy [70]; Spoelstra and Monti [98].

Dans la première catégorie, la résistance à la compression, la déformation axiale ultime et le comportement contrainte-déformation du béton confiné par FRP, sont prédits à l'aide d'équations analytiques basées directement sur l'interprétation des résultats expérimentaux. Dans la deuxième catégorie, les courbes contrainte-déformation du béton confiné sont générées en utilisant une procédure numérique incrémentale. En plus des modèles analytiques et des équations empiriques, la méthode des éléments finis a également été utilisée pour modéliser le béton confiné. Cette approche a un avantage particulier dans la modélisation du béton confiné de manière non uniforme, car elle est capable de capturer les variations de contrainte dans la section de béton.

Les premiers à avoir étudié le confinement furent Richart et al. [143]. Ils proposèrent un modèle qui tient compte de la contrainte maximale du béton non confiné et de la déformation axiale correspondante. Ce modèle permet d'évaluer la contrainte maximale et la déformation du béton confiné. Par la suite, plusieurs modèles de résistance du béton confiné avec des matériaux composites «FRP» (Fardis et Khalili [11], Karbhari et Gao [15], Mirmiran et Shahawy [70], Samaan [97], Miyauchi et al. [72], Saafi et al. [100], Toutanji [105], Thériault et Neale [106], Lam et Teng [59], Berthet et al. [13], Teng et al. [123] sont basées sur l'expression proposée par Richart et al [143].

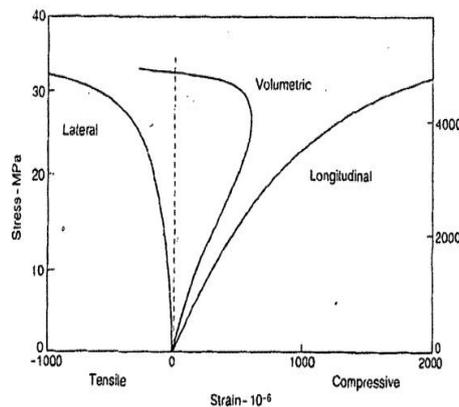
$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_l \quad (1)$$

Où  $f'_{cc}$  and  $f'_{co}$  sont respectivement la résistance à la compression axiale du béton confiné et non confiné,  $f'_l$  est la pression de confinement latérale et  $k_1$  est le coefficient d'efficacité de confinement. Cette formule a été proposée en premier par Richart et al. [143] pour un béton confiné par pression hydrostatique (confinement actif) avec une valeur de  $k_1 = 4,1$ . En 1929, Richart et al. [90] ont montré par la suite que leur modèle est aussi valable pour un béton confiné avec des aciers en spirales continues (confinement passif). Fardis et Khalili [40] ont suggéré que le model de Richart et al. [143] pourrait être utilisé directement pour le béton confiné avec des matériaux composites «FRP». En 1994, Saadatmanesh et al. [93] ont étendu le modèle de Mander et al [66] au béton confiné avec des matériaux composites «FRP».

## VII.2 Mécanisme de confinement

Le comportement du béton en compression axiale décrit trois phases distinctes. Dans la première phase, le béton se comporte d'une manière quasi élastique, subit un raccourcissement dans la direction de chargement et une dilatation (expansion) dans le plan perpendiculaire conformément à la loi de Poisson. Les déformations à ce stade sont réversibles et le bilan du changement volumétrique indique une compaction. Passé un certain seuil de chargement (environ 40 % de la charge de ruine), nommé seuil de réversibilité, des microfissures apparaissent à l'interface pâte cimentaire-granat puis se propagent d'une manière stable, le taux de dilatation radiale augmente légèrement à cause des microfissures, ce qui se traduit par l'augmentation du coefficient de Poisson « $\nu$ ». Cette deuxième phase est caractérisée par le début de la non-linéarité du comportement et l'apparition de déformations rémanentes au déchargement.

La troisième phase commence avec le dépassement du seuil de discontinuité à environ 70 % de la résistance du béton; les microfissures s'ouvrent davantage et s'interconnectent au long d'axes parallèles à celui du chargement ce qui altère la continuité du béton, la propagation des fissures devient instable et augmente rapidement le taux de dilatation radiale et donc le coefficient de Poisson «*apparent*». Le bilan volumétrique change de signe et indique une expansion : c'est la rupture [132,142] (Figure VI.1).



**Figure VII.1** Comportement en compression axiale du béton en termes de déformation axiale, latérale et volumétrique [132].

D'une certaine manière, on peut donc dire que la rupture en compression du béton est due aux efforts de tension transversale, comme l'ont déjà mentionné Richart et al. [143] dans une étude sur le comportement en compression du béton sous chargement multiaxial.

La pression latérale engendrée par le confinement du béton par matériaux composites est similaire de cas de la compression triaxiale par pression hydrostatique sur des cylindres. Lorsqu'une colonne en béton confiné avec des matériaux composites est soumise à une compression axiale, ces dernières appliquent une pression latérale dont la direction est opposée à celle de la dilatation, ce qui limite la propagation des fissures et de permettre en conséquence une plus grande déformabilité axiale (ductilité). La figure VI.2 montre le mécanisme de confinement de béton par matériaux composites.

Sur la base de l'analyse statique, l'équilibre des forces, la compatibilité de la déformation, les forces agissant sur les sections, les pressions de confinement latéral atteignent leur valeur

maximale  $f'_l$  à la rupture du FRP, la pression latérale maximale du béton de section circulaire confiné par des enveloppes de composites est de (figure VI.2-a) :

$$f'_l = \frac{2t_f f_{frp}}{D} = \frac{2E_{frp} \varepsilon_{frp,u} t_f}{D} \quad (2)$$

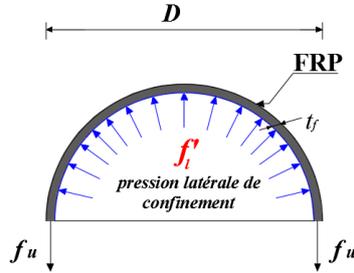


Figure VII.2-a Mécanisme de confinement (section circulaire)

Pour une section carrée (Figure VI.2-b) :

$$f_l = \frac{\sqrt{2}t_f E_{frp} \varepsilon_u}{b} \quad (3)$$

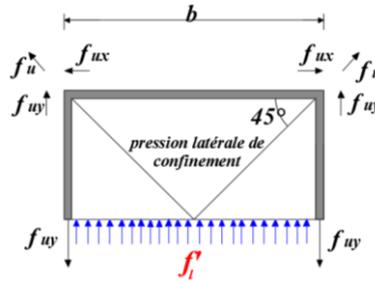


Figure VII.2-b Mécanisme de confinement (section carrée).

Pour une section carrée avec des angles arrondis (figure VI.2-c) :

$$f_l = \frac{2t_f E_{frp} \varepsilon_u}{\sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2}-1)} \quad (4)$$

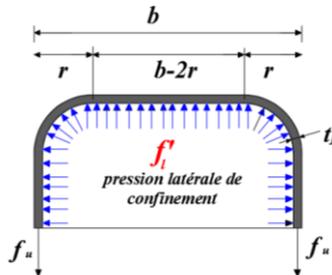


Figure VII.2-c Mécanisme de confinement (section carrée avec angles arrondis).

### VII.3 Coefficient de déformation effective du FRP

D'après les résultats expérimentaux obtenus, la rupture des spécimens s'est produite avant que les composites n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes  $\varepsilon'_{fu}$  (Tableaux VI-1 à VI-3). Ainsi, cette rupture se produit prématurément et la déformation circonférentielle à la

rupture était inférieure à la déformation ultime obtenue à partir des essais de traction du composite FRP. Ce phénomène affecte considérablement la précision des modèles existants pour le béton avec des matériaux composites «FRP ». En se référant aux ces tableaux, les valeurs des déformations radiales ( $\varepsilon'_{u,frp}$ ) au moment de la rupture varient entre 6.56 ‰ (valeur minimale) et 11.36 ‰ (valeur maximale) pour les spécimens prismatiques carrés de 150x150x300 mm renforcés par matériaux composite à base de fibre de carbone qui est représente un moyen de 9.50 ‰. Pour les spécimens cylindriques Ø160x320 mm, ces déformations moyennes représentent un moyen de 11.06 ‰ et 14.07 ‰ pour les cylindres confinés par CFRP et GFRP, respectivement. Par exemple, la rupture du cylindre de béton de moyen résistance confiné par une couche de CFRP « C160/320-B25-1C-2 » a été atteint à une déformation effective de composite  $\varepsilon'_{h,rep}$  égale à 12,61 ‰ ,représentant 90% de la déformation ultime  $\varepsilon_h$  de composite (14 ‰).

Plusieurs causes possibles expliquant cette réduction de déformation du composite FRP peuvent être attribuées comme rapporté dans les littératures [139,127]:

- i) la qualité de la main-d'œuvre;
- ii) la forme courbe de l'enveloppe composite ou désalignement des fibres peut diminuer la Résistance axiale du béton confiné,
- iii) la fissuration interne du béton résulte des déformations non homogènes, à cause de cette déformation non homogènes et des charges élevées appliquées sur le béton fissuré, la concentration de contrainte locale peut se produire dans l'armature de FRP.

Donc, déformation circonférentielle du composite 'FRP' à la rupture est un des facteurs important pour être en mesure de prédire des gains en terme de résistance et de déformation du béton confiné.

Cependant, la pression de confinement latérale effective due au composite FRP est donnée comme suit:

Pour une section circulaire:

$$f'_{l,eff} = \frac{2t_f E_{frp}}{D} \varepsilon_{frp,u} = \frac{2t_f E_{frp}}{D} k_{eff} \varepsilon_u = k_{eff} f'_l \quad (5)$$

où  $f'_{l,eff}$  est la pression de confinement latérale effective correspondant à une déformation à la rupture effective  $\varepsilon'_{h,rep}$ , cependant  $K_{eff}$  est le coefficient de déformation effective du FRP représentant le rapport  $\varepsilon'_{h,rep} / \varepsilon'_{frp,u}$ .

## VII.4 Section circulaire

### VII.4.1 Résistance maximale de confinement

#### VII.4.1.1 Critère de rupture Mohr-Coulomb

Le modèle de résistance proposé a été basé sur le *Critère de rupture de Bieniawski* et calibré avec les résultats expérimentaux obtenus. L'équation basée sur la théorie du critère de *Critère de rupture Bieniawski* montre que le rapport de résistance du béton confiné  $f'_{cd} / f'_{co}$  est lié

linéairement au rapport de confinement effectif  $f'_{l}/f'_{co}$  comme indiqué par l'équation (6) [129-136] :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + N \left( \frac{f'_{l}}{f'_{co}} \right)^M \quad (6)$$

Où  $N$  et  $M$  sont des constantes déterminées en ajustant une courbe à la famille de points  $\left( \frac{f'_{l}}{f'_{co}}, \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$ .

Comme mentionné précédemment, la déformation effective  $\varepsilon_{frp}$  de FRP à la rupture des cylindres de béton confiné est inférieure à la déformation ultime obtenue à partir des essais de traction  $\varepsilon_u$ . Par conséquent, l'équation (6) peut être réécrite comme:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + N k_{eff}^M \left( \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \right)^M \quad (7)$$

#### VII.4.1.2 Equation proposée

La déformation moyenne dans les enveloppes de FRP à la rupture des cylindres de béton confinés peut être beaucoup plus faible que celle donnée par les tests de traction standard, ce qui signifie l'hypothèse théorique que la rupture des cylindres en béton confinés par des enveloppes en matériaux composites survenue lorsque la résistance à la traction du matériau composite 'FRP' atteint son maximum ne convient pas. Sur la base de cette observation, les formules résistance du béton confiné par composite et la déformation correspondante force de pointe efficace et formule de contrainte correspondante doivent être basées sur les déformations effectives de composites ' $\varepsilon_{h,rep}$ '.

Sur la base du critère de rupture empirique de Bieniawski [129] et selon la régression des données des essais expérimentaux des cylindres ( $\emptyset 160 \times 320$  mm) des trois séries de béton : 26 MPa, 50 MPa et 62 MPa présentés dans les tableaux VI.1 et VI.2, un nouveau modèle est proposé pour prédire la résistance maximale de cylindres en béton confinés par matériaux composites à base de fibres de carbone «CFRP» et à base de fibres de verre «GFRP»

La Figure VI.3 montre la relation entre le rapport de confinement effectif  $f'_{l,eff}/f'_{co}$  et le rapport de résistance  $f'_{cc}/f'_{co}$ . On remarque que la relation peut être approchée par une fonction linéaire donnée par les équations suivantes:

- Pour les cylindres confinés avec CFRP:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.58 \left( \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \right)^{0.997} \quad (8)$$

- Pour les cylindres confinés avec GFRP:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.5 \left( \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \right)^{1.027} \quad (9)$$

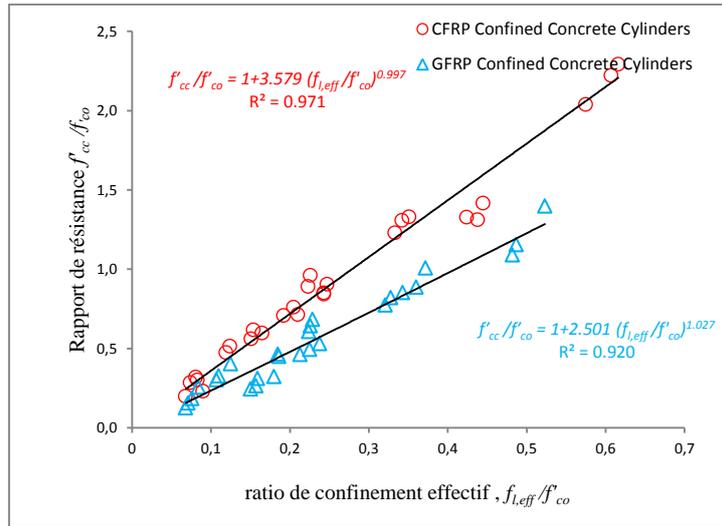


Figure VII.3 Rapport de resistance /rapport de confinement effectif

En utilisant un coefficient de confinement moyen  $K_{eff,m}$  pour l'ensemble des séries testées de 0,79 et 0.74 pour les cylindres confinés par «CFRP» et «GFRP», respectivement, avec le remplacement de  $f'_{eff}$  par  $f'_l$ , les gains en termes résistance ultime de compression axiale du béton confiné avec des «FRP» prend les formes:

- Pour les cylindres confinés avec CFRP:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.8 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (10)$$

- Pour les cylindres confinés avec GFRP:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.85 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (11)$$

#### VII.4.2 Déformation maximale de confinement

Pour les colonnes de section circulaire en béton confinées avec des matériaux composites, plusieurs études ont suggéré que la déformation axiale maximale peut être corrélée à la pression de confinement latérale [139,136,145]. Les modèles existants peuvent être classés en deux catégories, les modèles empiriques ou analytiques et les modèles numériques. Richart et al. [143] ont proposé que l'efficacité dans l'amélioration de la contrainte axiale dans les cylindres en béton confinés est d'environ cinq fois celle de l'amélioration de la contrainte axiale.

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + k_2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad \text{avec } k_2 = 5k_1 \quad (12)$$

Sur la base du critère de rupture empirique de Richart et al. [143] et selon la régression des données des essais expérimentaux des cylindres (Ø160x320 mm) des trois séries de béton, un nouveau rapport de confinement a été adopté. La figure VI.4 montre la relation entre le rapport de déformation et celui du confinement effective. Cette figure indique que la déformation ultime du béton confiné avec des FRP peut être liée de façon linéaire au rapport de confinement effective. Basée sur la régression des données d'essai, la déformation ultime axiale du béton confiné avec des FRP peut être exprimée à partir des expressions suivantes:

- Pour les cylindres confinés avec CFRP:

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 2.11 + 15.8 \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \quad (13)$$

- Pour les cylindres confinés avec CFRP:

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1.45 + 20.5 \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \quad (14)$$

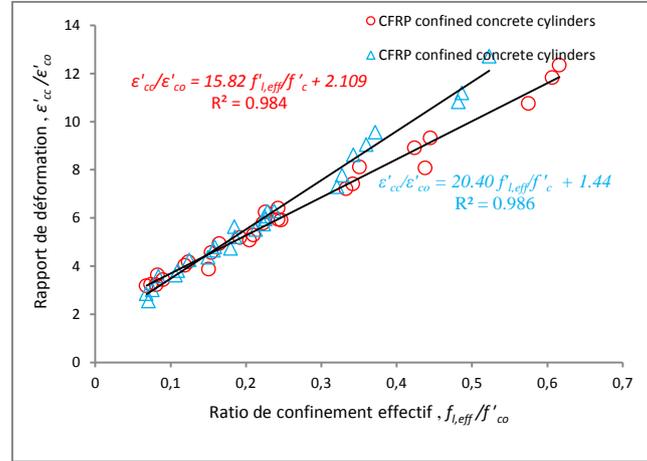


Figure VII.4 Rapport de Déformation axiale / rapport de confinement effectif

En remplaçant  $f'_{l,eff}$  par  $f'_l$  dans les équations (13) et (14), et en introduisant le coefficient de déformation effective moyen ( $K_{em}$ ), la déformation ultime axiale du béton confiné est :

- Pour les cylindres confinés avec CFRP:

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 2.11 + 12.5 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (15)$$

- Pour les cylindres confinés avec GFRP:

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1.45 + 15 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (16)$$

**Tableau VII.1** Données et résultats de cylindres Ø160X320 en béton confinés par «CFRP»

<i>Identification de l'échantillon</i>	$f'_{co}$ (MPa)	$t_f$ (mm)	$E_{frp}$ (GPa)	$\varepsilon_{frp,u}$ (‰)	$\varepsilon_{h,rep}$ (‰)	$K_{ef}$	$f'_{l,eff}$ (MPa)	$f'_{l,eff}/f'_{co}$	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$
C160/320-B25-1C-1	24	1	34	14	12.74	0.91	5.415	0.22	47.06	1.96	2.71	16.94	6.251
C160/320-B25-1C-2	24	1	34	14	12.6	0.9	5.355	0.22	45.36	1.89	2.71	15.67	5.782
C160/320-B25-1C-3	24	1	34	14	5.11	0.37	2.172	0.09	29.55	1.23	2.71	9.31	3.435
C160/320-B25-2C-1	24	2	34	14	11.98	0.86	10.18	0.42	55.88	2.32	2.71	24.15	8.911
C160/320-B25-2C-2	24	2	34	14	12.36	0.88	10.50	0.43	55.5	2.31	2.71	21.89	8.077
C160/320-B25-2C-3	24	2	34	14	12.56	0.9	10.67	0.44	58.01	2.41	2.71	25.28	9.328
C160/320-B25-3C-1	24	3	34	14	11.42	0.82	14.56	0.61	77.33	3.22	2.71	32.06	11.83
C160/320-B25-3C-2	24	3	34	14	11.6	0.83	14.79	0.62	79.01	3.29	2.71	33.45	12.34
C160/320-B25-3C-3	24	3	34	14	10.83	0.77	13.80	0.58	72.92	3.38	2.71	29.14	10.75
C160/320-B40-1C-1	41.6	1	34	14	6.69	0.48	2.843	0.07	49.88	1.19	3.11	9.92	3.190
C160/320-B40-1C-2	41.6	1	34	14	11.64	0.83	4.947	0.12	61.34	1.47	3.11	12.56	4.039
C160/320-B40-1C-3	41.6	1	34	14	12.1	0.86	5.143	0.12	62.99	1.51	3.11	12.98	4.174
C160/320-B40-2C-1	41.6	2	34	14	10.05	0.72	8.543	0.20	73.25	1.76	3.11	15.78	5.074
C160/320-B40-2C-2	41.6	2	34	14	11.88	0.85	10.09	0.24	76.66	1.84	3.11	18.49	5.945
C160/320-B40-2C-3	41.6	2	34	14	11.91	0.85	10.12	0.24	77.01	1.85	3.11	19.93	6.408
C160/320-B40-3C-1	41.6	3	34	14	11.45	0.82	14.59	0.35	96.93	2.33	3.11	25.23	8.113
C160/320-B40-3C-2	41.6	3	34	14	11.17	0.8	14.24	0.34	95.98	2.30	3.11	23.06	7.415
C160/320-B40-3C-3	41.6	3	34	14	10.88	0.78	13.87	0.33	92.77	2.23	3.11	22.45	7.219
C160/320-B60-1C-1	61.5	1	34	14	11.96	0.85	5.083	0.08	80.05	1.30	3.02	10.99	3.639
C160/320-B60-1C-2	61.5	1	34	14	10.69	0.76	4.543	0.07	78.99	1.28	3.02	9.78	3.238
C160/320-B60-1C-3	61.5	1	34	14	11.75	0.84	4.994	0.08	81.11	1.31	3.02	9.72	3.219
C160/320-B60-2C-1	61.5	2	34	14	10.89	0.78	9.257	0.15	96.02	1.56	3.02	11.68	3.868
C160/320-B60-2C-2	61.5	2	34	14	11.13	0.8	9.461	0.15	99.44	1.61	3.02	13.79	4.566
C160/320-B60-2C-3	61.5	2	34	14	11.91	0.85	10.12	0.16	98.25	1.598	3.02	14.92	4.940
C160/320-B60-3C-1	61.5	3	34	14	9.26	0.66	11.80	0.19	104.99	1.70	3.02	15.67	5.189
C160/320-B60-3C-2	61.5	3	34	14	11.89	0.85	15.16	0.25	117.14	1.95	3.02	17.88	5.921
C160/320-B60-3C-3	61.5	3	34	14	10.12	0.72	12.90	0.21	105.44	1.71	3.02	15.99	5.295

Tableau VII.2 Données et résultats de cylindres Ø160X320 en béton confinés par «GFRP»

Identification de l'échantillon	$f'_{co}$ (MPa)	$t_f$ (mm)	$E_{f_{FRP}}$ (GPa)	$\varepsilon_{f_{FRP,u}}$ (‰)	$\varepsilon_{h,rep}$ (‰)	$K_{ef}$	$f'_{l,eff}$ (MPa)	$f'_{l,eff}/f'_{co}$	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$
C160/320-B25-1G-1	26.2	1	26	19	14.88	0.783	4.836	0.18	38.37	1.46	2.67	15.05	5.637
C160/320-B25-1G-2	26.2	1	26	19	14.5	0.763	4.713	0.18	34.65	1.32	2.67	12.64	4.734
C160/320-B25-1G-3	26.2	1	26	19	15.01	0.79	4.878	0.18	38	1.45	2.67	13.92	5.213
C160/320-B25-2G-1	26.2	2	26	19	2.87	0.151	1.866	0.07	30.28	1.15	2.67	6.81	2.551
C160/320-B25-2G-2	26.2	2	26	19	14.5	0.763	9.425	0.36	49.45	1.88	2.67	24.16	9.049
C160/320-B25-2G-3	26.2	2	26	19	15.01	0.79	9.757	0.37	52.58	2.00	2.67	25.55	9.569
C160/320-B25-3G-1	26.2	3	26	19	14.06	0.74	13.709	0.52	62.83	2.39	2.67	33.98	12.72
C160/320-B25-3G-2	26.2	3	26	19	13.09	0.689	12.76	0.487	56.46	2.15	2.67	29.88	11.19
C160/320-B25-3G-3	26.2	3	26	19	12.95	0.682	12.62	0.482	54.76	2.09	2.67	28.91	10.82
C160/320-B40-1G-1	42.6	1	26	19	14.36	0.756	4.667	0.11	56.54	1.32	2.89	11.01	3.810
C160/320-B40-1G-2	42.6	1	26	19	14.01	0.737	4.553	0.10	55.51	1.30	2.89	10.46	3.619
C160/320-B40-1G-3	42.6	1	26	19	16.36	0.861	5.317	0.12	59.83	1.40	2.89	12.32	4.263
C160/320-B40-2G-1	42.6	2	26	19	14.66	0.772	9.529	0.22	68.5	1.60	2.89	16.59	5.740
C160/320-B40-2G-2	42.6	2	26	19	14.78	0.778	9.607	0.22	70.01	1.64	2.89	17.23	5.962
C160/320-B40-2G-3	42.6	2	26	19	15.03	0.791	9.770	0.22	71.72	1.68	2.89	18.15	6.280
C160/320-B40-3G-1	42.6	3	26	19	14.01	0.737	13.66	0.32	75.58	1.77	2.89	21.09	7.298
C160/320-B40-3G-2	42.6	3	26	19	15	0.789	14.62	0.34	78.89	1.85	2.89	24.93	8.626
C160/320-B40-3G-3	42.6	3	26	19	14.33	0.754	13.97	0.32	77.53	1.82	2.89	22.46	7.772
C160/320-B60-1G-1	61.7	1	26	19	12.95	0.682	4.209	0.06	69.49	1.12	3.11	8.85	2.846
C160/320-B60-1G-2	61.7	1	26	19	14.5	0.763	4.713	0.07	73.11	1.18	3.11	9.37	3.013
C160/320-B60-1G-3	61.7	1	26	19	16.02	0.843	5.207	0.08	77.5	1.25	3.11	11.15	3.585
C160/320-B60-2G-1	61.7	2	26	19	15.06	0.793	9.789	0.15	80.83	1.31	3.11	14.95	4.807
C160/320-B60-2G-2	61.7	2	26	19	14.21	0.748	9.237	0.15	76.75	1.244	3.11	13.59	4.370
C160/320-B60-2G-3	61.7	2	26	19	14.88	0.783	9.672	0.15	78.06	1.265	3.11	14.49	4.659
C160/320-B60-3C-1	61.7	3	26	19	13.5	0.711	13.16	0.213	90.15	1.461	3.11	17.15	5.514
C160/320-B60-3C-2	61.7	3	26	19	14.22	0.748	13.86	0.225	92.14	1.493	3.11	18.88	6.071
C160/320-B60-3C-3	61.7	3	26	19	15.03	0.791	14.65	0.238	94.49	1.53	3.11	19.55	6.286

## VII.5 Section carrée

Les modèles analytiques faits sur les colonnes de section carrée ou rectangulaire confinés par des composites est beaucoup restent plus modeste comparativement avec ceux développés pour les colonnes de section circulaire (Cole et Belarbi [133], Campione et Miraglia [130] Chaallal et al. [19], Maalej et al. [141], Hassan et Chaallal [49]).

Cette disparité vient surtout du fait que le confinement des sections carrées est moins efficace que celui des sections circulaires, l'aire de béton effectivement confiné y est réduite comme on l'a vu dans la section précédente, mais aussi à cause des concentrations de contraintes aux angles qui causent des ruptures prématurées du FRP. L'arrondissement des angles droits conduit à une amélioration du comportement en compression des colonnes et cela en agrandissant l'aire du béton effectivement confiné d'une part et en diminuant la concentration de contraintes d'autre part.

### VII.5.1 Coefficient de la section effective

Comme mentionné précédemment, dans le cas de FRP confinée en béton à section circulaire, la pression de confinement latéral est uniforme résultant section entièrement confinée. D'autre part, dans le cas de section carrée, la concentration de contrainte génère au niveau des coins de la section de la colonne. Cela signifie que, au niveau des coins de la colonne, il y aura une zone inefficace qui diminuera sensiblement la section effective dans le noyau du béton ( $A_{ec}$ ), ce qui entraîne une pression latérale de confinement non uniforme. La présence de ces sections partiellement confinés serait beaucoup réduire l'influence des confinements FRP pour augmenter le béton de la résistance maximale et la déformation ultime.

Par conséquent, dans le cas des colonnes en béton de section carrée confinées par des composites FRP, la pression latérale effective de confinement  $f'_l$  peut être définie en fonction de deux paramètres qui sont: le coefficient de section effective de confinement ( $k_e$ ) est donné par le rapport entre la surface de la section confinée ( $A_e$ ) et la surface de la section totale du béton confiné entouré ( $A_c$ ), de manière analogue au cas du noyau de béton confiné par des étriers en acier transversaux (14,16,36), et le coefficient de déformation effective du FRP est définie comme le rapport entre la déformation des enveloppes de FRP à la rupture des cylindres de béton confinés ( $\varepsilon_{h,rep}$ ) et celle obtenue à partir des les tests de traction standard sur les composites  $\varepsilon_{fu}$ .

La figure VI.5 montre l'action d'arc qui est supposé se produire sous forme parabolique de second degré avec une pente de la tangente initiale de  $45^\circ$  entre les pointes des coins.

Ainsi, le coefficient de la section effective de confinement est donné comme suit:

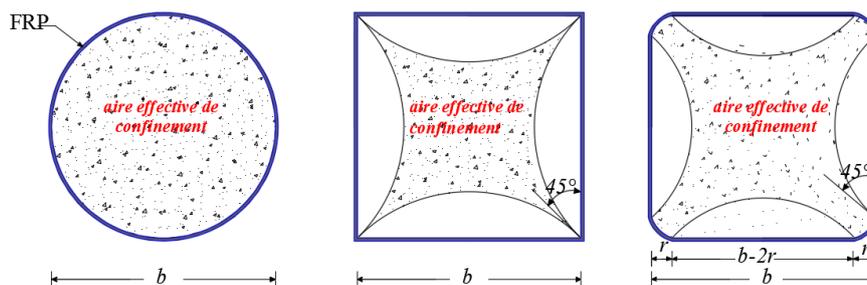


Figure VII.5 Aire effective de confinement

- Pour une section carrée :

$$k_e = 2 - \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

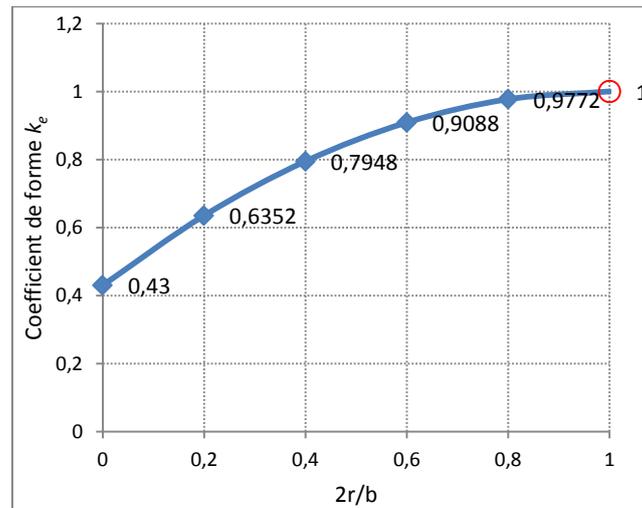
- Pour une section carrée avec des angles arrondis :

$$k_e = 1 - \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)(b - 2r)^2}{b^2} \quad (18)$$

Dans cette étude, le modèle Richart [143] (Equation 1) a été adopté et modifié en tenant compte de deux coefficients, le coefficient de section effective de confinement ( $k_e$ ) et le coefficient de déformation effective du FRP ( $K_{eff}$ ). L'équation (1) peut être réécrite comme suit:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_{eff} k_e \frac{f_{cc}}{f_{co}} \quad (19)$$

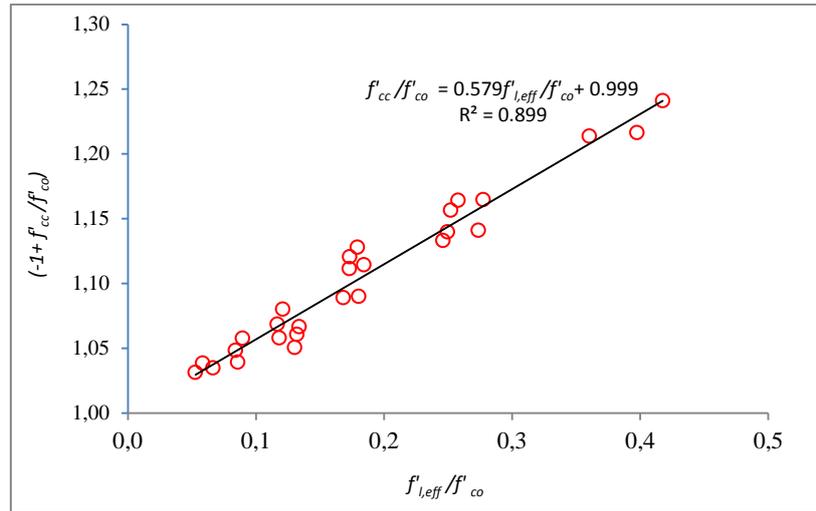
La figure VI.6 montre l'évolution du coefficient de la section effective de confinement en fonction du rayon de coin. D'après cette figure, On peut conclure que la répartition des contraintes devient plus uniforme et que la zone confinée effective augmente lorsque le rayon d'angle augmente.



**Figure VII.6** Evolution du coefficient de la section effective de confinement en fonction rayon de coin.

Basée sur le modèle Richart [143], la ligne de tendance de spécimens carrés pour les données de tests d'expérimentation (figure VI.7) montre que l'amélioration de la résistance à la rupture des échantillons en béton de section carrée peut être approximativement estimée à l'aide de l'équation (20):

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.58 \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \quad (20)$$



**Figure VII.7** Rapport de résistance vs. rapport de confinement effectif (section carrée)

Dans cette étude, les spécimens de section carrée, le coefficient de déformation effective moyen  $k_{mef}$  a une valeur de 0,75. En substituant de  $f'_{l,eff}$  par  $f'_l$  dans l'équation (20), le rapport de résistance de renforcement prend la forme:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.43 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (21)$$

La résistance maximale peut être estimée comme suit:

- Pour section carrée:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (22)$$

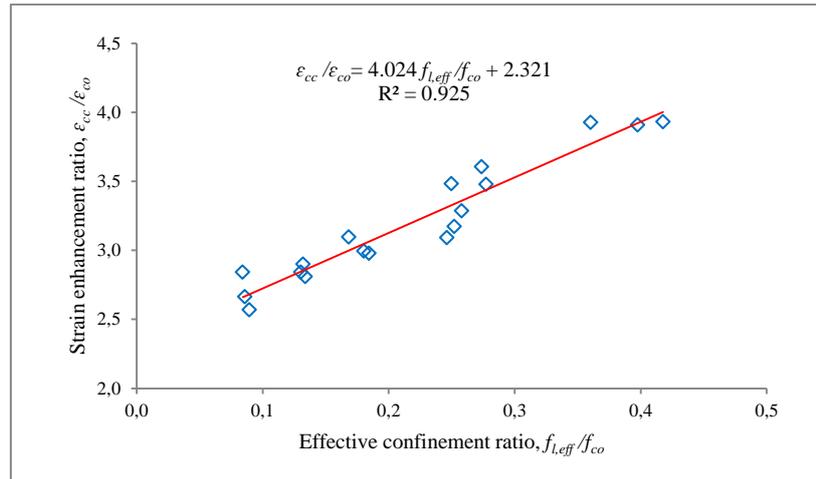
- Pour une section carrée avec des angles arrondis :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + \left(1 - \frac{(\frac{\pi}{2} - 1)(b - 2r)^2}{b^2}\right) \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (23)$$

### VII.5.2 Déformation maximale de confinement

Similaire au modèle proposé pour la résistance maximale à la compression, la déformation axiale correspondante à la contrainte maximale confinée des colonnes en béton confinées par FRP est proposé d'être donnée par une équation dans laquelle le coefficient d'efficacité de confinement ( $k_e$ ) et le coefficient effectif de souche FRP sont introduits. La figure VI.8 montre la variation du rapport de déformation  $\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$  en fonction du rapport de confinement latéral effectif  $f'_{l,eff}/f'_l$  pour les colonnes en béton de section carrée confinées par FRP, où la ligne de tendance de cette série d'expériences prend la forme:

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 2.3 + 4 \frac{f'_{l,eff}}{f'_{co}} \quad (24)$$



**Figure VII.8** Rapport de rdeformation vs. rapport de confinement effectif (section carrée)

Substituant  $f_{l,eff}$  par  $f_l$  dans l'équation (24), le rapport de déformation peut être écrit:

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 2.3 + 3 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (25)$$

For design, le rapport de déformation peut être réécrit comme suit:

Pour une section carrée:

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 2.3 + 7 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (26)$$

Pour une section carrée avec des angles arrondis :

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 2.3 + 7 \left(1 - \frac{(\frac{\pi}{2} - 1)(b - 2r)^2}{b^2}\right) \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (27)$$

## VII.6 Validation du modèle proposé

Il aurait été possible de réaliser un modèle théorique correspondant bien aux résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation. Un échantillonnage différent de celui de la présente étude est nécessaire pour caler le modèle théorique proposé afin qu'il décrive d'avantage la réalité.

On compare le modèle proposé de la résistance maximale à la compression axiale et la déformation correspondante avec des résultats des spécimens en béton confinés avec des matériaux composites «FRP» étudiés par d'autres chercheurs, comme indiqué dans les tableaux (VI.4, VI.5 et VI.6).

D'après ces tableaux, on montre clairement qu'il existe une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par le modèle qui est justifié lors de l'utilisation d'indicateurs statistiques: Moyenne (M) pour établir une moyenne de surestimation ou sous-estimation du modèle; Ecart-type (SD) pour établir l'ampleur de la dispersion associée; et le coefficient de variation (CV) pour mesurer la dispersion. Ces paramètres se révèlent une bonne corrélation entre les prédictions analytiques du modèle proposé avec les résultats expérimentaux d'une série de tests indépendants.

## VII.7 Conclusion

Basé sur les résultats expérimentaux et les considérations théoriques, un modèle analytique de confinement est proposé pour prédire la résistance à la compression maximale du béton confiné avec des matériaux composites ( $f'_{cc}$ ) et la déformation axiale correspondante ( $\varepsilon'_{cc}$ ). Ce modèle proposé offre des prédictions acceptables concernant la résistance axiale maximale de confinement et la déformation correspondante du béton confiné avec des composites FRP.

**Tableau VII.3** Données et résultats de spécimens prismatiques carrés 150x150x300 mm en béton confinés par CFRP

<i>Identification de l'échantillon</i>	$f'_{co}$ (MPa)	$t_f$ mm	$E_{frp}$ (GPa)	$\varepsilon_{frp,u}$ (‰)	$\varepsilon_{h,rep}$ (‰)	$K_{ef}$	$f'_{l,eff}$ (MPa)	$f'_{l,eff}/f'_{co}$	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}$ (‰)	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_{co}$
S160/320-B25-1C-1	25,5	1	34	14	10,65	0,76	3,41	0,13	27,2	1,07	2,53	7,11	2,81
S160/320-B25-1C-2	25,5	1	34	14	10,55	0,75	3,38	0,13	27,05	1,06	2,53	7,34	2,90
S160/320-B25-1C-3	25,5	1	34	14	10,36	0,74	3,32	0,13	26,79	1,05	2,53	7,19	2,84
S160/320-B25-2C-1	25,5	2	34	14	11,03	0,79	7,07	0,28	29,7	1,16	2,53	8,8	3,48
S160/320-B25-2C-2	25,5	2	34	14	10,88	0,78	6,98	0,27	29,1	1,14	2,53	9,12	3,60
S160/320-B25-2C-3	25,5	2	34	14	10,02	0,72	6,42	0,25	29,49	1,16	2,53	8,03	3,17
S160/320-B25-3C-1	25,5	3	34	14	9,55	0,69	9,18	0,36	29,95	1,17	2,53	9,94	3,93
S160/320-B25-3C-2	25,5	3	34	14	11,07	0,79	10,65	0,42	31,65	1,24	2,53	9,95	3,93
S160/320-B25-3C-3	25,5	3	34	14	10,54	0,76	10,14	0,40	31,02	1,22	2,53	9,89	3,91
S160/320-B40-1C-1	39,5	1	34	14	11,03	0,79	3,54	0,09	41,78	1,06	2,53	6,5	2,57
S160/320-B40-1C-2	39,5	1	34	14	10,58	0,77	3,39	0,09	41,05	1,04	2,53	6,74	2,66
S160/320-B40-1C-3	39,5	1	34	14	10,36	0,75	3,32	0,08	40,41	1,02	2,53	7,19	2,84
S160/320-B40-2C-1	39,5	2	34	14	10,36	0,75	6,64	0,17	43,02	1,09	2,53	7,83	3,09
S160/320-B40-2C-2	39,5	2	34	14	11,16	0,81	7,15	0,18	41,89	1,06	2,53	7,58	3,00
S160/320-B40-2C-3	39,5	2	34	14	11,36	0,82	7,28	0,18	44,02	1,11	2,53	7,53	2,98
S160/320-B40-3C-1	39,5	3	34	14	10,59	0,77	10,18	0,26	45,99	1,16	2,53	8,31	3,28
S160/320-B40-3C-2	39,5	3	34	14	10,25	0,74	9,86	0,25	45,02	1,14	2,53	8,81	3,48
S160/320-B40-3C-3	39,5	3	34	14	10,11	0,73	9,72	0,25	44,03	1,11	2,53	7,82	3,09
S160/320-B60-1C-1	55,75	1	34	14	9,18	0,656	2,11	0,04	57,50	1,03	2,44	6,28	2,57
S160/320-B60-1C-2	55,75	1	34	14	10,16	0,726	2,19	0,04	57,90	1,04	2,44	6,41	2,63
S160/320-B60-1C-3	55,75	1	34	14	11,55	0,825	2,20	0,04	57,70	1,03	2,44	6,14	2,52
S160/320-B60-2C-1	55,75	2	34	14	10,29	0,735	4,22	0,08	58,98	1,06	2,44	6,91	2,83
S160/320-B60-2C-2	55,75	2	34	14	10,52	0,751	4,99	0,09	60,22	1,08	2,44	6,88	2,82
S160/320-B60-2C-3	55,75	2	34	14	10,16	0,726	4,21	0,08	59,58	1,07	2,44	6,94	2,84
S160/320-B60-3C-1	55,75	3	34	14	10,04	0,717	7,92	0,14	62,47	1,12	2,44	7,62	3,12
S160/320-B60-3C-2	55,75	3	34	14	10,39	0,742	7,80	0,14	62,88	1,13	2,44	7,54	3,09
S160/320-B60-3C-3	55,75	3	34	14	10,03	0,716	8,18	0,15	61,97	1,11	2,44	7,44	3,05

**Tableau VII.4** Comparaison expérimentale/Modèle analytique de la série section ‘Circulaire/CFRP’

Source	Résultats Expérimentaux								Résultats du modèle				
	$D$ (mm)	$f'_{co}$ (MPa)	$\varepsilon_{co}$ (%)	$E$ (GPa)	$\varepsilon_{fmu}$ (%)	$t_f$ (mm)	$f'_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cu}$ (%)	$f'_{l,theo}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon'_{cc,the}$ (%)	$f'_{cc,theo}/f'_{cc,exp}$	$\varepsilon'_{ccthe}/\varepsilon'_{ccexp}$
Lam and Tang [140]	152	35.9	0.203	230	15	0.165	50.4	1.273	7.490	56.872	0.956	1.128	0.751
	152	35.9	0.203	230	15	0.65	47.2	1.106	7.490	56.872	0.956	1.205	0.864
	152	35.9	0.203	230	15	0.165	53.2	1.292	7.490	56.872	0.956	1.069	0.740
	152	35.9	0.203	230	15	0.33	68.7	1.683	14.98	77.845	1.485	1.133	0.882
	152	35.9	0.203	230	15	0.33	69.9	1.962	14.98	77.845	1.485	1.114	0.757
	152	35.9	0.203	230	15	0.33	71.6	1.85	14.98	77.845	1.485	1.087	0.803
	152	34.3	0.188	230	15	0.495	82.6	2.064	22.47	97.217	1.934	1.177	0.937
	152	34.3	0.188	230	15	0.495	90.4	2.413	22.47	97.217	1.934	1.075	0.802
	152	34.3	0.188	230	15	0.495	97.3	2.516	22.47	97.217	1.934	0.999	0.769
	152	34.3	0.188	230	15	0.165	50.3	1.022	7.490	55.272	0.908	1.099	0.888
	152	34.3	0.188	230	15	0.165	50	1.082	7.490	55.272	0.908	1.105	0.839
	152	34.3	0.188	230	15	0.165	56.7	1.168	7.490	55.272	0.908	0.975	0.777
Valdmanis et all [147]	150	40	0.17	234	10	0.17	66	0.63	5.304	54.851	0.639	0.831	1.014
	150	40	0.17	234	10	0.34	87.2	1.07	10.608	69.702	0.921	0.799	0.860
	150	40	0.17	234	10	0.51	96	1.36	15.91	84.554	1.202	0.881	0.884
	150	44.3	0.17	234	10	0.17	73.3	0.58	5.304	59.151	0.611	0.807	1.054
	150	44.3	0.17	234	10	0.34	82.6	0.54	10.60	74.002	0.866	0.896	1.603
	150	44.3	0.17	234	10	0.51	115.1	0.94	15.91	88.854	1.120	0.772	1.192
Vincent and Ozbakkaloglu [110]	152	35.5	0.2	240	16	0.117	44	0.77	5.912	52.052	0.836	1.183	1.086
	152	35.5	0.2	240	16	0.117	43.9	0.82	5.912	52.052	0.836	1.186	1.020
	152	35.5	0.2	240	16	0.117	43.1	0.82	5.912	52.052	0.836	1.208	1.020
	152	38	0.21	240	16	0.234	63.5	1.51	11.82	71.105	1.258	1.120	0.833
	152	38	0.21	240	16	0.234	66.1	1.65	11.82	71.105	1.258	1.076	0.762
	152	36.1	0.2	240	16	0.234	58.6	1.27	11.82	69.205	1.239	1.181	0.975
	152	64.5	0.27	240	16	0.117	65.6	0.59	5.912	81.052	0.876	1.236	1.485
	152	64.5	0.27	240	16	0.117	68.7	0.57	5.912	81.052	0.876	1.180	1.537
	152	62.9	0.27	240	16	0.117	66.3	0.65	5.912	79.452	0.884	1.198	1.360
	152	64.5	0.27	240	16	0.234	72.3	0.93	11.82	97.605	1.186	1.350	1.275
	152	62.4	0.27	240	16	0.234	68.4	0.71	11.82	95.505	1.206	1.396	1.699
	152	64.2	0.27	240	16	0.234	68.2	0.82	11.82	97.305	1.189	1.427	1.449
	152	64.5	0.27	240	16	0.351	85.9	1.19	17.73	114.16	1.495	1.329	1.256
	152	64.5	0.27	240	16	0.351	80.3	1	17.73	114.16	1.495	1.422	1.495
	152	64.5	0.27	240	16	0.468	99.4	1.38	23.64	130.71	1.804	1.315	1.307
	152	62.4	0.27	240	16	0.468	101.3	1.41	23.646	128.61	1.846	1.270	1.309
152	65.8	0.27	240	16	0.468	104.3	1.36	23.646	132.01	1.780	1.266	1.309	
<b>Moyenne (M)</b>												1.128	1.074
<b>Ecart-type (SD)</b>												0.172	0.287
<b>Coefficient de variation (%) (CV)</b>												15.22	26.72

Tableau VII.5 Comparaison Expérimentale/Modèle analytique de la série section 'Circulaire/GFRP'

Source	Résultats Expérimentaux								Résultats du modèle				
	$D$ (mm)	$f'_{co}$ (MPa)	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$E$ (GPa)	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	$t_f$ (mm)	$f'_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cu}$ (‰)	$f'_{l,theo}$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc,theor}$ (‰)	$f'_{cc,theo}/f'_{cc,exp}$	$\varepsilon_{cc,theor}/\varepsilon_{cc,t,exp}$
Cui and Sheikh [131]	152	47.8	0.222	22	23	1.25	59.1	1.35	8.322	63.196	4.236	1.069	0.697
	152	47.8	0.222	22	23	1.25	59.8	1.15	8.322	63.196	4.236	1.057	0.818
	152	47.8	0.222	22	23	2.5	88.9	2.21	16.645	78.593	7.021	0.884	0.705
	152	47.8	0.222	22	23	2.5	88	2.21	16.645	78.593	7.021	0.893	0.705
	152	47.8	0.222	22	23	3.75	113.2	2.85	24.967	93.989	9.807	0.830	0.764
	152	47.8	0.222	22	23	3.75	112.5	2.8	24.967	93.989	9.807	0.835	0.778
Jiang and Teng [137]	152	33.1	0.309	80.1	23	0.17	42.4	1.3	4.121	40.724	3.442	0.960	0.816
	152	33.1	0.309	80.1	23	0.17	41.6	1.29	4.121	40.724	3.442	0.979	0.827
	152	45.9	0.243	80.1	23	0.17	40.5	0.81	4.121	53.524	2.886	1.322	0.863
	152	45.9	0.243	80.1	23	0.17	40.5	1.06	4.121	53.524	2.886	1.322	0.660
	152	45.9	0.243	80.1	23	0.34	52.8	1.2	8.242	61.147	4.323	1.158	0.873
	152	45.9	0.243	80.1	23	0.34	55.2	1.25	8.242	61.147	4.323	1.108	0.838
	152	45.9	0.243	80.1	23	0.51	64.6	1.55	12.363	68.771	5.759	1.065	0.901
Teng et all [123]	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.17	37.2	0.94	4.107	47.199	3.110	1.269	0.868
	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.17	38.8	0.83	4.107	47.199	3.110	1.216	0.991
	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.34	54.6	2.13	8.215	54.797	4.769	1.004	0.589
	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.34	56.3	1.83	8.215	54.797	4.769	0.973	0.687
	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.51	65.7	2.56	12.322	62.396	6.429	0.950	0.661
	152.5	39.6	0.263	80.1	23	0.51	60.9	1.79	12.322	62.396	6.429	1.025	0.943
<b>Moyenne (M)</b>												1.057	0.786
<b>Ecart-type (SD)</b>												0.154	0.105
<b>Coefficient de variation (%) (CV)</b>												14.57	13.36

**Tableau VII.6** Comparaison Expérimentale/Modèle analytique de la série section 'Prismatique carré/CFRP'

Source	Résultats Expérimentaux								Résultats théoriques				
	$b$ (mm)	$f_{co}$ (MPa)	$\varepsilon_{coExpe}$ (‰)	$E_{frp}$ (GPa)	$\varepsilon_{frp}$ (‰)	$t_f$ (mm)	$f_{cc\ Exper}$ (MPa)	$\varepsilon_{cu}$ (‰)	$f_{l,theo}$ (MPa)	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc\ model}$ (‰)	$f_{cc\ theo} / f_{cc\ Exp}$	$\varepsilon_{cc\ theo} / \varepsilon_{cc\ ex}$
Demers and Neale [135]	152	32.3	2	25	15.2	0.9	34.1	4	3.18	33.67	5.19	0.98	1.298
	152	42.2	2	25	15.2	0.9	45.99	3.52	3.18	43.57	5.05	0.94	1.444
	152	42.2	2	25	15.2	0.9	45.71	3.52	3.18	43.57	5.05	0.95	1.444
Labossieret Rochette [138]	152	42	3	82.7	15	0.9	42.23	6.92	10.39	46.47	9.15	1.10	1.323
	152	43.9	3	82.7	15	1.5	50.86	10.11	17.32	51.35	10.4	1.010	1.025
	152	43	3	13.6	16.9	1.2	44.08	10.54	2.696	44.16	7.46	1.01	0.704
	152	43	3	13.6	16.9	5.04	47.33	12.12	10.78	47.64	9.15	1.00	0.738
Wang and Wu [113]	150	31.4	-	219	19.9	0.165	32.1	-	6.78	34.32	-	1.04	-
	150	31.2	-	219	19.9	0.165	31.8	-	6.78	34.12	-	1.16	-
	150	31.3	-	219	19.9	0.165	32.7	-	6.78	34.22	-	1.16	-
	150	31.4	-	219	19.9	0.33	32.1	-	13.56	37.23	-	1.15	-
	150	31.2	-	219	19.9	0.33	31.8	-	13.56	37.03	-	1.03	-
	150	31.3	-	219	19.9	0.33	32.2	-	13.56	37.13	-	1.03	-
	150	51.2	-	230	19.2	0.165	52.4	-	6.87	54.16	-	1.01	-
	150	53.3	-	230	19.2	0.165	54.6	-	6.87	56.26	-	1.01	-
	150	52	-	230	19.2	0.165	54.1	-	6.87	54.96	-	1.07	-
	150	51.2	-	230	19.2	0.33	56.2	-	13.74	57.11	-	1.02	-
	150	53.3	-	230	19.2	0.33	55	-	13.74	59.21	-	1.04	-
	150	52	-	230	19.2	0.33	56.7	-	13.74	57.91	-	1.160	-
benzaid [2]	100	54.8	2.500	23.8	21.2	0.44	56.1	9.2	3.14	56.15	6.180	1.001	0.672
	100	54.8	2.500	23.8	21.2	0.88	58.2	14.01	6.28	57.50	6.610	0.988	0.453
<b>Moyenne (M)</b>											1.041	1.011	
<b>Ecart-type (SD)</b>											0.062	0.379	
<b>Coefficient de variation (%) (CV)</b>											5.99	37.5	

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

ET

PERSPECTIVES

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Le présent travail de recherche est une contribution dans le domaine du renforcement des constructions en béton armé par des matériaux composites. Cette recherche a été axée sur l'étude du renforcement par confinement des colonnes en béton par des matériaux composites en polymères renforcés par fibres de carbone CFRP ou fibres de verre GFRP.

La recherche bibliographique menée sur le comportement des poteaux en béton armé renforcés par des enveloppes en matériaux composites a montré que la majorité des travaux expérimentaux ont été faits sur des spécimens cylindriques, un manque important des travaux de recherches sur les poteaux de section rectangulaire ou carrée a été constaté.

La première partie a eu pour problématique, de mettre en évidence les effets du confinement en matériaux composites sur le comportement du matériau béton. Pour y répondre, un travail expérimental a été élaboré. Il a consisté à tester en compression des spécimens en béton de forme cylindrique et de forme prismatique carrée confinés par des enveloppes de FRP.

Ces essais ont permis de mesurer la déformation longitudinale et transversale en fonction de la contrainte axiale.

La présente étude porte sur la compréhension du comportement de colonnes en béton de section circulaire ou prismatique carrée, confinées avec des enveloppes de composite à base de fibres de verre ou de carbone. Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement et la performance des éprouvettes confinées avec des matériaux composites « FRP » à savoir:

- Le degré de confinement (nombre de couches);
- La résistance en compression du béton non confiné ;
- Le type du matériau composite ;
- La forme de la section transversale (circulaire ou carrée) des colonnes confinées ;
- Le rayon de courbure des coins pour les colonnes de section carré ;
- Le rapport volumétrique ( $\rho$ ).

Pour mener à bien cette investigation, un programme expérimental a été élaboré. Ce programme de recherche a été mené sur les types de spécimens suivants :

- 54 cylindres en béton de dimensions ( $\text{Ø}160 \times 320 \text{ mm}$ ) confinés avec deux types de polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) et de fibres de verre (GFRP) ;
- 27 spécimens prismatiques carrés en béton de dimensions ( $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}$ ) confinés avec un polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) ;
- 27 cylindres en béton de dimensions ( $\text{Ø}80 \times 320 \text{ mm}$ ) confinés avec un polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) ;
- 27 cylindres en béton de dimensions ( $\text{Ø}80 \times 500 \text{ mm}$ ) confinés avec un polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) ;
- 12 spécimens prismatiques carrés en béton de dimensions ( $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}$ ) arrondis avec des rayons de coins différents ( $r/b=0 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8, 1$ ) confinés avec un polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) ;

L'ensemble de ces spécimens a été confectionné à partir de trois séries de béton (25, 40 et 60 MPa) et confinés par une couche, deux couches ou trois couches de FRP.

Par ailleurs, à travers les résultats expérimentaux obtenus et les considérations théoriques, un modèle du type résistance a été proposé pour les besoins de dimensionnement pratique des colonnes confinées avec des matériaux composites « FRP ».

A la base des résultats obtenus de cette étude portée sur l'évaluation du comportement mécanique en compression axiale des colonnes en béton confinées par des enveloppes en matériaux composites (CFRP et GFRP) extérieurement collées, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- **Résistances maximales et déformations correspondantes**

Le confinement a eu un effet positif sur les caractéristiques mécaniques des spécimens cylindriques et des spécimens prismatiques. En variant le nombre de couches de CFRP de 1,2 à 3, la résistance à la compression des spécimens cylindriques Ø160x320 a été augmentée respectivement avec des taux moyens de 47%, 92% et 142% par rapport au béton non confiné. De même la résistance des spécimens prismatiques carrés 150x150x300 a augmentée de 5%, 12% et 15%. Les déformations ultimes ont aussi été augmentées. En effet, pour les spécimens cylindriques, on a trouvé respectivement des augmentations de 311%, 535% et 723%, et pour les spécimens prismatiques des augmentations de 162%, 200% et 233%. De façon générale, l'enveloppe en composite permet d'améliorer significativement la résistance et la rigidité des colonnes en béton.

- **Courbes Contrainte-Déformation**

Tous les spécimens confinés avec des matériaux composites FRP ont présenté une allure caractéristique tri-linéaire, où la première zone présente une zone élastique linéaire gouvernée par la rigidité du béton non confiné. La seconde zone comme une zone de transition tandis que la troisième étape, les courbes présentent un comportement linéaire jusqu'à la rupture de l'enveloppe où les courbes des échantillons cylindriques montrent une tendance ascendante, cependant, les courbes des spécimens prismatiques carrés présentent une branche post-pic descendante similaires celles des spécimens non confinés.

- **Degré de confinement**

Pour l'ensemble des spécimens testés, les résultats obtenus montrent que plus le nombre de couches de FRP (l'augmentation de la rigidité du confinement) est élevé, meilleur est la performance en terme de résistance et de déformation procurée.

- **Modes de rupture des spécimens confinés**

La rupture de tous les spécimens confinés est marquée par une rupture des fibres. Elle se produit prématurément, pour un niveau de contrainte inférieur à la résistance ultime du composite FRP. La rupture et les modes d'endommagement des colonnes confinées dépendent fortement du type de la section transversale des spécimens confinés, ainsi que du type et de la nature de l'enveloppe composite.

- **Résistance en compression du béton non confiné**

En général, une augmentation de la résistance à la compression du béton  $f'_{co}$  entraîne une diminution globale à la fois du rapport de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et de déformation ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) pour les deux types de sections étudiées (à savoir les sections circulaires et carrées). Plus la

résistance initiale du béton est élevée, moins le gain procuré par le confinement par FRP est important.

- **Type du matériau composite**

Pour les deux types de composites utilisés CFRP et GFRP, le confinement entraîne une amélioration à la fois de la résistance et de la déformation. Cependant, plus le module d'élasticité du composite FRP est élevé, plus la contrainte de confinement est grande. Tandis que, plus la déformation du composites est grande, meilleur est la performance de confinement en terme de déformation procurée. Donc, le CFRP doit être utilisé pour apporter une plus forte augmentation de la résistance et une ductilité modérée, alors que le GFRP devrait être utilisé pour fournir une plus grande ductilité et une augmentation modérée de la résistance.

- **Forme de la section transversale des colonnes confinées**

- **Type de section transversale** : Les résultats des spécimens confinés montrent que pour la même série de confinement (rapport de section transversale, même élancement géométrique L/D, série de béton), la capacité de résistance et de déformation du confinement est plus bénéfique dans les spécimens de section circulaire que dans le cas des spécimens de section carrée. Cela, est interprété par une forte concentration de contraintes engendrées au niveau des coins de spécimens prismatiques carrés qui provoquent une rupture prématurée des enveloppes de composites.
- **Variation du rayon de coin** : Les résultats des spécimens prismatiques carrés arrondis avec des rayons de coins différents, montrent que l'augmentation du rayon des coins des spécimens prismatiques carrés confinés avec des matériaux composites FRP a un effet significatif sur le comportement des courbes contraintes-déformation ainsi que sur les conditions ultimes (résistance maximale et déformations correspondantes). La zone de rupture du FRP augmente avec l'augmentation du rayon d'angle. On peut conclure que la répartition des contraintes devient plus uniforme et que la zone confinée effective augmente lorsque le rayon d'angle augmente.

- **Rapport volumétrique ( $\rho$ ) :**

Les résultats obtenus pour les colonnes en béton de sections circulaires Ø160x320, Ø80x320 et de Ø80x500 mm correspondant respectivement des élancements géométriques (L/D) de 2, 4 et de 6.25 montrent que plus le rapport volumétrique est élevé, plus la pression latérale de confinement est grande et par conséquent la performance en termes de résistance et de déformation est améliorée.

- **Modèle Analytique:**

Le modèle proposé offre des prédictions satisfaisantes en ce qui concerne la résistance et la déformation du béton confiné avec des composites FRP.

## Perspectives

A l'issue de notre travail de recherche et afin de permettre une compréhension plus approfondie du comportement des colonnes confinées par des enveloppes en FRP, on envisage les perspectives suivantes :

- Etudier le comportement des colonnes en béton armé confinées par matériaux composites sous sollicitations composées.
- Déterminer expérimentalement les caractéristiques cycliques, sous un chargement de compression cyclique excentrée.
- Etudier le comportement des colonnes en béton armé avec des rapports  $L/D \geq 15$  permettrait de déterminer le seuil de l'influence du flambement sur l'efficacité du confinement avec des matériaux composites.
- Réaliser une simulation numérique par le biais d'un code de calcul à l'instar d'ANSYS ou ABAQUS.
- Faire un code de calcul récoltant tous les paramètres de confinement
- Effectuer une étude technico-économique approfondie pour démontrer la rentabilité de la technique « réhabilitation par matériaux composites ».

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] Abbasnia, R., Ziaadiny, H. "Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression", *Engineering Structures*, (2009) Vol. 30, pp. 493-505.
- [02] Abdalla, H.A. "Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer FRP bars", *Composites structures*, Vol. 56, pp. 63-71(2002)
- [03] Acroix, R. Clement, J.L. "Propriétés des bétons arme et précontraints", Hermes Science publications (2002).
- [04]ACI 440 R-96 "State-of-the-art report on fiber reinforced plastic FRP reinforcement for concrete structures", American Concrete Institute Committee 440, Farmington Hills, Michigan, USA(1996).
- [05] ACI Committee. (2006 ) "Guide for the Selection of Materials for the Repair of Concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills,Michigan, 546.3R-06.
- [06] AFGC "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages", Groupe de travail AFGC, Documents scientifiques et techniques (2004) .
- [07] Agouzoul, S. "Renforcement en flexion des poutres en béton armé par des plaques en FRP", Mémoire de maîtrise, Spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada(1999).
- [08] Al-Mahmoud, F. Castel, A. François, R. Tournier, C. "RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure", *Composite structures* Vol 92, pp.1920-1930(2010).
- [09] Al-Salloum,M. "Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates" *Composites: Part B*, (2007) Vol. 38, pp. 640-650.
- [10] Al-Sulaimani G.J. Aleemullah, M. "Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members", *ACI Structural Journal*, (1990) Vol.87,pp. 220-231.
- [11] Auyeung, Y. Balagru, P. Chung, L. "Bond behavior of corroded reinforcement bars", *ACI Materials Journal*, (2000) Vol. 97, no 2, pp. 14–220.
- [12] Benzaid,R. Chikh, ND. Mesbah, H. "Behaviour of square concrete column confined with GFRP composite wrap", *Journal of Civil Engineering and Management* (2010) Vol. 14 No. 2, pp115-120.
- [13] Berthet, J.F., Ferrier E. "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A", *Construction and Building Materials*, (2005) Vol. 19, pp. 223-232.
- [14] Barros, J.O.A. Varma, R.K. Sena-Cruz, J.M. "Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns" *Engineering Structures* (2008) Vol. 30, pp. 3412-3425.
- [15] Berthelot, J.-M. "Comportement mécanique et analyse des structures", Paris, 3ème éditions, (1999) Tec et Doc, 642 p.
- [16] Bresson, J. "Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures- Béton plaqué", *Annales de l'ITBTP, série béton et béton armé ; N° 278*, (1971).
- [17] Bessière, J.F. "La potentialité des matériaux composites de synthèse dans l'architecture", Mémoire de fin d'études, Ecole d'architecture de Paris Belleville (1996).
- [18] Bakis, C.E. "Life cycle analysis issues in the use of FRP composites in civil infrastructure" *Workshop on Life Cycle Assessment of Sustainable Infrastructure Materials*, Sapporo, Japan, (2009).
- [19] Chaallal, O. Hassan. "Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines", *Journal of Composites for Construction*, (2006) Vol. 10, No. 1, pp. 4-12.
- [20] Choi, E. Kim, JW. Rhee, I. Kang JW. "Behavior and modeling of confined concrete cylinders in axial compression using FRP rings" *Composites: Part B* (2014) Vol. 58 pp 175–184
- [21] Calgaro, J.A. Lacroix, R. "Maintenance et réparation des ponts", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1997).
- [22] Choukir .A. "La fissuration des ouvrages en béton", *Revue Marocaine du Génie Civil* (1992) N° 42, , ( 35-42).
- [23] Cabrera, J.G. "Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion", *Cement and Concrete Composites*, (1996) Vol. 18, , pp. 47-59.
- [24] Coronelli, D. "Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete", *ACI Structural Journal*, (2002) Vol. 99, no3, pp. 267-276.
- [25] Calgaro, J. Lacroix, R. "Maintenance et réparation des ponts", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, (1997)p.11-19.
- [26] Chai, Y.H. Priestley, M.J.N. Seible, F. "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance", *ACI Structural Journal* (1991), pp. 572-584.
- [27] Char, M.S., Saadatmanesh, H. et Ehsani,M.R. "Concrete girders externally prestressed with composite plates", *PCI Journal*, (1994) pp. 40-51.
- [28] Carolin, A. "Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements", Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, (2003) 178 p.

- [29] Christian, D. "Poinçonnement des dalles bidirectionnelles en béton armé d'armature de GFRP", Université de Sherbrooke, mémoire de maîtrise en science appliquées (2003).
- [30] Davidovici, V. "Enseignements tirés de la fissuration des structures en béton armé", Formulaire du béton armé, Tome 2, Editions du Moniteur, (1997) (286-295).
- [31] Dekoster, M. "Etude du comportement mécanique des structures en béton armé dégradé par la corrosion", Thèse de Doctorat, Spécialité génie civil, université de Lille1, France(2003).
- [32] Derrick, G.L. "Fiber glass composite distribution and transmission poles", Proceedings of the 3rd International Conference on Power and Development in Afro-Asian Countries, p. 1066-1073 (1996).
- [33] De Lorenzis L., Nanni A. "Shear strengthening of reinforced concrete beams with near surface mounted fiber-reinforced polymer rods", J. ACI Structural, (2001) p. 60-68, January February.
- [34] El Gawady, M. Endeshaw, M. McLean, D. Sack, R. "Retrofitting of rectangular columns with deficient lap splices" Journal of composites for construction, (2010) pp. 22-35.
- [35] El Houssain, R. "contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites", Université de Lyon 1, thèse de Doctorat (2004).
- [36] El-Hacha R., Rizkalla S. "Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete", J. ACI Structural, (2004) Vol. 101, No. 5.
- [37] Ehsani, M.R. et Saadatmanesh, H. "Seismic retrofit of URM walls with fiber composites", The Masonry Society Journal, (1996) pp.63-72.
- [38] EN 1998-3. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (2005).
- [39] Francesco Micelli, Rossella Modarelli. "Experimental and analytical study on properties affecting the behavior of FRP-confined concrete" Composites: Part B (2013) Vol. 45, pp1420-1431.
- [40] Fardis, M.N. et Khalili, H.H. "Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic", ACI Material Journal Proceedings, (1981) Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.
- [41] Feng, P. Cheng, S. Bai, Y. "Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete subjected to axial compression" Composite Structures (2015) Vol. 123, pp312-324.
- [42] Francy, O. Francois, R. "Modélisation du transfert couplé ions chlorures-humidité dans les matériaux cimentaires", RFGC, (2001) vol. 5, n°2-3, p. 377-396.
- [43] Fargeot, B. Tourneur, C. "Le traitement des fissures, maintenance et réparation des ponts", presses des ponts et chaussée (1997).
- [44] Fukuyama, H. et Sugano, S. "Studies Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake", Cement and Concrete Composites, (2000) Vol. 22, pp. 59-79.
- [45] Godart, B. (1997) "La réparation du béton dégradé, maintenance et réparation des ponts", Chapitre 6, presses des ponts et chaussée.
- [46] Hussein M. Elsanadedy, Yousef A. "Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns" Construction and Building Materials.(2012) Vol. 29, pp56-72
- [47] Hamelin, P. "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", Techniques pour l'Ingénieur(2002).
- [48] Harries, K.A. Ricles, J.R. "Seismic Retrofit of Lap Splices in Nonductile Square Columns Using Carbon Fiber-Reinforced Jackets" ACI Structural Journal, (2006) Vol. 103 S89, pp. 874-884.
- [49] Hassan T., Rizkalla S. "Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips", Composite Constructions, (2003) 7(3), p. 248- 257.
- [50] Islam, M. "Confinement effect of fiber reinforced polymer wraps in circular and square concrete columns" Civil Engineering Congress, Dhaka, Bangladesh, (2011) pp.978-984.
- [51] Iacobucci, R.D. Sheikh, S.A. Bayrak, O. "Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance" ACI Structural Journal, (2003) Vol.100-S81, pp. 785-794.
- [52] ISIS Product Certification No. 1. "Specifications for product certification of fibre reinforced polymers (FRPs) as internal reinforcement in concrete structures". Manitoba, Canada (2006), 27 p.
- [53] Katsumata, H., Kobatake, Y., et Takeda, T. "A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns", Proceedings of the 9 Conference on Earthquake Engineering, Vol. 7, Tokyo, Japan, (1988) pp. 517-522.
- [54] Kumutha, R., Vaidyanathan, R. "Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP", Cement and Concrete Composites, (2007) Vol. 29, pp. 609-615.
- [55] Karbhari, V. M. et Gao, Y. "Composite Jacketed concrete under uniaxial compression verification of simple design equations", Materials in Civil Engineering, (1997) Vol. 9, No. 4, pp. 185-193.

- [56] Kono, S., Inazumi, M., Kaku, T. "Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members." 2<sup>nd</sup> International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI'98, edited by: Saadatmanesh, H. and Eshani, R., University of Arizona, Tucson, (1998) pp. 343-355.
- [57] Karbhari, V. "Durability of FRP composites for civil infrastructure, mystery or reality", Department of Structural Engineering, University of California(2000).
- [58] Lavergne, S., et Labossiere, P. "Experimental study of concrete columns confined by a composite jackets under combined axial and flexural load", Annual Congress of the CSCE, , Québec, (1997) Vol. 6pp.11-20.
- [59] Lam, L. et Teng, J.G. "Strength models for FRP-confined concrete", Journal of Structural Engineering , ASCE, (2002) Vol. 128, No. 5, pp. 612-623
- [60] Li, Y-F., Lin, C-T. et Sung Y-Y. "A constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Mechanics of Materials, (2003) Vol. 35, pp. 603-619.
- [61] Lin, C-T. et Li, Y-F. "An effective peak stress formula for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Canadian Journal of civil Engineering, (2003) Vol. 30, pp.882-889.
- [62] Lin, H-J. et Liao, C-I. "Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material", Composite Structures, (2004) Vol. 65, pp. 239-250.
- [63] L'Hermite, R. "L'application des colles et résines dans la construction", Annales de l'ITBTP , série béton et béton armé, N° 239, (1967).
- [64] Lapierre, P. "Modélisation de poutres en béton armé renforcées de matériaux composites", Mémoire de maîtrise, Spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada(1999).
- [65] Luyckx, J. "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, (1999) AM 5 620.
- [66] Mander, JB. Priestley, M. Park, R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete". Journal of Structural Engineering .114,1804-1826 (1988). DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [67] Maalem, H. "Expertise du supermarché de la ville de Annaba", Agence de Annaba, CTC\Est (1988).
- [68] Marzouk, H. Ehrlacher, A. "Reinforced concrete two-way slabs strengthened with composite material: A limit analysis study", Composite Structures, (2003) Vol. 59, pp. 467-472.
- [69] Monti, G., et Spoelstra, M. R. "Fiber-section analysis of RC bridge piers retrofitted with FRP jackets", Proceedings of Structures Congress XV Building to Last, (1997).
- [70] Mirmiran, A. et Shahawy, M. "Behavior of concrete columns confined by fiber composites", Journal of Structural Engineering, ASCE, (1997) Vol. 123, No.5, pp. 583-590.
- [71] Mirmiran, A., Shahawy, M. Samaan, M. et El Echary, H. "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", Journal of Composites for Construction, ASCE, (1998) Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.
- [72] Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T. et Kobayashi, A. "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet", Transactions of the Japan Concrete Institute, (1999) Vol. 21, pp.143-150.
- [73] Mcconnell, V. "Composites in North America", Reinforced plastics, (2005)Vol.49, n° 11, p. 2633.
- [74] Massicotte, B. Boucher-Proulx, G. "Seismic retrofitting of bridge piers with UHPFRC", Designing and Building with: State of the Art and Development, ISTE-Wiley, (2010) pp. 531-540.
- [75] Meier, U. et Winistorfer, A. " Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheets", Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of The Second International RILEM Symposium, (1995) L., pp.509-516, London, UK.
- [76] Mosallam, A. "Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates", Construction and Building Materials, (2003) Vol. 17, pp.43-54.
- [77] Mamillan, M "Restauration des bâtiments en béton armé", Techniques de l'ingénieur, Tome 4, Editions Eyrolles, (1996) 2350-1,2350-14.
- [78] Nanni, A., et Bradford, N.M. "FRP jacketed concrete under uniaxial compression", Construction and Building Materials, (1995) Vol. 9, No. 2, pp. 115-124.
- [79] Nanni, A. et Norris, M.S. "«FRP» jacketed concrete under flexure and combined flexure compression", Construction and Building Materials, (1995) Vol. 9, No. 5, pp.273-281
- [80] Nanni A., Di Ludovico M., Parretti R. "Shear strengthening of a PC bridge with NSM CFRP rectangular bars", J. Adv Structure Engineering, (2004) 7(4), p. 97-109.
- [81] Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. et Higashibata, Y. "Bond properties of CFRP plate joint", Non-Metallic («FRP») Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan, (1997) pp. 241-248.

- [82] Pan, J.L., Xu, T. et Hu, Z.J. "Experimental investigation of load carrying capacity of the slender reinforced concrete columns wrapped with FRP", *Construction and Building Materials*, (2007) Vol. 21, pp. 1991-1996.
- [83] Pantelides, C.P. Gergely, J. Reaveley, L.D. "Seismic strengthening of reinforced concrete bridge pier with FRP composites" 12<sup>th</sup> World Conference on earthquake Engineering, (2000), New Zealand.
- [84] Pellegrino, C. et Modena, C. "Analytical model for FRP confinement of concrete columns with and without internal steel reinforcement" *Composite for construction*, (2010) Vol 14, No 6, pp 693-705.
- [85] Priestley, M.J. N., Seible, F., Fyfe, E., "Column seismic retrofit using fiber glass epoxy jackets", *Advanced Composite Materials for Bridges and Structures*. (1992) pp. 287-298.
- [86] Perrone, M. Barros, J.A.O. "CFRP-based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns" *composites for construction*, (2009) pp. 372-383.
- [87] Pico, O. "Confinement effectiveness of square FRP tubes in hybrid columns", MS Thesis, University of Central Florida, Orlando, Florida (1997).
- [88] Priestley, M.J.N. Seible, F. Calvi, G.M., "Seismic design and retrofit of bridges", Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, (1996) Inc. 686p.
- [89] Priestley, M. J. N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R. "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength-Part 2: Test Results and Comparison With Theory." *ACI Structural Journal*, (1994) 91(5).
- [90] Richart, F. Brandtzaeg, A. Brown, RL, "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression", Bulletin No.190 (1929), Engineering Experiment Station, University of Illinois, USA.
- [91] Raharinaivo, A. Arliguie, G. Chaussadent, T. Grimaldi, G. Pollet, V. Aché, G. "La corrosion et la protection des aciers dans le béton", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1998).
- [92] Resse, C. Venaut, M. "Projection des mortiers béton et plâtres", *Techniques et applications bâtiment et TP* (1981).
- [93] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. et Li, M. W. "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", *ACI Structural journal*, (1994) Vol. 91, No.4, pp. 434-447.
- [94] Saadatmanesh M., Ehsani, M-R., Limin Jin. "Behavior of concrete retrofitted with fiber composite straps under cyclic loading", *Fiber Composites structure. ICCI'96, U.S.A.*, (1996) pp. 842-856.
- [95] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman T. "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns", *Composites: Part B*, (2000) Vol. 31, pp. 471-480.
- [96] Shehata, I. A. E. M., Carneiro, L. A. V., et Shehata, L. C. D. "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets", *Materials and Structures*, (2002) Vol. 35, pp. 50-58
- [97] Samaan, M. "An analytical and experimental investigation of concrete-filled fiber reinforced plastics FRP tubes ", Doctorate Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering in the College of Engineering at the University of Central Florida- Orlando, Florida, (1997) 220 p.
- [98] Spoelstra, M.R. et Monti, G. "FRP-confined concrete model" *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150 (1999).
- [99] Seible, F. Priestley, M.J.N. Hegemier, G.A. Innamorato, D. "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets" *Journal of composites for construction*, (1997) pp. 52-62.
- [100] Saafi, M., Toutanji, H.A. et Li, Z. "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", *ACI Materials Journal*, (1999) Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.
- [101] Silva, M. "Behavior of square and circular columns strengthened with aramidic or carbon fibers" *Construction and Building Materials*, (2011) Vol 25. 3222-3228
- [102] Sika, Procèdes Sika Carbodur, Lamelle&Sika Wrap HEX 230 C, Sika Outre Mer Algérie, (2003).
- [103] Tan, K.H. "State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibres Southeast Asian perspective-status, prospects and research needs", *Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structure, the Third International Symposium* , Sapporo, Japan, (1997) pp. 13-23.
- [104] Theillout, J-N. "Renforcement des structures à laide de plats métalliques collés", In: Calgaro, J.A. et Lacroix, R. : *Maintenance et Réparation des Ponts*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, (1997), 666 p.
- [105] Toutanji, H. "Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets." *ACI Materials Journal*, (1999) Vol. 96, No. 3, pp. 397-404.

- [106] Thériault, M. et Neale, K.W. “Design equations for axially-loaded reinforced concrete columns strengthened with FRP wraps”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, (2000) Vol. 27, No. 5, pp. 1011-1020.
- [107] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. “FRP Strengthened RC Structures”, John Wiley & Sons, (2002) Ltd, Chichester, UK, 245p.
- [108] Teng, J.G. et Lam, L. “Compressive behaviour of carbon fiber reinforced polymer-confined concrete in elliptical columns”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (2002) Vol. 128, No. 12, pp. 1535-1543.
- [109] Thériault, M., Neale, K.W. et Claude, S. “Fiber-reinforced polymer-confined circular concrete columns: Investigation of size and slenderness effects”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, (2004) Vol. 8, No. 4, pp. 323-331
- [110] Vincent, T. Ozbakkaloglu, T. “Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high- and ultra high-strength concrete” *Composites: Part B*, (2013) Vol. 50, pp 413–428
- [111] Vizuete, J.M. “Techniques et systèmes de renfort des structures en béton”, *Proceedings of The Third ST Workshop*, (2000), edited by Laeger, H. and Prodon, S., pp.151-158.
- [112] Wang, Y-C. et Hsu, K. “Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity”, *Composite Structures*, (2008) Vol. 82, pp.132-139.
- [113] Wang, L-M. et Wu, Y-F. “Effect of corner radius on the performance of CFRP confined square concrete columns: Test”, *Engineering Structures*, (2008) Vol. 30, pp. 493-505.
- [114] Wang, H. Wang, D. Lu D. “Behavior of large-scale circular and square RC columns confined with carbon fiber-reinforced polymer under uniaxial compression” *Advanced Materials Research*, (2011) Vols. 163-167 pp 3686-3693
- [115] Xiao, Y. et Wu, H. “Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, (2003) Vol. 22, No. 13, pp. 1187-1201.
- [116] Xiao, Y. et Wu, H. “Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets”, *Journals of Materials in Civil Engineering*, (2000) ASCE, Vol. 12, No. 2, pp.139-146.
- [117] Xiao, Y., Martin, G.R., Yin, Z., Ma, R., “Seismic retrofit existing reinforced concrete bridge columns using a prefabricated composite wrapping system”, *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI'96, USA.*, (1996) pp. 903-916.
- [118] Xiao, Y. et Ma, R. “Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing”, *Journal of Structural Engineering*, (1997) Vol. 123, No. 10, p. 1357-1364.
- [119] Youssef, M.N., Feng M.Q., et Mosallam A.S. “ stress-strain model for concrete confined by FRP composites” *Composites: Part B*, (2007) Vol. 38, pp. 614-628.
- [120] Rousakis, T.C., Karabinis, A.I. “Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects”, *Materials and Structures*, (2008) Vol. 41, No. 9, pp. 1595-1611.
- [121] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K. et Taerwe, L. “Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites”, *ACI Structural Journal*, (2005) Vol. 102, No. 2, pp. 258-267.
- [122] Micelli, F. Modarelli, R. “Experimental and analytical study on properties affecting the behaviour of FRP-confined concrete”. *Composites Part B: Engineering*, 45,1420–1431(2013).
- [123] Teng, J.G. Yu, T. Wong, Y.L. Dong, S. “Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior”. *Construction and Building Materials*. 21(4),846-854 (2007), doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.017
- [124] Russell-Smith, S.V. Lepech, D. “Life cycle assessment of FRP seismic retrofitting” *Proceedings of US-Japan Workshop on Life Cycle Assessment of Sustainable Materials*, Japan, (2009).
- [125] Quiertant, M. Clément, J.-L. “Behavior of RC columns strengthened with different CFRP systems under eccentric loading” *Construction and Building Materials*, (2011) Vol. 25, pp. 452-460.
- [126] Teng, J.G. Jiang, T. Lam, L. Luo, Y. “Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete”. *Journal of Composites for Construction (ASCE)*,13(4), 269-278 (2009). DOI 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012
- [127] Ozbakkaloglu, T. Jian, C. “Axial compressive behaviour of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model”. *Composites Part B: Engineering*. 55, 607-634 (2013).<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.025>
- [128] TOUHARI, M. MITICHE KETTAB, R. ABDESSEMED, M. BALI, A. A. Laichaoui “Renforcement des poutres par matériaux composites à base de fibres de carbone CFRP : Investigation

- Numérique et Expérimentale”. 7<sup>ème</sup> Symposium sur la construction en zone sismique, Université de Chlef, Octobre 2015.
- [129] Bieniawski, Z.T. “Estimating the strength of rock materials. Journal of the south african institute of mining and metallurgy” (1974). 74, 312-324.
- [130] Campione, G., Miraglia, N. and Papia. M. “Influence of section shape and wrapping technique on the compressive behavior of concrete columns confined with CFRP sheets”, *Composites in Constructions*, (2003), (6) 216-221.
- [131] Cui, C. Sheikh, A. “Experimental study of normal- and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers”. *Journal of Composites for Construction (ASCE)*. 14:553–561(2010).
- [132] Collins, M.P. and Mitchell, D. “prestressed concrete structures publications” Canada (1997).
- [133] Cole, C. and Belarbi, A. “Confinement Characteristics of Rectangular FRP-Jacketed RC Columns”, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures*, Cambridge, UK, (2001) p.p. 823-832.
- [134] De Lorenzis, L. Tepfers, D. “Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites” *ASCE Journal of Composites for Construction*, (2003) p. 219-237.
- [135] Demers, M. and Neale, K.W. “Strengthening of Concrete Columns with Unidirectional Composite Sheets”, (1994) *Canadian Society of Civil Engineering*, 91: 895-950.
- [136] Goodman, R.E. “Introduction to Rock Mechanics”, John Wiley & Sons, (1989).
- [137] Jiang, T. Teng, J. “Analysis-oriented Stress-Strain Models for FRP-Confined Concrete”. *Engineering Structures*. (2007). 29, 2968-2986.
- [138] Labossiere, P. and Rochette, P. “Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites”, *Journal of Composites for Construction*, (2000) 4(3): 129-36.
- [139] Lam, L. Teng, J.G. “Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials*, (2003) 17 471–489.
- [140] Lam, L. Teng, J.G. Ultimate condition of FRP-confined concrete, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*. 8:539–548(2004).
- [141] Maalej, I-A. Chenik, M. Louzir, H. Ben Salah, A. Bahloul, C. Amri, F. Dellagi, K. “Comparative evaluation of ELISAs based on ten recombinant or purified Leishmania antigens for the serodiagnosis of Mediterranean visceral leishmaniasis”. *Am J Trop Med Hyg.* (2003) 68(3):312-20.
- [142] Neville, A. M. “Properties of concrete” Fifth Edition (1997).
- [143] Richart, F.E., Bradtzaeg, A. Brown, R. L. “A study of the failure of concrete under combined compressive Stresses” , *Bulletin No. 185, Engineering experimental station University of Illinois, Urbana*, (1928) pp. 104.
- [144] Ozbakkaloglu, T. “Compressive behaviour of concrete-filled FRP tube columns: Assessment of critical column parameters”, *Engineering Structures*. (2013) 51, 188–199.
- [145] Scholefield, B.W.J. “The strengthening of reinforced concrete columns with various methods”, M.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada; September (2003).
- [146] Touhari, M. R Mitiche-Ketteb. “Behaviour of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Investigation and Strength Model”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (2016) 60(4), pp. 647-660, 2016.
- [147] Valdmanis, V. De Lorenzis, L. Rousakis, T. Tepfers, R. “Behaviour and capacity of CFRP-confined concrete cylinders subjected to monotonic and cyclic axial compressive load”. *Structural Concrete Journal*. (2007) 8(4), 187-190.
- [148] ASTM C39/C39M-03 “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”, ASTM International, (2003).
- [149] NF EN ISO 527-1 1996-03 “Plastiques, Détermination des propriétés en traction, partie 1: Principes généraux”, AFNOR, 10 p (1996).
- [150] NF EN ISO 527-2 1996-07 “Plastiques, Détermination des propriétés en traction, partie 2: Condition d’essai des plastiques par moulage et extrusion”, AFNOR, 5 p (1996).
- [151] NF EN ISO 527-5 1997-07 “Plastiques, Détermination des propriétés en traction, partie 5: Condition d’essai pour les composites plastiques renforcés de fibres unidirectionnelles”, AFNOR, 11 p (1997).

# ANNEXES

**Notice Produit**  
 Numéro 9.80  
 Edition 21/07/2014  
 Version N° 2016 - 163  
 N° identification : 020206020010000025  
 SikaWrap®-230 C

## SikaWrap®-230 C

Tissu de fibres de carbone unidirectionnelles, conçu pour les applications de renforcement de structures

*Avis Technique CSTB n°3/16-875*

<b>Description</b>	Le SikaWrap®-230 C est un tissu unidirectionnel de renforcement de structures, à base de fibres de carbone, applicable « à sec » (sans imprégnation préalable des fibres). 
<b>Utilisation</b>	Renforcement de structures en béton armé ou précontraint, en maçonnerie et en bois, pour augmenter la reprise d'effort de flexion et de cisaillement : Renforcement des poutres vis-à-vis de l'effort tranchant Augmentation de la résistance et de la ductilité des poteaux par confinement (section circulaire, carrée) Augmentation de la capacité portante des éléments de la structure Amélioration de la tenue des maçonneries vis-à-vis des efforts sismiques Renforcement suite à un changement de destination, modifications, rénovations, réaménagement de locaux Réparation de dommages (chocs, incendies, corrosion aciers internes, ...) ) Reprises des défauts des structures (problème de conception, de calcul, ...) ) Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation (renforcement parasismique, nouveau code de calcul).
<b>Caractéristiques / Avantages</b>	Facile à appliquer sur des surfaces planes ou courbes (poteaux, cheminées, dômes, silos ...) ) Multifonctions : renforcement vis-à-vis des efforts de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion Légèreté ; permet un renforcement sans alourdir la structure Dispose de fibres de maintien latéral pour une meilleure stabilité du tissu Utilisation et application optimisées : tissu existe en 2 largeurs (30 et 60 cm)
<b>Agréments, Essais, Normes</b>	France: CSTB - Avis Technique n°3/16-875, Sika® CarboDur® SikaWrap® Slovaquie : TSUS, Building Testing and research institutes, Technical Approval TO-09/0080, 2009: Systémy dodatočného zosilňovania konštrukcií Sika® CarboDur® a SikaWrap® (Slovak). Pologne : Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych Pologne : Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskownicy, pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika CarboDur® do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych USA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008 Royaume Uni : Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012.



## Caractéristiques

<b>Aspect / Couleurs</b>	Tissu de fibres de carbone de couleur noire						
<b>Constitution/Orientation des fibres du tissu</b>	Orientation des fibres : 0° (unidirectionnelle, dans le sens de la longueur du tissu). 99% fil de chaîne en fibres de carbone, 1% fil de trame en fibres thermoplastiques blanches assurant une bonne stabilité dimensionnelle (heat-set process).						
<b>Conditionnement</b>	<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Longueur du rouleau</th><th>Largeur du tissu</th></tr></thead><tbody><tr><td>Carton de 1 rouleau</td><td>ε 50 m</td><td>300 / 600 mm</td></tr></tbody></table>		Longueur du rouleau	Largeur du tissu	Carton de 1 rouleau	ε 50 m	300 / 600 mm
	Longueur du rouleau	Largeur du tissu					
Carton de 1 rouleau	ε 50 m	300 / 600 mm					
<b>Stockage / Conservation</b>	24 mois à partir de la date de production ; stocker en emballage d'origine intact et non ouvert à l'abri d'une exposition directe au soleil, au sec et à une température comprise entre +5°C et 35°C.						

## Caractéristiques techniques

<b>Grammage</b>	235 g/m <sup>2</sup> ± 10 g/m <sup>2</sup>
<b>Epaisseur du tissu</b>	0,129 mm
<b>Densité des fibres</b>	1,82 g/cm <sup>3</sup>

## Caractéristiques physiques et mécaniques

<b>Caractéristiques des fibres</b>	Valeur dans le sens longitudinal des fibres (selon la norme ISO 10618) Résistance en traction : > 4 000 MPa Module d'Elasticité en traction : > 230 000 MPa Elongation à rupture : 1,7 %
------------------------------------	---

<b>Caractéristiques du composite (avec résine Sikadur®-330) (relatif à l'épaisseur des fibres)</b>	Valeur dans le sens longitudinal des fibres (selon la norme EN 2561*) 1 couche de tissu, minimum 27 échantillons par séries d'essais																
	<table border="1"><tbody><tr><td>Epaisseur nominale du tissu</td><td></td><td>0,129 mm</td></tr><tr><td>Section de calcul par largeur de 1000 mm :</td><td></td><td>129 mm<sup>2</sup></td></tr><tr><td rowspan="2">Module d'élasticité en traction</td><td>moyenne</td><td>225 GPa</td></tr><tr><td>caractéristique</td><td>220 GPa</td></tr><tr><td rowspan="2">Résistance en traction</td><td>moyenne</td><td>3500 MPa</td></tr><tr><td>caractéristique</td><td>3200 MPa</td></tr></tbody></table>	Epaisseur nominale du tissu		0,129 mm	Section de calcul par largeur de 1000 mm :		129 mm <sup>2</sup>	Module d'élasticité en traction	moyenne	225 GPa	caractéristique	220 GPa	Résistance en traction	moyenne	3500 MPa	caractéristique	3200 MPa
Epaisseur nominale du tissu		0,129 mm															
Section de calcul par largeur de 1000 mm :		129 mm <sup>2</sup>															
Module d'élasticité en traction	moyenne	225 GPa															
	caractéristique	220 GPa															
Résistance en traction	moyenne	3500 MPa															
	caractéristique	3200 MPa															
	* échantillon de 50 mm																

<b>Paramètres de calcul</b>	Consulter l'Avis Technique CSTB n°3/16-875
-----------------------------	--

## Système

<b>Constitution du système</b>	Le système (tissu + résine) ne doit subir aucune modification ni changement de constituant. Primaire et Résine d'imprégnation : Sikadur®-330. Tissu de renforcement structural : SikaWrap®-230 C. Pour obtenir des détails sur la résine, sur l'application du tissu et sur d'autres informations générales, consulter la Notice Produit du Sikadur®-330 et l'Avis Technique n°3/16-875 du CSTB.
--------------------------------	---

## Application

### Consommation de résine Sikadur®-330

La consommation peut varier suivant la rugosité et la planéité du support.

Imprégnation de la 1ère couche : ~ 0,8 – 1,2 kg/m<sup>2</sup>

Imprégnation des couches suivantes : ~ 0,7 kg/m<sup>2</sup>

Consulter l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875.

### Qualité du support

La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme NF EN 1504-9, Réparation des structures en béton).

Support en béton : la résistance moyenne en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1 MPa au minimum ou conforme aux spécifications du dossier de consultation.

Consulter l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875.

### Préparation du support

Supports Béton et maçonnerie:

Le support doit recevoir une préparation de surface adaptée pour le rendre propre, sain, exempt de laitance, d'agents polluants, de graisse, d'huile, de particules friables, d'anciens revêtements, -

Le support ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en œuvre de la colle.

Ne pas réaliser d'opération de collage en cas de risque de condensation sur le support. Contrôle à faire préalablement au démarrage du mélange du kit de Sikadur®-330.

Réparation et reprofilage : dans les cas où des défauts (béton carbonaté, faible enrobage des barres d'armature) doivent être réparés ou si un reprofilage est nécessaire, les systèmes suivants peuvent être utilisés :

Protection des armatures apparentes corrodées : Sika® Monotop® - 910 N,

Produits de réparation structurale : mortier de réparation à base de résine époxy Sikadur®-41F, ou les mortiers hydrauliques de réparation Sika® Monotop® - 410 R (application horizontale, verticale, sous face) ou Sika® Monotop® - 432 R (application horizontale par coulage).

Consulter les Notices Produits concernées ainsi que l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875 pour obtenir des détails sur l'application.

## Mise en œuvre

### Mélange de la résine

Consulter la Notice Produit du Sikadur®-330.

### Méthode d'application / outils

Consulter l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875.

Le tissu peut être coupé au moyen de ciseaux spéciaux ou d'un couteau acéré. Ne pas plier le tissu.

Consulter la Notice Produit du Sikadur®-330 pour les informations de mise en œuvre du composite.

### Nettoyage des outils

Nettoyer le matériel avec le Nettoyant Sikadur® (Notice Produit n° 6.90) avant polymérisation de la résine. Une fois durcie, la résine s'enlève mécaniquement.

### Durée de vie en pot (Sikadur®-330)

Consulter la Notice Produit du Sikadur®-330.

### Protection au feu de la structure

Consulter l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875.

Dès lors que la structure est vérifiée conformément au principe de dimensionnement retenu dans l'avis technique validé par le CSTB, aucune protection au feu du système n'est à prévoir :

« structure vérifiée à l'E.L.U. en situation de projet accidentel, sans le renfort à base de tissu de SikaWrap®-230 C, en tenant compte uniquement des barres d'armatures internes».

## Notes sur l'application / limites

### Dimensionnement des renforts

Il est conseillé de faire appel à un Bureau d'Etudes qualifié en calcul de structures pour réaliser le dimensionnement des renforts à base de tissu SikaWrap®-230 C. Nous consulter.

### Qualification de l'entreprise spécialisée

Le Maître d'ouvrage, le Maître d'œuvre, doivent faire appel à une entreprise qualifiée pour la réalisation des travaux de réparation et de renforcement des structures. L'entreprise retenue doit être expérimentée et assurée pour la réalisation de ces travaux spéciaux. Le personnel doit être spécialement formé à l'application des composites PRFC et des produits associés.

### Plan Assurance Qualité sur chantier

L'entreprise doit mettre en place un plan d'auto contrôle: en particulier pour vérifier l'état du support et mesurer sa résistance à la traction superficielle, vérifier la non condensation sur le support, mesurer régulièrement la dureté shore D des mélanges de colle Sikadur®-330.

Consulter également l'Avis Technique qui propose un exemple de fiche d'auto contrôle.

Le recouvrement des couches de tissu dans la direction longitudinale des fibres doit être au moins de 100 mm.

Lors des applications bords à bords du tissu (reprise effort tranchant de poutres) les lés de tissu sont juxtaposés et ne nécessitent pas de recouvrement.

Dans le cas de renforcement de poteau (par confinement), si plusieurs couches de tissu sont nécessaires, il y a lieu de répartir le recouvrement des couches uniformément sur le périmètre de la section du poteau.

Pendant l'application du système (SikaWrap®-230 C - Sikadur®-330), la température du support doit rester au moins 3°C au-dessus du point de rosée. Veiller à vérifier noter cet élément dans le plan d'autocontrôle

### Finition esthétique et/ou protection

Le système SikaWrap®-230 C - Sikadur®-330 peut être recouvert par une couche de finition esthétique ou de protection. Le choix du type de revêtement dépend des exigences du projet et de l'exposition. Le système SikaWrap® doit être protégé du rayonnement solaire direct permanent. Le revêtement de protection vis-à-vis des rayons UV est soit un produit à base de résine tel que Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S BetonColor, ou Sikagard®-675 W ElastoColor -Coloris disponibles suivant nuancier RAL, soit un produit à base de liant hydraulique modifié (Sikatop®-121 ou 107). Nous consulter.

## Note

Toutes les données techniques de cette notice sont basées sur des résultats d'essais de laboratoires. Les caractéristiques mesurées peuvent varier en fonction de circonstances indépendantes de notre contrôle.

## Précautions d'emploi

### Environnement Hygiène Sécurité

SikaWrap®-230C est un article selon le Règlement CE n° 1907/2006 (Reach). Selon l'article 31, une fiche de données de sécurité n'est pas nécessaire pour mettre le produit sur le marché, pour le transporter ou l'utiliser. Le produit n'endommage pas l'environnement quand il est utilisé comme spécifié.

### Reach

Selon le Règlement CE n° 1907/2006 (Reach), SikaWrap®-230C est un article dont aucune substance n'est destinée à être rejetée dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation. Donc, il n'y a aucune exigence d'enregistrement pour des substances dans un article selon l'Article 7.1 du Règlement.

Basé sur notre connaissance actuelle, SikaWrap®-230C ne contient pas de SVHC (substances extrêmement préoccupantes) de la liste candidate publiée par l'Agence Européenne des Produits chimiques dans une concentration supérieure à 0,1% (w/w).

## Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur

demande.».



## Système de renforcement

# SikaWrap -430G/Sikadur -330

## Renforcement au moyen de tissus de fibres de verre

---

<b>Genre</b>	<p>Système de renforcement à la surface au moyen de tissus de fibres de verre et de résine époxy d'imprégnation.</p> <p><b>Orientation des fibres:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Unidirectionnel</li></ul> <p><b>Composants du système:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– SikaWrap-430G Tissu de fibres de verre</li><li>– Sikadur-330 Résine d'imprégnation.</li></ul>
<b>Emploi</b>	<p>Renforcement de structures en béton armé, maçonnerie et bois. Désigné particulièrement pour l'assainissement d'ouvrages historiques.</p> <p><b>Raisons pour l'application:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Augmentation des charges d'exploitation</li><li>– Changement de destination / réaménagement</li><li>– Réparation de dommages</li><li>– Mesures préventives antisismiques</li><li>– Adaptation aux exigences de changements de normes et prescriptions.</li></ul>
<b>Arguments</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Usages divers</li><li>– Utilisation d'une résine thixotrope d'imprégnation, exempte de solvants, facilitant la manipulation sur le chantier</li><li>– Souplesse permettant l'application également sur surfaces courbes comme colonnes et cheminées</li><li>– Epaisseur faible, même dans le cas d'application de plusieurs couches de tissu</li><li>– Orientation des fibres selon besoin</li><li>– Rapport prix/performances optimisé</li></ul>
<b>Bibliographie</b>	<p><b>Sika, 1999:</b> «Die Verstärkung von Tragwerken mit CFK-Lamellen.» (Le renforcement d'ouvrages de construction au moyen de bandes en PRFC.) Supplément du cahier de congrès des séminaires Sika CarboDur, oct./nov. 1997.</p> <p><b>Meier H., 2000:</b> «Verstärkte Tragwerke mit Faserverbundwerkstoffen: Anwendungsbeispiele.» (Structures renforcées au moyen de matériaux composites à base de fibres: Exemples.) Fachveranstaltung «Faserverbundwerkstoffe für Ingenieurbauwerke: Umnutzungen und Neubauten». TFB Wildegg, mars 2000.</p> <p><b>Meier, H., Hess, P., 2000:</b> «Verstärkung eines Hochkamins ohne Betriebsunterbruch.» (Renforcement d'une cheminée d'usine sans interruption de la production.) Schweizer Baublatt No. 39/Bauwerksanierung No. 5, 2000.</p>

---

**Avis**

Les indications, en particulier les suggestions de mise en œuvre et d'utilisation pour nos produits, reposent sur les connaissances et expériences acquises dans les cas normaux avant la date d'impression. Les résultats peuvent s'écarter de ces données selon les circonstances concrètes, plus particulièrement pour ce qui est des supports, de la mise en œuvre et des conditions de l'environnement. Sika garantit pour ses produits le respect des propriétés techniques conformément aux Notices techniques et ce, jusqu'à la date de péremption. Les utilisateurs des produits sont tenus de lire attentivement la Notice technique la plus récente sur le CD-ROM «SikaData» de l'année considérée, qui peut être commandé chez nous, ou de la consulter sous «[www.sika.ch/bauchemie](http://www.sika.ch/bauchemie)».

## Caractéristiques techniques

<b>SikaWrap-430G Tissu</b>	<b>Type de fibre</b>	Fibres de verre avec résine époxy d'imprégnation
	<b>Orientation des fibres</b>	0° (unidirectionnel). Le tissu est muni de fils de trame spéciaux, donnant une bonne stabilité dimensionnelle (heat-set process).
	<b>Construction</b>	99 % fil de chaîne, 1 % fil de trame
	<b>Poids par unité de surface</b>	445 g/m <sup>2</sup> ± 22 g/m <sup>2</sup>
	<b>Masse volumique des fibres</b>	2,56 g/cm <sup>3</sup>
	<b>Epaisseur</b>	0,17 mm (sur la base de la section nette des fibres)
	<b>Résistance à la traction (fibres)</b>	2300 N/mm <sup>2</sup> (nominal) 2200 N/mm <sup>2</sup> (minimum)
	<b>Module E en traction des fibres</b>	76 000 N/mm <sup>2</sup> (nominal)
	<b>Allongement à la rupture des fibres</b>	2,8 % (nominal)
	<b>Longueur du rouleau</b>	50 mètres
	<b>Largeur du rouleau</b>	600 mm
	<b>Conditionnement</b>	1 rouleau dans une boîte en carton
	<b>Conservation</b>	illimitée

<b>Sikadur-330 Résine d'imprégnation</b>	<b>Aspect</b>	Comp. A: blanc Comp. B: gris
	<b>Poids volumique</b>	1,31 kg/l (Comp. A et B mélangés)
	<b>Rapport de mélange</b>	Comp. A : Comp. B = 4 : 1 (parts en poids) La stricte observation du rapport de mélange doit être assurée par l'utilisation d'une balance.
	<b>Température d'application</b>	du support et ambiant: +10 °C à +35 °C
	<b>Durée de vie en pot</b>	+10 °C: 90 min. (5 kg) +35 °C: 30 min. (5 kg)
	<b>Temps ouvert</b>	30 min. (à +35 °C)
	<b>Consistance</b>	pâteuse, non coulable
	<b>Résistance à l'arrachement sur béton (EN 24624)</b>	rupture du béton après 1 jour (>+10 °C), surface du béton sablée
	<b>Résistance à la traction (DIN 53455)</b>	durcissement: 7 jours, 23 °C: 30 N/mm <sup>2</sup>
	<b>Module E en flexion (DIN 53452)</b>	durcissement: 7 jours, 23 °C: 3800 N/mm <sup>2</sup>
	<b>Stabilité de forme thermique (ASTM D648)</b>	durcissement: HDT: 7 jours, +10 °C +36 °C 7 jours, +23 °C +47 °C 7 jours, +35 °C +53 °C 7 jours, +10 °C, plus 7 jours, +23 °C +43 °C
	<b>Conditionnement</b>	Emballage prédosé de 5 kg (Comp. A+B) en pile Emballages industriels non prédosés: Comp. A seau de 24 kg, Comp. B seau de 6 kg
	<b>Conservation</b>	En emballage d'origine non entamé, stocké entre +5 °C et +25 °C, le produit se conserve 24 mois à partir de la date de production.

---

## Mise en œuvre

---

### Découpe du tissu

Le tissu peut être coupé au moyen de ciseaux spéciaux ou d'un couteau acéré. Il ne faut cependant jamais plier le tissu!

---

### Préparation du support

- Préparer le support par sablage ou meulage. Enlever ensuite les particules non adhérentes et la poussière au moyen d'un aspirateur industriel. Le support doit être propre, exempt d'huile et de graisse et sec (humidité maximale du support 4%).
  - Les surfaces à coller doivent être planes. Les saillies locales ne doivent pas excéder 0,5 mm. Les inégalités majeures doivent être reprofilées avec Sikadur-41 ou un mélange de Sikadur-30 et de sable de quartz Sikadur-501 (rapport de mélange 1 : 1 parts en poids au maximum).
  - La résistance à l'arrachement du support à renforcer doit être partout au moins 0,5 N/mm<sup>2</sup>.
  - Les angles de la structure doivent être arrondis au rayon de 10 mm au moins. Ce travail peut être effectué par exemple par meulage au disque diamanté.
- 

### Mélange Sikadur-330



#### Emballage prédosé:

Ajouter le composant B au composant A en utilisant la spatule vide-restes Sika. Mélanger la masse à l'aide d'une broche mélangeuse à bas régime (max. 500 tr/min) afin d'éviter l'inclusion d'air. Mélanger la masse pendant 3 minutes environ jusqu'à disparition complète des traînées de couleur. Transvaser le mélange dans un récipient propre et remuer à nouveau pendant 1 minute.

**Mélanger à faible vitesse au moyen d'une broche mélangeuse afin d'inclure le moins d'air possible.**

#### Emballage industriel non prédosé:

Bien remuer les composants dans leurs récipients individuels. Doser les composants dans le rapport de mélange indiqué et mélanger dans un récipient approprié de façon analogue aux emballages prédosés.

La durée de vie en pot débute au moment du mélange de la résine au durcisseur. Elle est plus courte à températures élevées et plus longue à basses températures. Le fait de mélanger de grandes quantités diminue également la durée de vie en pot. Pour augmenter le temps utile de mise en œuvre par température élevée, il est recommandé de diviser la colle mélangée en petites portions. Une autre mesure efficace consiste à refroidir les deux composants avant le mélange.

---

### Application

- Découper le tissu au moyen de ciseaux ou d'un couteau et d'une règle.
  - Appliquer la résine Sikadur-330 mélangée à la brosse, à la taloche dentée ou à la truelle sur le support préparé de façon à atteindre un dépôt d'environ 0,7 à 1,2 kg/m<sup>2</sup>, selon la rugosité du support.
  - Appliquer le tissu découpé dans la direction voulue dans la couche de résine. Noyer le tissu soigneusement dans la résine par marouflage au rouleau d'imprégnation Sika. Répartir la résine au rouleau jusqu'à obtention d'une structure homogène. Sens du marouflage = sens des fibres!
  - Application de plusieurs couches de tissu: Etaler de nouveau une couche de résine à raison d'environ 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Ceci doit être fait dans le délai de 60 minutes (à 20 °C) qui suit l'application de la couche précédente. Si tel n'est pas possible, il faut attendre au moins 12 heures avant de procéder à l'application d'une nouvelle couche. Répéter ensuite l'opération selon le point C).
  - Une nouvelle couche de résine peut être appliquée à raison d'environ 0,5 kg/m<sup>2</sup> comme couche de couverture qui, saupoudrée de sable de quartz, peut servir de couche d'accrochage pour revêtements à base de ciment. Si une couche de peinture est prévue comme revêtement ultérieur, la surface de résine encore fraîche peut être aplanie au moyen d'une taloche.
-

**Renseignements importants**

- Le recouvrement en direction longitudinale des fibres doit au moins être de 100 mm.
- Plusieurs bandes de tissu peuvent être juxtaposées sans recouvrement.
- En cas de températures d'application basses et/ou d'humidité de l'air élevée, la surface de résine peut devenir poisseuse. Avant de procéder à un revêtement ou à l'application d'une nouvelle couche de tissu sur le matériau durci (âgé de plus de 12 heures), il faut enlever ce film poisseux en lavant la surface avec une éponge saturée d'eau ou en arrosant abondamment.
- Les restes de Sikadur-330 mélangé ne doivent être laissés à durcir que dans des récipients métalliques et en quantités inférieures à 1 kg.
- Les zones renforcées doivent être abritées des rayons du soleil directs. A cet effet, il faut appliquer un enduit clair (p. ex. Sikagard-550 W Elastic ou Sikagard-ElastoColor W). La couche de résine durcie (temps de durcissement au moins 12 heures) doit au préalable être lavée à l'eau et laissée à sécher.
- La température de service maximale admissible est +50 °C.
- Pendant l'exécution de travaux de renforcement, la température du support doit rester au moins 3 °C au-dessus du point de rosée.
- La résine d'imprégnation doit être tenue à l'abri de la pluie pendant au moins 12 heures après l'application.

**Nettoyage**

Nettoyer immédiatement les outils avec Colma-Nettoyant. Laver les mains et la peau à l'eau chaude savonneuse.  
Sikadur-330 durci ne se laisse enlever que mécaniquement.

**Prescriptions de sécurité**

**Mesures de protection**

Sikadur-330 peut provoquer des irritations de la peau (dermatose)! Porter des vêtements, lunettes et gants de protection. Appliquer une crème de protection sur les mains et les parties non protégées de la peau avant le commencement des travaux.  
En cas de contact avec les yeux ou les muqueuses, rincer immédiatement et abondamment avec de l'eau propre et chaude et consulter le médecin le plus proche sans tarder.

**Ecologie**

Sikadur-330 (composants A et B) à l'état non durci, est un polluant des eaux et ne doit donc pas pénétrer dans la canalisation, les eaux ou le sol.

Pour plus de détails, veuillez consulter la fiche de sécurité actuelle sous [www.sika.ch](http://www.sika.ch)

