



**HAL**  
open science

# Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes

Farid Abou Chakra

► **To cite this version:**

Farid Abou Chakra. Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes. Matériaux composites et construction. 2016. dumas-01664765

**HAL Id: dumas-01664765**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01664765>**

Submitted on 15 Dec 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS  
ISSAE – CENTRE ASSOCIE DU LIBAN**

---

**MEMOIRE**

Présenté en vue d'obtenir  
Le DIPLOME d'INGENIEUR CNAM

**SPECIALITE : CONSTRUCTION ET AMENAGEMENT**

OPTION : CALCUL DE STRUCTURE

CYC66

Par

ABOU CHAKRA Farid

---

Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de Polymère Renforcé par  
Fibre de Carbone - Comparaison des codes.

Soutenu le 09 Mars 2016

---

**JURY**

PRESIDENT :	Francis GUILLEMARD	Professeur Titulaire de la Chaire BTP
MEMBRES :	Elias EL-HACHEM	Directeur de CNAM à Beyrouth
	Marwan EL-RASSI	Chef de département de Génie Civil
	Walid LARBI	Maître de conférences
	Rachid CORTAS	Professeur assistant à l'université libanaise



## **Remerciements**

Dans un premier temps, nous tenons à remercier le président du jury Francis GUILLEMARD, Professeur Titulaire de la Chaire BTP, et les membres du jury d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail.

Ensuite, nos remerciements vont aussi au directeur du CNAM, Dr. Elias EL-HACHEM, et notre chef de département Dr. Marwan El-RASSI pour leur coopération dès le début.

En plus, nous tenons à remercier Dr. Rachid CORTAS, pour son suivi, sa disponibilité, ses précieux conseils, et sa relecture du manuscrit. Sans son aide, ce document n'aurait pas vu le jour.

Enfin, nous voudrions exprimer nos remerciements ainsi que notre profonde gratitude à Monsieur Ghassan EL-HACHEM qui a contribué énormément à ce travail grâce à ses compétences et sa grande connaissance des techniques analytiques dans le domaine de renforcement par matériaux composites.

## **Liste des abréviations**

ACI: « American Concrete Institute »

FIB: Fédération International du Béton

PRF : Polymère renforcé de fibres

PRFC : Polymère Renforcé par Fibre de Carbone

$A_c$  : Aire d'une section de béton

$A_s$  : Aire de la section d'acier

$b$ : Petit côté d'un poteau

$D$  : Diamètre d'un poteau

$E_p$  : Module de confinement

$E_f$  : Module d' Young du composite

$f'_{cu}$  : Résistance à la compression ultime du béton confiné

$f'_{cc}; f_{cd,c}$  : Résistance de calcul du béton confiné

$f'_c; f_{cd}$  : Résistance maximal de calcul du béton

$f_l$  : Pression de confinement requise

$f_Y$  : Résistance de l'acier

$f_{cc}^*$  : Pression de confinement requise

$h$  : Grand côté d'un poteau

$K_c$  : Coefficient de forme de la section

$K_h$  : Coefficient de forme du composite

$N_{RD}$  : Capacité portante du poteau

$n_p$  : Nombre de plis de composite

$S_f$  : Espacement entre les bandes de composite

$t_f$  : Epaisseur du composite

$W_f$  : Largeur de la bande de composite

$\varepsilon_{ccu}; \varepsilon_{cc}$  : Déformation axial ultime de compression du béton confiné

$\varepsilon_{cu}$  : Déformation axial ultime de compression du béton non confiné

$\varepsilon_{c0}$  ;  $\varepsilon'_c$  : Déformation axial maximal correspond à  $f'_c$

$\varepsilon_{fu}$  : Déformation ultime de traction du composite

$\alpha$  : Coefficient d'efficacité du confinement

$\beta$  : Paramètre du béton non confiné

$\psi_f$  : Facteur de réduction de la résistance du FRP

$\rho_l$  : Taux de ferrailage longitudinal

## **Tables des matières**

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>Liste des abréviations</b> .....	ii
<b>Tables des matières</b> .....	iv
<b>Introduction générale.</b> .....	1
<b>1 Chapitre 1 : La dégradation du béton</b> .....	4
1.1. Introduction .....	5
1.2 Les différents types des dégradations.....	6
1.2.1 Corrosion des armatures .....	6
1.2.2 Réaction Chimiques .....	8
1.2.3 Les chocs et les incendies (accidentel) .....	8
1.2.4 Les erreurs d'exécutions. ....	9
1.2.5 Altération d'origine sismique. ....	10
1.2.6 Erreurs de conception : .....	10
1.2.7 L'abrasion : .....	10
1.2.8 Les fissures : .....	11
1.3 La méthodologie du diagnostic. ....	11
1.3.1 Examen visuel.....	11
1.3.2 Mesures sur site.....	12
1.3.2.1 Mesures sur le béton:.....	12
1.3.2.2 : Les détecteurs d'armatures.....	13
1.3.3 L'analyse technique des données.....	14
1.3.4 La formulation de recommandation.....	15
<b>2 Chapitre 2 : Différentes méthodes de renforcement et de réparation.</b> .....	17
2.1 Introduction .....	18
2.2 Réparation des fissures :.....	18
2.2.1 Revêtement protecteur en surface :.....	19
2.2.2 Rebouchage des fissures :.....	19
2.2.3 Injection des fissures :.....	19
2.3 Béton projeté .....	20
2.4 Chemisage en béton armé .....	23

2.4.1	Mise en œuvre :.....	24
2.5	Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier. ....	27
2.5.1	Technique d'amélioration: .....	27
2.6	Renforcement des structures par précontraintes externe :.....	29
2.6.1	Technique d'amélioration .....	29
2.7	Renforcement des éléments structuraux par des matériaux composites. ....	32
2.7.1	Technique de renforcement.....	33
2.7.2	Les applications des PRF en génie civil. ....	33
a)	Les poutres.....	34
b)	Les colonnes. ....	34
3	<b>Chapitre 3 : Définition de polymère renforcé de fibres « PRF »</b> .....	36
3.1	Introduction. ....	37
3.2	Les constituants d'un polymère renforcé de fibres (PRF).....	39
3.2.1	Les renforts. ....	39
3.2.1.1	Fibres d'aramide.....	40
3.2.1.2	Fibres de verre .....	40
3.2.1.3	Fibres de carbone .....	41
3.2.2	Les matrices. ....	42
3.2.2.1	Les résines :.....	42
3.2.2.2	Les charges et les additifs : .....	43
3.3	Propriétés des matériaux composites. ....	43
3.4	Méthodes de confinement : .....	45
3.4.1	La stratification en contact :.....	45
3.4.1.1	Préparation avant mise en œuvre .....	47
3.4.1.2	Mise en œuvre .....	47
3.4.2	Enrouement filamenteux :.....	49
3.4.3	Chemisage par coquille préfabriquée en PRF :.....	51
3.5	Aspects constructifs : .....	53
3.6	Modification de forme :.....	54
3.7	Comparaison des méthodes de renforcements :.....	55
3.8	Comportement type et modes de rupture des poteaux en béton confiné avec des « PRF ».....	56
3.8.1	Colonnes de section circulaire. ....	56
3.8.2	Colonnes de section rectangulaire ou carrée.....	59



3.8.3	Colonnes de section elliptique. ....	60
3.9	Mécanique de rupture sous compression axiale du béton confiné. ....	61
<b>4</b>	<b>Chapitre 4 : Comparaison entre les différents codes des matériaux composites.....</b>	<b>63</b>
4.1	Introduction. ....	64
4.2	Vue sur les différentes guides. ....	65
4.2.1	Fédération Internationale du Béton (FIB Bulletin 14 2001) :.....	68
4.2.2	Institut American du Béton (ACI 440.2R-02) 2002.....	69
4.2.3	Institut American du Béton (ACI 440.2R-08) 2008.....	70
4.3	Etude comparatives des différents codes .....	71
4.4	Discussion : .....	76
<b>5</b>	<b>Chapitre 5 : Facteurs influant sur le renforcement par PRFC .....</b>	<b>78</b>
5.1	Introduction. ....	79
5.2	Présentation de la méthode de calcul de la portance d'un poteau confiné :.....	79
5.3	Les Facteurs influant sur le confinement des poteaux par PRFC. ....	81
5.3.1	Hypothèse de calcul. ....	81
5.3.2	Poteau circulaire : .....	81
5.3.3	Poteau rectangulaire :.....	84
5.3.4	Comparaison du $f_{cd,c}$ entre poteau circulaire et rectangulaire:.....	87
5.3.5	L'effet de la résistance initiale :.....	88
	<b>Conclusion .....</b>	<b>89</b>
	<b>Annexe.....</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>94</b>
	<b>Liste des figures.....</b>	<b>95</b>
	<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>97</b>
	<b>Résumé.....</b>	<b>98</b>

## **Introduction générale.**

Le dimensionnement des ouvrages en génie civil est conçu pour une durée de vie de plus de cent ans en moyenne. Malgré tout, plusieurs types de désordres sont responsables à réduire la durée de cette vie prévisionnelle et actuellement, plusieurs ouvrages exigent une maintenance pour garantir la sécurité des usagers.

En génie civil, la maintenance des ouvrages consiste à les protéger en limitant la corrosion ou en assurant une bonne étanchéité, à les réparer explorant à compenser les pertes de résistance dues à la fissuration, encore à les renforcer en augmentant la durabilité et les performances des ouvrages.

La maintenance des ouvrages est un problème de plus en plus ennuyant dans la mesure où les ouvrages neufs ont un coût élevé et les cas de réparation sont plus difficiles. Plusieurs techniques sont disponibles et parmi eux, l'une des plus efficace pour la réparation de structures en béton armé par le placement extérieur en acier. Néanmoins, la manipulation des plaques en acier avec la prise en compte de leur poids et également aux problèmes de corrosion ont conduit à une limitation d'utilisation de cette technique.

Depuis une dizaine d'année, une option est portée: il s'agit de la réparation ou le renforcement des structures en béton par des matériaux composites collés extérieurement sur les ouvrages dégradées. Les matériaux composites, spécialement qui sont à base de fibre de carbone, présentent un grand avantage pour la réparation.

En plus, malgré le prix élevé de ces matériaux, ils présentent un avantage économique grâce à la facilité de son mise en place qui se fait directement sur les éléments de l'ouvrage par moulage au contact, ou encore elle est appelée par la stratification directe. Ceci provoque une réduction considérable des coûts qui sont liés aux interruptions des activités des structures réparés et encore sont liés à la manipulation des matériaux

Les matériaux composites dans le domaine du génie civil sont utilisés pour la réhabilitation et le renforcement des éléments de l'ouvrage comme les dalles, les poutres, et les colonnes. Les premières études sur cette technique de renforcement par matériaux composites

dans le domaine de génie civil a été lancée en 1980, mais en 1990, la première utilisation de cette technique a été mise en scène, d'abord dans des expériences, puis sur une base commerciale.

Le confinement des poteaux en béton se fait avec des enveloppes en matériaux composites qui peuvent être à base de fibre d'aramide, de verre ou carbone. L'application de ces enveloppes pour les poteaux améliore le confinement du béton, ainsi que sa résistance en compression et sa ductilité.

La majorité des dommages dans les ouvrages en béton sont provoqués par des déficiences dans la construction des éléments structuraux. Bien que plusieurs causes conduisent à la nécessité de renforcer la structure citons par exemple : la rénovation des ouvrages anciennes, l'augmentation des charges qui sollicitent la structure, le changement de la forme ou de l'utilisation de la structure, etc.

Les travaux de réparation ou de réhabilitation des colonnes ont conduit à l'exploration de nouvelles techniques de renforcement à partir des techniques connues. L'intérêt de l'utilisation des chemisages par matériaux composites est la facilité d'installation et un accroissement de la durabilité comparativement au chemisage en acier.

D'abord, ce rapport va évaluer les facteurs qui influent sur le confinement des colonnes avec de matériaux composites et en particulier les matériaux composites à bases de fibres de carbone. Ensuite, le rapport va introduire trois guides avec une étude comparative qui est présentée. Cette étude est basée sur l'amélioration de la résistance en compression et de la déformation ultime avant rupture du béton confinée. La comparaison est faite entre des résultats expérimentaux, et les résultats théoriques des guides suivants (ACI 2002, ACI 2008, et FIB bulletin 14 2002) d'une autre part.

Alors les objectifs de cette étude peuvent être résumés par une évaluation des facteurs influant sur le chemisage par matériaux composites à base de fibre de carbone, et par suite une analyse comparative entre les guides, afin de savoir les lacunes et les choses manquantes dans chacun.

Le rapport est subdivisé en cinq chapitres avec une introduction et une conclusion.

Ce travail commence par une introduction générale qui définit la problématique du sujet et en plus les objectifs recherchés.

**Le chapitre 1** est consacré à traiter les causes de la dégradation du béton qui conduisent pour faire une réparation ou un renforcement pour ce dernier, et la méthodologie d'un diagnostic.

**Le chapitre 2** présente les différentes techniques utilisées dans les travaux de réparation ou de renforcement des ouvrages en béton armé. Par suite, une présentation des méthodes de la mise en œuvre de chacune des techniques inscrit dans le chapitre.

**Le chapitre 3** définit les matériaux composites, les propriétés mécaniques les constituants et les différentes techniques de la mise en œuvre des matériaux composites. De plus, il présente le comportement contrainte-déformation des colonnes confinées avec des « PRF » et la rupture sous une compression axiale.

**Le chapitre 4** présente une comparaison entre les trois guides FIB bulletin 14 2002, ACI 440-2R 2002 et ACI 440-2R 2008, avec les résultats de trois spécimens fait dans un laboratoire.

**Le chapitre 5** a pour but de souligner les facteurs qui diminuent l'efficacité du chemisage par matériaux composites à base de fibre de carbone.

A la fin, l'ensemble de ce travail est finalisé par une conclusion générale.

## **Chapitre 1 : La dégradation du béton**

## **1.1. Introduction**

L'étendue de la détérioration de structures en béton à l'échelle mondiale se produit à un rythme alarmant, qui défie les ingénieurs sur ce continent et dans le monde sur une base quotidienne. Cela comprend les dommages aux bâtiments, ponts, installations environnement, structures de stationnement, ainsi que d'autres structures.

Malheureusement, les coûts de réparation peuvent être énormes. Retarder les réparations se traduit généralement par des réparations coûteuses beaucoup plus tard. En outre, si la détérioration du béton ou des dommages ne sont pas abordées, certaines de ces structures éventuellement peut cesser d'être utile et la pire encore est de les échecs qui peuvent se produire.

Une compréhension de base des causes des lacunes de béton est essentielle pour procéder à des évaluations significatives et des réparations efficaces. Si la cause d'une déficience est entendu, il est beaucoup plus probable que d'un système de réparation approprié sera choisi, et que, par conséquent, la réparation sera couronnée de succès et la durée de vie maximale de la réparation sera obtenue. Réparation du béton, le renforcement et la rénovation est un immense sujet, il existe une multitude de méthodes et de matériaux disponibles pour réparer le béton.

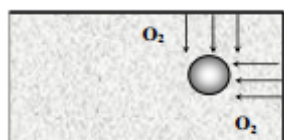
La porosité du béton est un paramètre qui joue un rôle très important sur sa durabilité et son efficacité. Dans le cas où le béton est poreux, ce dernier sera mise en face aux agressions extérieures ce qui conduit à une diminution de sa durabilité. Les faces protectives donnent pour le béton un mécanisme de défense, surtout si le béton est bien dosé et de forte compacité, alors tous les risques d'altération seront relativement faibles.

## 1.2 Les différents types des dégradations.

### 1.2.1 Corrosion des armatures

La corrosion des armatures dans le béton est la cause la plus fréquente de la détérioration de ce dernier, et en plus de la réduction dans la capacité portante qui est le résultat de la diminution de la section efficace. Le métal oxydé peut augmenter jusqu'à 10 fois de son volume d'origine, qui résulte à des forces d'éclatement intenses dans le béton qui finira à des fissures, des décollements, et des épaufrures (Figure 1-1). La corrosion est liée à deux phénomènes distincts, ces deux derniers peuvent agir conjointement ou séparément :

- L'attaque des armatures par des chlorures.
- La carbonatation du béton.



Pénétration de chlorure d'oxygène



Fissuration



Formation d'épaufrures

Figure 1-1: Fissuration due à la corrosion

### Carbonatation du béton et l'attaque par des chlorures :

La carbonatation du béton est un phénomène chimique, où le  $CO_2$  qui est dans l'air fait une réaction avec l'hydrate de chaux ( $CA(OH)_2$ ) existant dans le béton, ce qui conduit à la formation de l'eau et la carbonate de calcium.

Cela provoque une diminution du PH du béton. La valeur initiale du PH est de 12.5, après la carbonatation il deviendra à peu près 9. Pour protéger le béton de ce phénomène, il est conseiller de réduire la porosité du béton, et plus il faut assurer un enrobage suffisant.

Pour l'attaque par des chlorures, ils sont des sources externes qui attaquent le béton (l'eau de mer, les embruns,...), ou internes (granulats marins mal lavés....). Les ions chlore ( $Cl^-$ ) réagissent avec les ions de fer, pour faire dissoudre ces derniers dans les armatures.

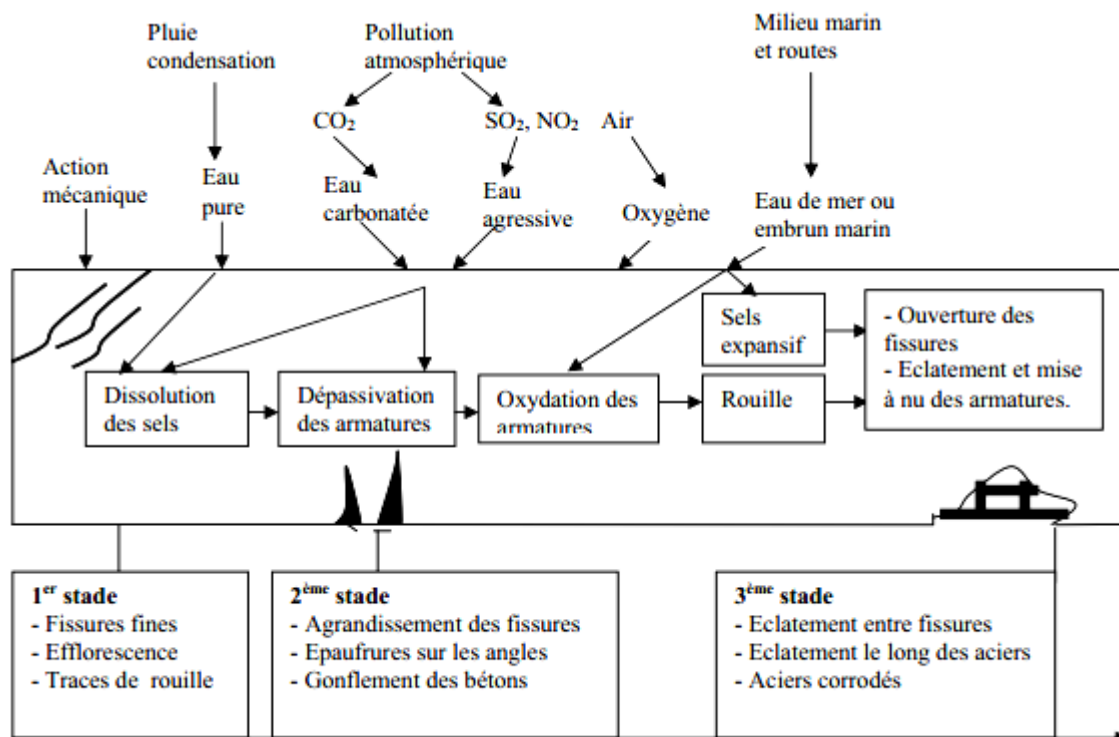


Figure 1-2:Processus de corrosion



Figure 1-3: Corrosion des armatures



### **1.2.2 Réaction Chimiques**

En plus de la corrosion et la carbonatation du béton, ce dernier confronte des dégradations chimiquement agressives à cause de plusieurs phénomènes comme (Réaction alcali-granulats). Ces phénomènes attaquent le béton, et le conduisent à des dégâts irréversibles si aucune précaution de protection n'est prise à temps. Alors, pour éviter ces dégâts il faut employer des bétons de bonne qualité, pour empêcher les solutions chimiques de pénétrer dans le béton et encore plus résister mieux et longtemps à ces attaques.

### **1.2.3 Les chocs et les incendies (accidentel)**

Les incendies conduisent à des dégradations de béton qui provoquent des endommagements significatifs pour les armatures et le béton. Ce phénomène qui est l'incendie travail à augmenter la température du béton (une température supérieur à 700° C à une dizaine de centimètre du parement au bout de 4 heures), ensuite les transformations irréversibles sont dues aux constituants du béton.

Mécaniquement, une vaporisation brutale de l'eau provoque des contraintes importantes dont le béton est peu perméable, et à la fin, ce phénomène conduit à des fissurations et des éclatements dans le béton.



Figure 1-4 : Eclatement de l'enrobage. ("Prospec-plus")

Les chocs sont à des origines accidentelle alors ils sont des phénomènes non prévisibles, dans les cas le plus meilleur, ils n'entraiment que des éclats de béton, des épaufrures et encore des ruptures dans les aciers.

Il y a des cas très grave comme par exemple le choc d'un camion, ou la chute de pierre (figure 1-5), ici un remplacement de certain élément de structure peut être entraîné.



Figure 1-5: Eclatement du béton dû à un choc.

#### 1.2.4 Les erreurs d'exécutions.

La qualité du béton peut être affectée dans n'importe quelle phase de la construction et cela est dû à la négligence et l'utilisation des méthodes inadéquates. Ces erreurs d'exécution donnent un béton avec une mauvaise qualité ce qui facilite sa détérioration que celui construit suivant des strictes règles. En plus, un default d'exécution peut entraîner beaucoup des agents agressifs, mais la détérioration du béton n'est pas visée sauf dans les cas suivant :



Figure 1-6: Détachement d'un balcon du deuxième étage.

- Erreurs dans le positionnement des armatures d'acier
- Enrobage insuffisant des armatures d'acier.
- Erreurs dans l'exécution des coffrages.

- Absence des armatures de peau (pour les retraits).
- Mauvaise qualité du béton (une porosité très élevée) ce qui facilite la circulation des agents agressifs et l'eau.
- La ségrégation du béton due à la condition de transport du béton frais.

### **1.2.5 Altération d'origine sismique.**

Les séismes résultent des ruptures des sols et des mouvements vibratoires qui font exciter les structures par le déplacement des fondations. Ce phénomène n'a pas un temps précise il est variable, mais il a une durée courte qui est dans la plupart des cas inférieur à une minute. Pour cela, Les codes de calcul dans les régions sismiques doivent être une référence pour limiter le degré d'endommagement.

### **1.2.6 Erreurs de conception :**

Les erreurs de conception sont résumées comme suit:

- Un tassement.
- Un manque d'armatures
- Une surcharge dont la structure ne peut pas résister.
- Un manque de joints.

### **1.2.7 L'abrasion :**

Ce phénomène est généralement due à :

- La grande circulation de l'eau (barrages).
- Les charges mécaniques répétées (chaussées, etc.)
- L'action sur les corps immergés ou flottants par le courant d'eau (piles de ponts etc.)

### **1.2.8 Les fissures :**

Ces différents types sont:

- Les fissurations mécaniques (à cause de la compression, traction, flexion et au cisaillement).
- Les fissures dues à la corrosion.
- Les fissures causées par les retraits et le fluage.
- Les fissures dues au gel-dégel.

### **1.3 La méthodologie du diagnostic.**

Le diagnostic est le résultat d'enquêtes menées pour prendre une décision sur l'état de la construction ou l'immeuble et ses conséquences. Cette appellation «diagnostic» est devenue le terme utilisé pour exprimer la réalisation des examens pour arriver à la formulation des conclusions.

Les étapes d'un diagnostic :

- Un examen visuel.
- Des mesures sur site.
- L'analyse technique des essais et des mesures. (en laboratoire)
- Les conclusions et les recommandations.

#### **1.3.1 Examen visuel.**

L'examen visuel est une investigation qui est le plus économique et la plus simple. Les informations recueillies et n'importe qu'elle est leur origine il faut les utiliser avec prudence, et ne pas les considérer comme une base de diagnostic. Ces informations doivent être considérées comme une indication pour la manière d'orientation d'un diagnostic. Elles sont obtenues par :

- La localisation et l'identification des zones fortement sollicitées.
- une prise des photos.
- La localisation des fissures.
- Une observation sur les zones critiques : appuis, joints, etc...

### **1.3.2 Mesures sur site.**

Une détermination des caractéristiques des structures doit être faite sur place pour savoir le niveau d'existence, la résistance et la dureté du béton, la position des armatures et le degré de corrosion. Les différentes mesures dans le site sont :

#### **1.3.2.1 Mesures sur le béton:**

##### **a) Le scléromètre.**

Cet instrument permet de mesurer la dureté superficielle du béton, et il permet de faire une estimation pour la résistance du béton. Cet instrument n'est pas très pratique car il faut faire une quinzaine d'essais pour chaque zone testée afin d'obtenir une valeur moyenne représentative.

La surface de mesure doit être nette, ces surfaces ne doivent pas présenter des écaillages de nids de gravier ou des textures grossières, en plus il faut éliminer la peinture ou l'enduit et toute trace de l'eau doit être éliminée.

Le scléromètre a pour rôle de préciser aux différents points de structure l'homogénéité de la résistance du béton, mais tout le résultat obtenu sur le béton reste imprécis en utilisant cette méthode.



Figure 1-7 : le scléromètre

## b) Carottage

Cette méthode consiste au prélèvement d'une carotte du béton pour l'analyser en laboratoire. Le carottage peut être fait au sec ou à la présence de l'eau. Cette analyse aide pour :

- L'identification et la détérioration des agrégats
- L'homogénéité du béton
- La réparation des fissures
- La résistance à la compression et la module d'élasticité.
- La profondeur d'une éventuelle carbonatation.



Figure 1-8 : Instrument de carottage

### 1.3.2.2 : Les détecteurs d'armatures

Cette méthode fonctionne par effet magnétique ou électromagnétique, mais l'investigation à une profondeur limitée pour quelques dizaines de centimètres. Les détecteurs d'armatures sont de trois types :

#### a) Le pacomètre.

Cet instrument sert à la détection de la position des armatures dans le béton.



Figure 1-9: le pacomètre.

### b) Le profomètre.

Le profomètre est utilisé pour la détermination du diamètre et de la position des armatures existantes dans le béton. En plus il détermine l'épaisseur d'enrobage du béton.



Figure 1-10: Le profomètre.

### c) Le corrosimètre.

Le corrosimètre est utilisé pour détecter la corrosion des armatures dans le béton avant l'apparition des dommages.



Figure 1-11: le corrosimètre

## 1.3.3 L'analyse technique des données.

L'interprétation des constats conduit à formuler des conclusions et cela est fait par l'analyse des données et des informations collectées. Les types d'opérations pour les modes d'analyse sont :

- Le calcul

Cette étape nous permet de déterminer les zones critiques pour les éléments structuraux ainsi que la capacité portante des structures.

- **La comparaison**

La comparaison consiste à la recherche sur l'incompatibilité ou la cohérence entre les informations ou les données qui portent sur le même aspect, mais qui proviennent des sources différentes. Cela permettra de renforcer la validité de certaine hypothèse et d'exclure d'autres. Par suite il permet de hiérarchiser les constatations connues.

- **L'évaluation et la vérification.**

L'évaluation est une méthode qui comporte une estimation qualitative ou quantitative, elle donne des approximations par rapport aux calculs scientifiques. Elle peut s'appuyer sur des recoupements, des calculs ou des comparaisons. En ce qui concerne les étapes de l'opération d'évaluation peut être conduit par : « un examen du dossier d'ouvrage et un examen pour l'état actuel de l'ouvrage ».

Par rapport à la vérification qui a comme objective de savoir les éventuels écarts par rapports aux règlements techniques et les normes pris en compte.

#### 1.3.4 **La formulation de recommandation.**

Après l'évaluation de la structure est complétée, les observations visuelles et autres données de support sont utilisées pour déterminer le ou les mécanismes à l'origine du problème. Depuis de nombreuses lacunes sont causées par plus d'un mécanisme, une compréhension de base des causes de la détérioration du béton est nécessaire pour déterminer ce qui est réellement passé à une structure particulièrement en béton.

Une évaluation correcte du problème est cruciale et est souvent le facteur décisif entre le succès ou l'échec d'une réparation. Avant de procéder à tout effort de réparation, assurez-vous que les problèmes désignés pour la réparation ont été correctement évalués à la cause, l'effet et le degré d'influence de ces problèmes ont sur le présent et à long terme des effets sur l'entretien et l'intégrité de la structure.



Seulement après l'évaluation est complète l'ingénieur peut développer un plan d'action correctif approprié, choisir les matériaux, et de préparer des dessins et des spécifications. Ensuite, après la détermination des causes des dommages dans les structures on pourra aller pour choisir la méthode de travail convenable :

- Traitement des effets de désordres et des causes lors du diagnostic
- Renforcement, réparation des structures.

## **Chapitre 2 : Différentes méthodes de renforcement et de réparation.**

## **2.1 Introduction**

Avant de s'engager dans un renforcement ou dans une réparation des éléments de structures, qui présentent des dégradations dans les armatures ou dans le béton, il est indispensable de faire un diagnostic déjà cité précédemment et à savoir les causes.

En ce qui concerne le choix de la méthode de renforcement ou de réparation et des matériaux à utiliser, il faut les définir en fonction des critères qui sont : « l'importance et la nature des désordres constatés », et encore il faut tenir compte des critères économiques des techniques choisies et de matériaux de construction.

Dans la majorité des cas, les structures en béton armé ont une excellente durabilité, qui mérite donc d'être conservées, même si l'exigence fonctionnelle des ouvrages est évaluée avec le temps. En plus, les structures en béton présentent des qualifications indéniables à la transformation et pour le renforcement nombreuses solutions sont disponibles.

Les renforcements des structures devraient supporter des sollicitations plus grandes que celles prévues à l'origine. Le renforcement utilise des procédés qui sont applicables aux travaux de réparation.

On peut procéder à la réparation ou au renforcement pour les éléments insuffisamment résistants, pour les parties dont les sections sont trop défaillantes et sollicitées une réparation pour le béton ou les armatures est souvent utilisées, par contre le renforcement des éléments des structures a pour but d'améliorer et augmenter leurs caractéristiques de manière pour offrir des meilleurs solidité.

## **2.2 Réparation des fissures :**

Le traitement n'est pas nécessaire pour les fissures dans la mesure où le fonctionnement réel des structures est resté cohérent avec le calcul initialement retenue et les sollicitations sont restées encore dans les limites qui sont prises en compte dans les calculs.

Si ce n'est pas le cas, il faut modifier les éléments de structure concernés pour obtenir un fonctionnement correct. En général les fissures accidentelles doivent être traitées, surtout si on a des ouvertures dépassant les limitations. Par suite, le choix du procédé de traitement compte principalement sur l'objectif recherché, corriger un défaut, éviter la corrosion des armatures, etc...

Les principales solutions :

### 2.2.1 Revêtement protecteur en surface :

Cette opération a pour rôle d'éliminer le défaut de protection des armatures par un revêtement, étanche ou imperméable, global ou partiel. Les revêtements sont des produits à base de résines qui sont mis en place avec des couches minces.

### 2.2.2 Rebouchage des fissures :

Le rebouchage des fissures peut être appliqué pour les fissures ouvertes. Pour garantir la pénétration des produits de calfeutrement il est important d'élargir les fissures. Ces derniers sont élargis par meulage. Il faut évacuer les poussières existant soigneusement en abondance d'eau. Cette solution est réalisée en utilisant une pâte de ciment avec de résines.

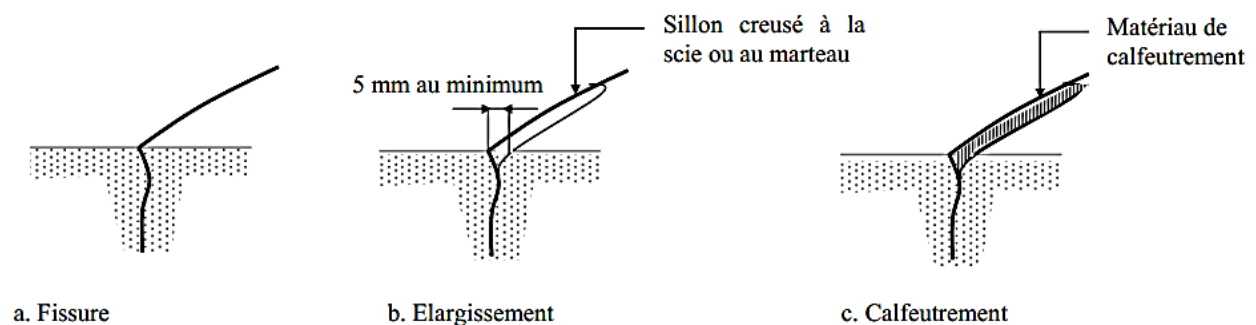


Figure 2- 1 : Etapes de réalisation d'un rebouchage des fissures

### 2.2.3 Injection des fissures :

Cette solution demande un nettoyage efficace des fissures tout en utilisant un jet d'eau sous pression avec un additionnement d'un détergent et suivant le produit injecté soit une résine ou un coulis de ciment, les fissures seront parfaitement sèches ou au contraire humidifiées.

### 2.3 Béton projeté

La technique de béton projeté est utilisée lors des surfaces qui ont une dégradation importante, par exemple cette méthode est utilisée pour la réparation des structures en béton après incendie.

Cette solution est répandue, tant pour le renforcement des éléments structuraux insuffisants, que pour la réparation des éléments structuraux défailants, et qui demande une mise en œuvre soignée.

Le béton projeté est un mélange constitué de granulats, eau et ciment et parfois des adjuvants. Il faut distinguer deux types de projection, dont les types sont distingués selon le moment d'introduction de l'eau :

- Par voie sèche : l'introduction de l'eau est au niveau de la lance. (Figure 2-2)
- Par voie mouillée : l'introduction de l'eau est dans le mélange du béton. (Figure 2-3)

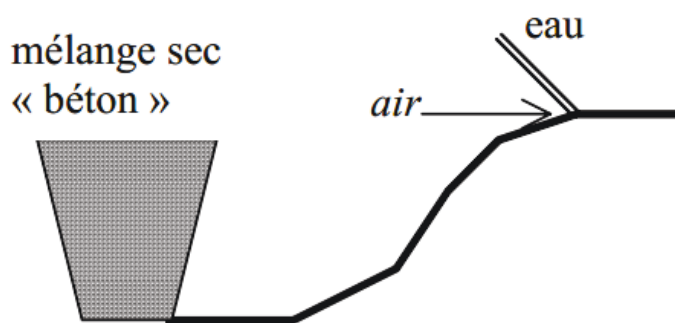


Figure 2- 2: Projection par voie sèche.



Figure 2- 3: Projection par voie humide.

Les techniques et les procédures utilisées dans l'application de béton projeté affectent grandement la qualité de ce dernier. Une mauvaise exécution de cette technique résulte à une diminution de la résistance et la durabilité du béton projeté.

L'angle de la projection sur une surface doit être généralement 90 degrés, et lorsque ce principe n'est pas suivi, il résulte une diminution de compactage et un rebond excessif des matériaux, mais il y a des exceptions dont l'angle doit être maintenu avec un angle inférieur à 90 degrés de la verticale de façon que le rebond des matériaux soit soufflé sur le travail accompli pour faciliter leur élimination.

La distance optimale durant la projection du béton est généralement d'environ de 1 m loin de la surface. Le rebond augmente lorsque la projection est maintenue à une distance supérieure à 1 m, et le compactage et la résistance du béton projeté sont réduits. En plus, le rebond peut également augmenter si cette projection est faite à moins de 1 m et aucune réduction de la pression et la vitesse de projection est effectuée.

Un mouvement régulier circulaire ou elliptique sur la surface est la bonne technique pour la projection du béton (figure 2-4), mais avec un lent déplacement ou un arrêt sur un endroit pour une longue période, cela génère une difficulté à contrôler l'épaisseur de la couche, et en plus des zones bien compactés sont formés et autres zones sont mal compactés.

L'enveloppement des armatures par le béton projeté doit être réalisé avec soin pour éviter les vides de se former derrière les ces armatures. Les faces de la barre doit rester propre et exempt jusqu'à ce que la barre est entièrement enveloppée. L'air comprimé devrait être utilisé pendant l'opération du béton projeté pour enlever l'accumulation sur la face des barres.

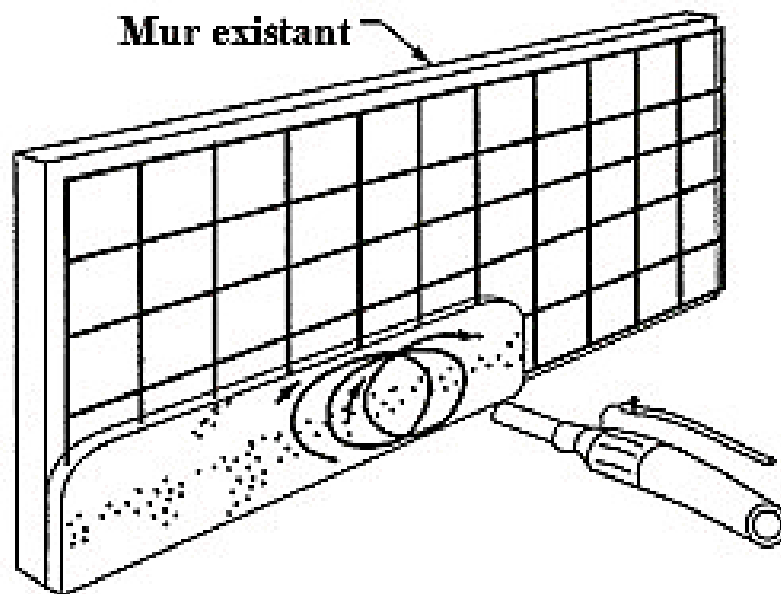


Figure 2- 4: Technique de déplacement pour le béton projeté

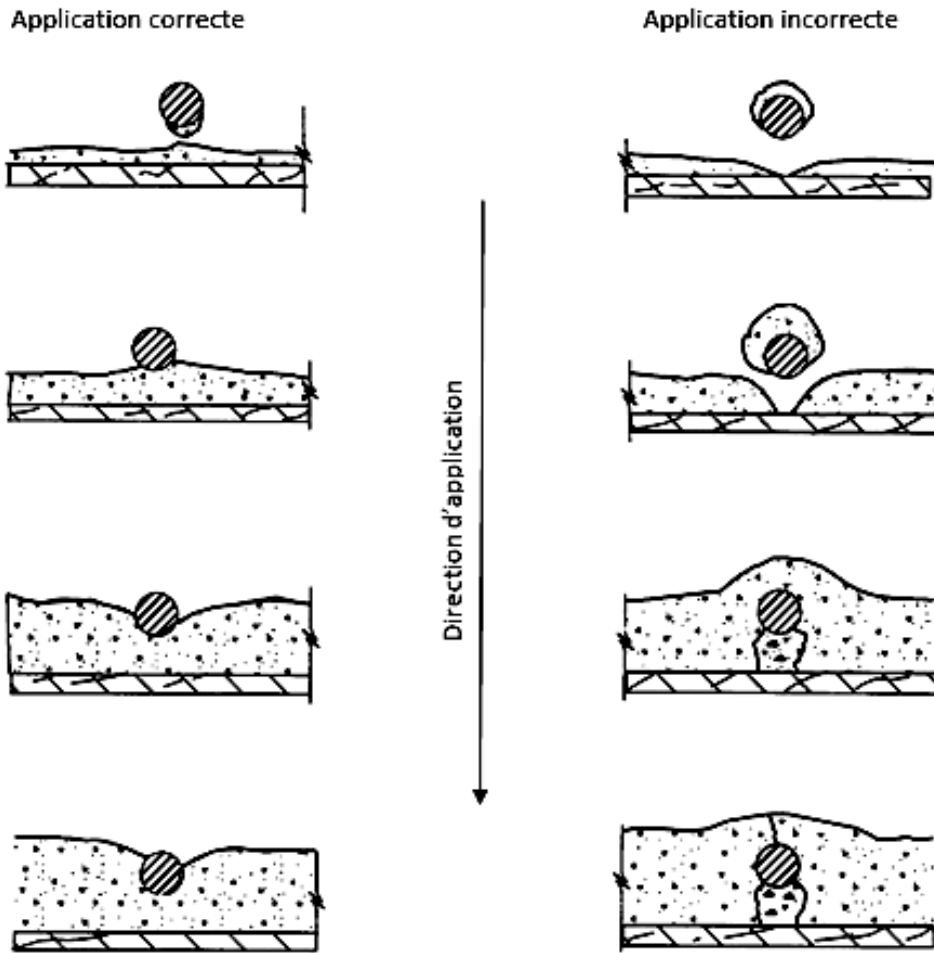


Figure 2- 5: l'application correcte et incorrecte de l'enveloppement des bars par le béton projeté.

## 2.4 Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé résulte une augmentation de la section du poteau et cela se fait par l'addition des armatures longitudinales et transversales à l'élément déjà existant et puis la mise en place d'un nouveau béton d'enrobage. Cette technique est appliquée pour les poteaux afin d'assurer les besoins suivants :

- Augmentation de la portance.
- Augmentation de la résistance en flexion et au cisaillement.
- Augmentation de la capacité de déformation.

Une préparation de la surface de l'élément en béton armé est demandée, pour cela un décaissement est nécessaire dans le béton pour une amélioration de la transmission des efforts, le traitement de la surface est fait avec une couche primaire de résine époxy. Si le renforcement est avec des armatures, cela conduit à une mise en place des armatures (Figure 2-6) puis la réalisation de bétonnage par coulage ou pompage est faite.



Figure 2- 6: chemisage en béton armé.



Des exceptions auront lieu dans le chemisage complet en béton armé, pour les éléments en béton dans le cas des façades. Ces cas font appel à d'autres procédés pour réaliser le chemisage soit par le renforcement par des plaques métalliques, ou soit par l'épaississement des deux faces opposées de l'élément en béton.

Les éléments de renfort doivent travailler avec le béton primitif comme un seul élément, alors un ancrage dans le béton est demandé dans le cas de béton additif (Figure 2-7), et dans le cas des platines métalliques il faut l'utilisation des boulons.

Le chemisage en béton armé consiste à mettre en place une épaisseur de chemise qui est suffisante pour permettre la disposition des armatures longitudinales et aussi transversales avec un enrobage adéquat. Cette méthode ne demande pas des travaux spécialisés contrairement aux autres méthodes.

#### **2.4.1 Mise en œuvre :**

Le chemisage en béton armé peut être continu entre les étages ou discontinu. Dans le cas d'un chemisage des poteaux pour assurer une augmentation de flexion cela conduit à un renforcement continu, contrairement dans le cas du renforcement pour améliorer la capacité de résistance et de déformation vis-à-vis de l'effort tranchant, alors un chemisage discontinu est demandé.

Pour la continuité entre les étages, les barres doivent passer à travers des trous fait dans les dalles, en plus des trous sont faits dans la fondation pour faire une continuité entre les éléments.

Ces trous doivent être bien nettoyés avant la mise en place de l'époxy et les barres d'acier, et cela pour éviter les problèmes de l'arrachement des barres et pour obtenir une grande adhérence.



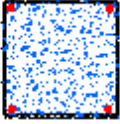

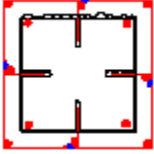
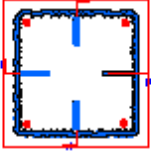
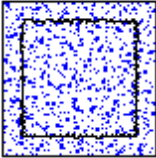
Figure 2- 7 : mise en place des armatures de renforcement.



Figure 2- 8: Augmentation de la rugosité du poteau.

Le chemisage en béton armé exige une préparation d'interface pour obtenir un bon lien entre la nouvelle colonne et l'ancienne, ce qui donne un effet monolithique.

Alors une augmentation de la rugosité de la surface est demandée, suivie de l'application d'agent de liaison. Plusieurs méthodes sont utilisées pour augmenter la rugosité de l'interface : sablage, « electric hammering », etc.

	
<p>1-nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau.</p>	<p>2- ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.</p>
	
<p>3-fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.</p>	<p>4- étalage d'une couche d'époxy sur la surface de béton primitif.</p>
	<p>Tableau 2- 1: Étapes de chemisage en béton armé.</p>
<p>5-coulage de l'enveloppe en béton.</p>	

## **2.5 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier.**

Le chemisage en acier des poteaux de sections rectangulaires et circulaires résulte à une amélioration de la résistance sismique des colonnes. La démonstration de l'efficacité du chemisage en acier a été visible par les recherches expérimentales et encore par l'observation de son efficacité sur le terrain durant le séisme de Nothbridge en 1994.

Toutefois, cette technique de renforcement est coûteuse et exige une main d'œuvre professionnelle. Compte tenu du coût et de la grande efficacité du chemisage en acier, cette technique pourrait éventuellement être appliquée dans les installations industrielles qui possèdent un nombre limité de colonnes nécessitant un renforcement. Mais, dans le cas de plusieurs poteaux ou des bâtiments types doivent être renforcés, le chemisage en acier s'avère trop coûteux.

Dans le cas des poteaux rectangulaires le chemisage en acier soit rectangulaire ou elliptique peut être exécuté. Toutefois, les recherches ont démontré que les chemises elliptiques sont plus efficaces que les chemises rectangulaires.

### **2.5.1 Technique d'amélioration:**

Le chemisage en acier est largement utilisé pour augmenter la résistance de colonnes aux séismes ou pour faire une réparation. Les propriétés du coulis et la géométrie des chemises sont des caractéristiques de chemisage en acier qui peuvent varier, bien que le fondement et la procédure des techniques de gainage d'acier soient moins ou plus similaires.

Un poteau circulaire déficient est enveloppé avec une chemise d'acier préfabriquée soudée. Un petit espace entre la colonne et la chemise apparaîtra, ce vide sera rempli par un coulis de ciment pour garantir la continuité entre le poteau et la chemise.

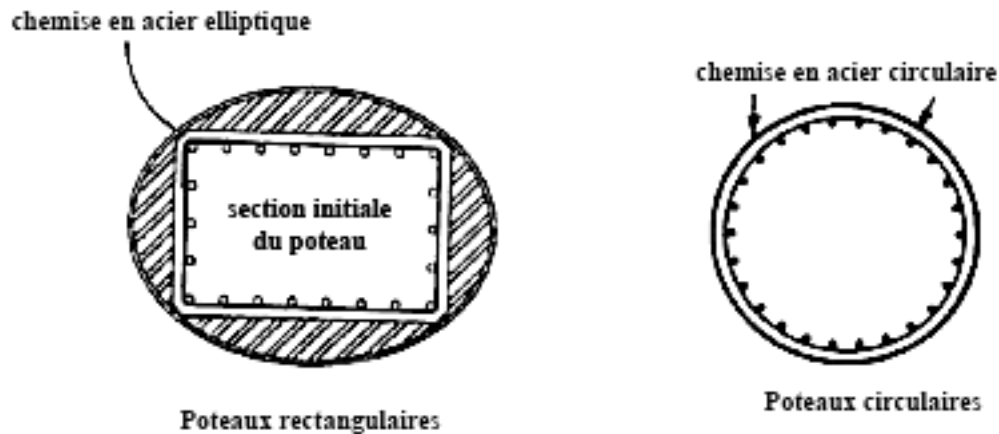


Figure 2- 9: Renforcement avec des chemises en acier. (Priestley et al. 1994)

Dans le cas des poteaux circulaires, les chemises sont fabriquées de deux demi-couches pour simplifier leur installation, et ces derniers sont soudées aux jointures verticales. En cas des poteaux rectangulaires, les couches habituellement prennent la forme elliptique et les espaces vides qui sont larges entre le poteau et la chemise sont remplis de béton à la place de coulis de ciment.

Une autre recherche pour le chemisage en acier a proposé autre manière du renforcement en acier qui consiste à souder des aciers plats transversaux et des cornières longitudinales autour des poteaux rectangulaires. Cette méthode exige l'élimination des parties dégradées et de rendre le support plan.



Figure 2- 10 : Chemisage en acier des poteaux rectangulaires. (Travaux de Monti 2003)

## **2.6 Renforcement des structures par précontraintes externe :**

Cette méthode de renforcement par précontrainte transversale additionnelles des poteaux des structures est prometteuse. Elle est qualifiée d'additionnelle car elle est utilisée à des ouvrages existant pour l'amélioration de la capacité portante et en plus pour le prolongement de la durée d'exploitation.

Cette technique de réparation est efficace et peut être économique que l'application du chemisage en acier. La mise en place de ce système de renforcement produit une gêne inférieure pour les occupants des bâtiments.

### **2.6.1 Technique d'amélioration**

L'utilisation du chemisage en béton, en acier ou en matériaux composites augmente la performance des parties de la structure (poteaux, poutres etc...) grâce à un chemisage et a une amélioration de la pression de confinement.

En plus, le renforcement des éléments de structure peut être fait par la précontrainte additionnelle qui garantit une armature supplémentaire avec une pression latérale active. La technique de mise en place consiste à entourer le poteau par des bandes d'acier. (Figure 2-11)

Ces bandes d'acier qui se composent de torons en acier à sept fils avec un élément d'ancrage conçus spécialement pour ce chemisage, qui sont placées autour de la colonne dont il faut respecter des espacements particuliers.

L'utilisation des éléments d'ancrage conduit à un ancrage adéquat aux extrémités du toron. La pression latérale active provoque une amélioration pour le confinement du béton, tout en augmentant la résistance à la flexion et au cisaillement.

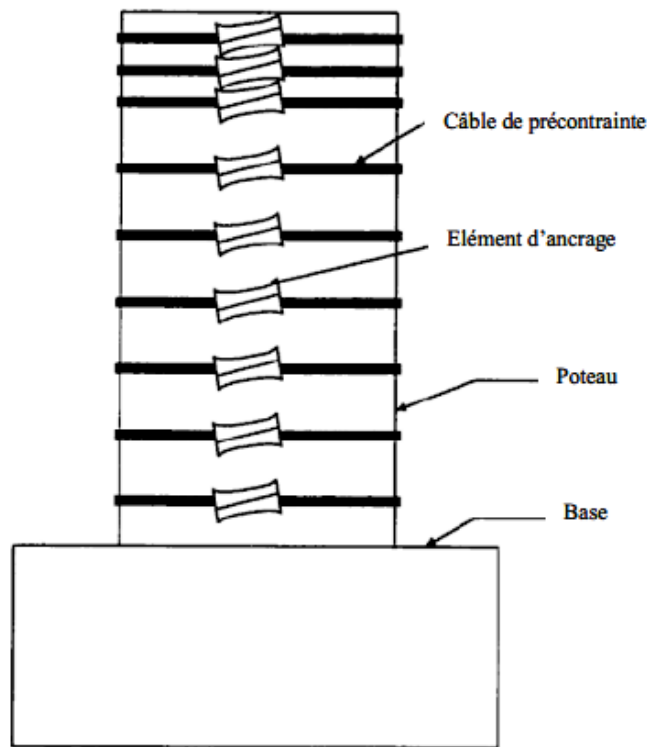


Figure 2- 11 : Renforcement d'un poteau circulaire par précontraintes additionnelles.(Saatcioglu et al . 2000)

La figure si dessous décrit le renforcement d'un poteau de section carré renforcé par une précontrainte externe produite à travers des disques de concentration des contraintes. Dans le cas du poteau rectiligne, et pour garantir une pression pratiquement uniforme sur toute la surface de ce poteau, il est nécessaire de l'application de la pièce d'appoint supplémentaire.

La pièce d'appoint est constituée d'un PCC (profilés de charpente creux) dont elle est utilisée comme bandes externes, et sur ces profilés de diamètres différents des disques de concentration des contraintes sont soudés. Les torons sont placés directement sur les disques de concentration pour produire des composantes de force perpendiculaires. Ainsi le calcul de l'emplacement et la hauteur des concentrations de contrainte se font pour garantir une répartition égale des composantes de force.

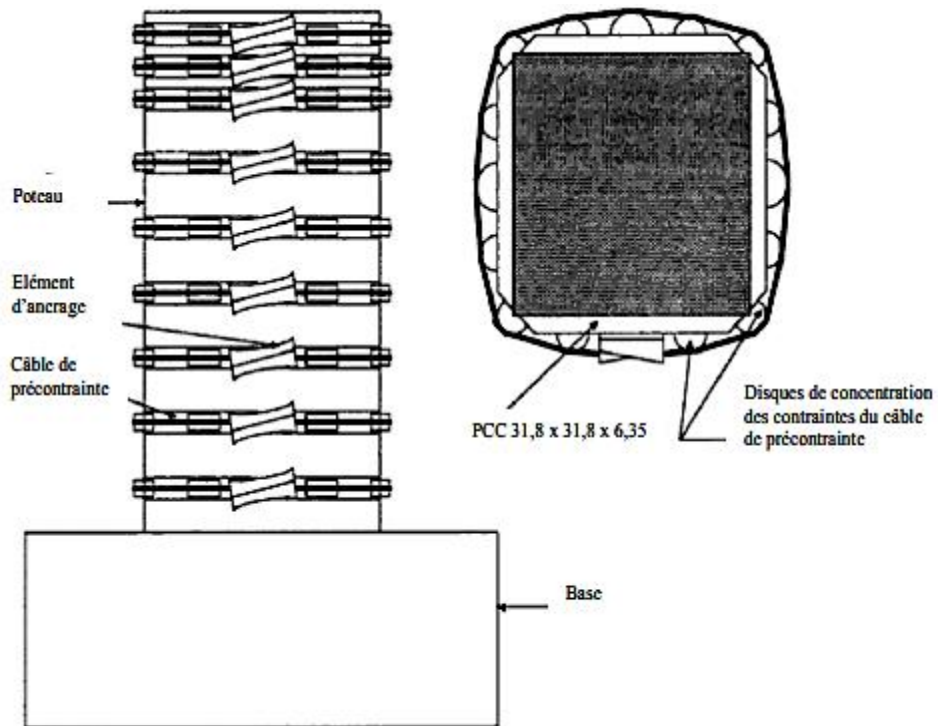


Figure 2- 12 : Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelles.  
(Saatcioglu et al . 2000)



Figure 2- 14: Renforcement d'un poteau carré.

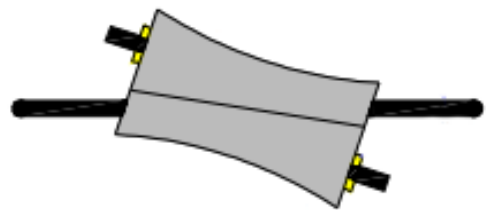


Figure 2- 13: L'élément d'ancrage.



## 2.7 Renforcement des éléments structuraux par des matériaux composites.

La technique de renforcement par des matériaux composites pour les éléments structuraux porteurs est l'une des techniques efficaces pour l'accroissement de la résistance de ces derniers. Cette technologie possède une application simple, peu exigeante en main-d'œuvre, et n'est pas dérangement pour les occupants des ouvrages.

En plus, la résistance aux substances chimiques et la corrosion sont des caractéristiques dont les matériaux composites présents donnent à cette technique une durée de vie plus longue que les matériaux traditionnels tels que l'acier. Cette technologie de renforcement possède un prix élevé mais elle est économique à long terme.

Les termes « composites amélioré », « matériaux composite renforcé de fibres » ou PRF « polymère renforcé de fibres » sont généralement destinés pour désigner les matériaux en fibres telles que la fibre d'aramide, la fibre de verre et la fibre de carbone fixée dans une matrice (résine époxy). Ces matériaux possèdent un rapport résistance-poids plus élevé par rapport aux matériaux de construction traditionnels comme l'acier, encore les composites de fibres a une résistance à la corrosion excellente.

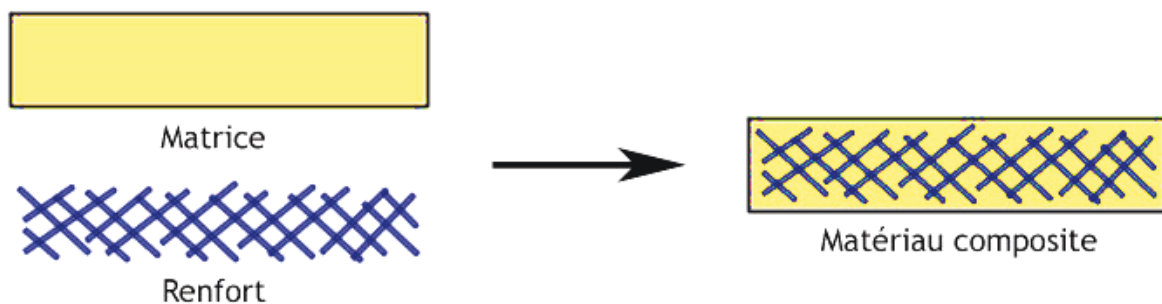


Figure 2- 15 : Composants d'un matériau composite de PRF.

Les matériaux composites sont initialement utilisés pour les industries de la défense et les industries aérospatiales. Suite à la grande demande des matériaux de construction durables et efficaces, cela a conduit une plus grande utilisation des PRF dans les constructions civiles. D'après des tentatives développement et des recherches qui ont parvenu à révéler que les matériaux composites permettraient de renforcer les structures en béton armé existantes.

### **2.7.1 Technique de renforcement.**

Un processus généralement pareil pour les étapes de la mise en place des matériaux composites, malgré la variation de l'installation du système de renforcement d'un installateur ou d'un fabricant à l'autre. Ce processus peut se résumer par :

- Examiner et réparer les surfaces effritées et les fissures de la surface de l'élément à renforcer.
- Appliquer une couche du mastic de vitrier après la préparation de la surface de l'élément en éliminant les saillies.
- Mettre en place les tissus de fibres sur la surface après une application d'une première couche d'agent d'imprégnation.
- Répéter l'étape précédente jusqu'à ce que les couches demandées de fibres soient installées.



Figure 2- 16 : Chemisage d'un poteau par PRFC.

### **2.7.2 Les applications des PRF en génie civil.**

Le génie civil a actuellement une consommation petite de matériaux composites comparativement aux différents secteurs tels que l'industrie aérospatiale ou celle de l'automobile. Cependant, dans les prochaines années il existe une réelle perspective pour leur utilisation dans la réhabilitation des constructions industrielles et civiles.

Cette perspective a apporté les centres et les laboratoires à travers le monde d'étudier les différents aspects des éléments soit réparés ou renforcés par des « PRF ».

Généralement, les polymères renforcés de fibre « PRF » résultent des avantages efficaces dès qu'il s'agit de la réparation, la protection et le renforcement des éléments de structures en B.A. comme la poutre, poteau, mur ou dalle.

#### a) Les poutres.

Le renforcement de la poutre en béton armé vis-à-vis à la flexion en utilisant les composites se fait en réalisant un collage des lamelles « PRF » sur la partie externe du support de la poutre (figure 2-17).

Une préparation du support doit être exécutée après le collage de ces lamelles de « PRF ». Cette préparation de support est très importante cela conduit à une surface adéquate dont les couches faibles sont éliminées, et cette surface adéquate a comme but l'amélioration de la liaison avec le « PRF ».

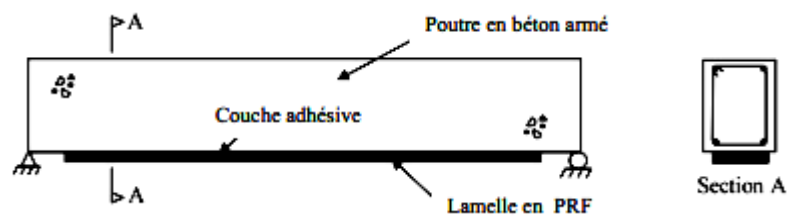
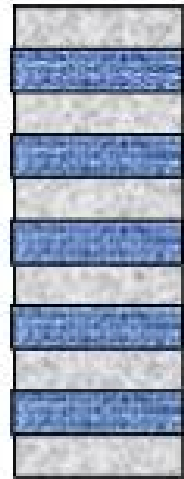


Figure 2- 17 : Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre.

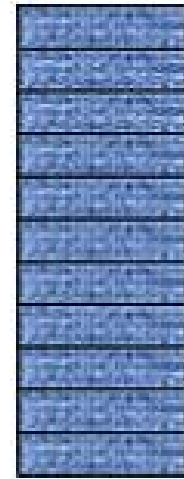
#### b) Les colonnes.

Différentes techniques ont été développées pour le renforcement des poteaux en béton armé avec des matériaux composites « PRF ». Les techniques de renforcements par le composite « PRF » peuvent être divisées en trois catégories selon la méthode adoptée pour le construire : l'enroulement filamentaire, la stratification au contact et le chemisage par coquille préfabriquée en « PRF ».

La colonne peut avoir un chemisage ou un enveloppement complet avec une ou plusieurs couches de tissus « PRF », ou elle peut être renforcée d'une manière discontinue en employant des bandes « PRF » sous forme des anneaux discrets ou spirale continue (Figure...).



Confinement discontinu



Confinement continu

Figure 2- 18: Types de confinement de poteaux

Le renforcement des poteaux par des matériaux composites est efficace grâce au « PRF » qui assure une amélioration de la résistance aux déformations qui est dues aux charges axiales, suite au confinement des contraintes créées dans le béton, ce qui augmentera la contrainte de compression du béton.

La figure (2-19) peut donner une observation facile que le confinement des poteaux avec des polymères renforcés en fibre a nettement amélioré la ductilité et la capacité des poteaux renforcés.

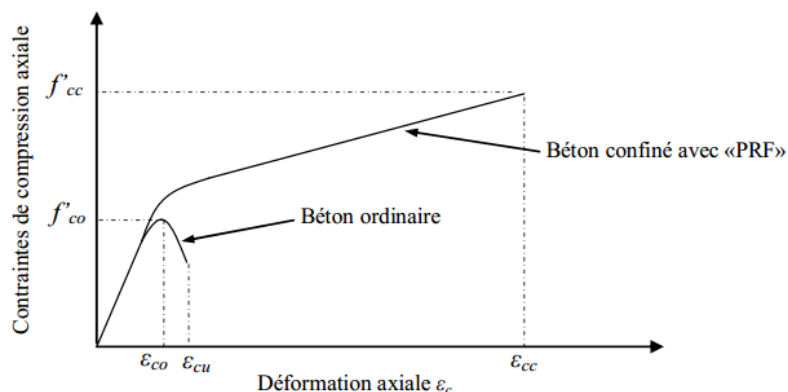


Figure 2- 19: Courbe contrainte-déformation pour un béton confiné avec « PRF ».

**Chapitre 3 : Définition de polymère renforcé de fibres**  
**« PRF »**

### 3.1 Introduction.

Les PRF sont des matériaux connus généralement par composites. Les composites sont des matériaux qui sont obtenus par la combinaison de deux ou plusieurs matériaux, ce qui conduit à un nouveau matériau dont ses propriétés sont plus avantageuses que celles des matériaux qui le constituent pris individuellement.

Les matériaux composites utilisés durant des certaines d'années en génie civil sont nombreux (par exemple le béton, est un matériau composite qui est formé principalement de ciment de gravier et de sable).

Plus encore, dans la nature il existe des matériaux composites organiques, l'os et le bois sont deux exemples sur ces matériaux naturels de forte résistance. Par exemple, l'os est la combinaison des fibres de protéine de collagène, qui sont reliées par l'apatite qui est un composé cristallin de calcium.

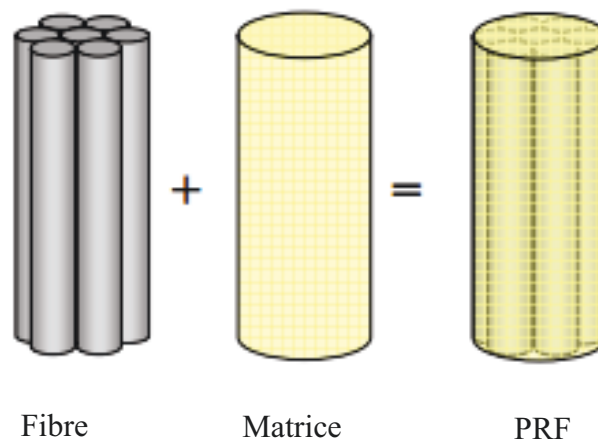


Figure 3-1 : Composants d'un matériau composite de PRF. (Vue microscopique)

Le PRF est un matériau composite qui se constitue de deux matériaux qui sont la fibre de haute résistance mélangée dans une matrice de polymère. Une complexité dans les études des PRF à cause de l'innombrable combinaison de matériaux dont elle peut être utilisée pour créer le PRF. Ce qui provoque en même temps un inconvénient et un avantage pour les PRF.

En effet, les PRF peuvent être conçus pour répondre à n'importe quel usage, mais cette polyvalence conduit à une vaste gamme de propriétés possibles, ce qui mène à une difficulté dans la généralisation du comportement des PRF dans plusieurs cas.

Les matériaux composites disposent des meilleurs avantages par rapport aux matériaux traditionnels. Ces matériaux apportent de nombreux avantages : résistance chimique et mécanique, légèreté, liberté de forme, maintenance réduite. Ils apportent une augmentation considérable dans la durée de vie des éléments de structures.

Ces performances remarquables dans les marches d'application (automobiles, équipements industriels, bâtiments...) sont à l'origine de solution innovantes.

Le PRF comme mentionné au-dessus, il est constitué de deux matériaux, le premier est la fibre qui est à la phase discontinue nommée « le renfort » qui donne aux composites les caractéristiques mécaniques, le second est le matrice qui est à la phase continue et son rôle est de conserver la disposition des fibres et leur transmet les sollicitations.

Les propriétés globales des PRF dépendent de ces deux constituants, pour cela l'examen du rôle et des propriétés de chaque matériau constitutif est fait avant la discussion des propriétés du PRF.

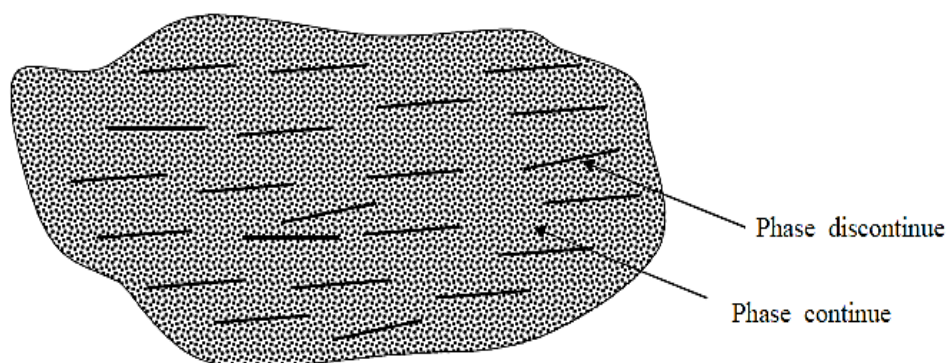


Figure 3-2: les phases du matériau composite « PRF »

## **3.2 Les constituants d'un polymère renforcé de fibres (PRF)**

La fabrication des composites qui sont des matériaux synthétiques est faite à travers des mélanges de matériaux qui ont de différent composition, état et forme. Les composants de ces matériaux sont clairement différenciés et maintiennent leur identité séparée. Cependant, le travail dans le composite est fait de manière solidaire, en combinant des caractéristiques qui ne sont pas obtenues séparément.

### **3.2.1 Les renforts.**

Les fibres fournissent la rigidité et la résistance mécanique d'un PRF et elles se présentent sous forme filamentaire. Puisque Les renforts sont orientés dans des directions indiquées, les polymères renforcés de fibres sont beaucoup plus rigides et résistants dans les directions des fibres. Les propriétés des composites sont influencées par les fibres utilisées, pour cela les fibres ou renforts sont choisis pour obtenir, une résistance ultime élevée, une rigidité élevée, et la résistance entre les différentes fibres ont une faible variation.

Le rapport d'aspect élevé de fibres (rapport longueur/diamètre) permet un transfert très efficace de la charge à travers la matrice aux fibres, ce qui permet ainsi le profit total des propriétés des fibres utilisées. Les fibres peuvent être fabriquées sous forme continue ou discontinue, et ces renforts utilisés pour le renforcement présentent un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture contrairement au comportement de l'acier.

Il existe principalement trois types de fibres qui sont utilisés pour le renforcement des structures en génie civil qui sont les fibres de verre, d'aramide et de carbone. Il convient de noter que les propriétés physiques et mécaniques peuvent varier trop d'un type donné de fibre ainsi bien entendu entre les différents types de fibres. Plusieurs facteurs permettent la sélection du type de fibres utilisées dans les matériaux composites pour le renforcement citons la résistance requise, la considération de la durabilité, la rigidité, la disponibilité des matériaux et les contraintes de coût.



### **3.2.1.1 Fibres d'aramide**

Les fibres d'aramide sont connues encore par polyamide aromatique. Kevlar est la marque la plus connue de ce type de fibre, aussi il existe d'autres marques telles que « SVM » et « Twaron ». Ces fibres possèdent des modules d'élasticité de 70 à 200GP, et un allongement ultime entre 1.5 à 5 %, et tout cela selon la qualité des fibres.

Le renfort d'aramide est sensible à l'humidité, aux températures élevées, et aux radiations « ultra-violet » et par suite, en génie civil ces fibres ne sont pas largement utilisées. En plus, les fibres d'aramide possèdent une bonne résistance à la fatigue et au choc, mais des problèmes avec la corrosion.

### **3.2.1.2 Fibres de verre**

Le verre sous forme massive possède une fragilité qui est due à sa sensibilité à la fissuration, tandis que ce caractère n'a plus d'effet sur le verre qui est sous forme des fibres. A la température de 1250<sup>0</sup>C, le verre fondu est maintenu dans des filières chauffées, et à la sortie de la filière un étirement rapide est fait avec le refroidissement. Elles sont caractérisées par leur module d'élasticité, leur masse volumique et leur résistance. Les fibres de carbone sont sensibles à l'humidité, mais ils peuvent être bien protégés par l'utilisation de la matrice. Les fibres sont et au cours de temps exposées à une perte de leurs résistance.

Ces renforts sont moins chères que les fibres d'aramide et de carbone, pour cela les polymères renforcées en fibre de verre sont devenues les fibres les plus utilisées dans le domaine de génie civil, et autre comme l'industrie d'automobile et des bateaux.

Plusieurs types de fibre en verre existent, elles ont des épaisseurs différentes qui varient entre 3 à 24 µm. Les types sont :

- Les fibres de verre E, ce type est le plus utilisé au génie civil, et cela grâce à ses propriétés de non conductivité électrique.
- Les fibres de verre C, elles sont utilisées en raison de la caractéristique de résistance à la corrosion.
- Les fibres de verre S, ce type possède une haute résistance et elles sont appliquées initialement dans l'aérospatial.

### 3.2.1.3 Fibres de carbone

La production de la fibre de carbone est faite par un processus nommé la pyrolyse commandée, ou elle consiste à soumettre un des trois précurseurs (polyacrylonitrile « PAN ») des fibres à une série de traitements thermiques (oxydation, carbonisation, graphitisation, et traitement de surface) afin de produire des diamètres variant de 5 à 8  $\mu\text{m}$  des filaments de carbone.

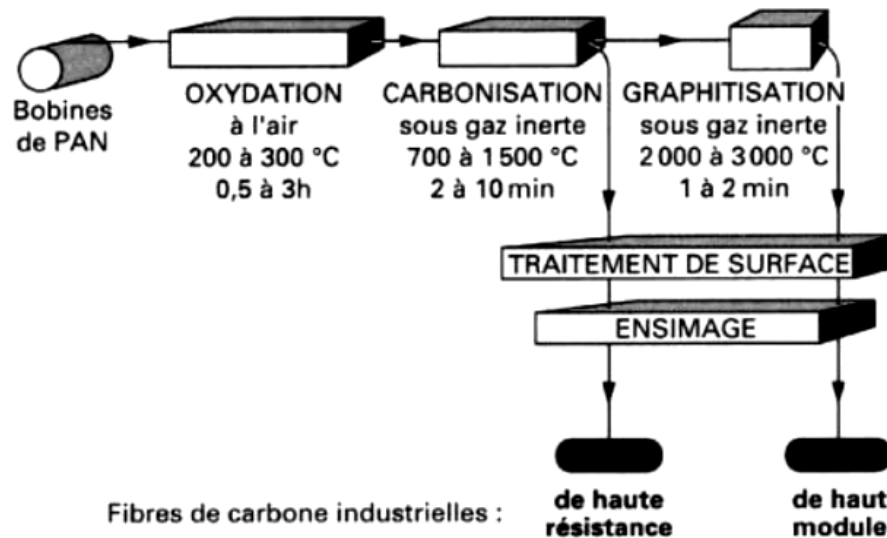


Figure 3-3: Processus de fabrication des fibres de carbone

Les fibres de carbones peuvent avoir des propriétés très différentes et ainsi ces renforts possèdent plusieurs catégorie qui sont classées selon leurs modules d'élasticité (régulier 200-300 GPa, intermédiaire 300-350 GPa, grand 350-550 GPa, très grand 550-1000 GPa), et l'allongement ultime varie de 0.3 à 2,5 %.

Ce type de renfort a une résistance excellente à la fatigue avec une faible relaxation. Les fibres de carbones résistent bien à plusieurs solutions chimiques et encore elles n'absorbent pas l'eau. Elles se différencient par le taux de carbone moins ou plus élevé ce qui conduit à une modification dans les contraintes à la rupture, les allongements et les modules d'élasticité.

Bien que les fibres de carbones sont plus chères que les fibres de verre, ces fibres commencent à être plus utilisées dans les structures comme les enveloppes de PRF pour le renforcement ou la réparation des colonnes, poutres, et dalles en béton armé. L'utilisation croissante des fibres de carbone grâce à leur résistance et hauts modules élastiques, leur résistance aux effets

chimiques, thermiques et environnementaux, encore leurs masse volumique (faible poids) pour cela dans les cas où la flèche et le poids ajouté sont des conditions critiques, les fibres de carbone sont le choix idéal.

### **3.2.2 Les matrices.**

De fait de la faible section des fibres (diamètres de quelque  $\mu\text{m}$ ), elles ne peuvent être appliquées directement dans une application mécanique, de là l'idée de les mélanger dans une matrice qui conduit à la fabrication du composite à fibres. La matrice qui est la liaison du PRF a encore des rôles important :

- Protéger les fibres de l'environnement et de l'abrasion
- Lier les fibres ensembles
- Transmettre les forces entre les fibres

Pour le choix des matériaux de matrices un critère important doit être pris en considération qu'ils aient une faible masse volumique, généralement la masse volumique de la matrice doit être considérée inférieure à celle des renforts, afin d'obtenir un poids global du composite qui est réduit au minimum.

La matrice est un composite qui est constituée de deux matériaux homogènes. Le premier est la résine (**polyester, époxy**), et un second qui est le charge qui a le but de l'amélioration des caractéristiques de cette résine.

#### **3.2.2.1 Les résines :**

L'utilisation de la résine dans les matériaux composites a le rôle de transférer les sollicitations aux fibres et lui offre une protection de l'environnement extérieur. Deux familles de résines existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

Les résines thermoplastiques : ce type de résine possède la capacité d'être mise en forme pour plusieurs fois et cela fait par chauffage et refroidissement, en plus sa récupération et son recyclage sont faciles. Elles ont un faible coût de production

Les résines thermodurcissables : les propriétés mécanique de ce genre de résine sont meilleures que la première. Encore, la mise en forme de ces résines est pour une seule

fois et elles sont plus coûteuses à la fabrication. L'époxy est une résine thermodurcissable.

### 3.2.2.2 Les charges et les additifs :

Les caractéristiques mécaniques et physiques sont améliorées par l'addition des charges et les additifs. Les charges et les additifs se différencient par leur rôle. Les charges améliorent ou font augmenter les caractéristiques mécaniques de la résine et encore conduisent à une diminution dans la probabilité de fissuration de la résine. Tandis que les additifs facilitent le façonnage de la résine et son démoulage, ils réduisent le retrait de ce dernier lors de séchage et lui donnent une couleur.

### 3.3 Propriétés des matériaux composites.

Les composites d'aramide, de verre et de carbone sont utilisés pour le renforcement des structures en béton armé. Le tableau ci-dessous nous montre les propriétés des composites

*Tableau 3- 1 : propriétés typiques des composites. (Teng et al. 2002)*

<i>Composite unidirectionnel</i>	<i>Contenu de fibre (% en poids)</i>	<i>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Module d'élasticité (GPa)</i>	<i>Résistance à la traction (MPa)</i>
<i>Fibre de verre /polyester</i>	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
<i>Fibre de carbone /époxyde</i>	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
<i>Fibre d'aramide /époxyde</i>	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Indépendamment du type des fibres, on a la même courbe contrainte-déformation pour ces matériaux qui est : élastique linéaire jusqu'à la rupture qui est fragile en traction. Les courbes contrainte-déformation présentée dans la figure 3-4 pour les matériaux composites (verre, carbone, aramide) et pour l'acier standard, montrent clairement le comportement ductile de l'acier et fragile des matériaux composites. La fragilité des matériaux composite et le manque de la ductilité comparés avec les aciers limitent la ductilité des éléments renforcés sauf des colonnes. Le confinement par matériaux composite ceci nous donne une augmentation de la capacité portante et la ductilité des colonnes. Ensuite, le calcul pour les éléments renforcés par matériaux composites sont différents des méthodes existantes pour les éléments renforcés par des aciers.

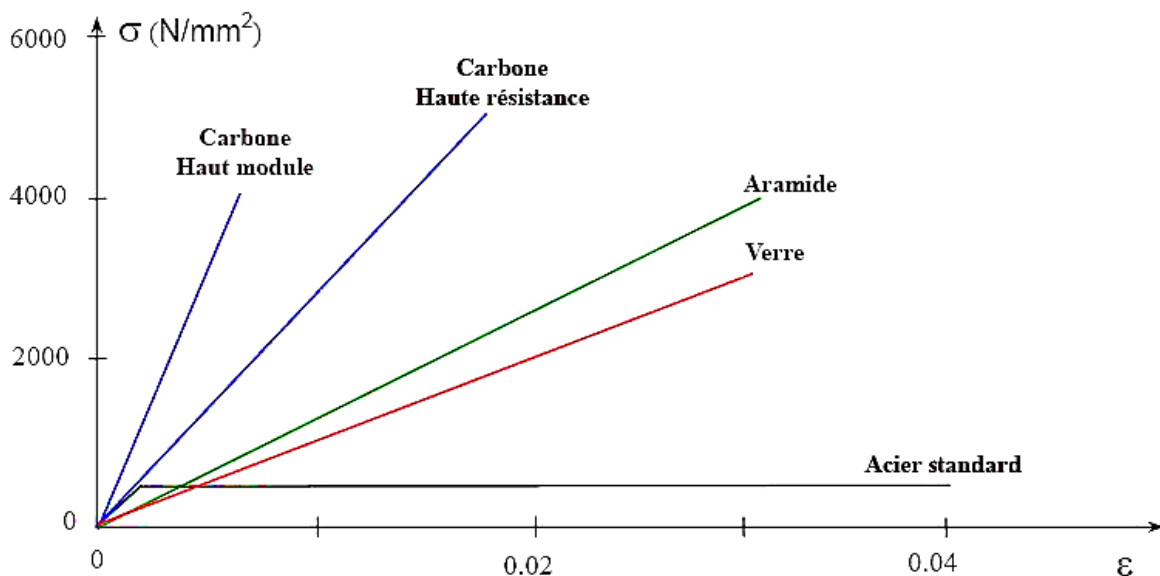


Figure 3-4: Courbes contrainte-déformation (matériaux composite - acier) (Nobatek)

Les fibres de carbone ont des meilleures propriétés que celles d'aramide et de verre, tandis que les fibres de verre ont un coût moins chers que celle du carbone. Le tableau ci-dessous nous donne une petite comparaison entre ces trois types de fibres, dont ils ont utilisé pour le renforcement des éléments en béton armé.

Tableau 3- 2: Comparaison qualitative entre les trois types de fibre (Meier et Winistorfer 1995)

<i>Critère</i>	<i>Fibres de verre</i>	<i>Fibre de carbone</i>	<i>Fibre d'aramide</i>
<i>Résistance à la traction</i>	Très bonne	Très bonne	Très bonne
<i>Résistance à la compression</i>	bonne	Très bonne	Inadéquat
<i>Comportement à Long terme</i>	adéquat	Très bonne	Bon
<i>Comportement à la fatigue</i>	adéquat	Excellent	Bon
<i>Prix</i>	Très bon	adéquat	adéquat

### 3.4 **Méthodes de confinement :**

Plus qu'une méthode de renforcement par matériaux composites « PRF » des colonnes existantes en B.A. ont été développées. Les méthodes de renforcements sont divisées en trois sections :

- La stratification en contact.
- L'enroulement filamentaire.
- Le chemisage par coquille préfabriquée.

#### 3.4.1 **La stratification en contact :**

C'est la méthode de renforcement des colonnes sur chantier la plus employée, en utilisant les composites « PRF » (Figure 3-5). Cette méthode consiste à l'imprégnation des draps de fibres par les résines, puis l'enveloppement des colonnes par ces couches est fait par un processus de moulage.

A)



B)



Figure 3-5 : Stratification en contact des colonnes (A et B)

Les colonnes peuvent être enveloppées complètement ou partiellement par des tissus de « FRP ». Pour le renforcement partiel on peut utiliser des couches de « PRF » sous forme des anneaux discrètes (Figures 3-6).

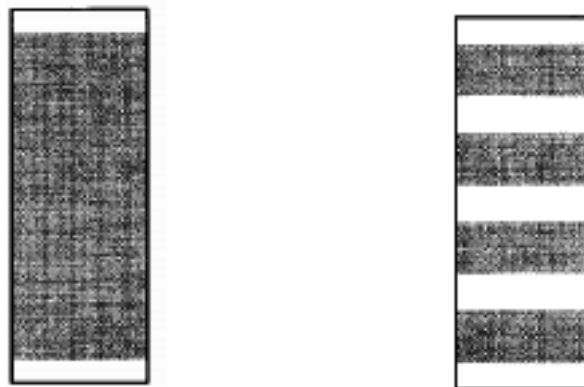


Figure 3-6 : Types de confinement de poteaux

Le confinement externe par « PRF » afin d'améliorer la force de compression du béton, est démontré premièrement par Fardis et Khalili (1981 et 1982).

Au Japon en 1980, était la première application de cette technique pour des colonnes en béton armé. Depuis cette utilisation il y a eu plusieurs recherches pour l'application de ces techniques dans le domaine des constructions en génie civil.

### 3.4.1.1 Préparation avant mise en œuvre

#### a) Préparation du support :

- Le support doit être sec
- Le support doit être sain et propre des produits non adhérents et d'enduit de type peinture.
- Une élimination des surfaces qui offre un peu de cohésion, et une préparation de cette surface doit être faite afin de créer une rugosité suffisante.

#### b) Préparation du tissu de fibre de carbone :

- Découper soigneusement les tissus.
- Les tissus coupés doivent rester à plat ou enroulés, pour éviter l'endommagement des fibres.
- Tenir hors poussière.

#### c) Préparation de la résine:

- Homogénéiser chaque composante séparément,
- Verser le durcisseur dans la résine
- Mélanger cette dernière avec un agitateur mécanique jusqu'à obtenir un mélange uniforme.

### 3.4.1.2 Mise en œuvre

- Mise en œuvre de la résine

L'application de la première couche de résine à l'aide d'un rouleau sur le support déjà préparé.

- Mise en place du tissu

Le placement du tissu sur la couche de résine, en prenant attention à l'orientation des fibres et à l'étirement excessif des tissus.



*Tableau 3- 3 Mise en place du confinement par tissu TFC*

**Préparation de surface :**

**ponçage au disque diamant des  
différentes faces du poteau et  
meulage des angles pour les  
arrondir.**



**Evacuation des poussières au moyen  
d'air comprimé.**



**Application d'une couche de résine,**



**Pose des bandes de TFC,**



**Marouflage au rouleau,**



**Pose d'une couche de résine de  
couverture,**

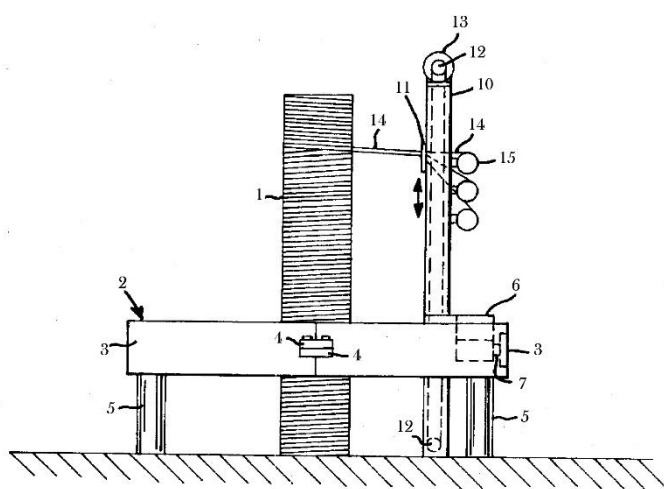


### 3.4.2 Enrouement filamentaire :

Cette méthode possède le même principe de la stratification direct, sauf que l'enrouement filamentaire consiste à utiliser une fibre continue au lieu des lanières ou tissus, en plus le traitement de l'enrouement des filaments est fait automatiquement à travers d'une machine contrôlée par ordinateur.

L'enrouement filamentaire donne plus de précision que la stratification directe, cette précision est trouvée dans l'épaisseur du « PRF », Encore Fardis et Khalili (1981) ont mentionné l'idée de confinement du béton par enrouement des fibres continues qui sont imprégnées par la résine.

La figure 3-7 représente une colonne verticale fixe (1) qui repose sur des semelles placés dans



le sol. La présente invention doit être utilisée pour équiper la colonne verticale (1) par des couches de matériau composite enroulées en spirale. Les figures 3-(7,8 et 9) présentent trois vues d'un dispositif d'enrouement filamentaire.

Figure 3-7 : Vue en élévation de l'enrouement filamentaire

L'appareil comprend une base (2) qui est formée à partir de deux pièces semi-circulaires (3) qui peuvent être assemblées pour former la base annulaire (2). Les deux pièces (3) sont généralement transportées en tant que pièces séparées, puis assemblées autour de la colonne verticale (1) au niveau du site de travail.

Chacune des pièces (3) comporte des « flange » (4) à ses extrémités opposées et elles sont assemblées avec des boulons pour former la base (2). La base (2) est supportée sur des pieds (5) dont les longueurs peuvent être ajustées par le fonctionnement de vérins afin de fixer la base.

Un appareil rotateur (6) est supporté sur la base (2) et elle tourne dans une direction circonférentielle autour de ce dernier. Un moteur contrôlable tourne la roue dentée (7) afin de produire un mouvement de rotation de l'appareil rotateur (6) dans la direction circonférentielle (8).

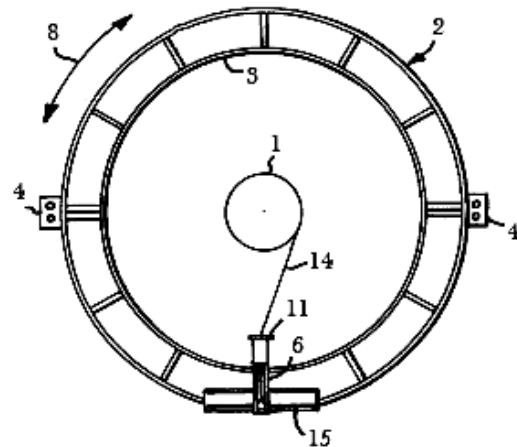


Figure 3-8 : Vue en plan de l'enroulement filamenteire.

Un élément vertical (10) est supporté verticalement sur l'appareil rotateur (6), cet élément (10) se trouve à l'intérieur du diamètre de la base dont il peut s'étendre vers le bas ou contrairement, ce qui permet un chemisage complet du support (colonne) (1). L'élément (10) peut être déplacé sur toute la circonférence de la base (2) par le mouvement rotatif correspondant à l'appareil rotateur (6).

L'élément (11) est supporté sur l'élément vertical (10) et il se déplace encre vers le bas et le haut à travers des supports (12), et ce support est contrôlé par un moteur (13). Les fils (14) qui sont produits à travers des bobines rotatifs (13). Six bobines de matériau de renfort sont prises en charge, trois de chaque côté de l'élément vertical (10). Les fils passent du support (11) et se dirigent vers le support (colonne).



Figure 3-9 : l'enroulement filamenteire ( Balaguru et al, 2009)

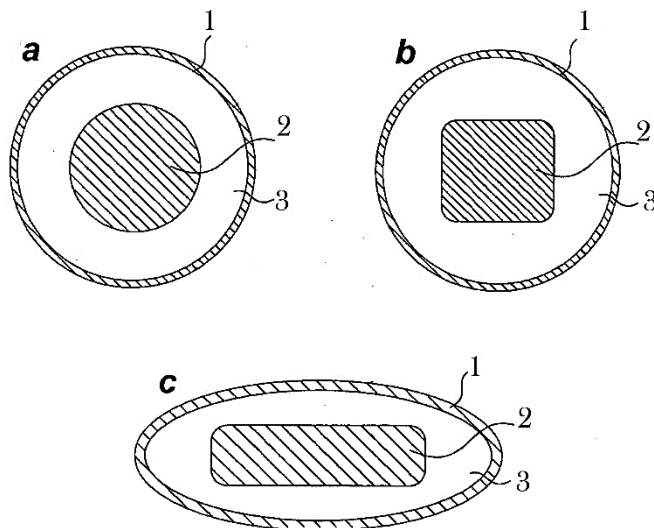
### 3.4.3 Chemisage par coquille préfabriquée en PRF :

Le renforcement des poteaux en béton armé peut être fait par des chemises sous forme de coquilles préfabriquées en « PRF ». Leur fabrication peut être en forme de demi-cercle, demi rectangles ou en cercles avec une fente, pour qu'elles puissent être ouvertes et placées autour des poteaux en B.A.

Un confinement efficace est obtenu par le contact total entre la coquille et les poteaux. Ce contact est assuré soit par l'utilisation des adhésives qui lie la colonne et la coquille, ou par l'injection par coulis ou mortier de ciment dans le vide entre la colonne et la coquille.

Cette méthode de renforcement est intéressante dans le cas de modification de forme des poteaux carrés ou rectangulaires, dont le renforcement est fait en les reformant dans des colonnes (elliptiques ou circulaires) cela est réalisée par l'utilisation de ces coquilles préfabriquées en « PRF ».

Les figures 3-10 (a,b et c) représentent des poteaux renforcés par des coquilles préfabriquées de PRF. Ce renforcement peut conserver la forme initiale de la colonne comme il est présenté



dans la figure 3a, mais encore la modification de la forme initiale peut être appliquée figure 3b et 3c, la figure 3b montre la coquille en fibre de carbone (1) avec une forme circulaire et une section intérieure transversale de forme carrée (2), tandis que la figure 3c la coquille est de la forme elliptique (1) et la section du poteau interne est de la forme rectangulaire (2)

Figure 3-10 : Différentes section des colonnes renforcées par des coquilles préfabriquées.

En se référant à la figure 3-11(a), une coquille de FRP extérieure est représentée autour d'une colonne existante(2) et la coquille extérieure (1). L'espace ouverte (3) peut alors être remplie par de ciment (4). Dans un mode de réalisation préféré des chevilles qui peuvent être placées entre la structure de ciment intérieure et la coquille extérieure FRP pour assurer le positionnement de la colonne extérieure et de la colonne existante avant de remplir l'espace ouverte avec du ciment.

La figure 3-11(b) illustre un mode de réalisation de la présente invention dans lequel l'enveloppe externe (1) comprend au moins deux pièces qui peuvent être placées autour de la colonne (2) existante pour former l'enveloppe extérieure. Pour renforcer une colonne existante (2), il est généralement nécessaire de séparer l'enveloppe extérieure (1) dans le sens longitudinal une première pièce (5) et une deuxième pièce (6).

Ces deux dernières peuvent alors être placées autour de la colonne (2) existante. Dans la plupart des cas, l'enveloppe extérieure est conçu et façonné à laisser un espace ouvert (3) entre la

colonne existante (2) et l'enveloppe extérieure (1). Ainsi, la coquille extérieure (1) fournit une avenue pratique pour façonner la modification des structures existantes. Une colonne existante (2) avec une forme carrée ou une section transversale rectangulaire peut être modifiée pour avoir une coupe transversale circulaire ou elliptique.

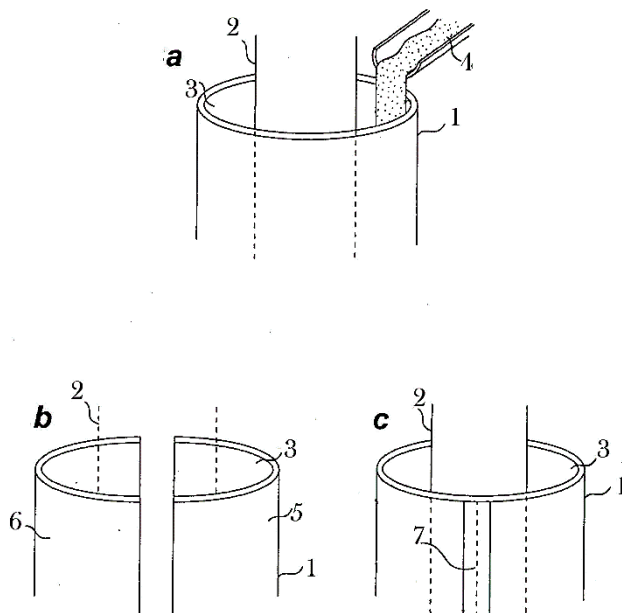


Figure 3-11 : Différents types de chemisage par coquilles préfabriquées.

Par conséquent, modification de forme d'une colonne existante en utilisant (2) la présente invention peut être facilement réalisée pour fournir de meilleures propriétés mécaniques et structurelles.

Une fois la première pièce (5) et deuxième pièce (6) ont été placées autour de la structure existante (2) elles peuvent être épaissées, comme le montre la figure 3-11(c), avec une bande composite FRP vertical (7) le long de chaque couture entre la première pièce (5) et la seconde pièce (6) de manière à former une enveloppe externe unitaire.

Dans un mode de réalisation préféré de la présente invention, après l'assemblage de la première et la seconde pièce avec une bande verticale de composite (FRP), des matériaux FRP supplémentaire peuvent être enroulé autour de la coque extérieure. Typiquement le chemisage peut être fait avec une seule feuille continue ou plusieurs feuilles.

### **3.5 Aspects constructifs :**

La surface des poteaux à renforcer doit être bien traitée pour aboutir à un surface sèche, propre et dure, tout cela avant l'application des « PRF », quelque soit la technique utilisée de ces trois techniques décrites ci-dessus.

L'élimination des parties abîmés ou endommagées et puis leur réparation est une nécessité. La réparation est faite avec un mortier du ciment, un bon béton ou avec de résine époxy.

Dans le cas des colonnes rectangulaires, l'arrondissement des coins est nécessaire pour les renforcer par des couches de « PRF ». Cette modification est importante pour réduire les effets nuisibles des coins tranchants sur les plies de « PRF», et pour l'amélioration de l'efficacité du confinement.

En utilisant les techniques de stratification au contact ou en coquilles préfabriquées, des joints verticaux sont créés dans le « PRF ». Le joint est important car il assure une élimination du facteur de la rupture de ce joint (ou la rupture par décollement) qui contrôle de la résistance

### 3.6 Modification de forme :

Une grande efficacité est obtenue lors du renforcement par des composites «PRF» les colonnes en section circulaire, tandis que cette efficacité diminue pour les sections rectangulaires. Pour une efficacité améliorée dans le cas des sections rectangulaires, une modification à des sections elliptiques ou circulaire doit être faite.

L'agrandissement excessif des sections doit être pris en considération, pour cela les sections rectangulaires sont généralement modifiées à des sections elliptiques au lieu de circulaire, bien que ce dernier soit pour les colonnes de section carrée.

Le renforcement des colonnes rectangulaires par des coquilles elliptiques ou circulaires préfabriquées en « PRF » peut être fait, et le vide entre la coquille et la colonne initiale est remplie de béton.

L'intérêt des coquilles est double, Premièrement elle fonctionne comme un coffrage permanent et deuxièmement ce confinement assure une augmentation par la capacité portante de la colonne qui a subi une modification de section. Un arrondissement pour les coins des colonnes initiales peut être fait, pour diminuer la dimension de la colonne renforcée. (Figure 3-12)

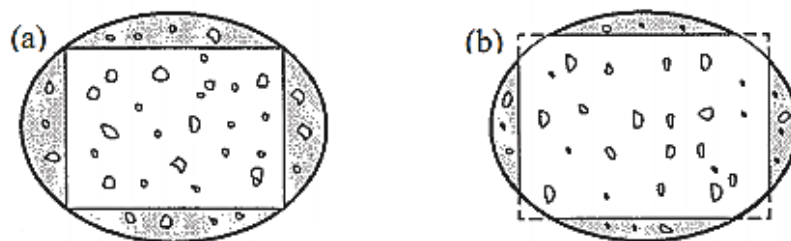


Figure 3-12 : Modification de forme d'un poteau à section rectangulaire. (Teng et al 2002)

### 3.7 Comparaison des méthodes de renforcements :

Les avantages et les inconvénients de ces trois méthodes sont comparés dans le tableau suivant : (tableau 3-4) :

Tableau 3- 4 : *Comparaison des trois méthodes de renforcements*

METHODES	AVANTAGES	INCONVENIENTS
<b>STRATIFICATION AU CONTACT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Méthode flexible quelque soit la forme des colonnes.</li> <li>○ La mise en place est facile, sans le besoin d'équipements spéciaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Le contrôle de la qualité est difficile</li> <li>○ Une main d'œuvre est demandée plus que les autres techniques.</li> </ul>
<b>ENROULEMENT FILAMENTAIRE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Un contrôle amélioré de la qualité</li> <li>○ Le besoin de main d'œuvre est réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Exige un équipement spécial.</li> <li>○ L'adaptation de cette technique avec les différentes formes des poteaux est limitée.</li> </ul>
<b>COQUILLES PREFABRIQUEE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Efficace pour modifier la forme des poteaux</li> <li>○ La main d'œuvre sur chantier est réduite.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Moins de flexibilité dans le cas de différentes formes de poteaux.</li> <li>○ Le coût de la préfabrication</li> </ul>

En général la technique la plus populaire est la stratification en contact grâce à ses avantages tels que la facilité et la flexibilité de mise en œuvre. L'enroulement filamentaire ressemble à la première méthode car le processus des deux techniques sera fait par une stratification directe



### 3.8 Comportement type et modes de rupture des poteaux en béton confiné avec des « PRF ».

#### 3.8.1 Colonnes de section circulaire.

##### a) Pression de confinement.

Le béton des colonnes confinées par des matériaux composites s'étend latéralement sous la compression axiale, et cette expansion sera prise par l'enveloppe des matériaux composites. L'action de confinement sur les colonnes circulaires exercées par le composite «PRF» est présente sur la figure 3-13.

Un confinement uniforme est trouvé pour les sections circulaires des colonnes confinées. Le « PRF » fourni une pression maximale de confinement qui est en lien direct avec la résistance l'épaisseur du « PRF », ainsi que le diamètre du béton confiné.

Le calcul de la pression de confinement pour les sections circulaires se fait par la formule suivante :

$$f_1 = \frac{2 * f_{prf} * t_{prf}}{D}$$

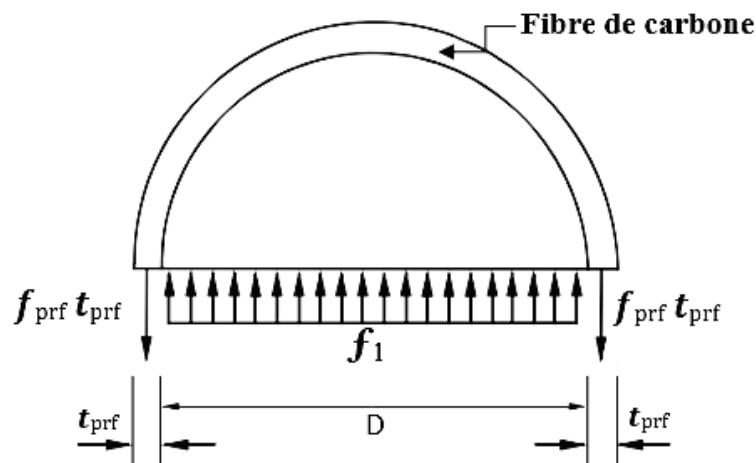


Figure 3-13 : Action de confinement avec « PRF » (Teng et al. 2002, Purba et Mufti 1999)

Avec  $f_1$  est la pression de confinement qui est due au renforcement par « PRF »,  $f_{prf}$  est la résistance du composite « PRF » à la traction et il est égale à  $E_{prf} * \epsilon_{fu}$ ,  $\epsilon_{fu}$  la déformation à la rupture de «PRF » et  $E_{prf}$  le module d'élasticité du « PRF »,  $D$  et le diamètre de la section du béton et  $t_{prf}$  : Epaisseur total du « PRF ».

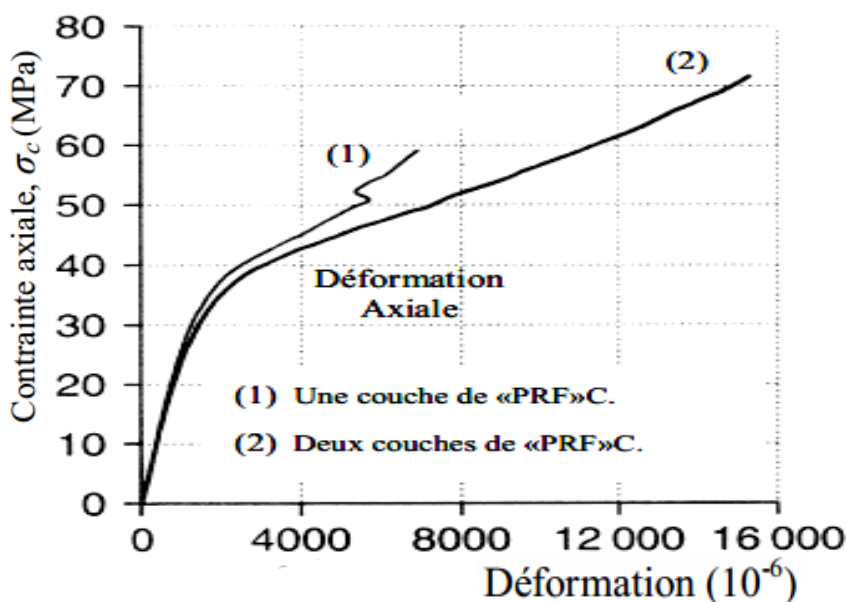
### b) Mode de rupture.

Les composites « PRF » sont soumis à une tension qui se propage dans la direction circonférentielle, lors que la résistance à la traction est atteinte une rupture éventuelle sera obtenue. La majorité des essais réalisés sur des éprouvettes cylindriques dont le béton est confiné avec de « PRF » ont reporté ce mode de rupture (Berthet et al. 2005, Teng et al. 2002, Lam et Teng 2003a.).

En plus, un autre mode de rupture a été découvert, c'est la rupture prématurée qui est due au décollement de matériaux composites « PRF », et cette rupture est le résultat de la longueur de recouvrement insuffisant.

- Diagrammes contrainte-déformation.

Les essais expérimentaux présents ont montré que les colonnes circulaires en béton confinées par des « PRF » ont une courbe contrainte-déformation qui présente une allure bilinéaire (figure 3-14), avec la possibilité que le type de diagramme soit ascendant ou descendant. D'après Xiao et Wu (2000), quand un faible confinement avec des PRF est fait,



une amélioration très petite aura eu lieu pour la résistance.

Figure 3-14 : Courbe contrainte-déformation type d'une colonne confinée avec PRFC de section circulaire (Teng et al. 2002)

La première branche linéaire, présente une inclinaison dans la courbe contrainte-déformation qui est semblable à l'inclinaison de la courbe d'un béton ordinaire, et cela implique un comportement qui n'est pas affecté par le « PRF ». Pour la seconde branche linéaire, la force de confinement des composites « PRF » est activée et le béton est fissuré.

La contrainte de béton confiné et la contrainte dans le composite « PRF » augmentent linéairement, et son maximum va être atteint à la rupture du « PRF ». La contrainte ultime du béton confiné dans ce cas et la déformation ultime du « PRF » sont atteintes simultanément (Figure 3-14) (Mirmiran et al. 1998).

D'autre part, le cas d'un confinement faible d'une colonne en béton, le comportement contrainte-déformation bilinéaire déjà vu ci-dessus ne peut pas se produire. Les colonnes de sections circulaires surviennent une telle situation si un faible niveau de confinement a été prévu (Teng et al. 2002).

Alors dans le cas d'un faible confinement, la courbe contrainte-déformation n'est plus bilinéaire, une branche descendante est présente dans la courbe (diagramme de type descendante). Cela montre que la compression  $f'_{cu}$  du béton confiné est inférieure à  $f'_{cc}$  qui est sa résistance maximale à la compression, et cette valeur est obtenue avant la rupture du « PRF ».

Ce comportement descendante est subdivisé (figures 3-15) en deux cas. Le premier cas, la résistance ultime  $f'_{cu}$  du béton confiné est plus grande ou supérieure à la résistance en compression maximale  $f'_{co}$  (figure 3-15 b), alors on a une amélioration de la résistance en compression du béton qui a résulté des renforts en « PRF ». Mais le cas où  $f'_{co}$  est supérieur à  $f'_{cu}$  (figure 3-15 c), cela implique que le béton est insuffisamment confiné et l'amélioration de la résistance est très faible. Ce confinement insuffisant du béton par les matériaux composites « PRF », a été présenté dans les essais faits par Aire et al. (2001) et Wu et Xiao (2000).

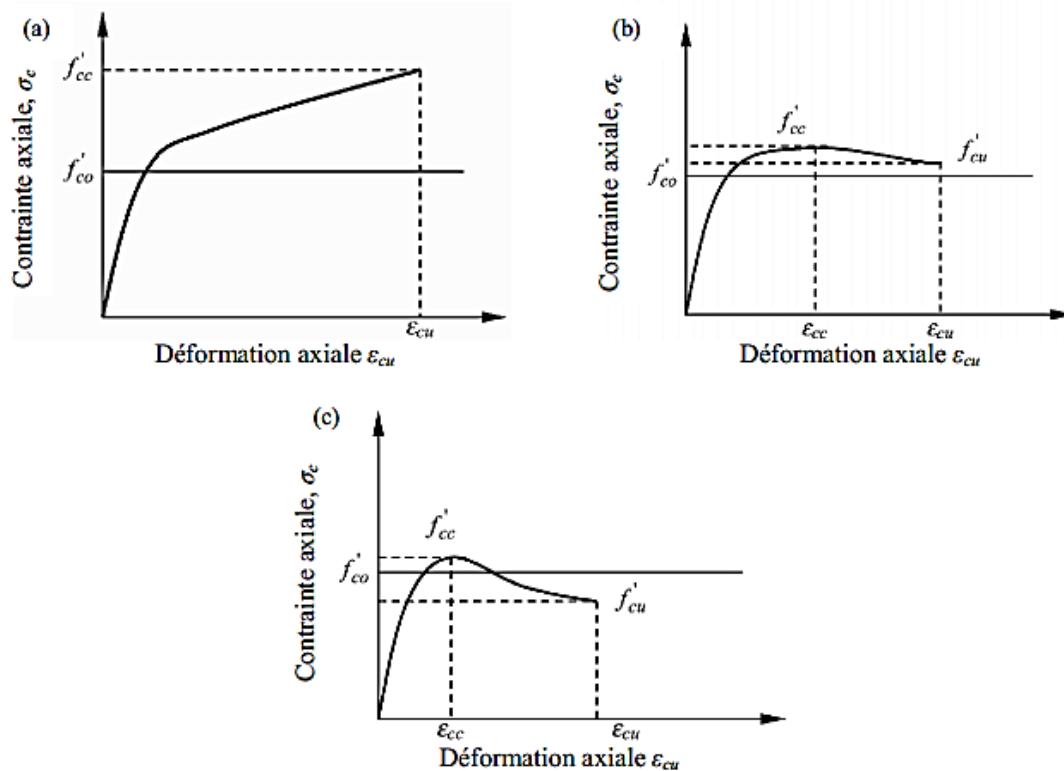


Figure 3-15 : Différents types des diagrammes contrainte-déformation d'un béton chemisé avec des « PRF » (Lam et Teng 2003)

### 3.8.2 Colonnes de section rectangulaire ou carrée.

Le confinement avec des matériaux composites a bien offert une efficacité plus grande pour les colonnes à section circulaire qu'aux sections rectangulaires ou carrées même avec l'arrondissement des coins. Cela est dû à une pression de confinement non uniforme qui se répartie dans les sections rectangulaires et carrées confinées avec des « PRF », les contraintes sont concentrées aux coins, encore une concentration au noyau du poteau qui est effectivement confinée.

Généralement la rupture se produit aux coins des colonnes après la rupture par traction des matériaux composites. Les courbes contrainte-déformation des sections rectangulaires ou carrées sont affectées pas seulement par les « PRF » mais encore par l'arrondissement des coins de ces sections, et cela résulte parfois à des courbes descendantes et des confinements insuffisants.

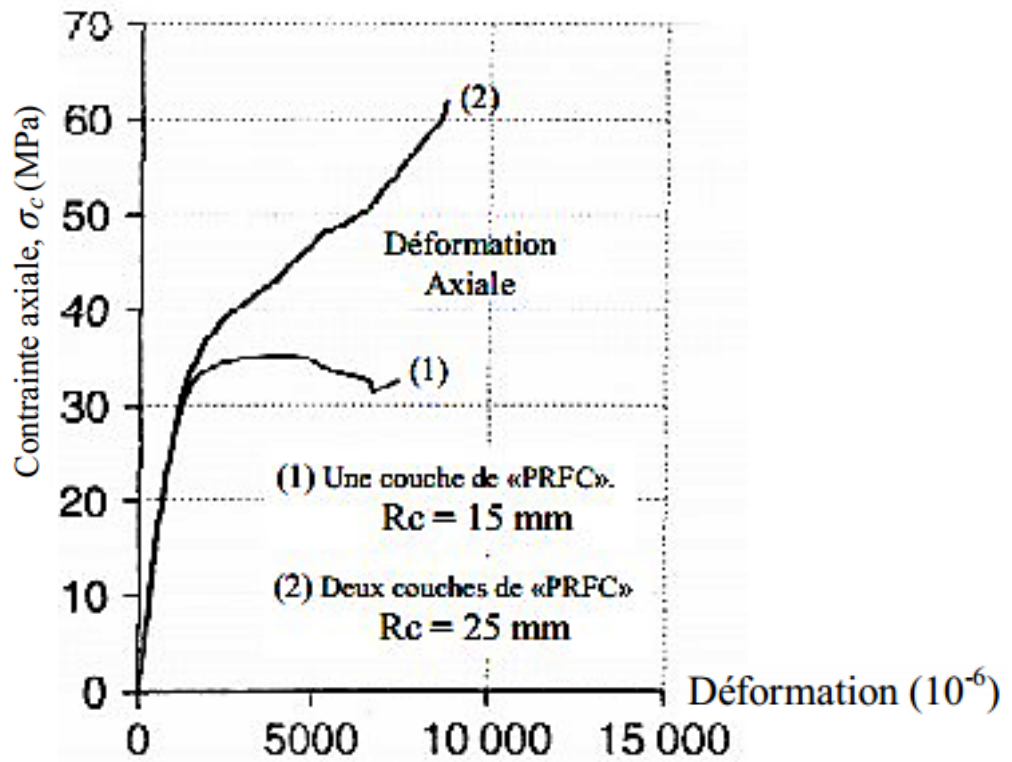


Figure 3-16 : Courbe contrainte-déformation type d'une colonne confinée avec PRFC de section carrée (Teng et al. 2002)

Cette figure présente deux courbes contrainte-déformation pour des spécimens carrés faite par (Teng et al.2002) qui ont des rayons des coins et de niveaux de confinement avec de « PRFC » différents. Teng et al 2002 ont constaté que les spécimens qui sont confinés avec une seul couche de «PRFC » et ayant le plus petit arrondissement des coins, présentent une branche descendante.

### 3.8.3 Colonnes de section elliptique.

Les colonnes de section elliptique sont plus affectées par le confinement que les sections rectangulaires, et moins affectées par rapport aux sections circulaires, en d'autre terme, pour une section rectangulaire il est préféré de la transformer à une section elliptique.

Le comportement de ce type de section est fortement affecté par son rapport géométrique (a/b). Le comportement pour un rapport géométrique petit et qui est proche de l'unité est semblable à celui des poteaux circulaires, d'autre part l'augmentation dans ce rapport provoque une diminution de l'efficacité du confinement avec des PRF.

La rupture du « PRF » pour une section elliptique avec un rapport géométrique grande a été localisée aux coins (cela est identique à la rupture des sections rectangulaires), tandis que pour un rapport faible, la rupture est observée dans des endroits très variables (cela est identique aux sections circulaires) (Teng et Lam 2002).

### 3.9 Mécanique de rupture sous compression axiale du béton confiné.

Le béton soumis à une compression axial est exposé à la rupture suite de l'interconnexion des microfissures qui est à cause de l'augmentation du chargement s'ouvrent au fur et à mesure pour arriver à une propagation instable des fissures qui provoque une rupture et cela tout est obtenu pour un certain niveau de chargement. Cela a donné la possibilité d'augmenter ou améliorer la résistance en compression du béton par la limitation de la propagation des fissures, cela a conduit à l'apparition du béton de fibres, ce qui a minimisé les fissures grâce aux fibres (la reprise des efforts de traction est faite par les fibres).

Dans le cas de « PRF » et d'une manière quasi analogue, l'augmentation de la résistance du béton en limitant les fissures est faite par la pression de confinement, ces fibres dans ce cas ne sont pas noyées dans le béton mais collées en surface, et la traction encore est reprise par les fibres.

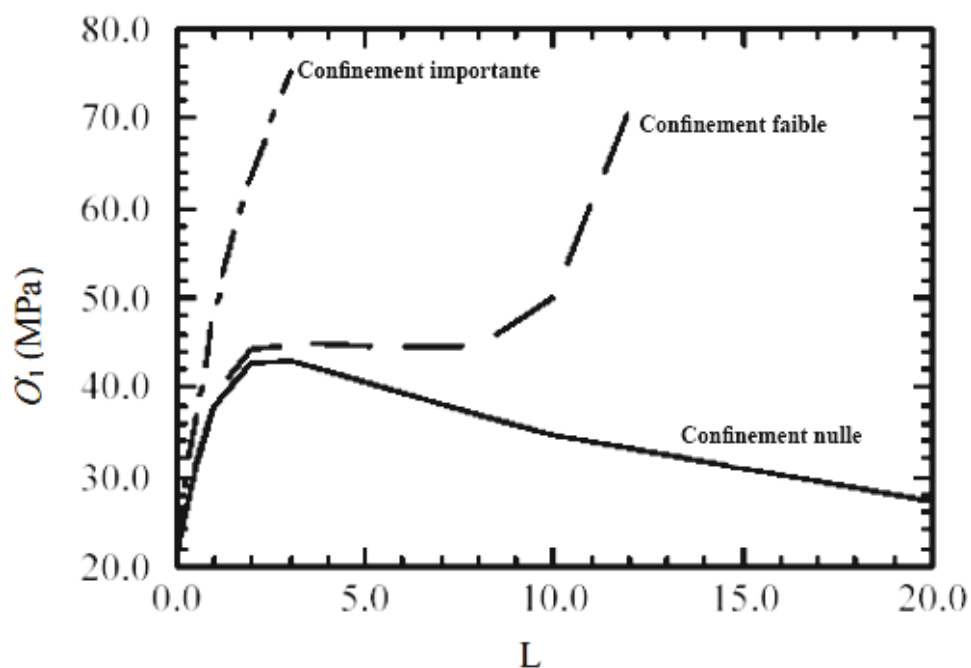


Figure 3-17 : Propagation des fissures en fonction de la charge axiale (Wu 2002).

La limitation de la propagation des fissures dans le béton ce fait par le confinement avec les « PRF » matériaux composites, cela conduit à une augmentation de la cohésion du béton. Pour une pression de confinement nulle, l'instabilité de la propagation des fissures est atteinte lorsque la résistance est au pic.

Avec un confinement faible, la propagation des fissures sont stabilisée, et avec un confinement qui devrait plus important un empêchement de la propagation de la fissure peut être réalisé complètement. A la fin, le béton confiné avec des matériaux composite va atteindre la rupture avec celle des renforts. (Teng et al 2002 ; Wu 2002 ; Shahawy et al. 2000)

## **Chapitre 4 : Comparaison entre les différents codes des matériaux composites**



## 4.1 Introduction.

Plusieurs recherches expérimentales ont été réalisées sur des éprouvettes du béton confiné par de « PRF » avec une section circulaire et non circulaire, et qui sont soumises à des charges axiale de compression pure. Ces travaux ont conduit à l'élaboration de plusieurs guides à propos de confinement par matériaux composites « PRF ».

Les guides examinés dans cette étude sont les suivants: "Guide pour la conception et la construction du renforcement par collage extérieur des PRF pour les structures en béton « rapporté par l'institut Américain du béton » (ACI 440.2R-02 2002 et 2008)" et "le guide du renforcement extérieur par collage de PRF pour les structures en béton armés « Rapport technique de la Fédération internationale du béton (FIB Bulletin 14 2001) "

Les combinaisons de charges ont été considérées au moment de calcul de la capacité d'un élément de structure sont affectées par des facteurs d'amplifications (supérieure à 1.0), qui représentent la probabilité des charges réelles soient plus grande que ceux attendus. En plus, la capacité de conception est également affectée par des facteurs de réduction qui prennent en considération la possibilité que les résistances étant moins de celle calculés.

Alors que tous les guides ont une approche cohérente à propos des facteurs d'amplification des charges (même si les coefficients peuvent être différents), facteurs de réduction de la force sont abordés de deux manières différentes.

Pour l'American Concrete Institute (ACI) les facteurs de réduction de la force (inférieure à la valeur 1,0) sont multipliés par le résultat final de calcul.

Pour la fédération internationale de béton (FIB), les facteurs de sécurité sont appliqués individuellement pour chaque matériau qui compose l'élément de structure (béton, acier et PRF) durant le calcul de la résistance. Ces facteurs de sécurité des matériaux sont indiqués par  $\gamma$  qui est supérieure à la valeur de 1,0 et utilisé comme diviseur.

Dans le cas de matériaux composites, l'ACI tient compte des facteurs de sécurité supplémentaires pour ces matériaux, qui dépendent du type, du procédé de fabrication, de la méthode de l'application, et la condition d'exposition (environnement).

## 4.2 Vue sur les différents guides.

Le tableau 4-1 montre les facteurs de réduction et les facteurs de sécurités important utilisés par les guides. On notera que les indices « c », « s » et « f » sont pour le béton (concrete), l'acier (steel) et FRP respectivement.

*Tableau 4- 1: Réduction des forces et les facteurs de réduction des matériaux pour (ACI et FIB)*

GUIDE	FACTEUR DE REDUCTION DE LA FORCE	FACTEUR DE REDUCTION DES MATERIAUX	LES FACTEURS DES PRF
ACI	$\Phi=0.75$ (spirale) $\Phi =0.7$ (ties)	----	$\Psi_f = 0.95$ $C_E =$ fonction de la condition d'exposition.
FIB	----	$\gamma_c = 1.50$ $\gamma_s = 1.15$ $\gamma_f =$ fonction de la type de PRF, l'application et ces conditions, et la qualité de contrôle.	----

L'ACI exige une maximum valeur pour le rapport (h/b) égale à 1,5 (ACI 2002) et 2 (ACI 2008), et pour le rapport dont la valeur est supérieure à 1.5 l'effet du confinement par matériaux composites doit être négligé, sauf s'il est démontré par des données expérimentales. En plus, l'ACI donne une valeur limite pour (b) et (h) qui est inférieur ou égale à (900 mm) dans le cas des sections non circulaire. Tandis que le FIB ne donne aucune limitation à propos des dimensions des sections.

Tableau 4- 2: Formule de calcul pour les sections circulaires (ACI et FIB)

Guide	Pression de confinement $f_l$ (MPa)	force de compression $f'_{cc}$ (MPa)	déformation axiale de compression ultime pour le béton confiné $\epsilon_{ccu}$
ACI 2002	$f_l = \frac{k_s \rho_f \epsilon_{fe} \epsilon_{fu} E_f}{2}, \quad k_s = 1$ $\epsilon_{fe} = \text{minimum} (0.004 \text{ et } 0.75 \epsilon_{fu})$	$f'_{cc} = f'_c \left[ 2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right]$	$\epsilon_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c}$
ACI 2008	$f_l = \frac{2 * t_f * n * \epsilon_{fe} * E_f}{D}$ $\epsilon_{fe} = \text{minimum} (0.004 \text{ et } k_e \epsilon_{fu})$	$f'_{cc} = f'_c + \psi_f * 3.3 * k_a * f_l$	$\epsilon_{ccu} = \epsilon_{c0} \left( 1.50 + 12 k_b \frac{f_l}{f'_c} \left( \frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon_{c0}} \right)^{0.45} \right)$
FIB 2001	$f_l = \frac{k_e \rho_f \epsilon_{fu} E_f}{2}$ $k_e = \left( 1 - \frac{s'}{2D} \right)^2$	<p>Formule exacte:</p> $f'_{cc} = \frac{E_c \epsilon_{ccu}}{1 + 2\beta \epsilon_{fu}}$ $f'_{cc} = f'_c \left[ 2.254 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.254 \right]$ $\beta = \frac{5.700}{\sqrt{f'_c}} - 500 \rightarrow f'_c \text{ (MPa)}$	<p>Formule exacte:</p> $\epsilon_{ccu} = \epsilon'_{cc} \left( \frac{2\beta \epsilon_{fu} E_c}{E_c - E_{cc}} \right)^{1 - \left( \frac{E_{cc}}{E_c} \right)}$ $\epsilon'_{cc} = \epsilon'_c \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right],$ $E_{cc} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon'_{cc}}$ <p>formule pratique :</p> $\epsilon_{ccu} = \epsilon'_c \left( 2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_c} \epsilon_{fu} \sqrt{\frac{f_l}{f'_c}} \right)$

Tableau 4- 3: Formule de calcul pour les sections non circulaires (ACI et FIB)

déformation axiale de compression  
ultime pour le béton confiné  $\varepsilon_{ccu}$

force de compression  $f'_{cc}$  (MPa)

Pression de confinement  $f_l$  (MPa)

Guide	Pression de confinement $f_l$ (MPa)	force de compression $f'_{cc}$ (MPa)	déformation axiale de compression ultime pour le béton confiné $\varepsilon_{ccu}$
ACI 2002	$f_l = \frac{k_s \rho_f \varepsilon_f \varepsilon_e E_f}{2},$ $k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_l)}$ <p><math>\varepsilon_{fe} = \text{minimum} (0.004 \text{ et } 0.75\varepsilon_{fu})</math></p>	$f'_{cc} = f'_c \left[ 2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right]$	$\varepsilon_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c}$
ACI 2008	$f_l = \frac{2 * t_f * n * \varepsilon_f \varepsilon_e * E_f}{\sqrt{(b^2 + h^2)}}$ <p><math>\varepsilon_{fe} = \text{minimum} (0.004 \text{ et } k_\varepsilon \varepsilon_{fu})</math></p>	$f'_{cc} = f'_c + \psi_f * 3.3 * k_a * f_l$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{c0} \left( 1.50 + 12 k_b \frac{f_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0.45} \right)$
FIB 2001	<p><math>f_l = \text{minimum entre } f_{l,x} \text{ et } f_{l,y}</math></p> $f_{l,x} = \rho_{fx} * k_s * E_f * \varepsilon_{fu}$ $k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_l)}$	<p>Formule exact:</p> $f'_{cc} = \frac{E_c * \varepsilon_{ccu}}{1 + 2\beta \varepsilon_{fu}}, \beta = \frac{5.700}{\sqrt{ f'_c }} - 500 \rightarrow f'_c \text{ (MPa)}$ $\Delta f'_{cc} = f'_c \left[ 2.254 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.254 \right]$ <p>formule pratique :</p> $f'_{cc} = f'_c \left( 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_c}} \right)$	<p>Formule exact:</p> $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_{cc} \left( \frac{2\beta * \varepsilon_{fu} * E_{cc}}{E_c - E_{cc}} \right)^{1 - \left( \frac{E_{cc}}{E_c} \right)}$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right],$ $E_{cc} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc}}.$ <p>formule pratique :</p> $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left( 2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_c} \varepsilon_{fu} \sqrt{\frac{f_l}{f'_c}} \right)$

#### 4.2.1 Fédération Internationale du Béton (FIB Bulletin 14 2001) :

Les recommandations de conception fournies par FIB pour les colonnes de section circulaires et non circulaires sont basées sur le modèle proposé par Spoelstra et Motti (1999). Ces auteurs ont élaboré un modèle d'analyse itérative pour les colonnes circulaires à partir de laquelle deux ensembles des équations la résistance à la compression du béton confinée  $f'_{cc}$  et la déformation axial ultime ( $\varepsilon_{ccu}$ ) ont été tirées : « exact » et les formules « approximatives ».

La méthode exacte nécessite le calcul préalable des paramètres  $f_{cc}^*$  et  $\varepsilon_{cc}^*$ . Tandis que la méthode approximative donne des expressions alternatives obtenues par Spoelstra et Motti (1999), qui nécessitent l'avant calcul de la pression de confinement ( $f_1$ ). Ces formules sont facilement utilisées à l'objectif de conception.

Une caractéristique particulière du modèle présenté par Spoelstra et Motti (1999) est l'inclusion d'un paramètre pour tenir compte de la dégradation physique du béton lorsqu'il est soumis à une charge. Ce paramètre a été initialement développé par Pantazopoulou et Mills (1995) dans un modèle de comportement pour le béton non confinée sous compression uniaxial. Cependant, le paramètre a été adapté après par Spoelstra et Monti.

$$f'_{cc} = \frac{E_c * \varepsilon_{ccu}}{1 + 2\beta \varepsilon_{fu}} \quad ; \quad \beta = \frac{5700}{\sqrt{f'_c}} - 500$$

Dans le cas des colonnes à section circulaire, pour le calcul de la pression de confinement exercé par la couche de FRP ( $f_1$ ), FIB fournit un coefficient d'efficacité ( $K_e$ ) moins de 1.0 pour un confinement partiel et égale à 1.0 pour un confinement continu (Mander et al. 1988). Dans le cas des sections non circulaires, un paramètre ( $K_s$ ) qui est encore un coefficient d'efficacité mais dans une façon géométrique. FIB ne prévoit pas de disposition pour la prise en compte d'un facteur additionnel qui représente l'effet du confinement partiel dans le cas des sections non circulaire.

$$k_e = \left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2 \quad ; \quad k_s = \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_l)}$$

#### **4.2.2 Institue American du Béton (ACI 440.2R-02) 2002**

L'approche présentée par le Comité ACI actuelle 440 (ACI 2002) pour l'amélioration de la résistance à la compression est basée sur la formule développée à l'origine par Mander et al. (1988) pour le confinement en acier du béton, qui a été démontré plus tard par Spoelstra et Monti (1999) pour être applicable dans le cas de confinement par des matériaux composites.

La formule par Mander et al. (1988) a été adaptée pour la détermination de la résistance maximale fournie par le confinement avec PRF. Cette décision était fondée sur le fait qu'il n'y a pas de différence entre le confinement par acier ou PRF jusqu'à la limite d'élasticité, car ils ont tous les deux un comportement linéaire élastique.

La formule pour  $f'_{cc}$  dans ACI prévoit le pic de la contrainte axiale donnée par la courbe de Mander qui correspond à une pression de confinement limitée par la déformation transversale obtenue à la rupture par le PRF ( $\epsilon_{fe}$ ). La définition de la déformation effective ( $\epsilon_{fe}$ ) a été fondée sur des preuves expérimentales sur des colonnes et des poutres complètement confinées (Priestly et al. 1996), où la perte de la cohésion des agrégats dans le béton avait été observée à des niveaux inférieurs de la déformation ultime des FRP. Par conséquent, pour éviter ce type de rupture, la déformation maximale a été mise inférieure à 0.004 ou 75% de la déformation ultime ( $\epsilon_{fu}$ ). Bien que ce guide introduise une limitation pour la déformation du FRP, cette restriction ne repose pas sur le fait que généralement la valeur de la défaillance de la déformation est inférieure à celle observée dans l'essai de traction pur, parce que le PRF est soumis à une contrainte de traction et une pression latérale résultant de la dilatation du béton. La pression de confinement est encore affectée par un facteur d'efficacité  $k_s$  (Restrepo et De Vito 1996) introduit pour tenir en compte de la géométrie des sections non circulaires.

ACI 2002 fournit une expression pour déterminer la déformation axiale qui correspond au pic de la résistance pour les colonnes circulaires et non circulaire ( $\epsilon_{cc}$ ) (Mander et al. 1988). Cette déformation correspond à la déformation axiale ultime ( $\epsilon_{ccu}$ ) dans le cas où la courbe contrainte-déformation bilinéaire avec une deuxième branche ascendante.

### 4.2.3 Institue American du Béton (ACI 440.2R-08) 2008

L'ACI 440.2R-08 remplace ACI 440.2R-02 et a été adopté et publié Juillet 2008. Dans la version actuelle de l'ACI 440.2R (2008), la défaillance prématuré du confinement par FRP est considérée, au lieu de l'équation de Mander et al. (1988), il est recommandé de calculer la résistance du confinement de béton pour les sections circulaires et non circulaire en utilisant les équations posées par Lam et Teng (2003), avec un facteur de réduction ( $\psi_f=0.95$ ).

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + \psi_f * 3.3 * K_a * \frac{f_l}{f'_c}$$

$$K_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2$$

$$f_l = \frac{2 * n * t_f * \epsilon_{fe} * E_f}{D}$$

$$\frac{A_e}{A_c} + \frac{1 - \left[ \left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r_c)^2 \right] \rho_g}{1 - \rho_g}$$

Basé sur les tests effectués par Lam et Teng (2003), ACI 440.2R-08 recommande que le rapport de confinement ( $\frac{f_l}{f'_c}$ ) doit être supérieur à 0.08 pour assurer un graphe contrainte-déformation ascendante qui peut être pris comme une limite inférieure pour le rapport de confinement.

Pour les sections circulaires, ACI 440.2R-08 recommande l'utilisation de l'équation ci-dessous pour la prédiction de la déformation axiale du béton ( $\epsilon_{ccu}$ ), cette valeur est limitée à une valeur maximale de 0.01 afin d'éviter les fissurations excessives et de maintenir l'intégrité structurelle.

$$\epsilon_{ccu} = \epsilon_{c0} (1.50 + 12 * k_b * \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon_{c0}}\right)^{0.45})$$

$$K_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5}$$

### 4.3 Etude comparatives des différents codes

Pour évaluer la performance et faire une comparaison à propos des différentes approches adoptées par ACI 440.2R 2002, ACI 440.2R 2008 et FIB bulletin 12 2001, pour la détermination de la résistance à la compression ( $f'_{cc}$ ) et la déformation axiale pour le béton confinée ( $\epsilon_{ccu}$ ), un total de trois échantillons de colonne en béton armé de différentes formes de section transversale (circulaire, rectangulaire et carrée) avec une surface égale ( $A_g$ ) ont été choisis.

Le tableau 4-4 montre les caractéristiques de chacun des échantillons prise la première colonne indique le sigle de l'échantillon, où la lettre dans chaque cadre indique la forme de la section C= circular, S= square, R= rectangular. Les paramètres suivant sont présentés dans le tableau 5-4 dans le même ordre : la dimension des sections (D diamètre de la section circulaire, b et h sont les côtés des sections transversales non circulaire.), le rapport de forme h/b, hauteur totale de la colonne H, aire de la section transversale  $A_g$ , pourcentage des armatures longitudinale  $\rho_l$ , résistance de l'acier  $f_y$ , résistance en compression du béton  $f'_c$ .

Tableau 4- 4: Caractéristique des échantillons. (Antonio NANNI et al.)

Echantillon	D (mm)	b (mm)	h (mm)	$\frac{h}{b}$	H (m)	$A_g$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_l$ (%)	$f_y$ (MPA)	$f'_c$ (MPA)	$\rho_f$ (%)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c}$	$\frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{cu}}$
C	508	--	--	--	1.12	2030	1.53	446	31.7	0.26	1.44	4.48
S	--	458	458	1.0	1.02	2100	1.48	446	32.1	0.29	1.06	1.67
R	--	318	635	2.0	1.37	2020	1.56	446	30.1	0.32	1.01	3.34

Tous les échantillons sont confinés par deux plies de fibres de carbonées avec une orientation des fibres perpendiculaires à l'axe longitudinal de la colonne. Les échantillons à section non circulaire ont été conçus avec un rayon de 30 mm. En outre, les valeurs



expérimentales sont données par les deux dernières colonnes ratio de résistance et celle de déformation  $f'_{cc}/f'_c$  et  $\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu}$ .

Les propriétés du matériau de fibre de carbone utilisées dans cette étude, sont déterminées expérimentalement à partir des essais de traction (Rocca et al. 2006). Ces propriétés sont :

- L'épaisseur du renfort :  $t_f = 0.167$  mm
- Déformation ultime en traction :  $\epsilon_{fu} = 0.93\%$
- Module d'élasticité :  $E_f = 291$  GPA.

Le tableau 4-5 présente les valeurs théoriques de résistance à la compression maximale  $f'_{cc}$  et la déformation axiale ultime  $\epsilon_{ccu}$  pour le béton confiné. Tableau 4-5 est divisé en trois sections principales horizontales, dont chacune correspond à une section: circulaire, carrée, rectangulaire.

Chaque section présente les valeurs de  $f'_{cc}$ ,  $\epsilon_{ccu}$  et leurs rapports correspondant  $f'_{cc}/f'_c$  et  $\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu}$ , obtenu conformément à chacune des codes utilisées. Les valeurs théoriques de la déformation

axiale du béton non confiné  $\epsilon_{cu}$ . Est prise selon chaque code sont les suivantes: 0,003 le cas de l'ACI et 0,0035 dans le cas de FIB.

Tableau 4- 5 : les résultats théoriques des poteaux confinés

Code		$f'_{cc}$ (MPA)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c}$	$\epsilon_{ccu}$ (mm/mm)	$\frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{cu}}$
		Section Circulaire			
ACI 440-2R.02		41.1	1.29	0.005	1.7
ACI 440-2R.08		36.8	1.16	0.0065	2.16
FIB	Exact	47.2	1.48	0.018	5.14
	Pratique	38.1	1.2	0.010	2.85
		Section Carré			
ACI 440-2R.02		37.5	1.16	0.004	1.33
ACI 440-2R.08		34.1	1.06	0.005	1.75
FIB	Exact	37.8	1.19	0.015	4.22
	Pratique	30.3	0.95	0.0087	2.48
		Section Rectangulaire			
ACI 440-2R.02		34.2	1.14	0.003	1
ACI 440-2R.08		30.8	1.02	0.005	1.83
FIB	Exact	28.06	0.88	0.012	3.43
	Pratique	22.06	0.69	0.0075	2.14

Tableau 4- 6 : Le comportement des équations des trois guides étudiés

	Circulaire		Carré		Rectangulaire	
	$\frac{(f'_{cc}/f'_c)_{Theo}}{(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}}$	$\frac{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Theo}}{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Exp}}$	$\frac{(f'_{cc}/f'_c)_{Theo}}{(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}}$	$\frac{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Theo}}{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Exp}}$	$\frac{(f'_{cc}/f'_c)_{Theo}}{(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}}$	$\frac{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Theo}}{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Exp}}$
<b>ACI 440.2R-02</b>	0.89	0.38	1.09	0.79	1.13	0.29
<b>ACI 440.2R-08</b>	0.81	0.48	1	1.04	1.01	0.54
<b>FIB Bulletin 14 (2001)</b>	1.02	1.15	1.12	2.53	0.87	1.02
	0.83	0.64	0.89	1.48	0.68	0.64

Le tableau 4-6 présente les ratios théorique et expérimentale de la résistance à la compression et la déformation axiale :  $\{(f'_{cc}/f'_c)_{Theo}/(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}\}$  et

$$\{(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Theo}/(\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu})_{Exp}\},$$

respectivement. Ce tableau est divisé en trois colonnes principales qui correspondent à chaque section prises dans cette étude : circulaire, carré, rectangulaire.

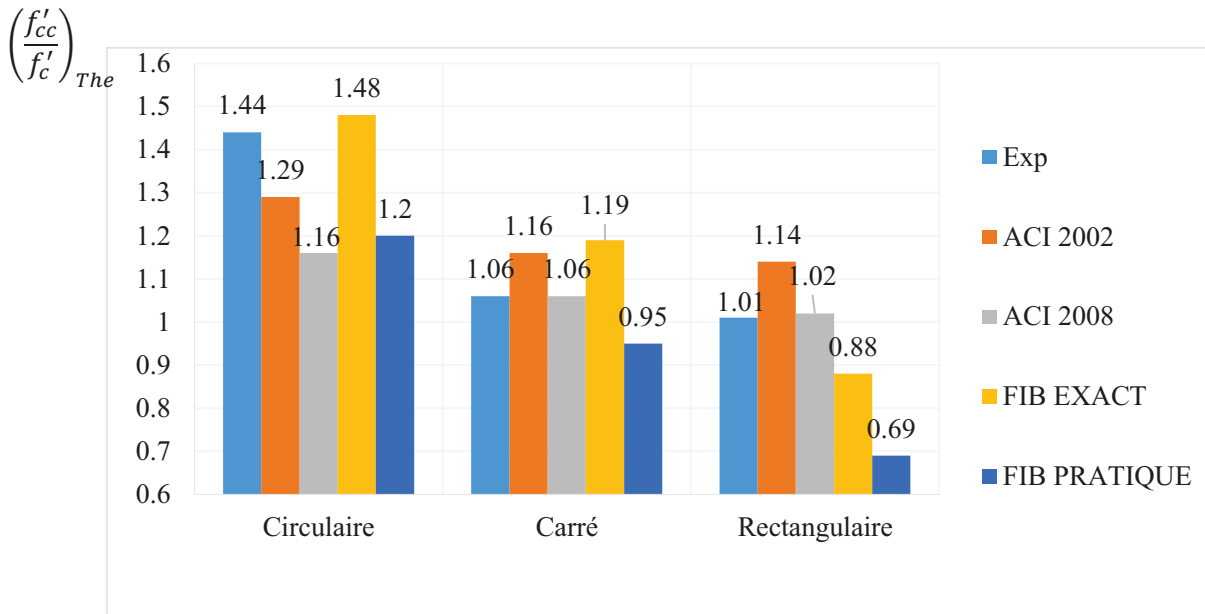


Figure 4- 1 : Les ratios de contraintes par rapport à la section.

La figure 4-1 montre les ratios des contraintes ( $f'_{cc}/f'_c$ ) obtenues à partir de l'expérience et selon les codes. Les tendances générales des codes correspondant à l'ACI 440.2R-02, ACI 440.2R-08, et FIB Bulletin 14 sont en accord avec la notion que, pour la même quantité de confinement avec FRP, l'augmentation de la résistance de béton confiné pour les sections non circulaire, est moins que dans le cas d'un poteau à section circulaire.

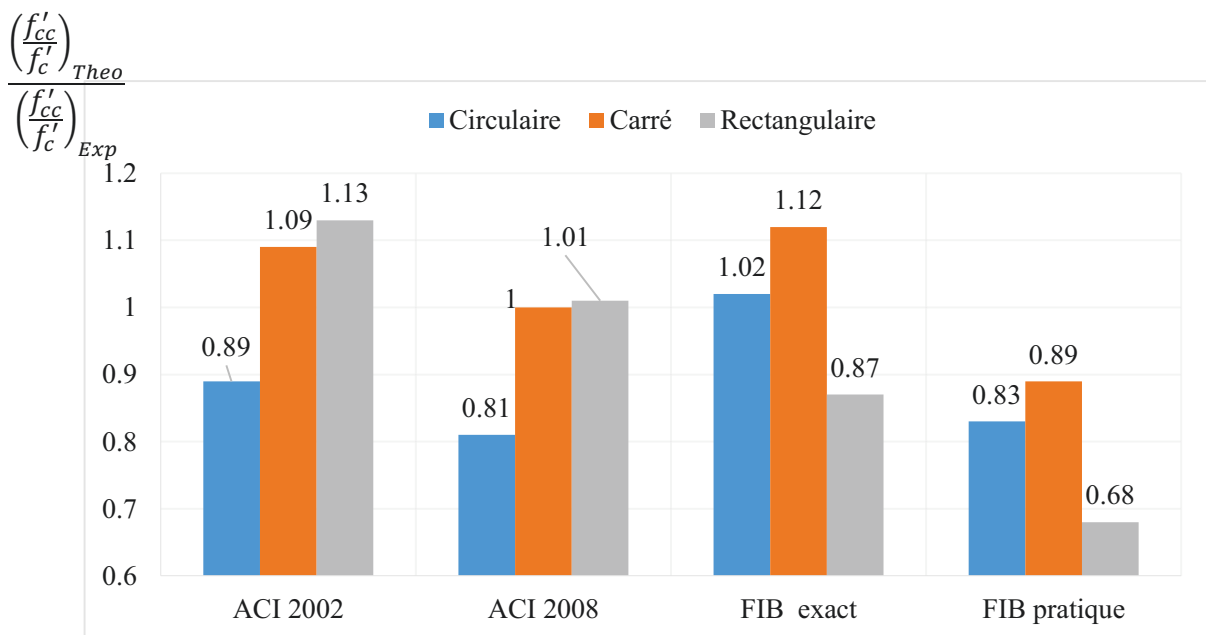


Figure 4- 2 : Les ratios de contraintes de contrainte théoriques sur celle expérimentale.

La figure 4-2 montre l'exactitude des différents codes en ce qui concerne les résultats expérimentaux en termes d'amélioration de la force en traçant les ratios donnés dans le tableau (4-6)  $\{(f'_{cc}/f'_c)_{Ttheo}/(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}\}$ . Pour le cas des sections circulaires, seules les équations «exactes» par FIB surestiment légèrement l'amélioration de la résistance de confinement (à peu près 2%).

En ce qui concerne les sections non circulaires, seul l'ACI 440.2R-02 surestime cet amélioration de la force pour les deux sections carrées et rectangulaires. Les formules «exactes» en FIB surestiment l'amélioration de la résistance pour les sections rectangulaires seulement. En plus, l'ACI440.2R-08 donne des résultats exacts pour cette amélioration pour les sections carré et rectangulaire.

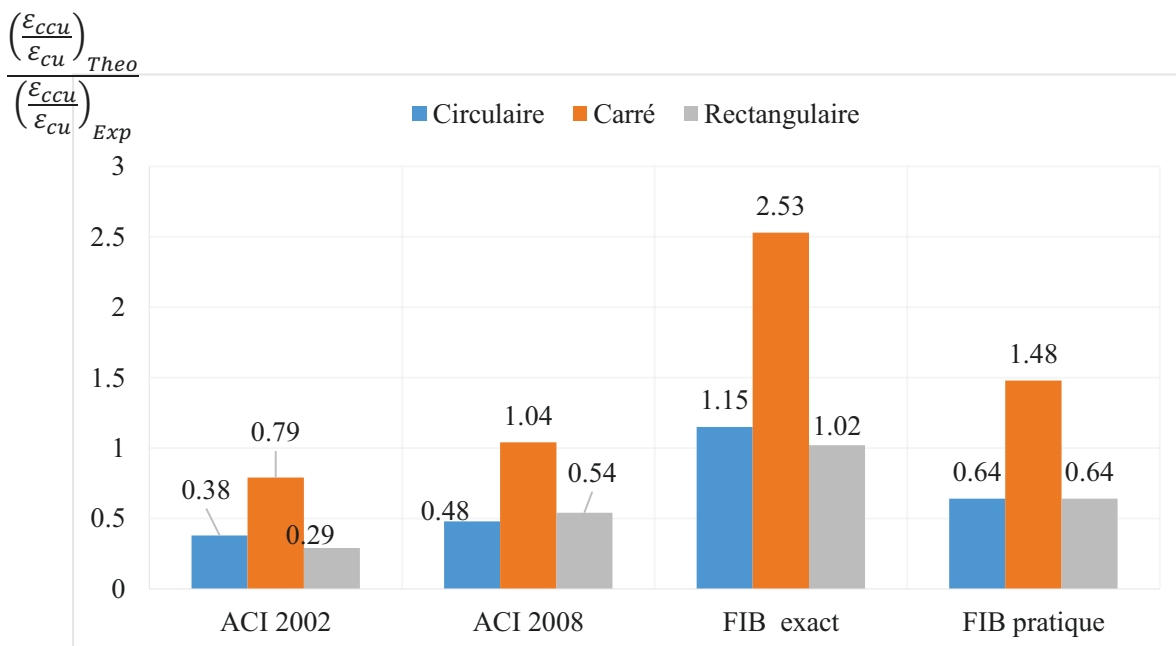


Figure 4- 3: Les ratios de contraintes de déformation théoriques sur celle expérimentale.

La figure 4-3 montre la précision des codes pour prédire l'amélioration de la déformation axiale ultime  $\epsilon_{ccu}/\epsilon_{cu}$ . Une valeur théorique de  $\epsilon_{cu} = 0,003$  a été utilisée dans le cas de l'ACI, et une valeur de 0,0035 a été utilisée dans les cas FIB.

Les estimations subissent des variations d'environ  $\pm 50\%$  des rapports expérimentaux, à l'exception de la valeur correspondant aux équations «exactes» de FIB pour le cas de la colonne rectangulaire a subit une variation de 150%.

Comme la déformation axiale ultime de béton est une fonction de différents paramètres de (taille et le type des agrégats ; rapport eau / ciment; et dans le cas du béton confiné, fortement influencée par le type de FRP utilisé. Le défi pour le calcul de la déformation axial est basé sur la difficulté posée par l'inclusion des paramètres influençant, et en particulier, l'interaction de la dilatation béton avec le confinement par FRP.

#### **4.4 Discussion :**

En ce qui concerne le calcul de la pression de confinement pour les colonnes de section non-circulaires, tous les guides considèrent l'effet de la géométrie transversale par l'inclusion d'un coefficient d'efficacité de confinement ( $K_s$ ) qui est exprimé en fonction de la dimension latérales (b,h), rayon des coins des poteaux (r), et ratio d'acier longitudinal par rapport à la surface transversale de la colonne ( $\rho_l$ ).

Pour la considération d'un facteur d'efficacité pour la déformation représentant l'échec prématuré de la couche de FRP, les deux codes d'ACI limitent le niveau de la déformation dans le FRP à obtenir à l'échec ( $\epsilon_{fe}$ ) en prenant la valeur minimum soit 0.004 ou ( $0.75*\epsilon_{fu}$ ). Toutefois, cette limitation n'existe pas dans les considérations de performance de FRP pour FIB.

L'ACI 440.2R dans le version 2008 a donné un valeur limite pour ( $\epsilon_{ccu}$ ) inférieur ou égale à 0.01, pour éviter les fissurations excessives et de maintenir l'intégrité structurelle. Tandis que FIB ne recommande pas un facteur de réduction à l'heure actuelle.

Les ratios des contraintes théoriques et expérimentales pour la section circulaires et non circulaire  $\{(f'_{cc}/f'_c)_{Theo}/(f'_{cc}/f'_c)_{Exp}\}$ , ont été mieux évalués par les équations prédictives fournies par l'ACI 440.2R-08.

Par rapport à la prévision de l'augmentation de la valeur de déformation axiale, tous les codes déjà vue fournissent des équations pour la déformation soit pour les colonnes à section

circulaires ou pour les sections non circulaires, mais d'après cette études pas tous ces équations donnent des résultats exactes.

En générale, la dispersion de la prédiction pour l'amélioration de la déformation était beaucoup plus grande que pour l'amélioration de la résistance. En fait, les équations « exacte » par FIB surestime l'amélioration de la déformation des colonnes à section carré par 150%. Cette surestimation peut-être à cause de la difficulté présenter avec la précision de l'effet des paramètres tels que la taille et le type des granulats; rapport eau / ciment; et dans le cas du béton confiné, l'influence de l'enveloppe du FRP.

## **Chapitre 5 : Facteurs influant sur le renforcement par PRFC**

## 5.1 Introduction.

Ce chapitre est consacré pour déterminer les facteurs qui influent sur la performance des poteaux confinés avec des PRFC (polymère renforcé par fibre de carbone) et le calcul est fait en utilisant L'avis technique 3 /10-669 qui est mise en conformité avec l'EUROCODE et qui est exploité par la société SIKA.

## 5.2 Présentation de la méthode de calcul de la portance d'un poteau confiné :

La procédure de dimensionnement concerne seulement les colonnes de section rectangulaire, carrée ou circulaire. En plus pour que cette dimensionnement soit applicable, il faudra que les colonnes vérifient la condition suivante :  $\lambda \leq 50$ .

Dans le cas où l'élanement est supérieur à 50 qui est la valeur limite, une étude plus approfondie doit être faite.

Le poteau renforcé par le PRFC peut supporter la charge maximale :

- $NRd \leq \gamma\lambda (A_c f_{cd,c} + A_s f_{yd})$

Avec  $\gamma\lambda$  coefficient qui dépend de  $\lambda$  :

- $\gamma\lambda = 0.85/(1+0.2(\lambda/35)^2)$  pour  $\lambda \leq 50$

La résistance de calcul du béton confiné :

- $f_{cd,c} = f_{cd} + \psi_f \cdot \alpha \cdot k_c \cdot k_h \cdot f_i$

La pression de confinement requise :

- $f_i = E_p \cdot \varepsilon_{fud}$ 
  - $\varepsilon_{fud}$  : déformation à rupture du renfort PRFC
  - $E_p$  : module de confinement (traduit la rigidité du confinement)
    - $E_p = (2 \cdot t_f \cdot n_p \cdot E_f) / D$  (section circulaire)
    - $E_p = (2 \cdot t_f \cdot n_p \cdot E_f) / b$  (section rectangulaire)
  - $E_f$  le module d'élasticité en traction du renfort PRFC SikaWrap



- $T_f$  l'épaisseur du renfort SikaWrap
  - $n_p$  nombre de plis nécessaire de renfort SikaWrap
  - $D$  le diamètre de la section circulaire du poteau.
  - $b$  le grand côté pour un poteau rectangulaire
- $f_{cd}$  résistance de calcul en compression du béton
  - $\psi_f$  coefficient de performance
    - $\psi_f=0.8$  pour une section circulaire
    - $\psi_f=0.6$  pour une section rectangulaire (avec angles arrondis de rayon  $R \geq 35\text{mm}$ )
  - $\alpha$  coefficient d'efficacité du confinement (3.45 pour  $f_{ck} \leq 60\text{MPa}$ )
  - $k_c, k_h$  coefficients minorateurs :
    - $k_c = 1$  section circulaires.
    - $k_c = 1 - ((h'^2 + b'^2)/3A_c)$  section rectangulaire.
      - $h'^2 = h - 2R$  (h petit côté du poteau)
      - $b'^2 = b - 2R$  (b grand côté du poteau)
    - $k_h$  renforcement continu ou discontinu
      - $k_h = 1$  renforcement continu
      - $k_h = \frac{(1 - \frac{S_f - W_f}{2D})^2}{(1 + \frac{S_f}{\pi D})(1 - \rho_l)}$  renforcement discontinu pour une section circulaire
      - $k_h = \frac{(1 - \frac{S_f - W_f}{2h})(1 - \frac{S_f - W_f}{2b})}{(1 - \rho_l)}$  renforcement discontinu pour une section rectangulaire
        - $\rho_l$  taux de ferrailage longitudinal ( $A_s/A_c$ )
        - $W_f$  largeur du renfort PRFC SikaWrap
        - $S_f$  espacement entre bandes

Espacement entre bandes de renfort SikaWrap :

L'espacement maximal entre bandes de renfort ( $S_f - W_f$ ) est :

- $S_f - W_f < \min(40 \text{ cm}, 15\phi)$ 
  - $\Phi$  : diamètre minimal des armatures longitudinales.

### 5.3 Les Facteurs influant sur le confinement des poteaux par PRFC.

#### 5.3.1 Hypothèse de calcul.

Les poteaux utilisés pour cette analyse sont un poteau circulaire avec un diamètre de 400 mm et un autre de section rectangulaire de dimension 350 x 400 mm. Ces deux colonnes ont une hauteur de 3.5 m avec une résistance de compression du béton de 30 MPa et un acier S500.

Pour les matériaux composites, le renforcement est fait par des matériaux composite à bases de fibre de carbone (SikaWrap) et ayant les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité en traction  $E_f = 234000$  Mpa
- déformation à rupture  $\varepsilon_{fud} = 1.8\%$
- épaisseur du renfort SikaWrap  $t_f = 0.13$ mm
- Largeur du bande :  $W_f = 300$  mm

#### 5.3.2 Poteau circulaire :

Tableau 5- 1:Section circulaire avec un renforcement continu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de plis	-	20	-	-	1.97
1 pli	0.13	20	2.73	27.55	3.10
2 plis	0.26	20	5.47	35.11	3.86
3 plis	0.39	20	8.21	42.66	4.63
4 plis	0.52	20	10.95	50.22	5.39

Tableau 5- 2: Section circulaire avec un renforcement discontinu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de plis	-	20	-	-	1.97
1 pli	0.13	20	2.73	22.25	2.66
2 plis	0.26	20	5.47	25.89	2.96
3 plis	0.39	20	8.21	28.84	3.26
4 plis	0.52	20	10.95	31.78	3.56

Dans ces deux tableaux, nous pouvons remarquer l'augmentation efficace de la capacité portante du poteau.

Le premier tableau nous donne les valeurs de  $f_{cd,c}$  (résistance du béton confiné) et  $N_{Rd}$  (capacité portante du poteau), pour une section circulaire d'un poteau avec un renforcement continu. Tandis que, le deuxième nous donne les résultats de  $f_{cd,c}$  et  $N_{Rd}$  d'une section circulaire avec un renforcement discontinu.

Ensuite, le renforcement continu d'un poteau avec un seul pli de fibre de carbone a amplifié sa capacité portante de 57% (de 1.97 MN jusqu'à 3.1 MN), et une autre amélioration de 73% (de 3.1 MN à 5.39 MN) entre la première couche et la quatrième.

En plus, la résistance du béton a subit un accroissement après le confinement avec la fibre de carbone du 20 MPa, à 27.55 MPa pour le premier pli et 50.22 MPa pour le quatrième pli.

Alors, le nombre de plis de fibre de carbone joue un rôle important pour améliorer les résultats de  $f_{cd,c}$  et  $N_{Rd}$ . L'amélioration de ( $f_{cd,c}$ ) est présentée dans le graphe ci-dessous.

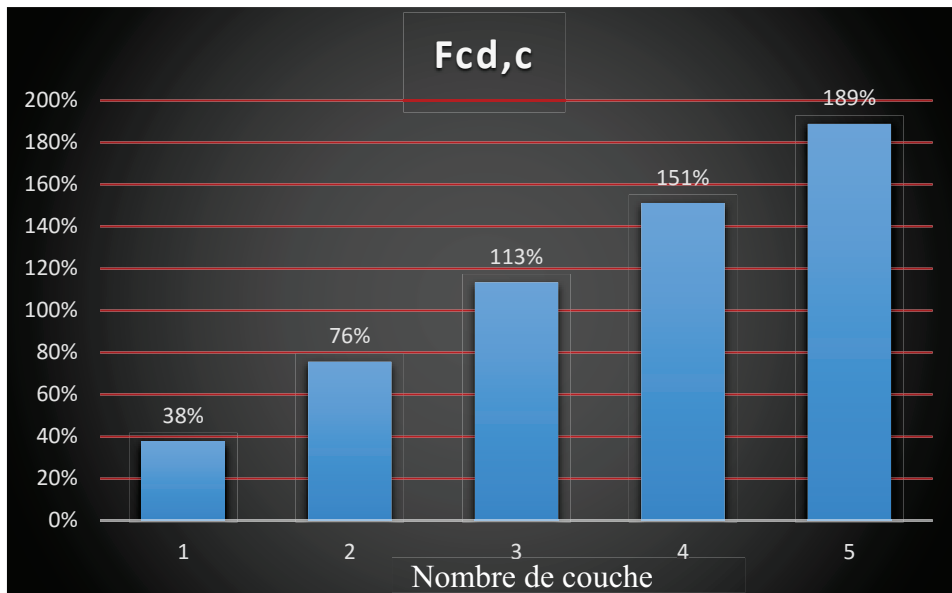


Figure 5- 1: Pourcentage d'amélioration de  $f_{cd,c}$  par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement continu).

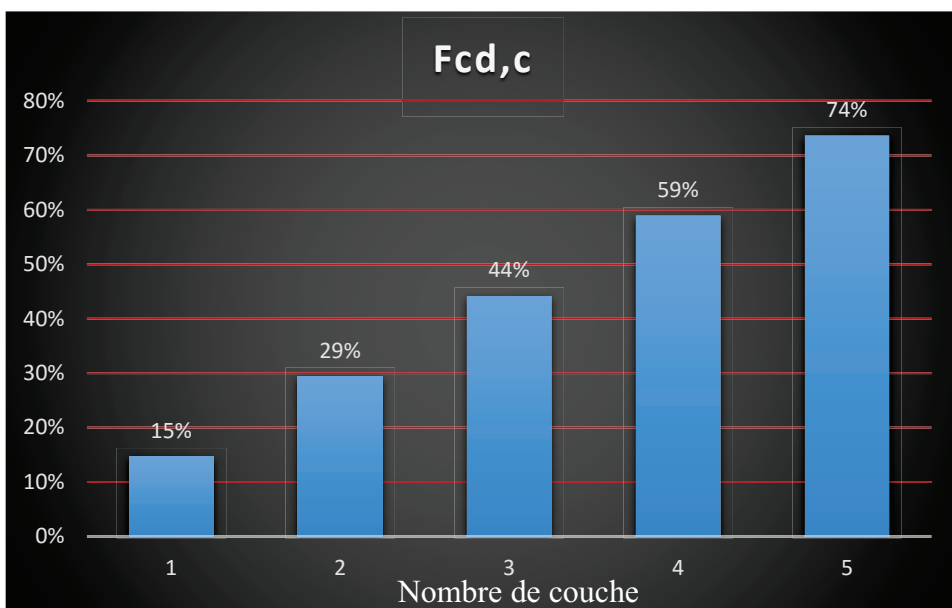


Figure 5- 2 : Pourcentage d'amélioration de  $f_{cd,c}$  par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement discontinu).

Deuxièmement, du tableau 5-2 nous pouvons conclure les mêmes résultats que la précédent, mais avec une diminution des valeurs de  $f_{cd,c}$  et  $N_{Rd}$ , 31,78 MPa et 3.56 MN respectivement, et ceci parce que nous avons changé le renforcement continu du poteau par un autre discontinu. Par suite, le renforcement discontinu ne donne pas le même résultat que celui du renforcement continu, et cela est montré par les pourcentages dans la figure 5-2.

### 5.3.3 Poteau rectangulaire :

Tableau 5- 3: Section rectangulaire ( $r=35$ ) avec un renforcement continu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de plis	-	20	-	-	2.14
1 pli	0.13	20	2.73	23.11	2.98
2 plis	0.26	20	5.47	26.22	3.31
3 plis	0.39	20	8.21	29.34	3.66
4 plis	0.52	20	10.95	32.46	4.02

Tableau 5- 4: Section rectangulaire ( $r=35$ ) avec un renforcement discontinu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de plis	-	20	-	-	2.14
1 pli	0.13	20	2.73	21.63	2.78
2 plis	0.26	20	5.47	23.26	2.96
3 plis	0.39	20	8.21	24.89	3.15
4 plis	0.52	20	10.95	26.53	3.33

Tableau 5- 5 : Section rectangulaire ( $r=60$ ) avec un renforcement continu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de plis	-	20	-	-	2.14
1 pli	0.13	20	2.73	23.89	3.03
2 plis	0.26	20	5.47	27.79	3.48
3 plis	0.39	20	8.21	31.69	3.92
4 plis	0.52	20	10.95	35.58	4.36

Tableau 5- 6: Section rectangulaire ( $r=60$ ) avec un renforcement discontinu.

Nombre de couche	Epaisseur $t_f$ (mm)	$f_{cd}$ (Mpa)	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	$N_{Rd}$ (MN)
Pas de pli	-	20	-	-	2.14
1 pli	0.13	20	2.73	22.03	2.82
2 plis	0.26	20	5.47	24.05	3.05
3 plis	0.39	20	8.21	26.08	3.28
4 plis	0.52	20	10.95	28.10	3.51

Les 4 tableaux suivants portent sur le même sujet que les tableaux précédents, mais le poteau étudié à une section rectangulaire (350 x 400 mm).

Les tableaux 5-(3 et 4) traitent un poteau dont le rayon de courbure est égal à 35 mm, avec un renforcement continu et discontinu, tandis que les tableaux 5- (5 et 6) traitent le même poteau mais avec un rayon de la courbure égale à 60 mm.

L'augmentation dans le rayon de courbure d'un poteau rectangulaire entraîne une augmentation dans la résistance du béton confiné  $f_{cd,c}$  qui conduit à un accroissement dans la capacité portante du poteau.

Par exemple, si nous prenons le renforcement continu avec 4 plis de fibre de carbone la valeur de  $N_{Rd} = 4.02$  pour un rayon de 35 mm, tandis que  $N_{Rd} = 4.36$  pour un rayon de 60 mm, alors c'est un accroissement de 7.8%.

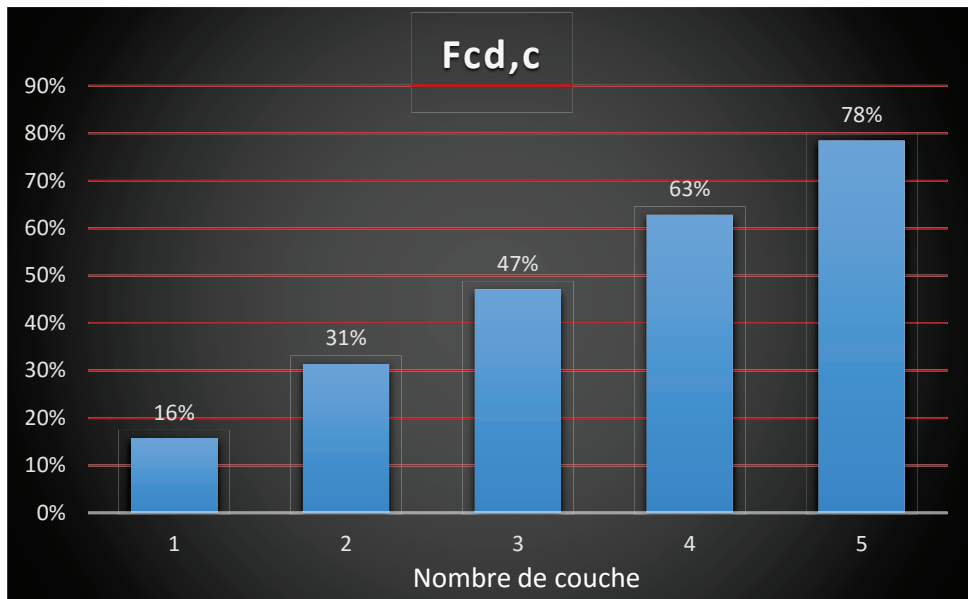


Figure 5- 3 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement continu).

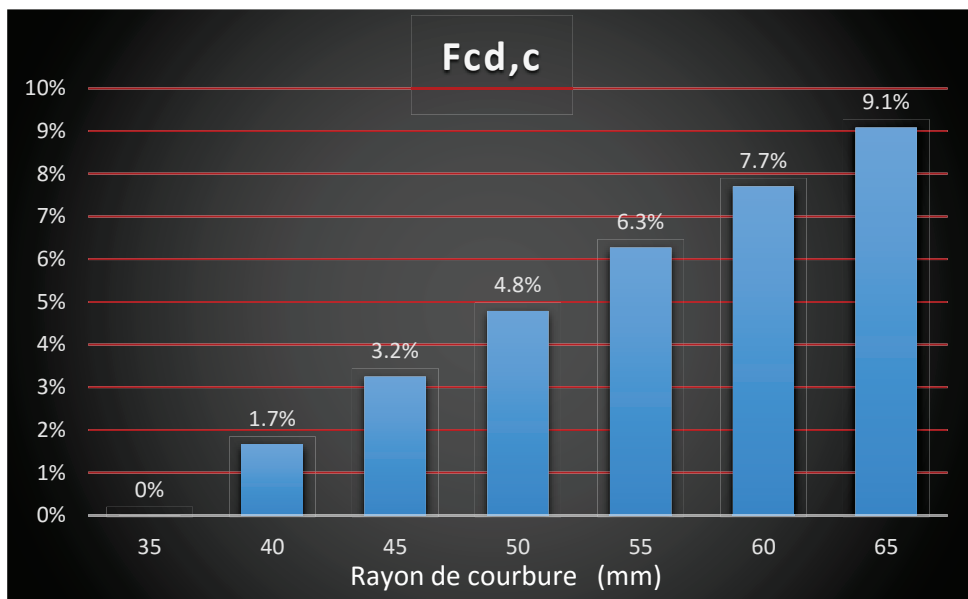


Figure 5- 4 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux rayon de courbure des poteaux rectangulaire (renforcement continu).

### 5.3.4 Comparaison du $f_{cd,c}$ entre poteau circulaire et rectangulaire:

Tableau 5- 7: comparaison entre poteau circulaire et rectangulaire

Poteaux circulaire	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)	Poteaux rectangulaire	$f_i$ (Mpa)	$f_{cd,c}$ (Mpa)
D=200 mm	21.90	80.44	200x300mm	14.60	38.50
D=400 mm	10.95	50.22	350x400 mm	10.95	32.56
D=600 mm	7.30	40.15	450x500 mm	8.76	29.24
D=800 mm	5.47	35.10	650x700 mm	6.25	25.95
D=1000 mm	4.38	32.10	700x800 mm	5.47	25.06

Ce tableau nous donne les valeurs de  $f_i$  et  $f_{cd,c}$  pour les poteaux circulaires et rectangulaires de dimensions différentes. De ces résultats nous pouvons conclure que, d'abord, la section circulaire donne une résistance de calcul du béton confiné  $f_{cd,c}$  meilleur que celle d'une section rectangulaire. Nous pouvons observer ce résultat par la comparaison du  $f_{cd,c}$  des poteaux circulaires par les résultats des autres poteaux rectangulaires.

Ensuite, l'augmentation de la section des poteaux circulaires ou rectangulaires provoque une diminution de l'efficacité du renforcement par fibre de carbone cela est prouvé dans les valeurs de  $f_{cd,c}$  obtenues avec le calcul et sur le graph suivant Figure 5-5.

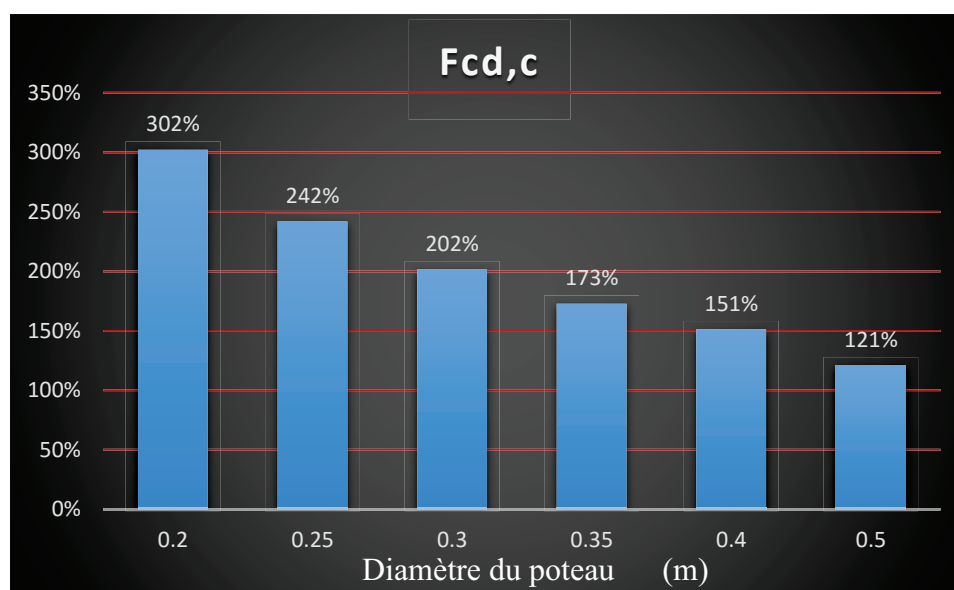


Figure 5- 5 : Pourcentage d'amélioration de  $f_{cd,c}$  par rapport au diamètre du poteau (renforcement continu, poteau circulaire).



### 5.3.5 L'effet de la résistance initiale :

Tableau 5- 8: effet de la résistance initial.

Fck (Mpa)	1 pli			2 plis	
	Fcd (Mpa)	Fcdc (Mpa)	Pourcentage (%)	Fcdc (Mpa)	Pourcentage (%)
16	10.667	18.223	70.8	25.778	141.66
20	13.333	20.889	56.67	28.445	113.34
30	20	27.556	37.78	35.112	75.56
40	26.667	34.223	28.33	41.779	56.669
50	33.333	40.889	22.66	48.445	45.33

L'effet de la résistance initiale de poteau est un facteur important pour obtenir une résistance de confinement plus efficace. C'est remarqué que plus la résistance initiale de poteau est élevée, moins le gain procuré par le confinement est important. En fait, l'augmentation de résistance du poteau dont  $F_{ck}=16$  MPa confinés avec un pli est de 70.8%, pour  $F_{ck}=30$  MPa elle est de 37.78% et pour  $F_{ck}=50$  MPa elle est de 22.66%. La même tendance est observée pour le confinement par 2 plis. Ceci nous permet de conclure que ce genre de confinement est plus approprié aux travaux de réhabilitations de colonnes endommagées ou à faible résistance initiale.

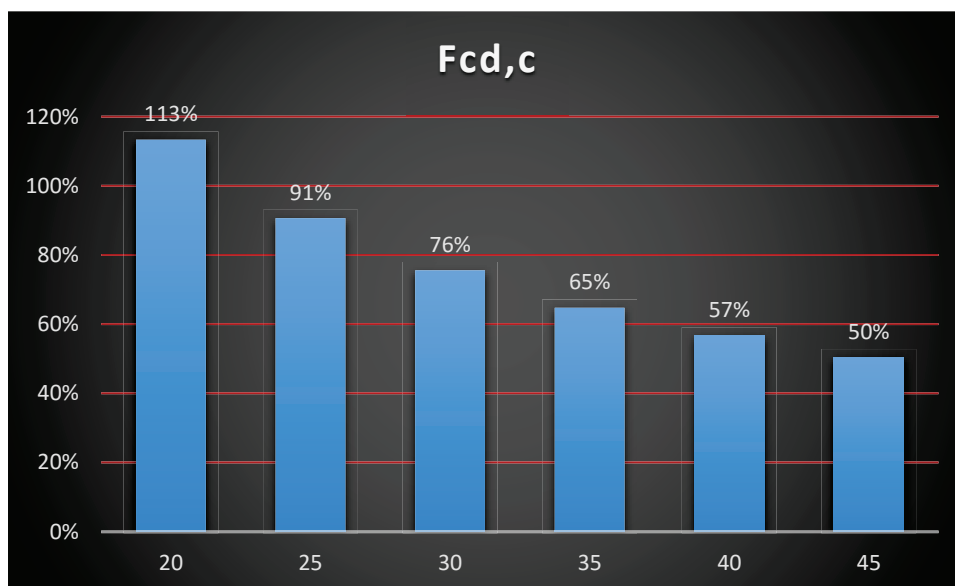


Figure 5- 6 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport à la résistance initial (renforcement continu, poteau circulaire, 2 plis).

## **Conclusion**

La nécessité de développer des méthodes de renforcement qui sont très efficaces et qui exigent un court temps pour se réaliser sur place, pour cela des études et des recherches ont conduit à la découverte de nouvelles techniques de renforcements. Parmi ces techniques est le renforcement par matériaux composites dont elle est très prometteuse. Plusieurs sont les recherches qui ont démontré le potentiel de cette technique par le renforcement des colonnes en béton armé.

Ce rapport est porté sur l'évaluation du comportement des colonnes en béton armés, avec une section circulaire, carrée et rectangulaire, confinée avec une chemise de composite à base de fibre de carbone. Les objectifs de ce rapport étaient de faire une évaluation des paramètres qui ont une influence sur la performance et le comportement des colonnes confinées avec des PRFC et en plus une évaluation des équations prédictives de la résistance en compression et la déformation ultime avant rupture des colonnes confinées.

Les résultats obtenus d'après l'évaluation des paramètres influant sur le renforcement par PRFC sont les suivants, l'augmentation du degré de confinement est suivi par une augmentation dans la résistance à la compression, la géométrie de la section confinée a joué un rôle dans l'efficacité et la performance de cette technique et d'après les résultats le gain de résistance à la compression est plus important pour les poteaux de section circulaire autant que pour ceux de sections rectangulaires.

Par rapport aux poteaux rectangulaires, la variation de rayon des coins conduit encore à une augmentation dans la résistance à la compression. Pour l'effet de la résistance de compression initiale des poteaux non confinés a été remarquable, que pour une résistance élevée des poteaux non confinés le gain procuré par le confinement est moins important.

En ce qui concerne les guides de calcul pour le confinement par matériaux composites des poteaux à section circulaires et non circulaires ils ont été présentés, et comparés. En plus, les équations et les limites pour le calcul de la résistance du béton confiné et la déformation axiale ultime ont été résumées.

Les trois guides FIB Bulletin 14 2001, ACI 440.2R-02 et ACI 440.2R-08 ont une inexactitude dans les formule de déformation et surtout pour le calcul de la déformation axiale d'un poteau

carrée à section carrée avec les formules exactes de la guide FIB une grande surestimation est prévue, en plus les autres guides donnent une variation de  $\pm 50\%$  par rapport aux données expérimentales. Pour Les résultats des contraintes, tous les guides ont donné une variation à peu près de  $\pm 2\%$  alors ces derniers fournissent une exactitude plus que dans le cas du calcul des déformations.

Sur le plan pratique, il y a un manque de codes et de critères de dimensionnement qui limitent l'utilisation pratique des matériaux composites pour la réparation ou le renforcement des structures en béton armé. En plus, il est important de préparer une génération des ingénieurs qui sont capables à utiliser les potentialités des matériaux composites.

## Annexe

Les tableaux Excel utilisés pour savoir l'effet des facteurs sur le renforcement par matériaux composites à base de fibre de carbone

### POTEAU CIRCULAIRE CONFINE

Données (Cas pour calculer la capacité portante)					
Diamètre du poteau	D =		0.40	m	
Hauteur d'étage	Lo =		3.50	m	
Conditions aux limites	bi-encasté		Lcr =	1.75	m
Béton					
Contrainte du béton à 28 jours	Fck =		30	MPa	
Enrobage	d' =		3	cm	
Acier					
Contrainte de l'acier utilisé	Fy =		500	MPa	
Section d'armatures	Long.	6	HA	14	As = 9.236 cm <sup>2</sup>
	Trans.	6	8	verifier	
Matériaux composites					
Module d'élasticité en traction	Ef =		234000	Mpa	
Déformation a rupture	ε <sub>fud</sub> =		0.018		
Epaisseur du renfort	tf =		0.13	mm	
Largeur du renfort PRFC	Wf =		30	cm	
Nombre de plis de PRFC	np =		4		

Résultats					
Rayon de giration	i =		0.1	m	
Elancement	λ =		17.5		
Coefficient dépend de l'élancement	γλ =		0.810		
Coefficient d'efficacité du confinement	α =		3.45		
Coefficient de forme de la section (Kc=1 pour une section circulaire)	Kc =		1		
Coefficient de forme du composite	renforcement continu		Kh =	1.000	
Espacement entre bande Sf-Wf < min(40 cm, 15 φ)	Sf =		51	cm	
Coefficient de performance (pour une section circulaire = 0.85)	ψf =		0.8		

Module de confinement	$E_p =$	608.4	
Pression de confinement	$f_l =$	10.951 2	Mpa
Résistance de calcul en traction d'acier	$f_{yd} =$	434.78 3	Mpa
Résistance de calcul en compression du béton	$f_{cd} =$	20	Mpa
<b>Résistance de calcul du béton confiné</b>			
	$f_{cd,c} =$	50.225	Mpa
<b>Capacité portante</b>			
	$N_{rd} =$	5.43	MN

## POTEAU RECTANGULAIRE CONFINE

Données (Cas pour calculer la capacité portante)					
Dimension du poteau				$b =$	0.40 m
				$h =$	0.35 m
Hauteur d'étage				$L_o =$	3.00 m
Conditions aux limites		bi-encasté		$L_{cr} =$	1.50 m
Béton					
Contrainte du béton a 28 jours				$F_{ck} =$	30 MPa
Enrobage				$d' =$	3 cm
Acier					
Contrainte de l'acier utilisé				$F_y =$	500 MPa
Section d'armatures		Long.	8	HA	12
		Trans.	6		10
					verifier
<b>Matériaux composites</b>					
Module d'élasticité en traction				$E_f =$	234000 Mpa
Déformation a rupture				$\epsilon_{fud} =$	0.018
Epaisseur du renfort				$t_f =$	0.13 mm
Largeur du renfort PRFC				$W_f =$	30 cm
Nombre de plis de PRFC				$n_p =$	3
Rayon de courbure (angle des poteaux)		$r \geq 35\text{mm}$		$r =$	35 mm
		$h' = h - 2r$		$h' =$	0.28 m
		$b' = b - 2r$		$b' =$	0.33 m

Résultats			
Rayon de giration	i=	0.1010	m
Elancement	$\lambda$ =	14.846	
Coefficient dépend de l'élancement	$\gamma\lambda$	0.820	
Coefficient d'efficacité du confinement	$\alpha$ =	3.45	
Coefficient de forme de la section	$K_c$ =	0.5540	
Coefficient de forme du composite	renforcement continu	$K_h$ =	1.000
Espacement entre bande	$S_f - W_f < \min(40 \text{ cm}, 15 \varphi)$	$S_f$ =	48 cm
Coefficient de performance	$\psi_f$ =	0.6	Mpa
Module de confinement	$E_p$ =	456.3	
Pression de confinement	$f_l$ =	8.2134	Mpa
Résistance de calcul en traction d'acier	$f_{yd}$ =	434.783	Mpa
Résistance de calcul en compression du béton	$f_{cd}$ =	20	Mpa
Résistance de calcul du béton confiné	$f_{cd,c}$ =	29.420	Mpa
Capacité portante	$N_{rd}$ =	3.702	MN

## **Bibliographie**

ABDE-ELGHANI M., 2009. *Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA*. Thèse université Des frères Mentouri-Constantine.

American Concrete Institute ACI. 2002. “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures.*” ACI 440.2R-02, Farmington Hills, Mich.

American Concrete Institute ACI. 2008. “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures.*” ACI 440.2R-08, Farmington Hills, Mich.

Avis Technique 3/10-669, Sika CarboDur,SikaWrap, <http://www.cstb.fr/pdf/atec/GS03-D/AD100669.pdf>

BELHANNACHI H., 2009. *Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé*. Thèse université Des frères Mentouri-Constantine.

BENZAID R., MESBAH H., CHIKH N., 2010. *Les matériaux composites “PRF” pour le confinement externe du béton*, Editions universitaires européennes EUE.

E S Ju' lio1, F Branco2 , V D Silva, 2003. *Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing*. Departamento de Engenharia Civil.

FAIZAN TAHIR M., YAQUB M., BUKHARI I., BUTT F., ASHRAF A., 2013. *Design Guidelines Review for CFRP Confinement of Plain and Reinforced Concrete Square Columns*. Life Sci J, 2013, 778-790.

Fédération internationale du Béton FIB, 2001. “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.*” Bulletin No. 14, Technical Rep., Lausanne, Switzerland.

KHEIRA O., 2014. *Réhabilitation des structures*. Polycopié université des sciences et de la technologie d’Oran MOHAMED BOUDIAF U.S.T.O.

LEBLANC, M., 2000. *Confinement de colonnes de béton circulaires à l’aide de fibre de carbone*. Maitrise en génie de la construction à l’école de technologie supérieure, Montréal.

ROCCA S., GALATI N., NANNI A., 2008. *Review of design guidelines for FRP confinement of reinforced concrete columns of noncircular cross sections*. ResearchGate. <http://www.researchgate.net/publication/255424884>

## Liste des figures

Figure 1-1: Fissuration due à la corrosion .....	6
Figure 1-2: Processus de corrosion .....	7
Figure 1-3: Corrosion des armatures.....	7
Figure 1-4 : Eclatement de l'enrobage ("Prospec-plus") .....	8
Figure 1-5: Eclatement du béton dû à un choc. ....	9
Figure 1-6: Détachement d'un balcon du deuxième étage.....	9
Figure 1-7 : le scléromètre .....	12
Figure 1-8 : Instrument de carottage .....	13
Figure 1-9: le pacomètre. ....	13
Figure 1-10: Le profomètre.....	14
Figure 1-11: le corrosimètre.....	14
Figure 2- 1 : Etapes de réalisation d'un rebouchage des fissures .....	19
Figure 2- 2: Projection par voie sèche. ....	20
Figure 2- 3: Projection par voie humide. ....	20
Figure 2- 4: Technique de déplacement pour le béton projeté.....	21
Figure 2- 5: l'application correcte et incorrecte de l'enveloppement des bars par le béton projeté. ....	22
Figure 2- 6: chemisage en béton armé. ....	23
Figure 2- 7 : mise en place des armatures de renforcement.....	25
Figure 2- 8: Augmentation de la rugosité du poteau.....	25
Figure 2- 9: Renforcement avec des chemises en acier. (Priestley et al. 1994).....	28
Figure 2- 10 : Chemisage en acier des poteaux rectangulaires. (Travaux de Monti 2003) .....	28
Figure 2- 11 : Renforcement d'un poteau circulaire par précontraintes additionnelles.(Saatcioglu et al . 2000).....	30
Figure 2- 12 : Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelles. (Saatcioglu et al . 2000) .....	31
Figure 2- 13: L'élément d'ancrage. ....	31
Figure 2- 14: Renforcement d'un poteau carré. ....	31
Figure 2- 15 : Composants d'un matériau composite de PRF. ....	32
Figure 2- 16 : Chemisage d'un poteau par PRFC. ....	33
Figure 2- 17 : Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre. ....	34
Figure 2- 18: Types de confinement de poteaux.....	35
Figure 2- 19: Courbe contrainte-déformation pour un béton confiné avec « PRF ». ....	35
Figure 3-1 : Composants d'un matériau composite de PRF. (Vue microscopique) .....	37
Figure 3-2: les phases du matériau composite « PRF ».....	38
Figure 3-3: Processus de fabrication des fibres de carbone.....	41
Figure 3-4: Courbes contrainte-déformation (matériaux composite - acier) (Nobatek).....	44
Figure 3-5 : Stratification en contact des colonnes (A et B).....	46



Figure 3-6 : Types de confinement de poteaux.....	46
Figure 3-7 : Vue en élévation de l'enroulement filamentaire .....	49
Figure 3-8 : Vue en plan de l'enroulement filamentaire.....	50
Figure 3-9 : l'enroulement filamentaire ( Balaguru et al, 2009).....	50
Figure 3-10 : Différentes section des colonnes renforcées par des coquilles préfabriquées. ...	51
Figure 3-11 : Différentes types de chemisage par coquilles préfabriquées. ....	52
Figure 3-12 : Modification de forme d'un poteau à section rectangulaire. (Teng et al 2002).54	
Figure 3-13 : Action de confinement avec « PRF » (Teng et al. 2002, Purba et Mufti 1999)56	
Figure 3-14 : Courbe contrainte-déformation type d'une colonne confinée avec PRFC de section circulaire (Teng et al. 2002) .....	57
Figure 3-15 : Différents types des diagrammes contrainte-déformation d'un béton chemisé avec des « PRF » (Lam et Teng 2003).....	59
Figure 3-16 : Courbe contrainte-déformation type d'une colonne confinée avec PRFC de section carrée (Teng et al. 2002).....	60
Figure 3-17 : Propagation des fissures en fonction de la charge axiale (Wu 2002). ....	61
Figure 4- 1 : Les ratios de contraintes par rapport à la section.....	74
Figure 4- 2 : Les ratios de contraintes de contrainte théoriques sur celle expérimentale. ....	74
Figure 4- 3: Les ratios de contraintes de déformation théoriques sur celle expérimentale.....	75
Figure 5- 1: Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement continu).....	83
Figure 5- 2 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement discontinu). ....	83
Figure 5- 3 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux nombre de couches de PRFC (renforcement continu).....	86
Figure 5- 4 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport aux rayon de courbure des poteaux rectangulaire (renforcement continu). ....	86
Figure 5- 5 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport à la section du poteau (renforcement continu, poteau circulaire).....	87
Figure 5- 6 : Pourcentage d'amélioration de fcd,c par rapport à la résistance initial (renforcement continu, poteau circulaire, 2 plis). ....	88

## **Liste des tableaux**

<i>Tableau 2- 1: Étapes de chemisage en béton armé. ....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 3- 1 : propriétés typiques des composites. (Teng et al. 2002) .....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3- 2: Comparaison qualitative entre les trois types de fibre (Meier et Winistorfer 1995) .....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 3- 3 Mise en place du confinement par tissu TFC .....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 3- 4 : Comparaison des trois méthodes de renforcements.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 4- 1: Réduction des forces et les facteurs de réduction des matériaux pour (ACI et FIB).....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 4- 2: Formule de calcul pour les sections circulaires (ACI et FIB) .....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 4- 3: Formule de calcul pour les sections non circulaires (ACI et FIB).....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 4- 4: Caractéristique des échantillons. (Antonio NANNI et al.).....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 4- 5 : les résultats théoriques des poteaux confinés .....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 4- 6 : Le comportement des équations des trois guides étudiés.....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 5- 1: Section circulaire avec un renforcement continu.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 5- 2: Section circulaire avec un renforcement discontinu. ....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 5- 3: Section rectangulaire (r=35) avec un renforcement continu.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 5- 4: Section rectangulaire (r=35) avec un renforcement discontinu. ....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 5- 5 : Section rectangulaire (r=60) avec un renforcement continu.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 5- 6: Section rectangulaire (r=60) avec un renforcement discontinu. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 5- 7: comparaison entre poteau circulaire et rectangulaire .....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 5- 8: effet de la résistance initial. ....</i>	<i>88</i>

## **Résumé**

Dans ce rapport des calculs sont faits afin de bien vouloir déterminer les paramètres qui influent sur le renforcement des poteaux à section circulaire, rectangulaire et carrée par des matériaux composites à bases de fibre de carbone « PRFC » qui sont liés extérieurement au béton par une résine époxydique. En fonction de ces calculs, on a constaté que le nombre de plis, la géométrie de la section, la variation de rayon des coins pour les sections rectangulaires et carrée et la résistance de compression initiale des poteaux non confinés sont les principaux facteurs qui réduisent l'efficacité du confinement par PRFC. En plus, une comparaison des équations prédictives de la résistance à la compression et de la déformation ultime des colonnes confinées entre les guides suivants FIB Bulletin 14 2001, ACI 440.2R-02 et ACI 440.2R-08 est réalisée. Cette comparaison a abouti à l'inexactitude dans les formules de déformation axiale et aux meilleurs résultats obtenus par les équations de calcul de la résistance de compression du béton confiné.

Mots clés : Pathologies de béton – Renforcement des poteaux – PRFC – Techniques de renforcement – Facteurs influençant – FIB, ACI.

---

## **Summary**

The report includes calculation made to determine the parameters influencing the strengthening of circular, rectangular and square columns with carbon fiber-reinforced polymer "CFRP" externally bonded to the concrete by epoxy. According to these calculations, the main factors that reduce effectiveness of retrofitting by CFRP are the following: the number of plies, the geometry of the section, the radius variation of corners for rectangular and square section and the initial compressive strength of unconfined columns. Moreover, the comparison and evaluation of predictive equations between the compressive strength and ultimate strain of confined columns of three guides FIB Bulletin 14 2001, ACI 440.2R-02 and ACI 440.2R-08, led to discovery of an inaccuracy in the axial deformation formula, and a better results obtained from the equations used to calculate the compressive strength of confined concrete.

Keywords: Pathology of concrete – Strengthen of columns – CFRP – Retrofitting techniques – Factors influencing – FIB, ACI

---

