

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi**  
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil



No d'ordre :  
N° de série :

## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de magister en  
Génie Civil  
Option : MATERIAUX

## **INTITULE**

**Contribution à l'étude des matériaux composites pour  
Le confinement externe des colonnes en béton**

Présenté par :  
M<sup>elle</sup> **KHERKHACHE Soumeya**

Soutenue le : .....

Devant le jury:

<b>Président :</b>	<b>BUDCHICHA Abdelaziz</b> (MC/A)	- Université d'Om el bouaghi
<b>Rapporteur :</b>	<b>CHIKH .Naceredine</b> (PROF)	- Université de Constantine
<b>Examineur :</b>	<b>HOUARI Hacene</b> (PROF)	- Université de Constantine.
<b>Examineur :</b>	<b>BOUDAUD Zeineedine</b> (MC/A)	- Université d'Om el bouaghi

# Remerciements

---

*Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et je passe les obscures subtilités de la langue, le choix de la formule de remerciements demeure toujours difficile.....*

*Je commencerais en premier lieu par remercier le bon Dieu tous puissent, de m'avoir donné le courage et l'optimisme et surtout la patience de finir ce travail malgré tous les difficultés, et sincèrement remercier ceux qui m'ont honoré en acceptant d'examiner et de juger ce travail.*

*Je voudrais remercier mon encadreur, Monsieur Nasr-Eddine CHIKH, Professeur à l'Université de Constantine- Algérie et Monsieur et Riad BENZAID Professeur assistant et chercheur à l'Université de Jijel –Algérie comme co encadreur ; de m'avoir permis de bénéficier de leurs conseils et compétences scientifiques et de m'avoir témoigné une grande confiance.*

*Mes remerciements vont sûrement à tous mes professeurs d'ingéniorat, qui depuis mon introduction au génie civil ont contribué de près ou de loin à ma formation, puis mes professeurs de post de graduation à l'Université de Oum El Bouaghi, en commençant par le chef de département de Genie civil, Mr Boudchicha, Mr Chikh Zouaoui, Mr Boudaoud, Mr Houari, Mr Lahmar , Mr Guenfoud, et Mr Houari .*

*J'adresse des remerciements particuliers à Monsieur Jijeh Hafid: ingénieur contrôleur a PIZZAROTI, Mr Riad Samahi : responsable du laboratoire d'ANDRAD, Mr Zerzezi : propriétaire du laboratoire sol et béton, que je leurs suis particulièrement reconnaissante pour leur disponibilité de me fournir une formation pratique dans les initiations de base des travaux du laboratoire qui vont sûrement me servir dans le future.*

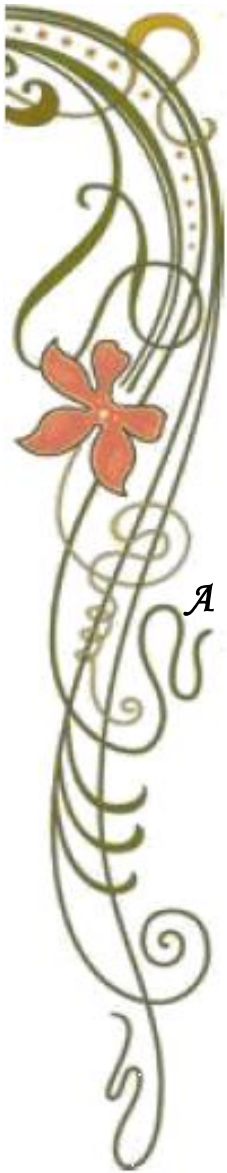
*Je suis également redevable à tous mes collègues de l'Urbaco ; qui m'ont toujours données courage de pouvoir poursuivre mes études de post graduation en parallèle avec ma profession d'ingénieur d'étude. Aussi à mes collègues du Magister .En outre, cette formation s'est déroulée dans une ambiance amicale que j'ai particulièrement appréciée.*

*Pour terminer, je tiens à mentionner le support constant et exprimer mon immense gratitude à mes parents et ma famille surtout Djawed, qui m'ont soutenu dans mes choix et m'ont toujours encouragé à réaliser mes ambitions.*

**Merci**

# *Dédicaces*

---



*Je dédie le présent travail*

*A mes chers parents ;*

*A Djawed, Mouayd, Chahine, Mouaad, Anes et Aniss, Amir, et Karim;*

*A tous les gens qui m'aimé*

# Résumé

---

Les éléments structuraux, particulièrement les poteaux en béton armé, sont sensibles à de multiples sollicitations dont les conséquences peuvent être plus désastreuses en présence d'imperfections de forme, par le vieillissement, par des défauts d'exécution ou tout simplement par des erreurs de conception. La réduction de la vulnérabilité aux sollicitations extrêmes des structures existantes est un enjeu majeur d'où la nécessité d'un renfort qui doit être mené dans le but de leur redonner leur état de service initial (réparation) ou de leur donner un nouveau état de service (renforcement). Cependant, en complément des procédés classique (béton projeté, béton fibré projeté, collage de plats métallique, précontrainte additionnelle...), une des solutions palliatives à ce problème est le renforcement extérieur par adjonction de matériaux composites, cette pratique connaît actuellement un essor important, d'autant plus que peut devenir aussi une application préventif ou un nouveaux procédé de construction.

Pour ce faire, l'initiation à la connaissance des différents matériaux composites employés dans le génie civil, permet d'identifier certaines techniques du chemisage des poteaux par PRF, ainsi que le choix des méthodes de mise en œuvre avec une importance accordé aux travaux préparatifs dans le choix du type des PRF, et la protection de l'interface.

Le travail présenté s'insère dans une étude globale visant à éclaircir la contribution des matériaux composites étant un confinement externe; dans le comportement des poteaux en béton, à partir des travaux exposés dans la littérature. Dans cette optique, plusieurs recherches se sont intéressé à intégrer l'apport d'un polymère renforcé de fibres (PRF) dans le développement du nouveau comportement du béton exprimé par les différentes équations d'équilibre ainsi que dans le développement graphique des diagrammes.

Ainsi la contribution des PRF, a fait preuve des gains significatifs en matière de déformations et de résistance par une revue du comportement à la rupture des poteaux confinés. L'étude paramétrique du confinement à travers un panorama de quelques travaux expérimentaux trouvés dans la littérature ; recense les différents paramètres pertinents utilisés dans illustration du comportement mécanique, notamment : l'épaisseur du renfort, sa rigidité ; la forme géométrique de la section du poteau, le rapport volumétrique du «PRF», l'élancement et la résistance initiale du béton.

Durant plus de 20ans, un certain nombre de modèles simples des recherches ultérieurs, permettant de prédire le comportement du béton confiné par un matériau linéaire élastique tel que le matériau composite (PRF). Certaines recommandations et lacunes présentes dans les études ayant conduit à l'élaboration de normes et modèles les plus aboutis, visent à obtenir une

corrélation satisfaisante de la loi contrainte-déformation avec les résultats expérimentaux des travaux de recherche en question. Les caractéristiques mécaniques et géométriques des spécimens de béton, ainsi que les paramètres du chemisage, interviennent alors.

Toutefois, le manque d'un guide pertinent et universel dans le domaine du chemisage des poteaux par PRF, rend l'application d'un modèle ou d'un autre attributaire au choix du concepteur qui prend en considération le code de sa région, tel que l'Eurocode 8-3, le guide de l'AFGC 2011 et le *module ISIS*. Pour cela certaines pistes peuvent être proposées ; et nous avons conduit de procéder à une analyse critique de quelques modèles.

**Mots clés** : poteaux béton armé, renforcement, Polymères Renforcés de Fibres (PRF), ancrage

## *Abstract*

---

Structure elements, particularly the concrete columns are susceptible to severe loadings, which these consequences can be worsened by the presence of shape imperfections, by ageing, by execution defects or simply by design errors. The reducing vulnerability of existing structures in severe loadings, is thus an important issue, where retrofitting is necessary. One of the palliative solutions in addition to classical procedures is strengthening with external composite materials. There has been a worldwide increase in the use of composite materials for the new constructions.

In order to achieve this objective, the review mannequins of different range of FRPs used in civil engineering identifies some techniques of fiber bonding and their implementing methods. An importance is given to preparation works, FRP type, and surface treatments.

The present work is presented as a part of a more wide study carried out which purpose is the contribution of composite external material in concrete columns behavior, through literature works. Within this present study it was considered an interest to integrate the contribution of a Fiber Reinforced Polymer (FRP) in the analytical development of the various equilibrium equations like in the graphic development of the diagrams.

Therefore, the contribution of FRP shows the specific gain on strain and stress offered by FRPs within behavior of confined columns. A parametric study focus on the main parameters of mechanic behavior as the reinforcement thicknesses, rigidity, geometric shapes columns, volumetric ratio of FRP, slenderness and first concrete stress.

In addition, the fifth chapter assesses some simple models that lead to predict the columns behavior confined with an elastic linear material such as FRP. Some recommendations and lists shortcomings found in the studies that lead to elaborate norms and models which predict a satisfying correlation between the stress strain law and the experimental results of some researches. Mechanics columns and bonding FRP's parameters are reached in.

Over the last 40 years, a certain number of simplified design models are conducted to predict the concrete behavior with a focusing attention on the linear elastic quality of the FRPs. Given the lack of guidance or regulation in this area, models application are depending on the researcher choices how considered the specific code of region as the Eurocode 8-3, the AFGC 2011 code and the ISIS modules. Therefore, some ways are proposed with a critical analysis of some models.

*Keywords:* concrete columns, strengthening, Fiber-Reinforced Polymer (FRP), anchorage, design.

ان العناصر الهيكلية خاضه الأعمده الخرسانية , تتعرض لعدة تأثيرات خارجية مما يجعلها هشّة بسبب عوارض في الأشكال المنفدة , العجز او اخطاء في الأنجاز. كل هذا يادي الي الحاجة لتدعيم هذه العناصر . باضافة الي الطرق الكلاسيكية توجد حاليا طرق جد ناجعة هي اللدائن المركبة المعززة بألياف (PRF). هذه المواد تعرف تطورا جد هام خاضه الهياكل.

ان معرفة خصائص اللدائن المركبة المعززة بألياف يتحكم في اختيار طرق تطبيقها في تدعيم الأعمده الخرسانية و حمايتها .

تهتم هذه الدراسة بالسلوك الميكانيكي المحوري و القطري الناتج عن تأثير الحصر الخارجي الذي يقدمه مغلفا من اللدائن المركبة المعززة بألياف ال (PRF). مكاسب المقاومة للضغط المحوري و التشوهات المحورية و القطرية للخرسانة المحصورة خارجيا بالمواد المركبة (PRF) تم تقييمها و تحليلها على أساس عدد طيات مغلف ال (PRF) ، مقاومة الضغط للخرسانة غير المحصورة ، النسبة الحجمية لل PRF ( التي تعرف بنسبة مساحة المقطع العرضي لمغلف ال PRF إلى مساحة المقطع العرضي للخرسانة) ، شكل المقطع العرضي للخرسانة (دائري أو مربع) ، نسبة الطول إلى قطر العينات (L/D) و درجة الضرر الأولى للخرسانة المسلحة .

اخيرا. ان القوانين الخاصة بشرح السلوك الميكانيكي للأعمده الخرسانية المدعمة باللدائن المركبة المعززة بألياف غير كافية لحد الان نهيا عن قوانين ( 8-3 Eurocode 1 - 2011 AFGC - ISIS module )

### كلمات البحث

الأعمده الخرسانية - التدعيم - اللدائن المركبة المعززة بألياف - الضبط

# Table des matières

---

<i>Remerciements</i>	(ii)
<i>Dédicaces</i>	(iii)
<i>Résumé</i>	(iv)
<i>Liste des figures</i>	(xiv)
<i>Liste des tableaux</i>	(xx)
<i>Notations</i>	(xxiii)
I – 1. Introduction générale	2
Qu'est-ce qu'une réhabilitation ?	
I – 2. La nécessité de réhabilitation	4
I – 3. Techniques de renforcement ou de réparation applicable aux poteaux en béton armé :	6
I – 3 – 1. Chemisage en béton ou en béton armé :	6
I – 3 – 2. Renforcement par chemisage en acier :	7
I – 3 – 3. Renforcement par tôles collées :	9
I – 3 – 4. Le renforcement au moyen de profils métalliques :	10
I – 3 – 5. Technique d'amélioration des poteaux en béton armé par le précontraint transversal	12
I – 3 – 6. Renforcement extérieur par matériaux composites :	12
I – 4. Objectifs de l'étude	15
I – 5. Structuration de la thèse :	16
<b>CHAPITRE (II) : INTRODUCTION AUX MATERIAUX COMPOSITES</b>	
II – 1. Introduction	18
II – 2. Matériau	20
II – 2–1. Fibres de renfort	20
II – 2–1–1. Fibres de verre	21
II – 2–1–2. Fibres de carbone	23
II – 2–1–3. Fibres d'aramide	27
II – 2–2. Comparaison des performances des fibres pour le renforcement des structures	27
II – 2–3. Forme des renforts	28
a- Formes linéiques	28
b- Formes surfaciques	29
c- Structures multidimensionnelles	29
II – 2–2. Matrice	31
II – 2–2–1. Les résines thermodurcissables (TD) :	31
II – 2–2–2. Les résines thermoplastiques (TP) :	32
II – 2–2–3. Principales combinaisons de résines et renfort :	34
II – 3. Les charges et additifs	34
II – 4. Interfaces	35
II – 5. Procédés de fabrication	35
II – 5–1. Moulage au contact	35
II – 5 – 2. Enroulement filamentaire	36
II – 5 – 3. Pultrusion	37
II – 6 – Propriétés mécaniques des composites « PRF »	37
II – 6 – 1 Module d'élasticité :	39

II – 6 – 2	Résistance :	39
II – 6 – 3	Fatigue :	40
II – 6 – 4	Fluage :	40
II – 7 –	Durabilité environnementale des composites « PRF »	41
II – 7 – 1	Température :	41
II – 7 – 2	Humidité :	42
II – 7 – 3	Rayons ultraviolets :	42
II – 7 – 4	Effets des alcalis :	43
II – 7 – 5	Incendie (feu) :	43
II – 8 –	Application des composites « PRF » en génie civil	44
II – 8 – 1	Processus générale d'application de renforcement en PRF :	45
II – 8 – 2	Application aux Poutres :	46
II – 8 – 3	Application aux poteaux :	48
II – 8 – 4	Application aux assemblages poteau-poutre	49
II – 8 – 5	Application aux murs de contreventement :	50
II – 8 – 6	Application aux dalles :	51
II – 9.	CONCLUSION	51
-	Références	

#### **CHAPITRE (IV) : TRAVAUX EXPERIMENTAUX SUR LE CONFINEMENT DES POTEAUX EN BETON PAR MATERIAUX COMPOSITES**

III – 1.	Introduction	54
III – 2.	Problématique de l'état des colonnes en béton arme à renforcer	54
III – 2 – 1.	Problématique de la réhabilitation des poteaux avec des matériaux composites	55
III – 3.	Renforcement des colonnes de béton à l'aide de matériaux composites	56
III – 4.	Matériaux composites destines au Renforcement des poteaux en béton armé.	57
III – 4 – 1	Fibres continues :	58
III – 4 – 2	Les tissus composite (PRF polymère renforcé de fibres)	59
III – 4 – 3	les composites stratifiées	60
III – 4 – 4	La résine	60
III – 5	Mise en œuvre des matériaux composites :	61
III – 6	Méthodes de confinement des poteaux par les « PRF »:	62
III – 6 - 1	Stratification au contact	62
III - 6 - 1- a)	Traitement de surface	63
III - 6 - 1- b)	Mise en place des tissus de fibres continues	63
III - 6 - 1- c)	La cure	64
III - 6 - 1- d)	Finition	64
III – 6 - 2	Enroulement filamenteaire	65
III – 6 - 3	Chemisage par coques en PRF	65
III – 6-4	Comparaison des méthodes de mise en œuvre	66
III – 7	Caractéristiques du renforcement des poteaux par matériaux composites	66
III – 8	Dispositifs constructifs	67
III – 8 - 1	Amélioration des sections rectangulaire	67
III – 8 - 2	Amélioration du renforcement des poteaux confinés par « PRF »	68
a.	Ancrage par mèches de PRF	68
b.	La technique de « NSMB »	69

c. La technique de « NSMB » simplifié	69
d. La technique de Huang et Chen	70
e. La technique de Raphaëlle SADONE	70
III – 9 contribution du FRP au renforcement	71
III – 9 -1 Introduction : 71	71
III –9-2. Comportement du béton confine à la compression	71
III –9-3. Equations d'équilibre de la section de béton confine	73
III –9-4. Conclusion	73
- Références	
<b>CHAPITRE (IV) : TRAVAUX EXPERIMENTAUX SUR LE CONFINEMENT DES POTEAUX EN BETON PAR MATERIAUX COMPOSITES</b>	
- Introduction	78
- Comportement du béton confiné	
IV – 1 Mécanique de la rupture du béton sous compression axiale et le mécanisme de son	78
IV – 2 Panorama de quelques travaux expérimentaux sur les sections circulaires	81
- Introduction	
IV –2 – 1 Travaux de Shahawy et al (2000)	81
IV –2 – 1 – a) Observations	82
IV –2 – 1 – b) Résultats	82
IV –2 – 2 Travaux de Berthet et al (2005)	87
IV –2 – 2– a) Instrumentation	87
IV –2 – 2 – b) Résultats	88
- Mode de rupture	90
- Influence de la pression ultime de confinement	91
- Influence de la rigidité de confinement	92
- Influence de la classe de résistance du béton	93
IV –2 – 3 Travaux Lin et Liao (2004)	94
- Résultats	95
- Mode de rupture	96
- Linéarité du renforcement	95
IV – 3 Panorama de quelques travaux expérimentaux sur les sections rectangulaires	
- Introduction	97
IV –3 – 1 Travaux de Cole et Belarbi (2001)	97
- Résultats	100
- Effet de l'arrondi	102
IV – 4 Panorama de quelques travaux expérimentaux sur la réparation des poteaux par « PRF » et leur durabilité	
IV – 4 – 1 Travaux de G.Li et al (2003)	101
- Résultats	103
- Effet du type de PRF	103
- Effet de l'agressivité de l'environnement	104
IV – 4 – 2 Travaux de Toutanji (1999)	104
- Résultats	105
- Effet de conditionnement	106
IV – 4 – 3 Travaux de Toutanji et Deng (2002)	106
- Références	

## **CHAPITRE (V) : MODELISATION DU BETON CONFINE PAR MATERIAUX COMPOSITES**

Introduction	114
V – 1 Modélisation du comportement mécanique des poteaux en béton arme, renforcée par collage de « FRP ».	115
V – 1 -1 cadre théorique.	115
V – 2. Poteaux de section circulaire	116
V – 2 – 1 Pression de confinement	116
V – 2 – 2 Allure du diagramme contrainte-déformation	118
V – 3. Poteaux de section rectangulaire	121
V – .3 Poteaux de section elliptique	123
V – 5. Résistance en compression axiale des poteaux de section circulaire confine par « PRF »	125
V –5 – 1 Modèles de résistance basés sur les modèles de confinement par acier	126
V – 5 – 1 – a) Fardis et Khalili (1981)	126
V – 5 – 1 – b) Saadatmanesh et al (1994)	126
V – 5 – 2 Modèles de résistance empiriques ou analytiques	127
V – 5 – 2 – a) Miyauchi et al (1997)	127
V – 5 – 2 – b) Karbhari et Gao (1997)	127
V – 5 – 2 – c) Kono et al (1998)	127
V – 5 – 2 – d) Mirmiran et al (1998)	128
V – 5 – 2 – e) Samaan et al (1998)	128
V – 5 – 2 – f) Toutanji (1999)	128
V – 5 – 2 – g) Saafi et al (1999)	128
V – 5 – 2 – h) Spoelstra et Monti (2000)	129
V – 5 – 2 – i) Xiao et Wu (2000)	129
V – 5 – 3 Travaux de Lam et Teng (2001)	129
V – 5 – 3 – a) Performance des modèles en résistance	133
V – 5 – 3 – b) Modèle de Lam et Teng 2001	135
V – 6. Relation contrainte-déformation pour le béton confiné par PRF	136
V – 6 – 1 Modèles contrainte-déformation basés sur les modèles pour confinement par acier	137
V – 6 – 1 – a) Fardis et Khalili (1981)	137
V – 6 – 1 – b) Saadatmanesh et al (1994)	137
V – 6 – 2 Modèles contrainte-déformation empiriques ou analytiques	138
V – 6 – 2 – a) Miyauchi et al (1997, 1999)	138
V – 6 – 2 – b) Karbhari et Gao (1997)	139
V – 6 – 2 – c) Kono et al (1998)	140
V – 6 – 2 – e) Samaan et al (1998)	141
V – 6 – 2 – f) Toutanji (1999)	141
V – 6 – 2 – g) Saafi et al (1999)	142
V – 6 – 2 – h) Spoelstra et Monti (2000)	143
V – 6 – 2 – i) Xiao et Wu (2000)	143
V – 6 – 3 Travaux de Lam et Teng (2001)	
V – 6 – 3 – a) Croisement de la 2ème branche linéaire avec l'axe des contraintes	146
V – 6 – 3 – b) Rupture circonférentielle du PRF	148
V – 6 – 3 – c) Performances des modèles $\sigma$ - $\varepsilon$ pour le béton confiné par PRF	148

V – 6 – 3 – d) Modèle $\sigma$ - $\varepsilon$ de Lam et Teng	152
V – 7. Résistance en compression axiale des poteaux de section rectangulaire confinés par PRF	
V – 7 – 1 Modèles existant	157
V – 7 – 1 – a) Equations générales	157
V – 7 – 1 – b) Coefficient de forme	158
V – 7 – 1 – c) Diamètre du poteau circulaire équivalent	159
V – 7 – 2 Travaux de Lam et Teng	159
V – 7 – 2 – a) Modèle de Lam et Tang	161
V – 8. Comparaison de quelques modèles	165
V – 9. Résistance en compression axiale des poteaux de section elliptique confinés par PRF.	166
V – 10. Recommandations pour le dimensionnement des poteaux confiés par PRF	167
V – 10 – 1 Expression générale de la résistance en compression du béton confiné par PRF	167
V – 11. Proposition d'un modèle simplifié de calcul	168
V – 11 -2. Principe de calcul des poteaux en béton confine par les « PRF »	168
V – 11 -3. Formulation du model	169
	171
<b>CONCLUSION GENERAL ET PERSPECTIVES</b>	<b>173</b>

*Annexe.*

# LISTE DES FIGURES

## Figures Chapitre I

Figure I -1 : Rupture d'une pile par flexion-cisaillement (Kobe, 1995), d'après [Priestley et al. 1996].	4
Figure I -2 : Rupture par manque de confinement (San Fernando, 1971)	4
Figure I -3 : Rupture en flexion des piles de pont de la Hanshin expressway (Kobe, 1995)	4
Figure I -4 : Poteau endommagé: a) flambement des barres, b) ouverture des cadres	4
Figure I -5 : Chemisage béton de poteaux de section rectangulaire [Priestley et al, 1996]	7
Figure I -6 : Chemisage en béton armé [Fukuyama et al 2000]	7
Figure I -7 : Détails du chemisage en BTHP fibré ([Massicotte et Boucher-Proulx, 2010])	8
Figure I -8 : Chemisage en acier [Fukuyama et al 2000], [Monti 2003]	9
Figure I -9 : Chemisage en acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire (Priestley et al, 1996)	9
Figure I -10 : Tôles colées ; (droite) difficulté de manutention ; (gauche) Renforcement du viaduc de Territoire par tôles collées perforées (Freyssinet) [tech ing3]	10
Figure I -11 : Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique	11
Figure I -12 : Renforcement d'un poteau carré à état de cisaillement dominant (Saatcioglu et coll, 2000)	12
Figure I -13 : Confortement – Renforcement d'éléments existants par collage de Tissus de Fibres de Carbone (TFC) – Exemples d'application. [Sika, 2003a].	13
Figure I -14 : Domaine d'application du renforcement par matériaux composites [Fukuyama et al 2000]	13
Figure I -15 : Facilité de mise en œuvre des tissus de fibres	14

## Figures Chapitre II

Figure II - 1 : Un composite	18
Figure II - 2 : Utilisation des composites dans le génie civil [Seible et al 2003], [Anido et Karbhari 2000]	19
Figure II - 3 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort ([Berreur et al., 2002])	21
Figure II - 4 : Tissue de fibres de verre [J.Li et Hadi 2003]	21
Figure II - 5 : Fibres de carbone [J.Li et Hadi 2003]	24
Figure II - 6 : Fabrication par carbonisation des fibres hautes résistance (HR)	24
Figure II - 7 : Fabrication par carbonisation des fibres hautes résistance (HM)	24
Figure II- 8 : Fibres d'aramide...	27
Figure II - 9 : Elément composants de la forme linéique	28
Figure II.10 : Elément composants de la forme surfacique	29
Figure II.11 : Elément composants de la forme multidimensionnelle	29
Figure II-12 : Utilisation des renforts selon leur forme de présentation	30
Figure II.13 : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice	31
Figure II.14: les différents charges et additifs utilisés dans les résines	35
Figure II-15 : Moulage au contact...	36
Figure II-16: Schéma du procédé de fabrication de PRF par Enroulement filamentaire [Module ISIS n°2.	36
Figure II-17: Schéma du procédé de pultrusion (GangaRao et al. 2007).	37

Figure II-18: Courbes contrainte-déformation en traction typiques pour différentes armatures en PRF actuellement disponible [Module ISIS n°2]	38
Figure II-19 : Déformations à la rupture des matériaux constitutifs des PRF quand la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle de la fibre. [Module ISIS n°2]	40
Figure II-20 : Déformations à la rupture des matériaux constitutifs des PRF quand la déformation à la rupture de la matrice est supérieure à celle de la fibre. [Module ISIS n°2]	40
Figure II-21 : Changement de la résistance des PRF et de la résistance d'adhésion avec l'augmentation de la température (Les courbes ne sont pas définitives.)	43
Figure II-22 : Processus de renforcement en PRF (lamelle) sur une poutre de pont	45
Figure II-23 : Trois types d'ancrage utilisés dans les études expérimentales : (a) par des chemises en U et des bandes en acier (Spadea et coll. 1998); (b) par des chemises en U et des verrous en acier (Mukhopadhyaya et coll.1998)	46
Figure. II-24: Near-surface-mounted bars	47
Figure. II-25 : Configurations de renforcement à l'aide de PRF (Khalifa et coll. 1998)	47/48
Figure. II-26 : Exemples de renforcement des poteaux par matériaux composite	49
Figure. II-27 : Méthodes typiques d'enveloppement de poteaux en béton armé par « PRF »	49
Figure II-28 : Renforcement de poteau: dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la compression	49
Figure. II-29 : Plan du renforcement du composite (Pantelidis et coll. 2000)	50
Figure. II-30 : Renforcement de la jonction poteau-poutre	50
Figure. II-31 : Système d'ancrage pour les feuilles en fibres de carbone à la base du mur (Lombard et al,2000).	51
Figure. II-32 : Dalle en béton armé renforcé dans les deux sens par des lamelles croisé	51

### Chapitre III

Figure. III-1. Assortiment de produits de PRF en tissu utilisés pour le la réhabilitation des poteaux en béton	58
Figure III -2: Classification des fibres [JBDPA1999], [ Fukuyama et al	59
Figure III-3 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées	60
Figure III-4 : Déformation de la matrice autour d'une fibre soumise à une contrainte de traction	61
Figure III-5 : Description des procédés de renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (a) ou par collage de lamelles composite (b) (ici deux lamelles superposées)	62
Figure III-6 : stratification au contact	62
Figure III - 7 : Etapes de mise en œuvre du renfort textile a fibres continues [JBDPA1999], [Fukuyama et al 2000]	63
Figure III-8a : Configurations du Confinement discontinu pour les poteaux	64
Figure III-9 : Enroulement filamentaire [Monti 2003]	65
Figure III - 10 : Chemisage par coque en PRF [Monti 2003], [Teng et al 2002]	66
Figure III - 11 : Section efficace du béton confiné et évaluation du coefficient d'efficacité de confinement $K_e$	68
Figure III - 12: Mise en œuvre d'une mèche d'ancrage (procédé Freyssinet)	69
Figure III - 13: Système d'ancrage testé par [Eshwar et al., 2008] – méthode NSMB	69

Figure III - 14 : Système d'ancrage testé par Nagy Gyorgy et al. ([Nagy Gyorgy et al., 2005])	70
Figure II -15 : Système de renforcement testé par Huang et Chen ([Huang et Chen, 2005])	70
Figure II -16 : Schéma de principe de mise en place des lamelles ancrées sur un poteau...	70
Figure II -17 : Géométrie des ancrages développés (cotes en mm)	71
Figure II -18 : Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge uniaxiale de compression	71
Figure II -19 : Mécanisme de rupture d'un béton enveloppé d'un FRP soumis à une charge de compression	72
Figure II -20 : Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP à base de fibres de verre et de résine époxy soumis à une charge de compression [Lau et al., 2001]	72
Figure III -21: Influence de la résistance initiale du béton sain sur la résistance axiale du béton renforcé pour différents confinements [Berthet et al. 2005]	73
Figure III -22: Confinement d'un poteau circulaire	73
Figure III -23: Zone de confinement dans une section rectangulaire...	75

## Chapitre IV

Figure IV - 1: Propagation des fissures en fonction du chargement axial (longueurs normalisés où $a$ = moitié de la longueur initiale de la fissure, $L$ = accroissement de la fissure) [Wu 2002]	79
Figure IV - 2 : Propagation des fissures en fonction du chargement axial pour des bétons de différentes ténacités ( $KIC = 0.3 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ pour mortier, $0.6$ béton ordinaire, et $1.2$ pour BHR) [ Wu 2002]	80
Figure IV -3: Evolution du coefficient de dilatation en fonction de la déformation axiale pour différents niveaux de confinement (gauche, confinement par PRF de verre E ; droite, confinement par PRF de carbone) [Harries et Kharel 2003]	81
Figure IV - 4: a) Instrumentation ; b) mode de rupture [Shahawy et al 2000]	82
Figure IV - 5: Représentation des résistances et déformations considérées	83
Figure IV-6: Diagramme contrainte-déformation pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]	84
Figure IV-6: Diagramme contrainte-déformation pour le béton 41,4 MPa [Shahawy et al 2000]	84
Figure VI - 7: Déformation volumétrique pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]	85
Figure IV - 8: Déformation volumétrique pour le béton 41,4 MPa [Shahawy et al 2000].	85
Figure IV - 9: Taux de dilatation pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]	86
Figure IV - 10: Taux de dilatation pour le béton 41,4MPa [Shahawy et al 2000]	86
Figure IV - 11: Détails des instruments de mesure	88
Figure IV - 12: Diagrammes contraintes-déformation du béton C 40 confiné par PRFC [Berthet et al 2005]	88
Figure IV - 13: Diagrammes contraintes-déformation des bétons C20, C50, C100 et C 200 confinés par PRFC et PRFV [Berthet et al 2005]	89
Figure IV - 14: Evolution du coefficient de Poisson apparent (dilatation) en fonction du nombre de plis [Berthet et al 2005]	90
Figure IV – 15 : Rupture des éprouvettes en béton ordinaire confiné par PRFC et PRFV [Berthet et al 2005]	91
Figure IV – 16 : Rupture des éprouvettes en BHP confiné par PRFC [Berthet et al 2005]	91

Figure IV - 17 : Relation entre le gain en déformation et le niveau de confinement [Berthet et al 2005]	92
Figure IV - 18 : Influence du module de confinement sur la pente de la 2ème branche [Berthet et al 2005]	92
Figure IV - 19 : Influence du module de confinement sur la distribution des déformations [Berthet et al 2005]	93
Figure IV - 20 : Influence de la résistance du béton non confiné sur l'efficacité du confinement [Berthet et al 2005]	93
Figure IV - 21 : Influence de la résistance du béton non confiné sur le coefficient d'efficacité du confinement [Berthet et al 2005]	94
Figure IV - 22: Configurations des renforcements (acier et PRF) [Lin et Liao 2004]	94
Figure IV - 23: Modes de rupture des éprouvettes en béton armé (a et b) et en béton confiné par PRF de verre(c) [Lin et Liao 2004]	95
Figure IV - 24: Béton effectivement confiné dans un poteau en béton armé (confinement par acier) pour ; a)une section circulaire ; b) une section rectangulaire [Mander et al 1988 a]	96
Figure IV - 25: Béton effectivement confiné dans un poteau en béton armé (confinement par acier) pour une section carrée	97
Figure IV - 26: Dimensions des éprouvettes [Cole et Belarbi 2001]	97
Figure IV - 27: Arrondi des angles	98
Figure IV - 28: Comportement typique du béton confiné par PRF [Cole et Belarbi 2001]	99
Figure IV - 29: Relation contrainte normalisée-déformation pour les poteaux confinés par PRF ; a) d'aramide ;b) de carbone ;c) de verre [Cole et Belarbi 2001]	100
Figure IV - 30: Effet de l'arrondi des angles sur la résistance en compression des éprouvettes confinées avec 2plis de PRF de carbone [Cole et Belarbi 2001]	101
Figure IV - 31: Effet du rapport géométrique sur la résistance en compression des éprouvettes confinées avec 2plis de PRF de carbone [Cole et Belarbi 2001]	102
Figure IV - 32: Essai de fendage (gauche) et éprouvette endommagée (gauche) [G.Li et al 2003 a].	103
Figure IV - 33: Résistance en compression des éprouvettes sans conditionnement [G.Li et al 2003 ]	103
Figure IV - 34: Résistance en compression des éprouvettes avec conditionnement [G.Li et al 2003 ]	103
Figure IV - 35 : Enceinte de conditionnement [Toutanji et Deng 2002]	105
Figure IV - 36 : Résultats des spécimens conditionnés et non conditionnés avec les deux matrices [Toutanji 1999]	105
Figure IV-37: Comparaison entre les éprouvettes confinées par PRFA exposées ou non aux cycles mouillage / séchage [ Toutanji et Deng 2002]	107
Figure IV-38: Comparaison entre les éprouvettes confinées par PRFA exposées ou non aux cycles gel / dégel [ Toutanji et Deng 2002]	107

## Chapitre V

Figure V – 1 : Diagramme $\sigma - \epsilon$ pour le béton confiné par acier [Mander et al 1988]	115
Figure V – 2 : Mécanisme de confinement par PRF pour des sections circulaires	116

Figure V - 3 : Déformations circonférentielles ultimes du renfort en PRF [Lam et Teng 2003]	118
Figure V- 4 : Classification des diagrammes contrainte-déformation pour le béton confiné par PRF : a) type ascendant ; b) type descendant avec $f'_{cu} > f'_{co}$ ; c) type descendant avec $f'_{cu} < f'_{co}$ [Lam et Teng 2003]	119
Figure V - 5 : Diagrammes $\sigma - \epsilon$ typiques pour le béton confiné par PRF [Lam et Teng 2003]	120
Figure V - 6 : Déformation volumétrique pour les 5 spécimens confinés par PRF de carbone [Lam et Teng 2003]	121
Figure V - 7 : schéma indiquant la non-uniformité du confinement dans le cas des sections rectangulaires/carrées	121
Figure V - 8 : Rupture du renfort aux angles [Cole et Belarbi 2001]	122
Figure V - 9 : Diagrammes $\sigma - \epsilon$ typiques pour les sections carrées confiné par PRF de carbone [Teng et al 2002]	122
Figure V - 10 : Modification des sections rectangulaires avec et sans arrondi des angles (droite et gauche respectivement) [Teng et al 2002]	123
Figure V - 11 : Caractéristiques d'une ellipse	123
Figure V - 12 : Diagrammes $\sigma - \epsilon$ typiques pour les sections elliptiques confiné par PRF de carbone ; a) axe secondaire ;b) axe principal [Teng et al 2002]	124
Figure V- 13 : Effet des types d'essais pour caractériser le PRF sur la régression : a) 1er groupe caractérisé avec l'essai de traction sur éprouvette plane ;b) 2ème groupe caractérisé par dilatation d'éprouvettes annulaire ;c) propriétés données par le fournisseur [Lam et Teng 2002]	131
Figure V - 14 : Comparaison entre les éprouvettes dont le PRF a été stratifié sur le béton (bonne adhérence) et les tubes en PRF remplis de béton (mauvaise adhérence) [Lam et Teng 2002]	133
Figure V - 15 : Comparaison entre les différents modèles de résistance en utilisant les résultats des éprouvettes du 1er groupe [Lam et Teng 2002]	134
Figure V - 16 : Comparaison entre le modèle de résistance de Lam et Teng et les résultats expérimentaux [Lam et Teng 2002]	136
Figure V- 17 : Modèle contrainte-déformation de Karbhari et Gao pour le béton confiné par PRF [Karbhari et Gao 1997]	140
Figure V- 18 : Modèle contrainte-déformation de Samaan et al pour le béton confiné par PRF	141
Figure V - 19 : Effet de la source des propriétés du PRF ;a) essai de traction sur éprouvettes planes ; b) traction circonférentielle obtenue par dilatation d'éprouvettes annulaires ; c) propriétés donnés par le fournisseur [Teng et al 2002]	145
Figure V - 20 : Effet du type de PRF sur la déformation axiale ultime du béton ;a)éprouvettes stratifiées avec du PRF de carbone ;b) tubes en PRF de verre remplis de béton [Teng et al 2002]	147
Figure V - 21 : Croisement de le 2ème branche avec l'axe des contraintes [Teng et al 2002]	147

Figure V - 22 : Rapport des allongements circonférentiels du PRF en fonction du niveau de confinement [Teng et al 2002]	148
Figure V - 23 : Comparaison entre les prédictions des modèles $\sigma$ - $\epsilon$ et les résultats expérimentaux [Teng et al 2002]	151/152
Figure V - 23 : Modèle $\sigma$ - $\epsilon$ de Lam et Teng pour le béton confiné par PRF [Teng et al 2002]	153
Figure V - 24 : Comparaison entre les prédictions du modèle $\sigma$ - $\epsilon$ de Lam et Teng et les résultats expérimentaux [Teng et al 2002]	155/156
Figure V - 25 : Section effective du béton confiné	158
Figure V - 26 : Comparaison entre la relation gain de résistance-coefficient de confinement modifié pour les deux coefficients de forme ;a) modèle de la section effectivement confinée ;b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]	160
Figure V - 27 : Comparaison entre la relation coefficient d'efficacité du confinement--coefficient de confinement modifié pour les deux coefficients de forme ;a) modèle de la section effectivement confinée ;b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]	161
Figure V - 28 : Comparaison entre les deux coefficients de forme et les résultats expérimentaux de Lam et Teng ; a) modèle de la section effectivement confinée ;b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]	162
Figure V - 29 : Modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire [Teng et al 2002]	163
Figure V - 30 : Performance du modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire avec leurs résultats expérimentaux [Teng et al 2002]	163
Figure V - 31 : Performance du modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire avec tous les résultats expérimentaux [Teng et al 2002]	164
Figure V - 32 : Comparaison des différents modèles pour la prédiction de $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	165

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I - 1 :</b> Comparatif des méthodes de renforcement	11
<b>Tableau II - 1 :</b> Différents types de verres textiles [tech ing2]	22
<b>Tableau II - 2 :</b> Propriétés d'un stratifié en fibres de verre selon le TVF [Saadatmanesh 1997]	23
<b>Tableau II - 3 :</b> Propriétés physique et mécaniques des fibres de carbone [HANCOX, 1981]	25
<b>Tableau II - 4 :</b> Propriétés en traction comparées des fibres de carbone commercialisées [tech ing1.	27
<b>Tableau II - 5 :</b> Propriétés en traction des fibres d'aramide [tech ing5]	26
<b>Tableau II- 6:</b> Comparaison qualitative entre Verre-E, Carbone-H.T et fibres Aramide D'après Meier et Winistorfer (1995)	27
<b>Tableau II-7 :</b> Performances comparés des différents types d'architecture des renforts	30
<b>Tableau II-8 :</b> Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées	33
<b>Tableau II-9 :</b> Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et hermodurcissables (Gay D.,1991)	33
<b>Tableau II-10:</b> Synthèse de l'utilisation des résines et renforts non renforcées	34
<b>Tableau II-11:</b> Propriétés mécaniques typiques des composites GFRP, CFRP et AFRP	38
<b>Tableau II-12 :</b> Comparaison qualitative de trois principaux types de PRF [module ISIS n°2]	38
<b>Tableau III - 1 :</b> Caractéristiques mécaniques des composites [Teng et al 2002]	60
<b>Tableau III - 2 :</b> Comparaison entre les méthodes de mise en oeuvre [Teng et al 2002]	66
<b>Tableau IV - 1 :</b> Résultats des éprouvettes confinées par PRFC	83
<b>Tableau IV - 2 :</b> Propriétés des fibres utilisées	87
<b>Tableau IV - 3:</b> Propriétés des matériaux utilisés	94
<b>Tableau IV- 4:</b> Résultats des écrasements des différentes éprouvettes	95
<b>Tableau IV – 5 :</b> Propriétés des fibres utilisées	98
<b>Tableau IV – 6 :</b> Configurations des éprouvettes	98
<b>Tableau IV - 7:</b> Caractéristiques mécaniques des matériaux	102
<b>Tableau IV - 8:</b> Propriétés des fibres	104
<b>Tableau IV - 9:</b> Résultats après conditionnement des éprouvettes confinées et non confinées	106
<b>Tableaux V – 1 :</b> Rapports entre les allongements ultimes des PRF lors d'essais de confinement et de traction sur éprouvettes planes en composite	117
<b>Tableau V – 2 :</b> Résultats statistiques de la base de données expérimentales [Lam et Teng 2002]	132
<b>Tableau V – 3 :</b> Performances statistiques des modèles de résistance pour le 1 <sup>er</sup> groupe [Lam et Teng 2002]	
<b>Tableau V - 4 :</b> Effet du type de fibre sur le coefficient d'augmentation de déformabilité du béton [Teng et al 2002]	144
<b>Tableau V - 5 a :</b> Eprouvettes en béton confiné par PRF de carbone	149

<b>Tableau V - 5 b :</b> Tubes en PRF de verre remplis de béton	150
<b>Tableau V - 6 :</b> Comparaison du modèle $\sigma$ - $\varepsilon$ de Lam et Teng avec les résultats expérimentaux	154
<b>Tableau V- 7 :</b> Expressions de contrainte et de la déformation axiale maximum pour le béton	165
<b>Figure V - 33 :</b> Performance du modèle de coefficient de forme de Teng et Lam pour les poteaux de section elliptique avec les résultats expérimentaux [Teng et Lam 2002]	166
<b>Tableau V- 8 :</b> $k_1$ , $k_g$ , $k_s$ et $f_l$ recommandés pour le dimensionnement	167

# NOTATIONS

$A_e$	: la surface du béton effectivement confiné
$A_c$	: la surface totale du béton enveloppée par le composite «PRF»
$A_g$	: la surface de la section du béton avec les coins arrondis
$C_j$	: module de confinement
$C$	: la cohésion du matériau béton
$D$	: degré d'endommagement du spécimen en béton
$d$	: diamètre de la section du béton
$E_{co}$	: module d'élasticité du béton non confiné
$\tilde{E}_{co}$	: module d'élasticité du béton non confiné après endommagement
$E_{PRF}$	: module d'élasticité en traction du composite «PRF»
$E_{fib}$	: module d'élasticité en traction des fibres du matériau composite
$E_{rés}$	: module d'élasticité en traction de la matrice (résine) du matériau composite
$E_a$	: module d'élasticité de l'acier d'armatures
$E_2$	: la deuxième pente de la courbe contrainte-déformation bilinéaire ascendante
$f'_{co}$	: résistance à la compression axiale maximale du béton non confiné
$f'_{cc}$	: résistance à la compression axiale maximale du béton confiné par composite «PRF»
$f'_{cu}$	: résistance à la compression axiale ultime du béton confiné par composite «PRF»
$f_l$	: pression de confinement latérale due au composite «PRF»
$f'_l$	: pression de confinement latérale effective due au composite «PRF» dans un confinement partiel
$f_{l,eff}$	: pression de confinement latérale effective due au composite «PRF» dans un confinement totale
$f_{l,r}$	: pression de confinement latérale réelle due au composite «PRF»
$f_{PRF}$	: résistance à la traction du composite «PRF» dans la direction circonférentielle
$f_t$	: la contrainte axiale de transition du béton confiné dans la courbe contrainte-déformation
$f_o$	: la contrainte plastique de référence à l'intersection de la deuxième pente de la courbe contrainte-déformation avec l'axe des contraintes
$f_l/f'_{co}$	: rapport de confinement
$f_{l,eff}/f'_{co}$	: rapport de confinement actuel
$f'_{cc}/f'_{co}$	: rapport de résistance
$f_{ct,ax}$	: la résistance à la traction axiale
$f_{ct,sp}$	: la résistance à la traction par fendage
$fc_{28}$	: résistance à la compression du béton à 28 jours
$fc_j$	: résistance à la compression du béton le jour des essais
$f_e$	: limite élastique de l'acier des armatures
$f_r$	: résistance à la rupture de l'acier des armatures
$k_1$	: coefficient d'efficacité de confinement
$k_2$	: est le coefficient d'augmentation de déformation axiale du béton
$k_e$	: coefficient empirique d'efficacité de confinement
$k_g$	: le coefficient d'espacement des bandes «PRF»
$k_s$	: facteur de forme de la section
$L/D$	: élancement géométrique
$m$	: coefficient de confinement modifié
$n$	: paramètre de forme de la courbe contrainte-déformation qui contrôle la courbure dans la zone de la transition
$N$	: nombre de couches du matériau composite
$R_c$	: rayon de courbure des coins d'une section carrée ou rectangulaire
$S_{PRF}$	: espacement vertical entre les bandes du composite «PRF»
$t_{PRF}$	: épaisseur totale de l'enveloppe composite
PRF	: polymères renforcés de fibres
PRFV	: polymère renforcé de fibres de verre
PRFC	: polymère renforcé de fibres de carbone
PRFA	: polymère renforcé de fibres d'aramide

## Lettres grecques

$\varepsilon_{co}$	: déformation axiale maximale du béton non confiné
$\varepsilon_{cc}$	: déformation axiale maximale du béton confiné par composite «PRF»

$\varepsilon_{cu}$	: déformation axiale ultime du béton confiné par composite «PRF»
$\varepsilon_r$	: déformation radiale (circonférentielle) du béton confiné par composite «PRF» au moment de la rupture
$\varepsilon_t$	: déformation axiale de transition du béton confiné dans la courbe contrainte-déformation
$\varepsilon_{fu}$	: déformation ultime de traction du composite «PRF»
$\varepsilon_r / \varepsilon_{cc}$	: ratio de dilatation
$\rho_{PRF}$	: rapport volumétrique du composite «PRF»
$\rho_{sc}$	: rapport de la section des armatures longitudinales à la section du béton
$\phi_{prf}$	: facteur de résistance du composite «PRF»
$\phi_c$	: facteur de résistance du béton
$\sigma_c$	: la contrainte axiale du béton confiné
$\sigma_1$	: la contrainte de compression ultime du béton
$\sigma_3$	: la contrainte de confinement latéral due à l'enveloppe composite (équivalente à $f_l$ )
$\varphi^\circ$	: l'angle interne de frottement du matériau béton
$\nu_c$	: coefficient de Poisson du béton non confiné
$\nu_a$	: coefficient de Poisson de l'acier d'armatures
$\nu_{PRF}$	: coefficient de Poisson du matériau composite «PRF»
$\nu_{fib}$	: coefficient de Poisson des fibres du matériau composite
$\nu_{rés}$	: coefficient de Poisson de la matrice (résine) du matériau composite
$\lambda$	: élancement mécanique

# Chapitre 1

## Renforcement des structures en béton armé

## I – 1. INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, de nombreux ouvrages en génie civil construits nécessitent des opérations d'entretien, de consolidation ou de maintenance. Ces opérations visent à redonner à l'ouvrage ce qu'il a perdu (aspect, portance,...) suite à un vieillissement, ou autre cause. Les dégradations des bâtiments et des ouvrages d'art, peuvent être attribuées à l'environnement tel que la corrosion des aciers, carbonatation du béton, attaque des chlorures et sulfates, et le cycle gel dégel ; à une mauvaise conception ou exécution, à un manque de maintenance, à des circonstances accidentelles tel que le séisme ou le choc mécanique,... ; ces causes font que les structures n'ont plus leurs performances initiales. De même, une nouvelle affectation (augmentation du trafic routier, changement de fonction pour les bâtiments...etc.) ou un changement de réglementation imposent de nouvelles charges auxquelles la structure devra s'adapter. Aussi, on aura besoin de moderniser une structure pour un nouveau design ou tout simplement pour de nouvelles extensions.

Toutefois le dimensionnement des structures en béton armé prends compte de différents paramètres (fluage, retrait, effet de la température, séismes...etc.), ce qui se traduit par une augmentation des performances et de la durabilité, mais ce ne fut pas le cas il y a de cela quelques décennies, il en résulte qu'une grande partie du parc immobilier et des infrastructures se trouve vulnérable, spécialement au risque sismique en raison de ses impacts indéniablement lié à notre existante ,et nos besoins de civilisation moderne.

En effet, l'effondrement et les sévères dommages subis par les structures en béton armé (bâtiments et ponts) lors des séismes passés, y compris le séisme de San Fernando en 1971, le séisme de Loma Prieta en 1989, le séisme de Northridge, en Californie 1994, le séisme de Kobe au Japon en 1995, les séismes de 1999 en Turquie et le séisme de Jiji, et aussi les derniers séismes dévastateurs, de magnitude ( $M_w$ ) supérieure à 7, comme au Chine (Sichuan, mai 2008,  $M_w = 7,9$ ), à Haïti (janvier 2010,  $M_w = 7$ ), au Chili (février 2010,  $M_w = 8,8$ ), au Japon (nord-est de Honshu, mars 2011,  $M_w = 9$ ), ou encore en Nouvelle-Zélande Christchurch, février 2011,  $M_w = 7,1$ ) et les derniers séismes (le Pacifique 2010-2013) avec une  $M_w = 8$ , ont mis en évidence la nécessité de renforcer les structures n'ayant pas les performances requises vis à vis de l'action sismique [Seible et al 1997], [Teng et al 2002], [Cheng et al 2003], [Mortazavi et al 2003], [Parvin et al 2002], [Saadatmanesh 1997], [Saatcioglu et Yalcin 2003]. Certains pays tels que le Japon et les États-Unis, ont développé d'important programme d'évaluation des vulnérabilités et des solutions de réhabilitation adaptées aux nouveaux règles parasismique de construction qui s'attachent à garantir un bâti fiable et sécuritaire vis-à-vis des séismes .

L'Algérie situé dans la plaque Africaine qui assiste à une pression subméridienne du domaine nord-africain, peut tirer une leçon très importante des tremblements de terre passés ; Chlef (octobre 1980,  $M_w = 7,3$ ), Boumerdés (Mai 2003,  $M_w = 6,8$ ), occasionnant de lourde pertes de vie, en raison d'importante densité urbanistique et surtout de la qualité parfois médiocre de

plusieurs édifices qui ne répondent même pas aux règles en vigueur de construction et qui n'ont jamais subi de programme de maintenance (selon les opérations d'expertise du CTC et le CGS). De cela, démolir et reconstruire selon les nouvelles normes se trouve une solution trop onéreuse, demande beaucoup de temps, sans compter les désagréments occasionnés aux habitants, industriels ou usagers. Une autre alternative qui forme un des plus grands défis des opérateurs de génie civil dans ce XXI<sup>ème</sup> siècle est sans doute la réhabilitation (renforcement et réparation) des ouvrages existants.

Le guide [SETRA, 2011]), et Zacek ([Zacek, 2004]) par son ouvrage dresse un panorama des problèmes liés à la réhabilitation parasismique des bâtiments et présente différentes approches permettant d'effectuer un diagnostic de vulnérabilité aux séismes et d'adopter une stratégie de réhabilitation pertinente. Une illustration parfaite de la pertinence de cette démarche réside dans la résistance d'un grand nombre d'infrastructures suite à l'application de nouvelles règles parasismique et de diverses techniques de mise en conformité (réhabilitation) des structures existantes via les matériaux traditionnels tels que le béton et l'acier en plus des nouveaux matériaux dits composites qui se révèle être une technique de plus en plus répandue et répond aux préoccupations immédiates des professionnels du bâtiment et des travaux publics.

### **Qu'est-ce qu'une réhabilitation ?**

Le terme réhabilitation peut s'appliquer à des opérations de réparation ou de renforcement ; la réparation vise à retrouver les performances initiales d'une structure endommagée, alors que le renforcement consiste en une amélioration des performances d'une structure, endommagée ou non, pour répondre à de nouveaux besoins ou pour répondre à un besoin de remise en conformité avec des niveaux de sécurité exigés par les différentes réglementations en vigueur, dont les exigences en déformabilité et en résistance ; la technique de renforcement vient pour donner à la structure ou l'élément de structure ce qu'il a perdu dans des conditions non prévues à l'origine.

Un des renforcements les plus importants sont les renforcements parasismiques de différentes natures comme l'augmentation de la résistance aux efforts latéraux, l'augmentation de la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects ([SETRA, 2011]), afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes.

Le renforcement des structures se fait par plusieurs méthodes. En complément des procédés classiques (béton projeté, béton fibré projeté, collage de plats métalliques, précontrainte additionnelle...), une autre technique curative qui a séduit très rapidement les acteurs de la construction est l'utilisation du collage in situ des matériaux composites apparue depuis les années 90, cette technique permet de palier aux inconvénients des méthodes conventionnelles, et cela avec des performances supérieures.

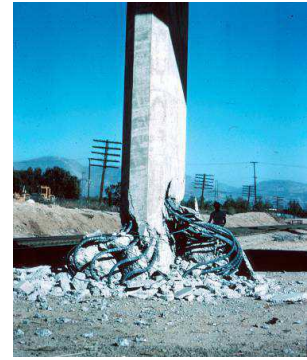
Les principales applications de renforcement d'élément de structure ont porté sur le renforcement ou le confinement des poteaux en béton armé comme étant des éléments critiques dans la tenue des ouvrages surtout aux risques sismiques. Ces éléments majeurs peuvent subir de sévères dommages (**Figure 1 -1, 2,3**), manifestés suivant trois (03) classes :

- a- des fissures fines (horizontales ou diagonales) sans fracture du renforcement
- b- des fissures larges, perte du béton d'enrobage mais, sans désordre au niveau du ferrailage.
- c- Perte du béton, ouverture des cadres et flambement des barres longitudinales (Figure 1-4).

De cela les poteaux nécessitent en plus d'un calcul de renforcement mais aussi de prévoir leur comportement une fois renforcés et soumises à de diverses sollicitations ; Il est donc essentiel d'être en mesure d'analyser l'efficacité d'une telle solution de renforcement.



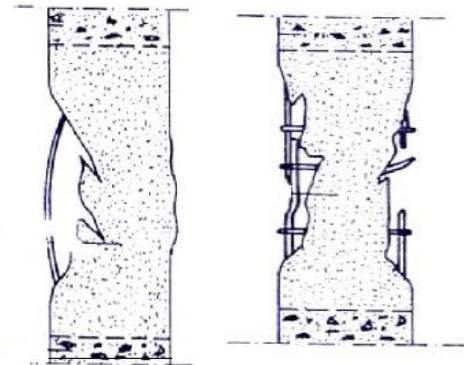
**Figure 1-1** : Rupture d'une pile par flexion-cisaillement (Kobe, 1995), d'après [Priestley et al., 1996].



**Figure 1-2** : Rupture par manque de confinement (San Fernando, 1971)



**Figure 1-3** : Rupture en flexion des piles de pont de la Hanshin expressway (Kobe, 1995)



**Figure 1-4** : poteau endommagé:  
a) flambement des barres,  
b) ouverture des cadres.

## I – 2. LA NECESSITE D'UNE REHABILITATION

La nécessité de renforcement doit être justifiée en premier lieu par l'identification des ouvrages pouvant recevoir ces opérations, notamment par la notion d'importance (indice d'importance « I ») définie selon deux critères : l'importance des ouvrages et l'importance des itinéraires ([SETRA, 2011]). L'Eurocode 8-2 pour les ouvrages neufs utilise l'indice d'importance compris entre 0 et 150 varie, pour classer les ouvrages en trois catégories de :

- Catégorie I :  $0 \leq I < 50$  : ponts jugés non essentiels à la communication.
- Catégorie II :  $50 \leq I < 100$  : les ponts routiers et ferroviaires.

- Catégorie III :  $100 \leq I < 150$  : importance est critique pour le maintien des communications

Pour les catégories II et III, le recours à un renforcement structurel peut être nécessaire pour des causes préventif, ou le risque est plus élevé, comme les hôpitaux et les barrages.

De cela, les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier. Selon (Vizuete 1998), les causes plus fréquentes sont:

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure :
  - ✓ changement d'usage de la structure,
  - ✓ augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel),
  - ✓ installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution :
  - ✓ armature insuffisante ou mal placée,
  - ✓ mauvais matériaux,
  - ✓ dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- Rénovation des structures anciennes :
  - ✓ prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),
  - ✓ connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période,
  - ✓ vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.
- Changement de la forme de la structure :
  - ✓ suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
  - ✓ ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- Dégâts dans la structure :
  - ✓ corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
  - ✓ impacts contre la structure,
  - ✓ incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service :
  - ✓ diminuer les déformations et flèches,
  - ✓ réduire la contrainte des armatures,
  - ✓ diminuer l'ouverture des fissures.
- Impacte du séisme et ses répliques :
  - ✓ intégration de nouvel aléa sismique (nouveau zoning) aux règles de construction,
  - ✓ les séismes étant source de nombreux désordres structurels.
  - ✓ L'interaction sol-structure, nécessite d'être en mesure d'apporter un certain niveau de réhabilitation à la structure, notamment pour garantir une augmentation de sa ductilité ainsi qu'une meilleure résistance aux efforts latéraux.

### **I – 3. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT OU DE REPARATION APPLICABLE AUX POTEAUX EN BETON ARME :**

Selon le degré de l'endommagement qui se manifeste au niveau des poteaux, différentes techniques peuvent être utilisées dans le but de palier au problème posé.

Le renforcement des structures en béton armé en général, fait le plus souvent appel à l'ajout de matière et plus rarement à l'ajout de forces [*Calgaro et Lacroix*], [*Cheng et al 2003*], dans la catégorie « ajout de matière », les techniques les plus utilisées sont :

- Chemisage en béton armé
- Chemisage en acier (profilé)
- Tôles collées

Récemment, et spécialement après les séismes de Northridge (1994), Kobé (1995), Taiwan (1999) [*Mortaz vi et al 2003*], [*JBDPA1999*], [*Fukuyama et al 2000*], [*Y.F.Li et al 2003*], [*Teng et al 2002*], [*Parvin et al 2002*] s'est développée une nouvelle technique de renforcement par ajout de matière ; dite les matériaux composites, remplaçant les matériaux conventionnels.

#### **I – 3 – 1. Chemisage en béton ou en béton armé :**

Le procédé est classique dont l'efficacité a été largement vérifié par l'expérience. Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des section par la mise en œuvre d'un nouveau ferrailage après dépose du béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage du nouveau béton qui sera mis en œuvre après la confection du coffrage [*Teng et al 2002*], [*Calgaro et Lacroix*], [*Monti 2003*] (**figure I-5 et I-6**) , ceci est appliqué sur tous le périmètre de l'élément primitif, puis remplir les interstices sans mode de vibration d'un micro-béton, autocompactable par coulage ou pompage.

L'adhérence entre le béton existant et le nouveau béton est due essentiellement la liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm [*Eurocod8*],

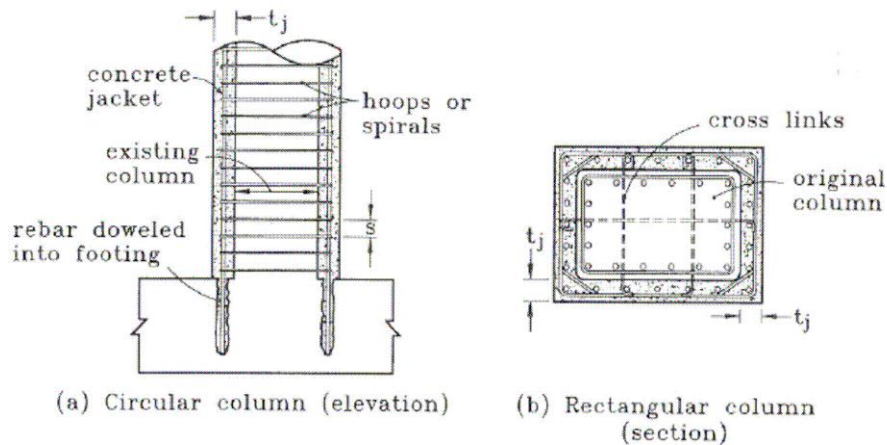
Dans ce procédé l'action de confinement est plus efficace dans le cas de poteaux à section circulaire qu'à de section rectangulaire. Généralement, au-delà d'un ratio longueur/largeur de la section de 2, l'efficacité du confinement est largement diminuée (les tensions radiales se concentrent de manière excessive sur les coins).

*Avantage :*

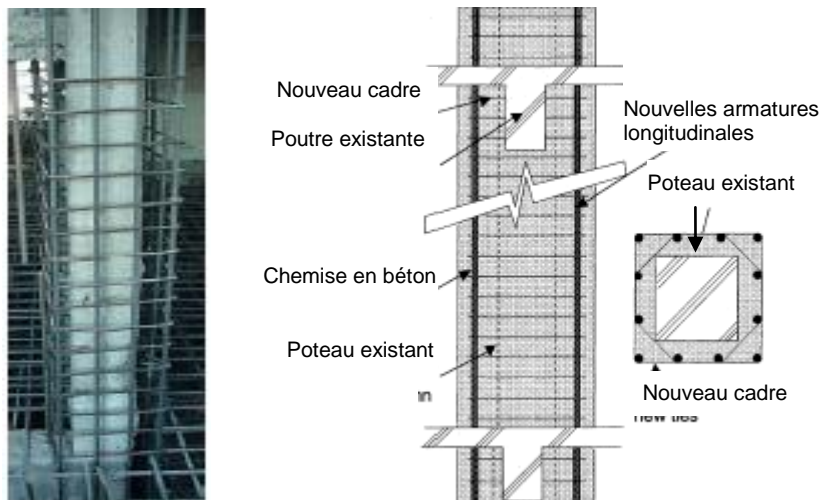
- Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés.
- Main d'œuvre peu qualifiée.
- Augmentation de la rigidité des éléments concernés.
- Une adhérence entre l'ancien et le nouveau béton du faite qu'ils sont de mémé nature.

*Inconvénients :*

- Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure, donc des charges sismiques.
- Cette augmentation de section, crée une différence de masse à l'étage concerné (cas de bâtiment) d'où une excentricité entre le centre de masse et le centre de torsion
- La différence de masse à l'étage concerné par le chemisage (cas de bâtiment) crée une excentricité entre le centre de masse et le centre de torsion
- Augmentation de rigidité entre étage menant à une augmentation des décentes de charge de la structure, ce qui induit finalement à un redimensionnement des fondations
- Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques.
- Nécessité de mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue.
- Transport des matériaux, nouveau coffrage, et des difficultés dans la mise en œuvre.
- Cette méthode reste très contraignante du point de vue exécution d'où la nécessité de coffrages, et une mise en œuvre souvent difficile, par le manque d'espace.

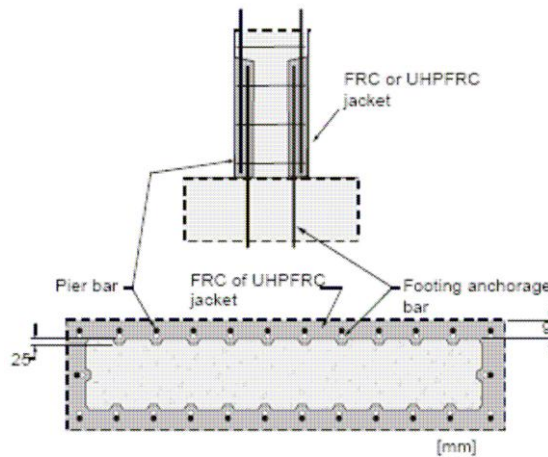


**Figure 1 -5 :** Chemisage béton de poteaux de section rectangulaire ([Priestley et al., 1996]).



**Figure I -6 :** Chemisage en béton armé [Fukuyama et al 2000]

Aussi des études très récentes dans l'utilisation de chemisage en béton ont été développées surtout pour la mise aux normes parasismiques, citant l'utilisation des bétons fibrés à Très Haute Performance (BTHP). L'expérimentation est réalisée par ([Massicotte et Boucher-Proulx, 2010]) (**Figure 1-7**), portant sur la réhabilitation de piles de ponts rectangulaires à l'aide d'un chemisage BTHP fibré sans augmentations de section.



**Figure 1-7** : Détails du chemisage en BTHP fibré ([Massicotte et Boucher-Proulx, 2010]).

### I – 3- 2. Renforcement par chemisage en acier :

Généralement, cette technique de cage en acier n'est pas largement utilisée, mais plus rapide à mettre en œuvre, et moins encombrante que le chemisage en béton armé, il consiste soit à souder des cornières longitudinales avec des aciers plats transversaux autour des poteaux rectangulaires, avec possibilité de précontrainte (chauffage des aciers transversaux entre 200 et 400°C avant de les souder aux cornières [Monti 2003]) (**figure I-8**), soit à la mise en place de deux demi cylindres ou deux demi rectangles/elliptique autour des poteaux de section circulaire ou rectangulaire respectivement, qui seront soudés et on procédera par la suite au coulage d'un mortier pour remplir le vide entre la chemise et le béton qui est généralement compris entre 1 et 2 cm et qui sert à solidariser l'ensemble (**figure I-9**). Il faut aussi prendre le soin de laisser un espace de 2,5 à 5 cm entre la chemise et les nœuds (ou semelles) afin d'éviter de charger la chemise axialement, ce qui pourrait entraîner leurs flambage [Fukuyama et al 2000], [Foo, Naumoski et Saracoglu 2001], [Monti 2003]. Il est à noter, que même si les chemisages rectangulaires s'avèrent efficaces pour un renforcement au cisaillement, les performances en termes de confinement et d'amélioration de la ductilité en flexion sont beaucoup moins bonnes que celles obtenues par des chemisages elliptiques ([Sun et al, 1993]).

*Avantage:*

- Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton.
- Bonne performances des éléments renforcés (bonne ductilité en flexion).
- Faible augmentation des sections.

*Inconvénients :*

- Coûts relativement élevé.

- Nécessité de soudure donc de main d'œuvre qualifiée.
- Problème de corrosion donc entretien nécessaire.
- Poids des chemises et difficulté de découpage.
- Augmentation de la rigidité en flexion ce qui n'est pas souhaité dans le cadre du renforcement parasismique (augmentation de l'énergie restituée élastiquement), sauf cas particuliers (corrosion ou manque initial des armatures longitudinales).
- Transport des matériaux.

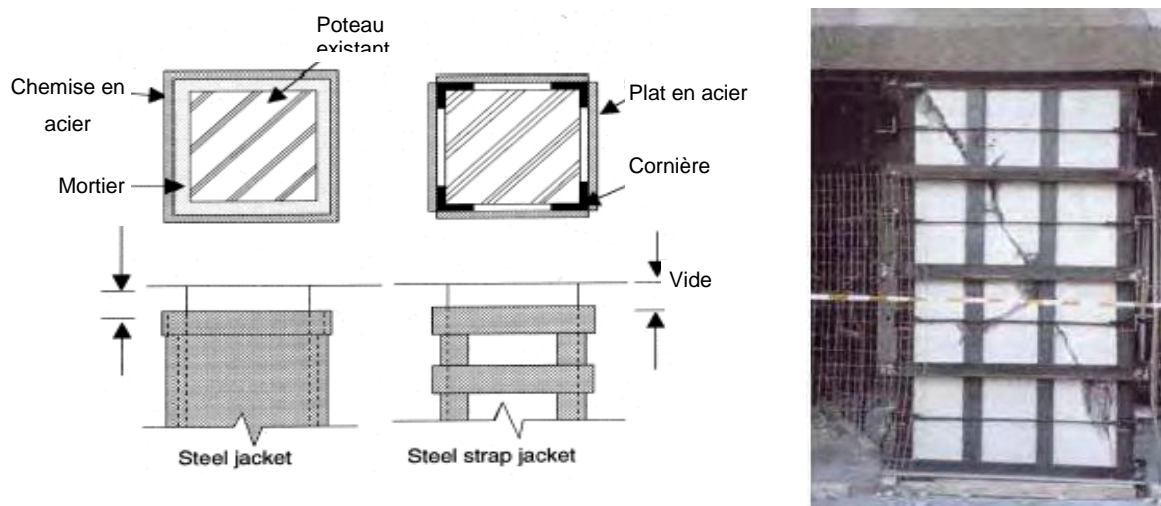


Figure I - 8 : Chemisage en acier [Fukuyama et al 2000], [Monti 2003].

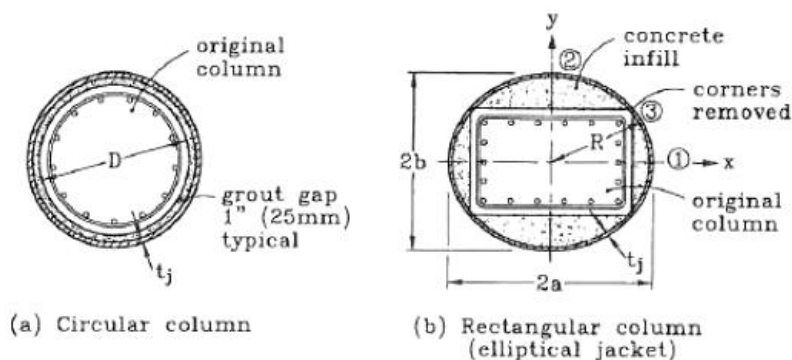


Figure I - 9 : Chemisage en acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire ([Priestley et al., 1996]).

### I – 3 – 3. Renforcement par tôles collées :

Ce procédé a été initiés par [ Krieg et al 1966], [Hermite et Bresson 1967], et [Burkhardt et al 1975], consiste au collage (par colle époxydique) en sous face des dalles ou des poutres de tôles en acier qui ont entre 3 et 5 mm d'épaisseur [Calgaro et Lacroix] ; dont la proposition a été d'augmenter la capacité portante des éléments structuraux .Cette technique fut d'abord utilisée dans le domaine du bâtiment industriel (Bresson 1971), puis très répandu dans le domaine des ouvrages d'art , tout en l'améliorant par d'autres dispositions tel que la perforation des tôles collées [Freyssinet International,1977](figure I-10).

*Avantage:*

- Jouent à la fois le rôle de coffrage et d'armatures externes.
- il n'exige que des interventions mineures sur la structure;
- il est d'un emploi souple ;
- les renforts sont peu encombrants.

*Inconvénients :*

- Flexion locale des tôles au voisinage des fissures qu'elles recouvrent
- Nécessité de la préparation des tôles en usine (découpage, pré assemblage, abattage des arrêtes et sablage).
- Les longueurs sont limitées impliquant la nécessité des joints.
- Utilisation juste après la préparation, sinon prendre des mesures de protection des tôles.
- Le transport doit être avec soin de façon à ne pas entraîner de défauts de planéité, de rayure ou de choc.
- Application d'une pression (vérins) de 4 KPa durant toute la durée de polymérisation.
- Les surfaces à renforcer doivent être planes.
- La durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose de problème (Ballinger et al. 1993, Demers et Neale 1999).
- Mauvaise tenue au feu et au choc.
- Présence de bulles d'air.
- Tôles lourdes, manutention pénible.
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation (Luyckx 1999).



**Figure I - 10 :** Tôles collées ; (droite) difficulté de manutention ; (gauche) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées (Freyssinet) [tech ing3].

### **I – 3 – 4. Le renforcement au moyen de profilés métalliques :**

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

*Avantage :*

- la rapidité de réalisation in-situ
- les pièces métalliques sont préfabriquées
- L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

*Inconvénients :*

- L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles



*Figure I - 11 : Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.*

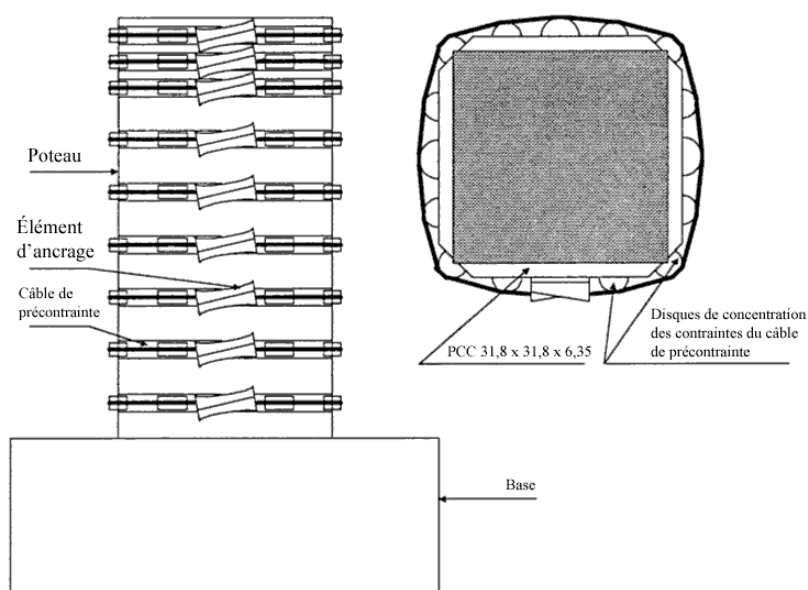
Une étude comparative rapide des différentes techniques de renforcement classique [Raphaëlle SADONE 2012] résulte le tableau suivant :

Type de chemisage	Chemisage acier	Chemisage béton armé	Chemisage BTHP fibré
<b>Avantage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible augmentation des sections</li> <li>- Assez rapide à mettre en œuvre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- peu coûteux</li> <li>- ne nécessite pas de main d'œuvre hautement qualifiée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bonnes performances en termes de dissipation d'énergie</li> <li>- très bonne durabilité</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- coût élevé</li> <li>- nécessité d'une main d'œuvre qualifiée</li> <li>- sensibilité à la corrosion ; entretien régulier nécessaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- augmentation de la section (et de l'encombrement) et du poids de la structure</li> <li>- corrosion et autres pathologies du béton armé</li> <li>- nécessité de coffrages ; travaux assez longs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- augmentation du poids de la structure</li> <li>- nécessite une main d'œuvre qualifiée</li> <li>- coût élevé</li> </ul>

*Tableau I -1 : Comparatif des méthodes de renforcement*

### I – 3 – 5. Technique d'amélioration des poteaux en béton armé par la pré contrainte transversal :

On peut également améliorer la performance des éléments structuraux au moyen d'une précontrainte externe qui assure une armature supplémentaire ainsi qu'une pression latérale active. Une nouvelle technique mise au point à l'Université d'Ottawa et appelée Retro-belt (Saatcioglu et coll., 2000), qui utilise des bandes d'acier faite de toron à haute résistance placées autour des poteaux. (La **figure I-12**). Cette technique augmente la résistance au cisaillement et à la flexion. Elle est efficace et peut être nettement plus économique que l'utilisation de chemises d'acier, et l'installation d'un tel système occasionne une gêne moindre pour les occupants des bâtiments.

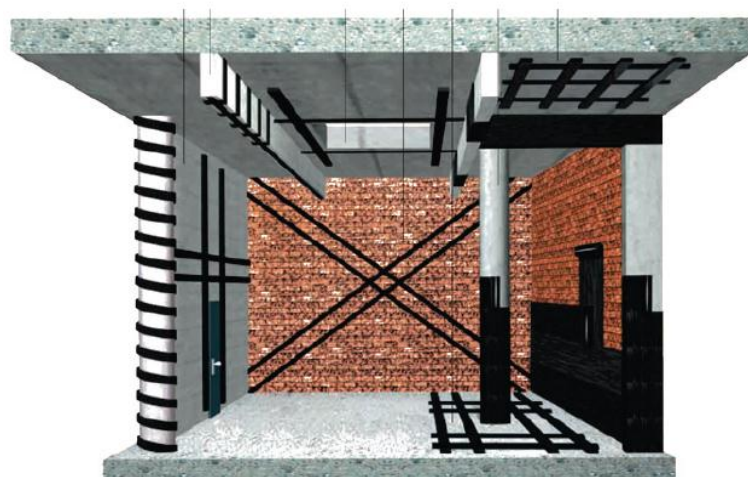


**Figure I-12** : Renforcement d'un poteau carré à état de cisaillement dominant (Saatcioglu et coll, 2000)

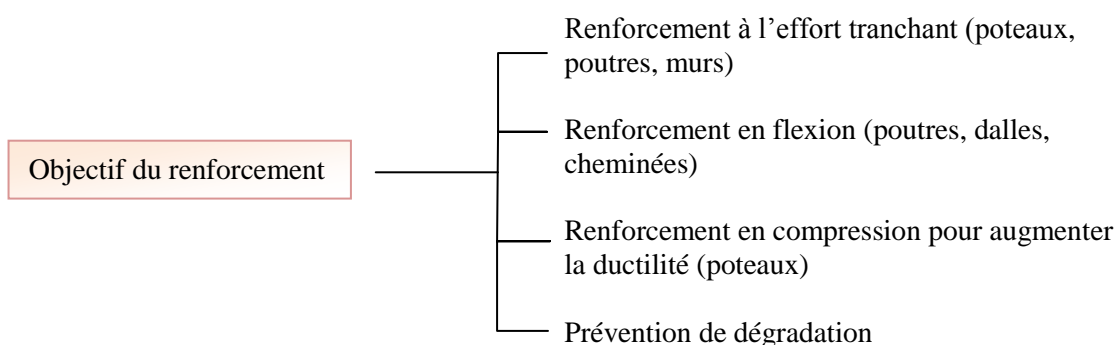
### I – 1 – 6. Renforcement extérieur par matériaux composites :

Le développement de la science des matériaux a permis l'apparition du concept de «composite». Les matériaux composites sont devenus une alternative à l'utilisation des tôles d'acier, en raison de leurs meilleures caractéristiques mécaniques, ce qui justifie leur utilisation sur un plan économique. L'utilisation de ce nouveau procédé, est considérée comme une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art.

Le rôle des matériaux composites dans le domaine de renforcement des structures est incontestable, cependant ce système de renfort est composé de deux produits : un adhésif de résine époxy et un renfort constituées de polymères renforcés de fibres de plusieurs nature (le carbone, le verre, ou l'aramide). Actuellement, on peut dire que cette technique est utilisable pour le renforcement de tous les éléments structuraux ou non structuraux (poteaux, poutres, dalles, murs, nœuds poteau-poutre, maçonnerie...etc.) **figure I – 13**, et cela en vue d'un renforcement en flexion, à l'effort tranchant ou en compression. Les objectifs du renforcement sont résumés dans la **figure I – 14**.



**Figure 1-13 :** Confortement – Renforcement d'éléments existants par collage de Tissu de Fibres de Carbone (TFC) – Exemples d'application. [Sika, 2003a]



**Figure 1 - 14 :** Domaine d'application du renforcement par matériaux composites [Fukuyama et al 2000].

Cette technique ne peut être efficace sauf si elle était accompagnée de bonnes études quantitatives calculant les taux d'endommagement du béton pour pouvoir quantifier les quantités de matériaux de renforcement et de réparation nécessaires pour une bonne réhabilitation, permettant ainsi d'améliorer :

- ✓ la capacité portante,
- ✓ la rigidité,
- ✓ la durée de vie de la structure,
- ✓ la durabilité de la structure, exposée aux attaques environnementales.

*Avantage:*

- Anisotropie des composites, on peut l'exploiter en disposant les fibres dans la direction des sollicitations, ce qui permet de faire travailler le composite d'une manière optimum (maximum de résistance pour un poids minimum) [ACSMC 1990].
- Caractéristiques mécaniques élevées en traction avec un poids propre faible, on parle alors de module spécifique élevé (rapport résistance-poids).
- Une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- Une résistance 10 fois plus optimale que les platines(ou l'acier).

- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone)
- Un faible coefficient de conductivité thermique.
- Insensibles aux produits chimiques « mécanique » comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.
- Mise en forme des pièces courbes ou de géométries complexes (adaptation aux supports).
- Mise en œuvre facile : facilité de découpe des fibres, moulage facile, légèreté du renfort...etc. (voir **figure I - 15**)
- Pas de pression pendant le durcissement.
- Outillage simple.
- Durcissement rapide.
- Faible épaisseur : permet l'entraînement en traction par la résine sans flexion parasite.
- Une bonne résistance à la corrosion chimique et environnementale.
- Bonne résistance au choc, à la fatigue et à l'usure.
- Bonne absorption des vibrations
- Pas de problème magnétique,
- Stabilité dimensionnelle.
- Très peu d'entretien.



*Figure I - 15 : Facilité de mise en œuvre des tissus de fibres*

*Inconvénients:*

- Comme en général les PRF affichent un comportement linéaire jusqu'à la rupture, l'absence de plateau sur leur courbe de contrainte-déformation serait de nature à causer une rupture fragile et soudaine des plaques, facteur indésirable du point de vue du dimensionnement.
- Une anisotropie très marquée
- Vieillissement sous l'action répétée de l'eau et de la température
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- L'incompatibilité des résines époxy avec certains supports,
- Le comportement limité des résines époxy à hautes températures, surtout si la température de transition vitreuse est dépassée, ou l'émission de fumées est parfois toxiques pour certaines matrices.

- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.
- La perte d'esthétisme de la structure ou du bâtiment suite au renforcement.

Des points précédents, trois apparaissent comme particulièrement préjudiciables. Tout d'abord le problème du feu : la dégradation du FRP réduira la capacité portante du bâtiment, ce qui peut provoquer l'effondrement de ce dernier. Ensuite, l'incompatibilité entre l'époxy et certains substrats : ainsi, le FRP ne peut s'appliquer sur la pierre naturelle. À tout ceci il faut ajouter le désagrément visuel que peut provoquer un traitement par FRP sur un bâtiment enrichissant le patrimoine culturel. La somme de ces inconvénients démontre la nécessité de chercher une matrice inorganique qui remplacerait le polymère sans susciter de problèmes similaires ; à noter un nouveau produit en cours de développement appelé Textile Reinforced Mortar (TRM) qui a montré des résultats pleinement satisfaisants.

#### **I – 4. OBJECTIFS DE L'ETUDE**

Vu que l'utilisation des matériaux composites est récente dans notre pays, il est intéressant en premier lieu de voir qu'est-ce qu'un matériau composite appelé aussi PRF (Polymère Renforcé de Fibres), quels sont les différents types et techniques de mise en œuvre, et cela d'un point de vue général, en second lieu on s'intéressera au cas du renforcement dans le domaine du génie civil. Dans ce travail, on abordera en particulier, la contribution du confinement extérieur par le matériau composite FRP sur le comportement des poteaux en béton armé, qu'ils soient endommagé ou pas, notamment les gains de résistance en compression du béton et en déformations axiales et radiales. L'objectif scientifique de ce projet est d'éclaircir les champs d'application du procédé d'FRP vis-à-vis des poteaux en béton armé sollicités, ainsi une analyse critique porté sur les modèles analytique de dimensionnement les plus pertinente développé par certain auteurs.

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport sont de plus en plus en vieillissement est également sujet de temps à autres à des secousses sismiques dévastatrices (Chlef et Boumerdes). Le volume de travail est en terme d'expertise et de restauration, surtout les dernières opérations de réhabilitation du vieux bâti et des ponts, est par conséquent impressionnant et l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement et la réparation de structures constitue sans aucun doute ce qui se fait de mieux en matière de technologies de réhabilitation et au meilleur rapport coût efficacité.

L'objectif principal étant d'étudier les caractéristiques générales de ces matériaux, le comportement mécanique des poteaux renforcées, les paramètres influents sur le renfort composite, et les méthodes de calcul et de dimensionnement.

## I – 5. STRUCTURATION DE LA THESE :

- **Le chapitre « I »** s'étale dans la compréhension général de la nécessité de réhabilitation des structures en béton ayant subi des dommages ou qui atteint la fin de leur durée de vie utile. Ensuite un bref exposé des différents techniques de renforcement applicable aux poteaux, tout en s'intéressant à la problématique de l'utilisation des matériaux composites, comme une nouvelle alternative du confinement externe.
- **Le chapitre « II »** s'intéresse à la définition macroscopique des matériaux composite employé dans le domaine de génie civil, notamment dans le confinement des poteaux en béton armé. Aussi, un exposé général de leurs constituants, leurs différents modes de fabrication et de mise en œuvre, ainsi que leurs multiples applications sur les éléments structurels.
- **Le chapitre « III »** est réservé pour définir la technique de confinement par matériaux composite appliqué spécialement dans les poteaux en béton armé tout en décrivant un panorama des effets apporté par ce matériau.
- **Le chapitre « IV »**, selon une revue de littérature, expose des expériences jugé les plus pertinentes dans la procédure du confinement des poteaux par PRF, tout en indiquent l'apport de cette technique innovante sur l'amélioration du comportement des poteaux en béton armé, ainsi que les limites d'utilisation de ces matériaux décliné par le mode de rupture tout en atteignant les sollicitations maximum.
- **Le chapitre « V »**, et sur la base des expériences exposé au chapitre précédent, un bilan des modèles destiné pour le calcul et la détermination des lois du comportement des poteaux en béton armé confiné par les matériaux composite, avec une description détaillé des paramètres influant ces derniers. Un modèle simplifié basé sur le modèle de Teng est proposé comme une perspective.

## Chapitre II

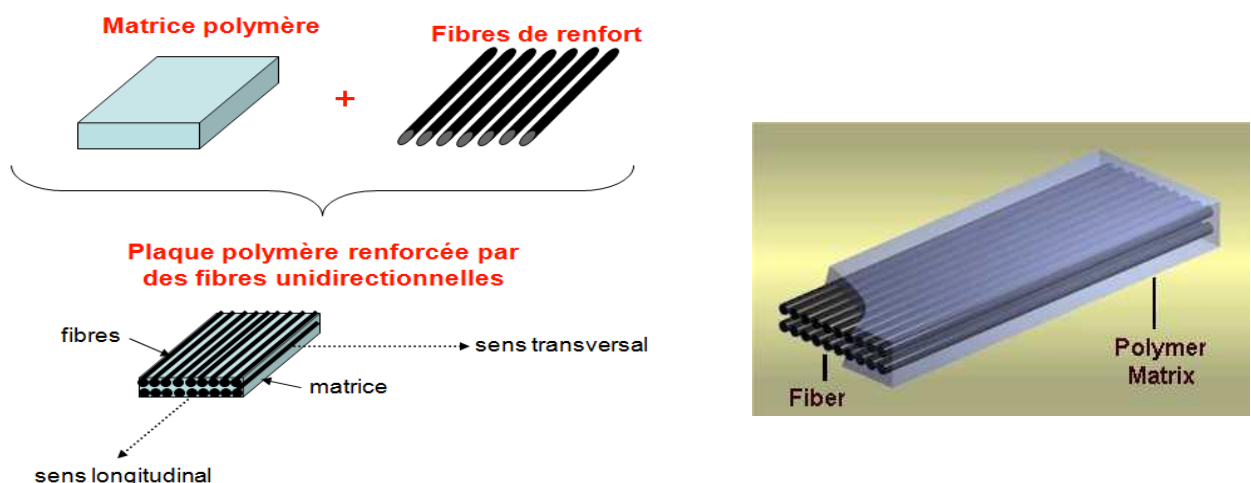
# Introduction aux matériaux Composites

## II – 1. INTRODUCTION :

Un matériau composite résulte d'un assemblage intime d'au moins deux corps non miscibles à structure différente dont les qualités individuelles se combinent en donnant un matériau hétérogène et anisotrope ou les performances globales sont améliorées. (Weiss J., Bord C.,1983).

L'intérêt d'un matériau composite est de combiner les avantages des constituants pour obtenir un matériau plus performant que les constituants pris isolément. Leur utilisation remonte à des âges très reculés, les anciens égyptiens utilisèrent l'argile et la paille pour construire leurs maisons [Anido et Karbhari 2000]. De nos jours, les matériaux composites sont composés d'une matrice organique et d'une structure de renfort pouvant se présenter sous forme de particules, de mats, de fibres courtes, longues ou continues. Les polymères renforcés de fibres (PRF) qui sont un sous-groupe de la classe des matériaux composites, forment une alternative très motivante dans les applications de plusieurs secteurs tels que l'aéronautique et la défense, la construction automobile, l'industrie chimique, et pétrochimique et le domaine de génie civil (bâtiments et ouvrages).

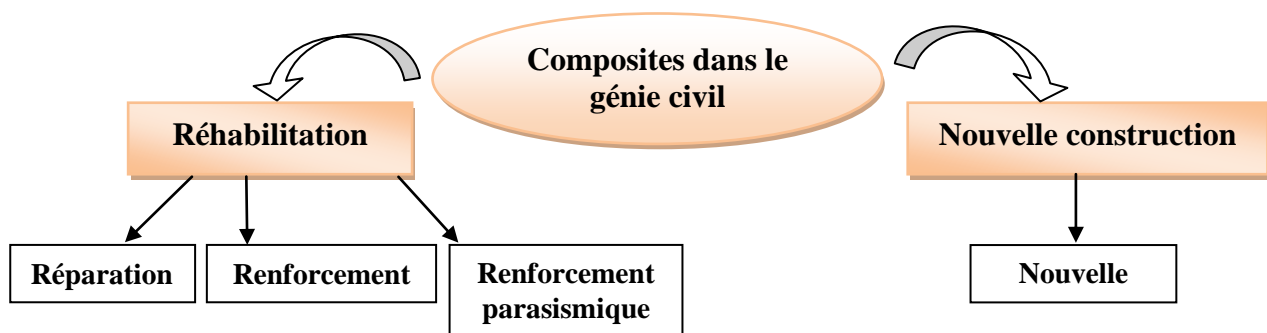
En génie civil, les termes «matériau composite renforcé de fibres», «composite amélioré» ou plutôt «polymère renforcé de fibres (PRF)» sont généralement employés pour désigner les matériaux en fibres synthétiques continues (ou coupées) tels que la fibre de verre, la fibre de carbone et l'aramide ; enchâssée dans une matrice polymère (résine époxyde ou ester) (*Figure II - 1*), ces deux matériaux (matrice et renfort) sont assez différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques. Les propriétés de cette combinaison peuvent être modifiées pour certaines applications, en incluant les charges et les additifs. L'association fibres-matrice, possèdent habituellement un ratio résistance-poids plus élevé que celui des matériaux de construction conventionnels tels que l'acier. Cette combinaison performante donne un matériau hétérogène souvent anisotrope (Berreur L., 2002), c'est-à-dire dont les propriétés (mécaniques ou chimiques) diffèrent suivant les directions.



*Figure II - 1 : Un composite*

Les fibres autant que squelette du matériau jouent le rôle de renfort, elles sont chargées de supporter la majeure partie des efforts appliqués. La matrice est essentiellement un liant qui garantit l'orientation des fibres et les protège des agressions de l'environnement (choc, corrosion, humidité...etc.). Cette association fibres-matrice permet de tirer profit des avantages respectifs de chacune des phases, à savoir grande rigidité et résistance des fibres, faible masse volumique et bonne résistance à la corrosion de la matrice [ACSMC 1990]. Il existe plusieurs types de fibres, de résines et plusieurs procédés de mise en œuvre, qui font qu'avec le même type de fibres, résine mais en changeant le procédé de mise en œuvre, on obtient des composites avec des propriétés mécaniques complètement différentes, et cela même sans jouer sur l'orientation des fibres, cela est essentiellement dû au taux volumique en fibres (TVF) dans le composite, vu que les performances mécaniques du composite sont étroitement liés à celles des fibres (Teng et al. 2002, Carolin 2003).

Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques requises, la résistance à la chaleur ou à l'eau ? ou même la méthode de mise en œuvre. Le domaine d'application des matériaux composites est résumé dans la **figure II-2**.



**Figure II - 2 :** Utilisation des composites dans le génie civil [Seible et al 2003], [Anido et Karbhari 2000].

Les matériaux composites appartenant à la famille des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la construction. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, lamelles pultrudées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux ([Keller et al., 2005]) ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton ([ACI Committee 440, 2010c]). D'une manière générale, ces produits peuvent toutefois être distingués selon deux grandes familles (Eniafe-Eveillard M., 2009) :

- Les matériaux de « grande diffusion » (**GD**), à base principalement de fibre de verre, et qui représentent 95 % des composites utilisés du fait de leur coût compatible avec une production en grande série ;
- Les matériaux composites de « hautes performances » (**HP**), présentant des propriétés mécaniques plus élevées mais avec un coût unitaire plus important. Les matériaux composites à base de fibres de carbone se situent dans cette catégorie.

Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres.

Les propriétés globales des PRF qui sont confiées par les propriétés de leurs deux composants, dépendent de quatre points essentiels, notamment :

- ✓ de la fraction volumique de fibres
- ✓ l'orientation des fibres,
- ✓ du type de matrice utilisé,
- ✓ de la méthode de fabrication.

## II – 2. MATERIAU

### II – 2- 1. FIBRES DE RENFORT :

Les fibres constituent le principal élément résistant du FRP; cette ossature conçue jusqu'à 90 % en volume de filaments appelée renfort; elle assure ainsi la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Ces renforts sont souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques) constitués par plusieurs centaines/milliers de filaments de diamètres variant de 5 à 15  $\mu\text{m}$ , traité dans des machines textiles (mèches) ; leurs formes industrialisées sont des filaments décomposés en fil de base et en mèche, sinon des renforts sous forme de semi-produit. Elles fournissent la résistance et la rigidité au matériau composite. Cependant la fonction mécanique du renfort doit être préalablement définie, car le positionnement de la fibre définit une direction privilégiée des caractéristiques mécaniques ; ainsi les matériaux composites sont orthotropiques, c'est à dire beaucoup plus efficaces en résistants et rigides dans la direction des fibres.

Les fibres sont généralement choisies pour avoir :

- **une rigidité élevée;**
- **une résistance ultime élevée;**
- une faible variation de la résistance entre les différentes fibres;
- une stabilité lors de la manipulation; et
- un diamètre uniforme.

En addition d'autres critères entre dans le choix des fibres, notamment ; la légèreté, la compatibilité avec les résines, l'adaptabilité aux procédé de mise en œuvre, et les contraintes de coût ainsi que la disponibilité des matériaux constituants.

Les fibres peuvent être longues (continues) ou courtes, Il existe actuellement différents types de fibres, mais les fibres les plus utilisées dans le domaine de la construction, sont les fibres continues de carbone, de verre, et d'aramide (dont la plus connue est le Kevlar®). Chaque fibre de ce qui précède possède des propriétés bien spécifiques qui détermineront leur emploi, et que nous les détaillerons ci-après.

Bien que les fibres carbonées, les fibres de verre, et les fibres d'aramides sont les plus employé dans le domaine de génie civil, d'autres familles de fibres sont développées mais moins utilisé, à citer :

- Bore (Un filament de tungstène)
- Carbure de silicium (tenue en température)
- Trichites
- Fibres synthétiques thermostables
- Autres fibres comme (PBO: Polypara-phenylene-benzo-bis-Oxazole, Dyneema fiber ,PET : Polyethylene Terephthalate /Polyester , Basalt fiber , .....). Ces derniers sont très employés dans le renforcement parasismique.

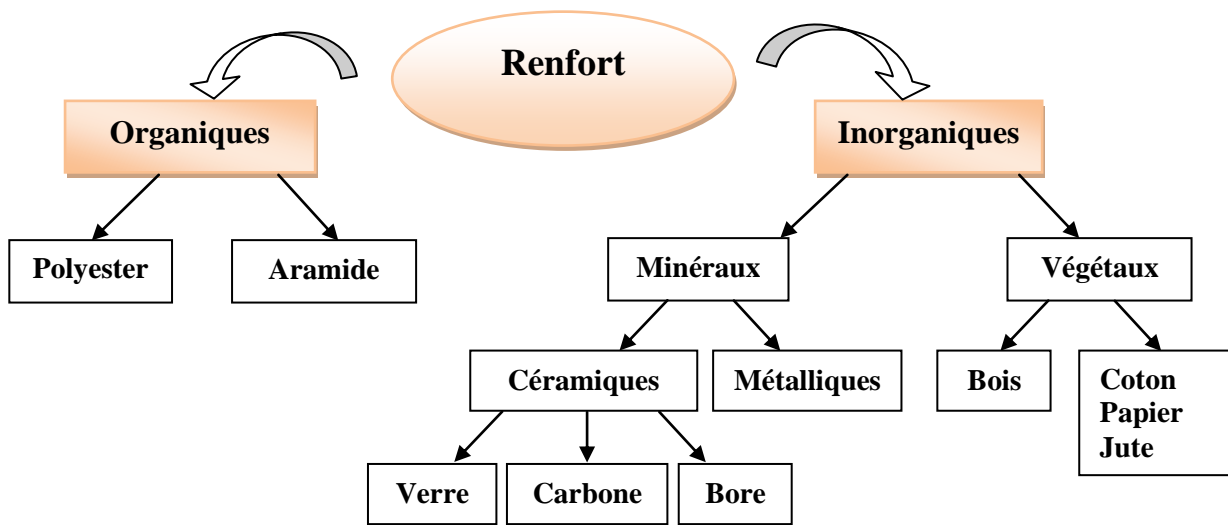


Figure II – 3 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort ([Berreur et al., 2002])

### II – 2 – 1- 1. Fibres de verre :

Les fibres de verre sont généralement produites par un processus appelé la fusion directe, dans lequel les fibres ayant un diamètre de 3 à 25 microns sont formées par un étirement rapide et continu du verre en fusion. ([ISIS n°2]). La fusion se fait sur la matière premiers (silice, alumine, chaux, additifs ...etc) à une température dépassant les 1000°C, les fibres ainsi faites reçoivent un ensimage (protection, amélioration de l'adhésion fibre-matrice), et le produit fini se présente sur plusieurs formes (files, tissus, lamelle, barres .....ex) - figure II-5.

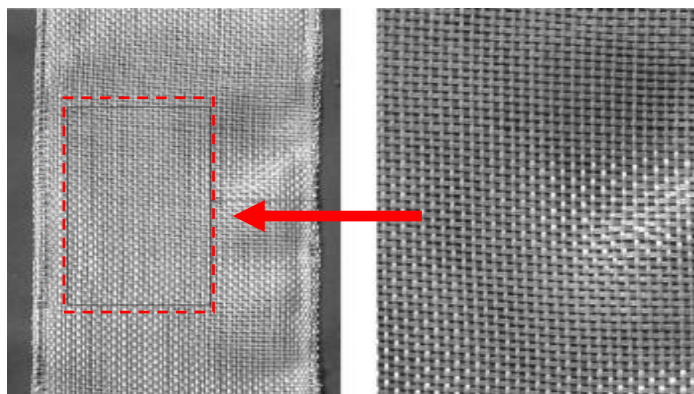


Figure II - 4 : Tissue de fibres de verre [J.Li et Hadi 2003].

Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en **trois qualités** :

- fibres *E* pour les composites grandes diffusions (GD) ;
- fibres *D* pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés) ;
- fibres *R* pour les composites hautes performances (HP).

Les fils de base sont élaborés par assemblage parallèle, sans torsion des monofilaments à la sortie de la filière, pour aboutir soit à des fils continus (fils silionne), soit à des fils discontinus (fils verranne), et sont caractérisés essentiellement par:

- La désignation des verres de type **E** ou **R**.
- Le type du fil : silionne ou verranne.
- Le diamètre des filaments.
- La masse linéique du fil.

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Leurs principales familles, sont résumées dans le **tableau II-1**.

**Tableau II - 1 : Différents types de verres textiles** [tech ing2].

Type	Indications générales	Contrainte à la rupture en traction (Mpa)	Module d'élasticité en traction (Gpa)	Allongement à la rupture en traction (%)
<b>E</b>	À usage général; bonnes propriétés électriques	3 200 à 3 400	72 à 73	4,6 à 4,8
<b>D</b>	Hautes propriétés diélectriques	2 500	55	4,5
<b>A</b>	Haute teneur en alcali	3 100	71	4,4
<b>C</b>	Résistance chimique	3 300	70,3	4,8
<b>S</b>	Haute résistance mécanique	4 600	87	5,4
<b>R</b>	Haute résistance mécanique	4 400	86	5,2
<b>AR</b>	Résistant en milieu basique	3 700	76	4,9
<b>E-CR</b>	Pour usage en milieu acide	3 200 à 3 400	72 à 73	4,6 à 4,8

Les fibres de verre sont caractérisées par leur haute résistance, leur module d'élasticité et leur masse volumique modérés et par leur faible conductivité thermique.

Comme on l'a déjà dit auparavant, le TVF (Taux volumique en fibres) peut changer les caractéristiques du composite, plus il est grand et meilleur est le stratifié (empilation de plusieurs plis de tissus de fibres imprégnés de résine), ce qui est bien logique vue que le composite tire sa résistance des fibres et non pas de la résine, le **tableau II-2** illustre bien ce qui précède.

**Tableau II - 2 : Propriétés d'un stratifié en fibres de verre selon le TVF [Saadatmanesh 1997].**

Taux volumique en fibres ( <b>Vf</b> )	<b>Vf = 25,4 %</b>	<b>Vf = 50,2 %</b>	<b>Vf = 74,0 %</b>
Résistance en traction (Mpa)	281	532	814
Module d'élasticité (Mpa)	9074	17755	29056
Allongement à la rupture (mm/mm)	0,031	0,030	0,028

*Avantages*

- Fibres de faible coût aux propriétés équivalentes à l'aluminium.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Incombustibilité : Matériau minéral, ni fumée, ni vapeur.
- Stabilité dimensionnelle : Insensible aux variations de température et d'humidité.
- Compatibilité avec matrices organiques : compatible avec différents types d'ensimage - liage avec résines synthétiques et minérales.
- Imputrescibilité.
- Faible conductivité thermique: suppression des ponts thermiques dans le bâtiment.
- Perméabilité diélectrique.
- Haute résistance aux agents chimiques.

*Inconvénients*

- Performances surclassées (rigidité, rupture) par rapport aux autres fibres de renfort.
- Peuvent avoir des problèmes de relaxation
- Sensibles à l'humidité, sauf au choix correct d'une matrice qui les protège.
- Etape d'ensimage.
- L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de T° élevées.

**II – 2–1–2. Fibres de carbone :**

Les fibres de carbone sont des fibres synthétiques, de la famille des fibres minérales artificielles (FMA) non siliceuses. Ils ont la propriété d'être très anisotropes avec des caractéristique mécaniques très élevées dans le sens des fibres, elles sont élaborées à partir du processus de la pyrolyse contrôlée (ou pyrolyse commandée) de fibres organiques appelées : « *précurseurs* ».

Selon le type de précurseur, nous aurons les fibres isotropique « *PITCH* » caractérisé par un module d'élasticité élevé ; ou les « *PAN* » (fibres de poly-acrylonitrile) caractérisé par sa résistance ultime qui sont les plus employé. On admet généralement que la pyrolyse du PAN entraîne une cyclisation intra ou intermoléculaire qui aboutit à des cycles carbonés. Les autres précurseurs sont la rayonne, le brai, mais la plupart des polymères filables pourraient être employés avec plus ou moins d'intérêt. En fonction de leur précurseur, les fibres de carbone sont appelées : ex-PAN, ex-brai (**Figure II-5**).

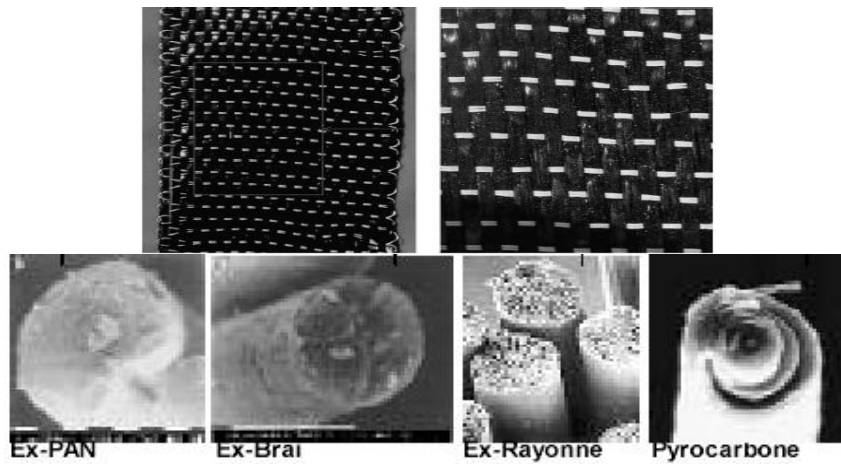


Figure II - 5 : Fibres de carbone [J.Li et Hadi 2003]

Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques (des filaments de diamètre variant entre 5 à 8 microns), assemblés sans torsion (de 1000, 6000 jusqu'à 10000 filaments), et leur font subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface (Figure II-6 et Figure II-7).

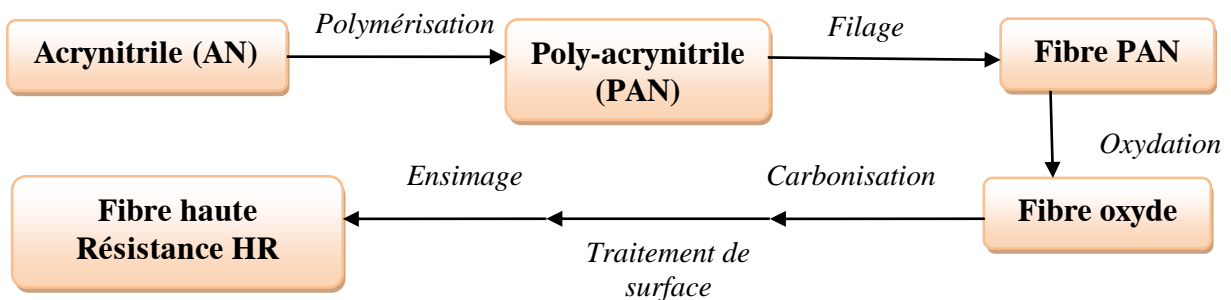


Figure II-6 : Fabrication par carbonisation des fibres haute résistance (HR)

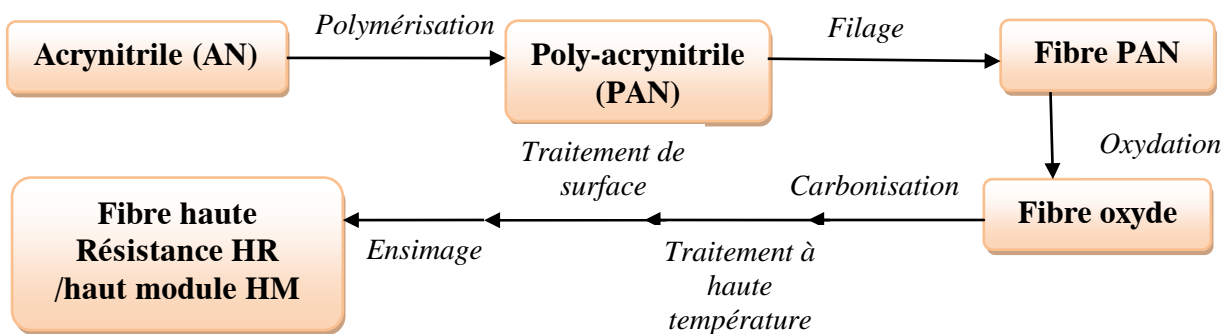


Figure II-7: Fabrication par carbonisation des fibres haute résistance (HM)

A la fin du procédé de fabrication des fibres de carbone, et selon leurs propriété physique et mécanique (Tableau II-3), ils sont classé comme suit [HANCOX, 1981] :

- Module élastique élevé **HM**.
- Module élastique ultra élevé **THM**.

- Haute résistance **HR**.
- Très haute résistance **THR**.

**Tableau II - 3 : Propriétés physique et mécanique des fibres de carbone [HANCOX, 1981] .**

Propriétés	UHM	HM	THR	HR
Densité	>1.95	1.8 - 2.0	1.73 – 1.82	1.73 – 1.82
Résistance à la traction (Mpa)	>1700	>1700	>2760	2000 - 2750
Module d'élasticité (Gpa)	>400	300 - 400	200 – 250	200 – 250
Déformation ultime (%)	0.38	0.60	1.27	1.12
Coefficient de Poisson	-	-	-	-

Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture, ainsi que les modules d'élasticité. Les composites en fibre de carbone possèdent :

- ✓ Une résistance mécanique très grande aussi bien en traction qu'en compression et par suite en flexion ;
- ✓ Un grand rapport rigidité/densité ;
- ✓ Une très bonne tenue en température en atmosphère (température supérieure à 400°C), non oxydante ;
- ✓ Une bonne tenue chimique à la température ambiante ;
- ✓ Une grande résistance à la fatigue ;
- ✓ Un faible coefficient d'expansion thermique (CET) longitudinal ;
- ✓ Une conductivité électrique qui peut provoquer la corrosion galvanique au contact des métaux et alliages ;
- ✓ Une sensibilité aux chocs (rigidité élevée et faible allongement à la rupture) ;
- ✓ Dans le cas d'un stratifié, les fibres de carbone signale un mauvais comportement au choc et l'abrasion ;
- ✓ Haut module d'élasticité, de 200 à 800GPa ;
- ✓ Allongement ultime de 0.3% à 2.5 %.

Les propriétés des fibres de carbone les plus commercialisées sont indiqués dans Le tableau **II-4**.

**Tableau II - 4 : Propriétés en traction comparées des fibres de carbone commercialisées**  
[tech ing1]

Fabricant	Nom commercial	Classe	Module (Gpa)	Résistance à la rupture (Mpa)	Allongement à la rupture %	Précurseur	
Toray (Asie) et Soficar (Europe)	Torayca	T300	HR	230	3530	1,5	PAN
		T300J	HR	230	4210	1,8	
		T400H	HR	250	4410	1,8	
		T700S	HR	230	4900	2,1	
		T800H	MI	294	5490	1,9	
		M40	HM	392	2740	0,7	
		M40J	HM	377	4410	1,2	
		M46J	HM	436	4210	1,0	
		M50J	HM	475	3920	0,8	
		M55J	HM	540	4020	0,8	
		M60J	HM	588	3920	0,7	
Toho Rayon (Asie) et Akzo (Europe)	Tenax	HTA	HR	238	3950	1,5	PAN
		UTS	HR	240	4900	2,0	
	Bestfight	IMA	MI	295	4100	1,4	
		IMS	MI	290	5750	1,9	
		HMA	MI	358	3100	0,6	
		HMS	HM	414	3600	0,7	
Hercules (USA)	Magnumite	AS-2	HR	225	3450	1,3	PAN
		AS-4	HR	235	3900	1,5	
		IM-6	MI	280	5000	1,5	
		IM-7	MI	281	5400	1,6	
		IM-8	MI	303	5400	1,6	
		HMU	MI	360	2760	0,7	
		UHMS	HM	440	3540	0,8	
Amoco Performance products (USA)	Thornel	T-300	HR	231	3450	1,4	PAN
		T-650/35	HR	241	4550	1,7	
		T-650/42	MI	290	5030	1,7	
		T-40	MI	290	5650	1,8	
		T-50	HM	390	2900	0,7	
Mitsubishi Rayon (Asie)	Pyrofil (Asie)	AS30	HR	206	3140	1,5	PAN
		TR40	HR	235	4710	2,0	
		MR40	MI	289	4400	1,5	
		MR50	MI	289	5100	1,7	
		SR40	HM	475	4200	0,9	
	Grafil (USA)	34-700	HR	234	4500	1,9	
Kureha Chemical (Asie)	Kureca	T101F	UG	33	800	2,4	Brai
		T201F	UG	33	700	2,1	
Amoco Performance (USA)	Thornel	P-55 S	HM	390	1900	0,5	Brai
		P-75 S	HM	520	2100	0,4	
		P-100 S	THM	755	2350	0,3	
		P-120 S	THM	825	2350	0,3	

HM : de haut module ;  
 HR : de haute résistance ;  
 MI : de module intermédiaire ;  
 THM : de très haut module ;  
 UG: d'usage général.

### II – 2–1–3. Fibres d’aramide :

Ce sont des fibres synthétiques de polyamide aromatique, fabriqué à partir d’un procédé appelé filage par fusion (Figure II-9), commercialisés par Du Pont de Nemours (États-Unis) sous les noms de Kevlar et Nomex et par Akzo-Enka (Pays-Bas) sous le nom de Twaron. Deux principaux types de fibres sont commercialisés :

- les fibres Haut Module (Kevlar 49 et Twaron HM).
- les fibres standards (Kevlar 29 et Twaron HM 50).

Les premières sont choisies pour la fabrication de stratifiés et les autres pour la réalisation de câbles et cordage, ainsi que dans des stratifiés pour la protection balistique et les casques en concurrence avec le verre R.

Les stratifiés fabriqués avec ces fibres ont une mauvaise tenue en compression, une sensibilité aux températures élevées, à l’humidité et aux radiations « ultraviolet », mais une bonne résistance au choc, en traction, et à la fatigue [tech ing4]. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés.

Leur principale qualité est leur ténacité, c’est pour cela qu’on les utilise pour faire des tendons de précontrainte, leurs propriétés mécaniques sont proches de celles du verre, elles sont résumées dans le **tableau II-5** (comme pour le carbone, selon les fabricants il existe une large gamme de fibres commercialisées).



*Figure II - 8 : Fibres d’aramide*

**Tableau II - 5: Propriétés en traction des fibres d’aramide**[tech ing5]

Type de fibres	Résistance en traction	Module d’élasticité (Gpa)	Allongement à la rupture (%)
Haut module	2760	120	2,4
Haute résistance	3400	73	4,5

### II –2–2. Comparaison des performances des fibres pour le renforcement des structures :

Les composites «PRFC» ont des propriétés supérieures que celles des composites «PRFV», mais ces dernières ont l’avantage d’être moins cher. **Le tableau II-6** établis par Meier et Winistorfer (1995)

donne une comparaison qualitative des différents composites «PRF» couramment utilisés pour les applications de renforcement des structures en béton armé.

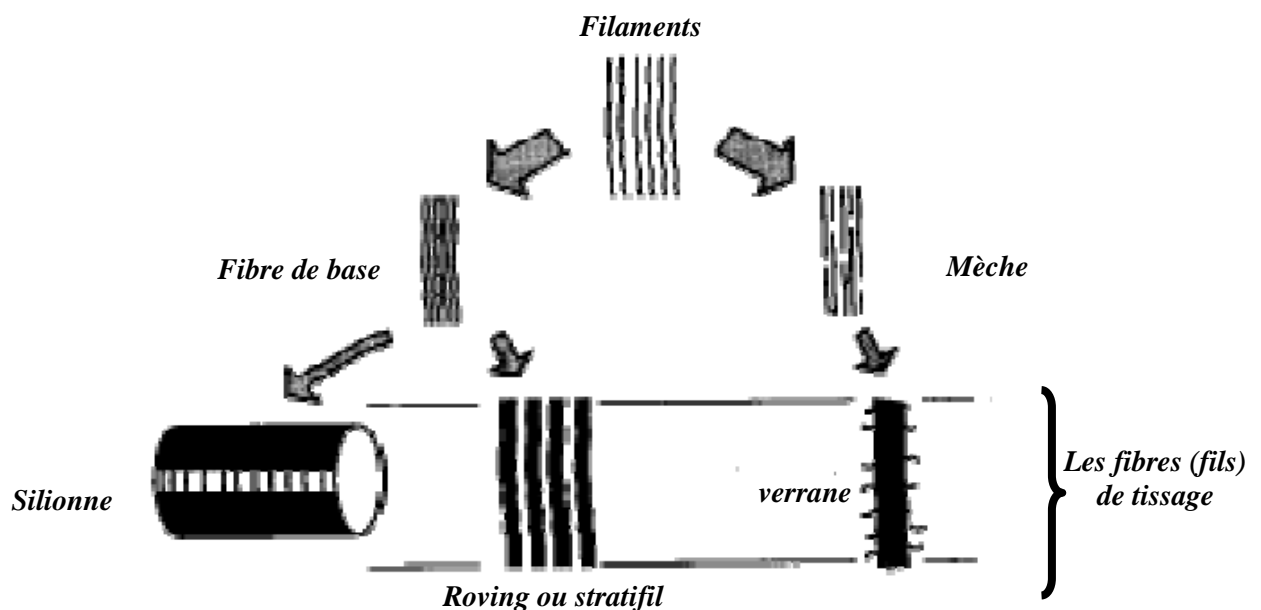
**Tableau II - 6:** Comparaison qualitative entre Verre-E, Carbone-H.T et fibres Aramide D'après Meier et Winistorfer (1995)

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

### II – 2–3. Forme des renforts :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Les renforts se présentent généralement sous diverses formes : linéique, surfacique et structures multidirectionnelles.

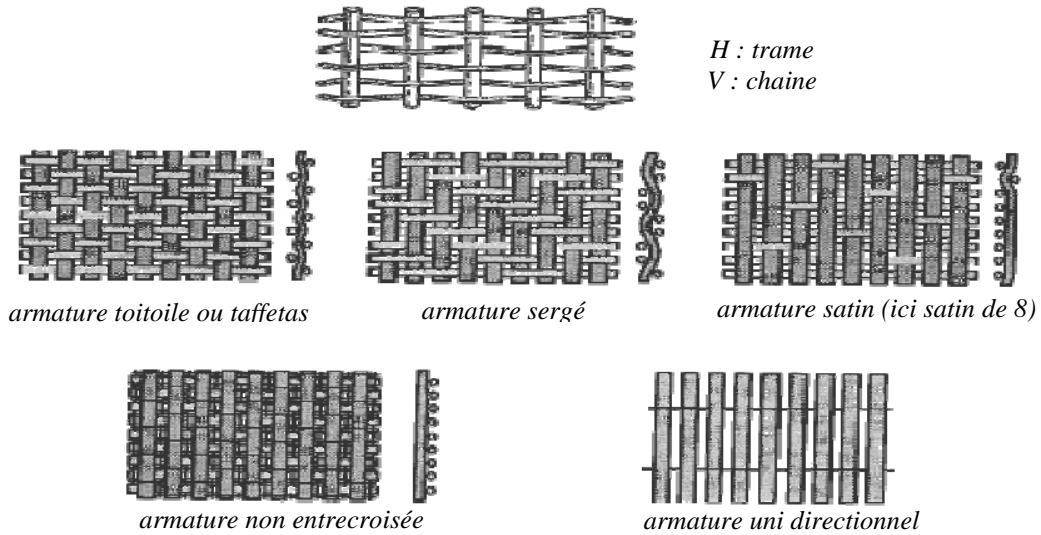
- a- **Formes linéiques :** Une fibre (diamètre environ de **10 µm**) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (**1 tex = 1 g/km**).



**Figure II - 9 :** Eléments composants de la forme linéique

**b- Formes surfaciques :**

- *Tissus et rubans*



**Figure II - 10:** Eléments composants de la forme surfaciques

- **Mats :** Ce sont des nappes de fils continus ou coupés, disposés dans un plan suivant une direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant. Le mat est isotrope à cause de l'absence d'orientation préférentielle des fibres.

**c- Structures multidimensionnelles**



**Figure II - 11:** éléments composants de la structure multidimensionnelle

**Note :** Les renforts peuvent également s'arranger sous formes hybrides (Mélange de fils continus et les fils coupés) afin d'augmenter la résistance du composite.

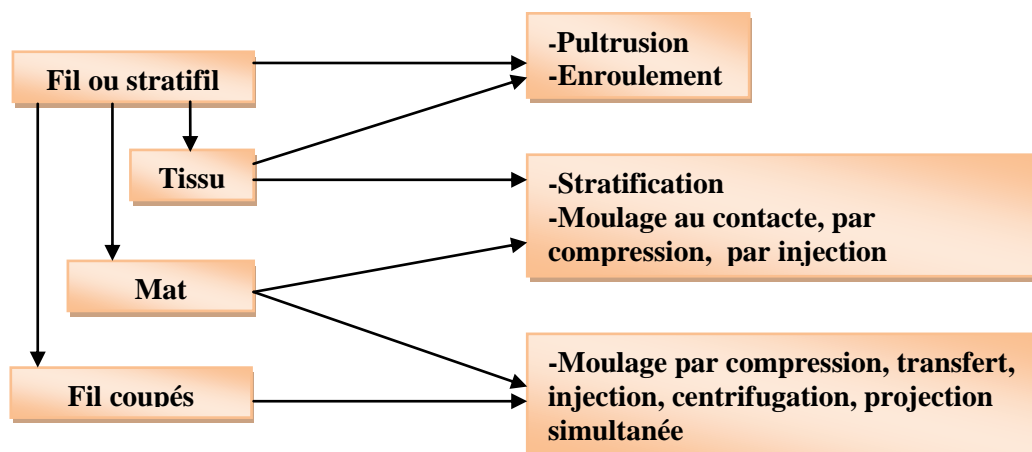
**Tableau II - 7: Performances comparés des différents types d'architecture des renforts**

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Tous ces types de structures sont généralement commercialisé sous plusieurs formes, telle que les tissus, les mat, les lamelles, et les fils. Cette diversité offre aux utilisateurs l'opportunité d'adapter leurs besoins, surtout en matière de qualités des performances demandées à la disponibilité du marché des matériaux composites.

Aussi il faut noter que le choix d'une forme à l'autre, exige une méthode de mise en œuvre et d'application sur les supports en béton armé.

La figure suivante, illustre ce que nous venons d'expliquer.



**Figure II - 12 : Utilisation des renforts selon leur forme de présentation**

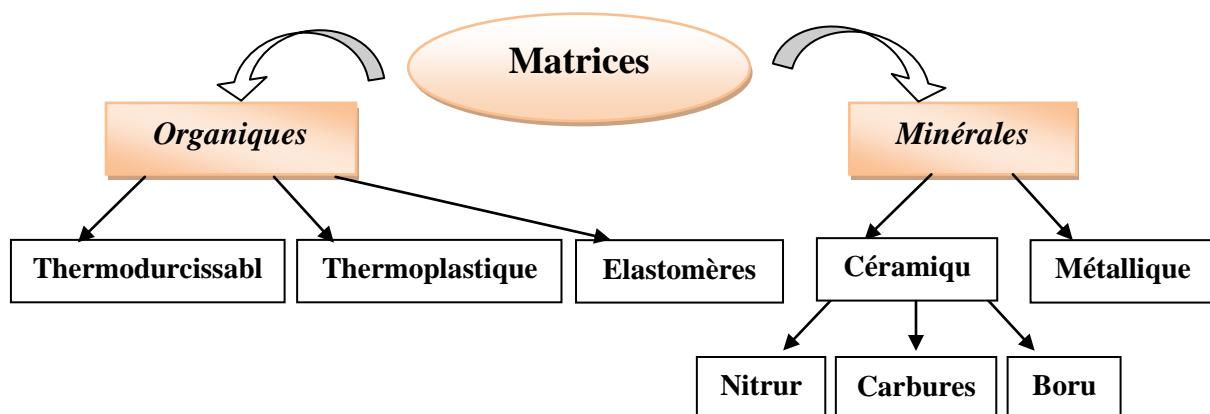
## II – 2–2. MATRICE :

Appelé aussi une protection ; la matrice est un composé organique qui fait la liaison du PRF ; son choix doit être chimiquement et thermiquement compatible avec les fibres. Elle joue plusieurs rôles importants. Certaines des principales fonctions de la matrice sont [module ISIS n°2]. :

- ✓ **lier** les fibres ensemble;
- ✓ **protéger** les fibres de l'abrasion et de l'environnement
- ✓ **séparer et disperser** des fibres dans tout le composite;
- ✓ **transférer et distribuer** les forces entre les différentes fibres; et

Les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvant et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères en suspension dans des solvants. Deux grandes familles de matrices existent : les thermodurcissables (TD) et les thermoplastiques (TP). Ces deux derniers se composent de longues chaînes moléculaires construites à partir de monomères.

Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la **Figure II.13** :



*Figure II.13 : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice*

### II – 2–2–1. Les résines thermodurcissables (TD) :

Les résines thermodurcissables peuvent être mises en forme qu'une seule fois, en raison de leurs réactions de polymérisation qui sont irréversibles. Ces résines ont en général de bonnes propriétés mécaniques, ainsi leurs caractéristiques thermomécaniques sont plus élevées que celle des résines thermoplastiques, c'est pour cela qu'on les utilise le plus souvent dans le génie civil pour la réparation et le renforcement des ouvrages. Il est à noter que, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

Parmi les résines thermodurcissables on cite :

- a) **Polyesters insaturés** : elles sont utilisées pour la construction nautique, automobile et pour la construction de réservoirs. Leur coût est relativement bas en raison de leur facilité de fabrication (polymérisation aux températures ambiantes)
- b) **Vinylester** : Elles sont dissoutes dans un solvant copolymérisable, le plus souvent le styrène, de sorte que leur mise en œuvre et leurs propriétés, différentes de celles des polyesters, les rapprochent des polyépoxydes. Les vinylesters sont résistants aux acides et aux alcalis forts. De plus leur absorption d'humidité et le retrait est moindre que ceux des polyesters, mais demeurent combustibles.
- c) **Polyépoxydes** : Leurs propriétés d'adhésivité sont bien connues et les fait choisir malgré leur prix plus élevé quand existent des impératifs de liaison avec une structure ou un mécanisme métallique.
- d) **Polyuréthanes** : Ils sont utilisés sous forme souple ou rigide avec des techniques spécifiques ou sous forme expansée comme remplissage de caissons d'insubmersibilité ou âme d'éléments sandwichs.
- e) **Formophénoliques**.
- f) **Poly-imides** : ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leur stabilité à la haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficiles à mettre en œuvre, essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.
- g) **Poly (bismaléimides)** : Ces des matrices très peu utilisées, elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et à la température, mais restent difficiles à mettre en œuvre, elles sont utilisées comme support dans les circuits imprimés.

## II – 2–2–2. Les résines thermoplastiques (TP) :

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Ils ont des propriétés mécaniques (*Le tableau II-8*) inférieures à celles des thermoplastiques et sont très déformables ce qui limite leur utilisation avec les fibres courtes, par contre, elles ont l'avantage d'être recyclées vu que leur polymérisation est réversible.

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- polytéréphtalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- polysulfures de phénylène: une résistance à l'hydrolyse.
- polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.
- polysulfurés: une bonne stabilité chimique.
- polypropylène: assez stable en température, mais combustible.

**Tableau II-8 : Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées**

Polymère	Masse spécifique (kg/dm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (Gpa)	Module deflexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polypropylène (PP)	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1,6	55-75	2-2,2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO-)	1,3	55-65	2,4-2,6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1,3-1,4	195	4,9	275
Polyéther-imide (PEI)	1,5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1,6	85	2,6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK).	1,5	100	3,7	>240

De ce qui précède **le tableau II-9** montre les critères essentiels des matrices **TD** et **TP**

**Tableau II-9: Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et hermodurcissables (Gay D.,1991)**

	<b>TP : thermoplastiques</b>	<b>TD : thermodurcissables</b>
<b>Etat de base</b>	Solide (prêt à l'emploi : polymérisé)	Liquide visqueux à polymériser
<b>Stockage matière de base</b>	Illimité	Temps réduit (précautions à prendre)
<b>Mouillabilité des renforts</b>	Difficile	aisée
<b>Moulage</b>	Chauffage (fusion/ramollissement + refroidissement de fixation)	chauffage continu
<b>Cycle</b>	court	plus long (polymérisation)
<b><u>Caractéristiques spécifiques</u></b>		
<b>Tenue au choc</b>	Meilleure	limitée
<b>Tenue thermique</b>	Perdus ou utilisés en charges	meilleure
<b>Chutes et déchets</b>	Emanations de solvants	perdus
<b>Conditions de mise en œuvre</b>	bonnes + propreté	émanations pour méthode humide (allergie possible)

### II – 2–2–3. Principales combinaisons de résines et de renforts :

Le choix d’une association entre un renfort et une matrice (codifié : renfort/matrice) est très délicat et ce travail reste du ressort des chimistes. En effet, l’interface résultant de l’association intime de deux constituants différents doit avoir de bonnes performances mécaniques. Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites HP ou GD.

*Tableau II-10: Synthèse de l’utilisation des résines et renforts non renforcées*

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
<b>TD</b> Thermodurcissables	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthanes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
<b>TP</b> Thermoplastiques	Polypropylènes	GD				
	PA6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

### II -3 : LES CHARGES ET ADDITIFS

Il est désigné sous le nom générale charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui incorporée à la résine (**figure II-14**), permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d’améliorer l’aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite. Les additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchées, et devra satisfaire un certain nombre d'exigences:

- compatibilité avec la résine de base.
- uniformité de qualité et de granulométrie.
- faible action abrasive.
- bas prix de revient.

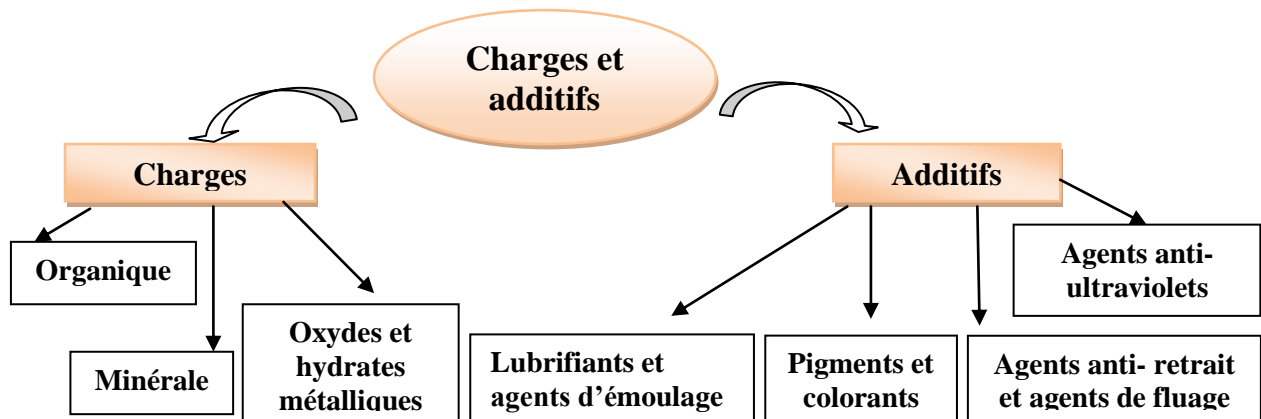


Figure II.14: les différents charges et additifs utilisés dans les résines

## II – 4. INTERFACE :

L'utilisation d'une couche d'interface (sizing) permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (protection contre l'abrasion due au frottement entre fibres).

## II – 5. DIFFERENTS PROCEDES DE MISE EN ŒUVRE DES RENFORTS :

Les procédés de transformation des matériaux composite sont nombreux. Cependant, seules les méthodes de fabrication utiles pour l'ingénieur en structure sont incluses ci-après :

- Moulage (stratification) au contact.
- Enroulement filamentaire
- Pultrusion
- Moulage au sac (en autoclave)
- Panneaux sandwich
- Moulage par compression (SMC, BMC).
- Moulage par injection...etc.

Pour le renforcement et la réparation dans le génie civil, la méthode qui est la plus utilisée est le moulage au contact, loin derrière vient l'enroulement filamentaire. Dans le domaine des nouvelles constructions la pultrusion et les panneaux sandwich sont pratiquement les seules utilisées, les autres techniques sont surtout réservées dans la construction aérospatiale, automobile, nautique...etc.

### II – 5– 1. Moulage au contact

Le moulage au contact, appelé aussi ; le moulage (manuel) et plus répondu par l'expression anglaise *wet lay-up* ; est une technique manuelle qui consiste à élaborer le composite directement

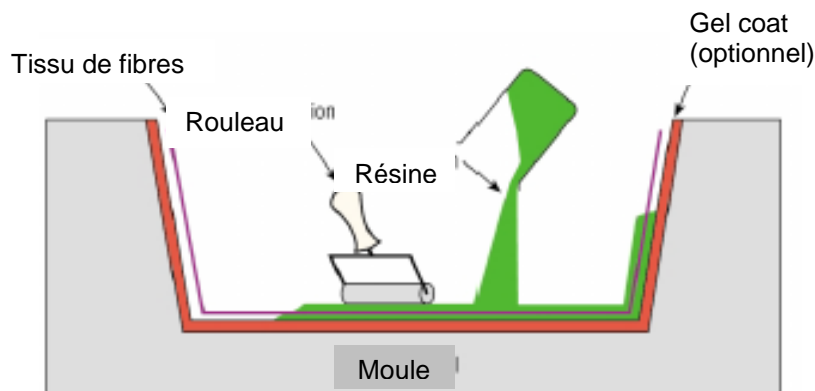
sur un moule (**figure II-15**) ou sur l'élément à renforcer, qui doit être pré imprégné de résine, cette technique est détaillée dans le chapitre III.

*Avantages :*

- Faible coût d'outillage
- Grand choix de matériaux
- Consolidation à température ambiante
- Taux de fibres importants et renfort de fibres longues

*Inconvénients :*

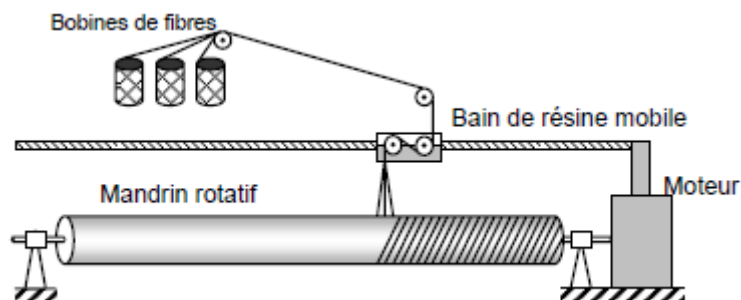
- Mélange de la résine, son taux au sein du stratifié et qualité du stratifié dépendent du savoir-faire de l'opérateur
- Porosité importante
- Nécessité d'utiliser des résines de faible viscosité, ce qui contribue à la chute des propriétés du fait de l'addition de diluants (environnement)



*Figure II-15: Moulage au contact*

## II – 5 – 2. Enroulement filamentaire

Ce procédé est aussi automatisé utilisée pour élaborer des pièces creuses, par enroulement des fibres imprégnés des résine sur un mandrin rotatif (**figure II-16**), les fibres brutes sont tiré des bobines, passent dans un bain de résine puis sont enroulées sur le mandrin[Module ISIS n°2]. Ce processus a trouvé une place dans le génie civil pour le renforcement des piles de ponts et cheminés, et ce sont les éléments à renforcer qui servent de mandrin.



*Figure II-16: Schéma du procédé de fabrication de PRF par Enroulement filamentaire[Module ISIS n°2]*

### II – 5 – 3. Pultrusion

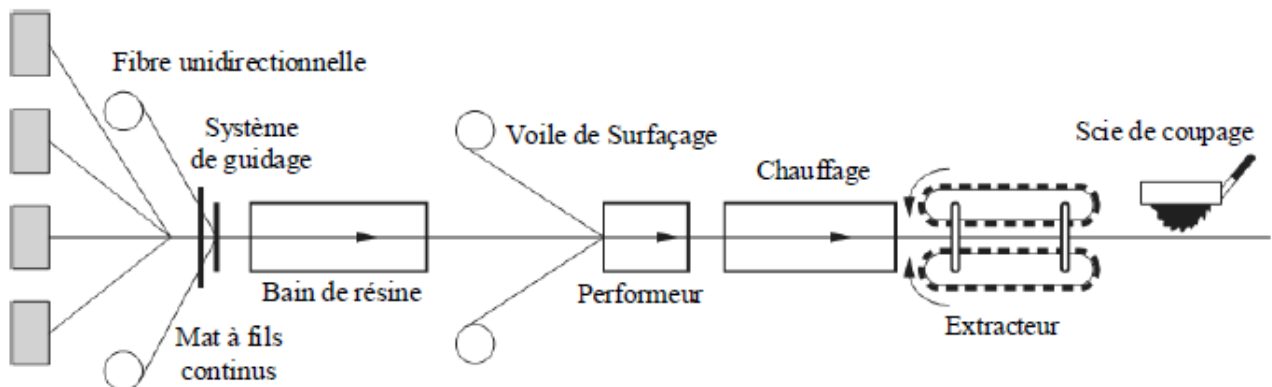
Procédé de fabrication de pièces en continue (profilés, poutres, caissons, barres d'armatures...etc.) *figure II-17*, il est donc utilisé pour les nouvelles constructions. Il est réalisé en tirant les fibres brutes qui passent d'abord dans un bain de résine puis par une filière chauffée ou la matrice de polymère durcit sous l'effet de la chaleur, produisant ainsi un composant structural.

*Avantages :*

- Procédé continu, entièrement automatisé et est ainsi très rapide et économique.
- Taux de résine contrôlable.
- Taux de fibres élevés.
- Limitation des émissions de produits volatiles.
- Solution de remplacement au métal (pas de corrosion).

*Inconvénients :*

- Limitation à des sections constantes ou quasi-constantes.
- Prix des filières.



*Figure II-17: Schéma du procédé de pultrusion (GangaRao et al. 2007)*

### II – 6 – PROPRIETES MECANQUES DES COMPOSITES « PRF »

Les propriétés mécaniques d'un PRF dépendent d'un certain nombre de facteurs comprenant :

- Les proportions relatives des fibres et de la matrice;
- Le type et les propriétés mécaniques des matériaux constituants (fibres, matrice et tous les additifs);
- L'orientation des fibres dans la matrice;
- Le ratio du volume fibres par rapport au volume total du composite; et
- Le volume ou la dimension du composite lui-même

Le tableau II-11 présente les propriétés mécaniques typiques des trois groupes des PRF utilisé en génie civil [Mufti et al.1991, Head1996].

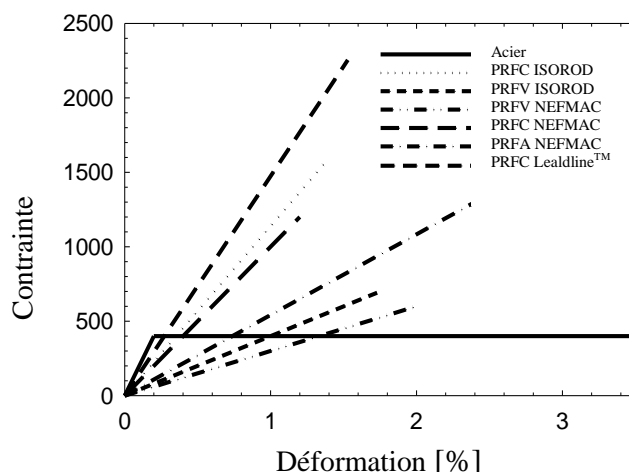
**Tableau II-11:** Propriétés mécaniques typiques des composites GFRP, CFRP et AFRP

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (%par poids)	Densité (kg /m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinale (Gpa)	Résistance à la traction (Mpa)
Fibres de verre /polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone/ époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-125	1200-2250
Aramide/ époxy (AFRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Aussi les propriétés des PRF se différencient d'un type à l'autre, le **Tableau II-12** résume sommairement cette différence, et plus particulièrement la **Fig. II-18** montre des courbes contrainte-déformation typiques pour plusieurs PRF unidirectionnels.

**Tableau II-12 :** Comparaison qualitative de trois principaux types de PRF [module ISIS n°2].

Critère	Type de fibre		
	Carbone	Aramide	Verre
Résistance en traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement en fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance aux alcalis	Très bonne	Bonne	Adéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bon



**Figure II-18:** Courbes contrainte-déformation en traction typiques pour différentes armatures en PRF actuellement disponible [module ISIS n°2].

A partir d'une simple lecture du diagramme précédent, il est évident que les PRF de verre et d'aramide ont des modules nettement inférieurs à celui de l'acier avant plastification, mais que les PRF de carbone ont des modules comparables, ou même supérieurs dans certains cas, à l'acier. Ces données mettent également en évidence le fait que les PRF ont des résistances ultimes qui peuvent être de plusieurs fois plus grandes que celle de l'acier.

### **II – 5 – 1 Module d'élasticité :**

Le module élastique en compression est généralement plus faible que celui en traction. Les valeurs des modules élastiques en compression sont typiquement de l'ordre de 50-80% de celles déterminées à partir des essais en traction, dépendamment du type de PRF considéré.

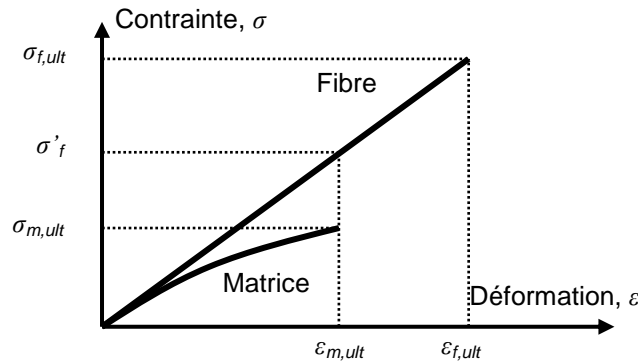
Le module d'élasticité d'un stratifiant dépend de la définition de l'épaisseur du composite, cependant cela est difficile à déterminer, d'où il y a lieu d'utiliser l'épaisseur du voile de fibre [Ahmed et Van Gemert 1999] ou tout simplement utiliser l'épaisseur nominale généralement recommandée par le fabricant [Teng et al. 2000].

### **II – 5 – 2 Résistance :**

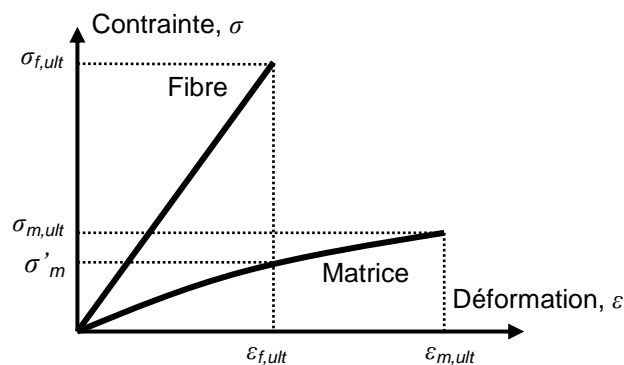
La résistance axiale des PRF unidirectionnels diffère selon que la charge appliquée soit en compression ou en tension, et la plupart des PRF sont nettement plus résistants en tension. La réponse d'un matériau de PRF en traction dépend en grande partie des déformations à la rupture des deux matériaux constituants et deux possibilités de comportements doivent être prises en considération. Les figures II-19 et II-20 montrent les scénarios possibles pour les déformations à la rupture des fibres et de la matrice et donnent un aperçu du comportement à la rupture des matériaux de PRF.

La résistance ultime des PRF chargés en compression est inférieure à celle en traction et dépend d'un certain nombre de facteurs comprenant le type de fibres, les propriétés de la matrice et la résistance à l'interface matrice-fibre.

Les résistances en compression axiale pour les matériaux de PRF uniaxiaux chargés dans la direction des fibres sont en général environ 55%, 20% et 78% de la résistance à la traction axiale pour les PRF de verre, d'aramide et de carbone respectivement. Les fibres d'aramide en particulier se comportent mal en compression et par conséquent, la résistance en compression de PRF utilisés comme renforts pour le béton est généralement négligée [module ISIS n°2].



**Figure. II-19.** Déformations à la rupture des matériaux constitutifs des PRF quand la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle de la fibre. [module ISIS n°2].



**Figure. II-20 .** Déformations à la rupture des matériaux constitutifs des PRF quand la déformation à la rupture de la matrice est supérieure à celle de la fibre. [module ISIS n°2].

### II – 5 – 3 Fatigue :

La plupart des matériaux de PRF unidirectionnels utilisés en génie civil affichent un bon comportement en fatigue comparativement à l'acier, bien que certains matériaux de PRF (PRF de carbone en particulier) affichent des caractéristiques supérieures en fatigue. Les fibres de verre sont considérablement moins rigides par rapport au carbone et les matrices des PRF de verre subissent de plus grandes déformations pendant les cycles de chargement. Toutefois, la nature même des fibres d'aramide rend ces dernières sensibles aux dommages de fatigue par un processus appelé défibrillation, qui, à terme, peut mener à la rupture par fatigue.

### II – 6 – 4 Fluage :

Le fluage ne constitue pas une grande préoccupation pour la plupart des PRF unidirectionnels utilisés dans les projets de génie civil, à condition que la contrainte soutenue dans le PRF soit limitée. ISIS Canada recommande que les contraintes permanentes dans les éléments structuraux en PRF unidirectionnels soient limitées aux pourcentages comme suit :

- ✓ PRF de verre, 20%
- ✓ PRF d'aramide, 30%
- ✓ PRF de carbone, 50%

Le taux de fluage subi par un PRF particulier dépendra principalement de la fraction volumique de fibres et de l'orientation des fibres par rapport aux charges appliquées. De plus, la température et l'humidité peuvent avoir des effets significatifs sur le comportement en fluage des polymères. [module ISIS n°2].

## **II – 7 – DURABILITE ENVIRONNEMENTALE DES COMPOSITES « PRF »**

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux d'ingénierie sont d'une importance capitale pour les concepteurs en structure envisageant leur utilisation. Cependant, les considérations environnementales et de durabilité sont également importantes dans l'évaluation des matériaux et des systèmes à employer dans les infrastructures. L'exposition à une variété de conditions défavorables peut modifier de manière significative la performance mécanique des matériaux de PRF et omettre de considérer les effets des facteurs tels que la température, l'humidité, les rayons ultraviolet, les différents produits chimiques et l'incendie peut mener à des performances insatisfaisantes.

L'inspection et la maintenance sont des aspects clef pour assurer la pérennité des structures renforcées afin de prévenir tout désordre. Une inspection uniquement visuelle n'est pas envisageable car les renforcements PRF masquent les signes de dommages (fissuration, délamination, ...) qui surviennent le plus souvent dans le béton ou à l'interface entre le béton et le renfort. Un suivi par thermographie ou radar est conseillé [Arya et al., 2002].

### **II – 7 – 1 Température :**

La température est un facteur extrêmement important dans la conception et l'utilisation des matériaux de PRF. Aux températures élevées, les matériaux de polymères se décomposeront ou dans certains cas, brûlent. La température en service d'un composant de PRF est donc limitée à environ 20 °C de moins que la température de transition vitreuse de verre ( $T_g$ ) [module ISIS n°2], pour une résine d'époxyde, ou à la température de déformation thermique, pour un vinylester ou un polyester. À ces températures, on observe d'importants changements des propriétés mécaniques des matériaux de matrice de polymère qui entraînent une détérioration rapide des propriétés mécaniques des composants en PRF.

Lors de la diminution de la température la rigidité des fibres augmente. Le transfert des contraintes de la matrice aux fibres n'est plus continu et peut devenir préjudiciable [Green et al., 2006].

La durabilité des PRF sous climat froid est éprouvée par une exposition prolongée à des températures extrêmes (- 18°C ou - 40°C) ou par des cycles (environ 300) de gel/dégel (de -18°C à 15°C). Dans cette exposition, la résistance mécanique du béton réparé n'est pas affectée par la température et peut même être améliorée par rapport à celle du béton de référence (béton réparé conservé à température ambiante), en raison du durcissement de la matrice du FRP, mais le mode de rupture devient brutal avec l'absence des signes. Par contre, l'alternance de gel et dégel diminue la capacité mécanique du béton enrobé par des FRP, ou l'interface béton - renforcement est rompue

suite à l'expansion et la traction des matériaux étant donné leurs différents coefficients de dilatation thermique. Cet effet est plus marqué pour les polymères à fibres de verre que pour ceux à fibres de carbone car plus rigides et plus sensibles à l'humidité [Belarbi et al., 2007].

Il faut dire aussi, que dans des cas rares où les températures extrêmement basses (cryogéniques) provoquent la fragilisation des matériaux de matrice de polymère. [module ISIS n°2].

L'utilisateur des PRF dans le renforcement des structuraux doit savoir une des connaissances générale des phénomènes suivants lors de l'évaluation du potentiel des PRF, à savoir :

- les températures élevées augmentent le taux de fluage des matériaux de PRF;
- les températures plus élevées augmentent le taux de dégradation des PRF dû aux attaques chimiques ou à l'absorption d'humidité;
- la dilatation thermique différentielle (entre les fibres et la matrice, ou entre le PRF et le substrat dans les cas où le PRF est collé sur le béton) peut mener au développement de contraintes thermiques qui pourraient endommager l'interface matrice-fibre ou l'interface entre le PRF et le substrat; et
- la répétition de cycles thermiques et des contraintes qui en résultent peuvent endommager les matériaux de PRF par fissuration de la matrice et la rupture des fibres, ce qui peut aggraver les problèmes dus à l'absorption d'humidité et/ou à l'attaque chimique.

### **II – 7 – 2 Humidité :**

La quantité d'humidité absorbée et les effets de cette absorption sur la performance mécanique du composite varieront en fonction de la composition et des propriétés des PRF. Selon les connaissances actuelles, la pénétration de l'humidité dans les PRF se produit généralement dans la région de la matrice à proximité des fibres (par capillarité). Les fibres d'aramide sont particulièrement sensibles aux effets de l'humidité. Ainsi, les fibres d'aramide ont récemment été écartées des usages où l'humidité constitue une préoccupation. [module ISIS n°2].

Des études comparant la durabilité de renforcements GFRP et CFRP ont montrées que les fibres de verre étaient sensibles à l'humidité et se dégradaient dans des solutions salines [Belarbi et al., 2007]. Alors que d'autre étude souligne que la durabilité des fibres n'est pas l'unique paramètre déterminant [Toutanji, 1999].

### **II – 7– 3 Rayons ultraviolets :**

Les rayons ultraviolets (UV) peuvent endommager les matériaux de PRF. Les fibres d'aramide sont connues pour être particulièrement sensibles aux rayons UV, alors que les fibres de carbone et les fibres de verre sont résistantes à la lumière UV. De plus, la plupart des matrices de polymère se dégraderont légèrement en raison des rayons UV. [module ISIS n°2].

La dégradation due à la lumière UV peut être empêchée par l'utilisation de divers additifs dans la matrice, l'application d'un enduit gélifié pigmenté sur l'extérieur d'un PRF ou en appliquant sur le PRF une peinture opaque. [module ISIS n°2].

#### II – 7 – 4 Effets des alcalis :

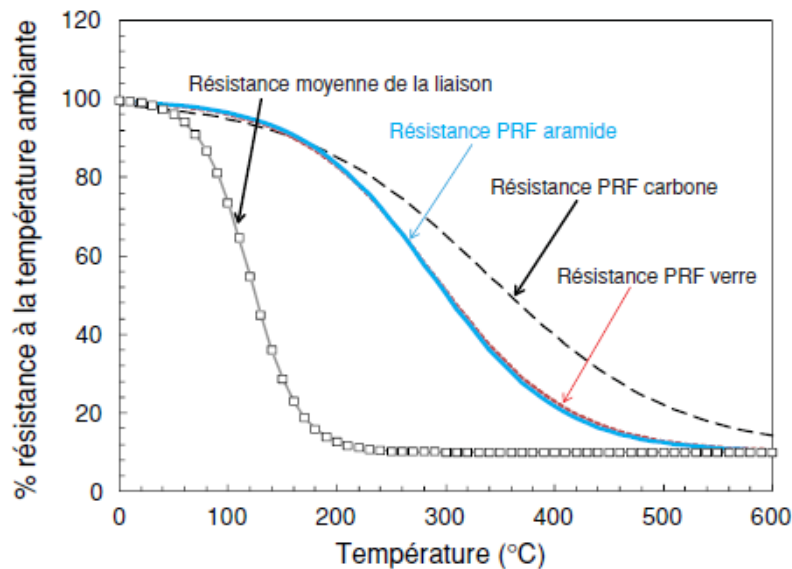
L'environnement à l'intérieur du béton sain est fortement alcalin (le niveau de pH est généralement entre 12 et 13,5) et ceci peut constituer une préoccupation pour les matériaux de fibres de verre qui souffrent d'une réduction de la l'endurance et de la résistance par la fragilisation induite par l'alcalinité. [module ISIS n°2].

#### II – 7 – 5 Incendie (feu) :

L'une des caractéristiques des PRF est leur basse température de transition vitreuse (Tg). Tg représente le milieu de la plage des températures au-dessus desquelles la matrice polymère des PRF subit un changement et passe de dure et cassante à visqueuse et caoutchouteuse.

Exposés au feu, les matériaux des PRF peuvent souffrir de carbonisation, de fonte, de délamination, de fissures et de déformation. La **Figure. II-18** montre que pour certains types de matrices, le décollement peut être bien avancé à 200 °C. Elle montre aussi que les fibres elles-mêmes perdent de la résistance lorsque les températures augmentent, la fibre de carbone étant celle qui en perd le moins.

Les polymères généralement utilisés comme matrices dans les infrastructures en PRF sont tous combustibles, se brûlent quand elles sont soumises à des températures suffisamment élevées et libèrent généralement de grandes quantités de fumées denses, noires et parfois toxiques et/ou corrosives. De cela il faut protéger le PRF par l'installation d'isolants pare-feu, l'ajout d'additifs dans la matrice et l'application de peintures céramiques. [module ISIS n°2].



**Figure. II-21 :** *Changement de la résistance des PRF et de la résistance d'adhésion avec l'augmentation de la température (Les courbes ne sont pas définitives.)*

## II – 8 – APPLICATION DES COMPOSITES « PRF » EN GENIE CIVIL

Bien que l'application des matériaux composite peut concerner les différent type de matériaux conventionnel en génie civil, telle que le béton, l'acier (construction métallique), et le bois ; nous intéresserons ici aux supports de béton en raison de son emploi dominant dans le concept de constructions. A cet effet, l'opération de confinement exige des taches préliminaires pour bien accomplir la fonction du matériau composite.

### II – 8 – 1 Processus générale d'application de renforcement en PRF :

Avant toute application, les supports doivent être débarrassés de tous produits pouvant contrarier la bonne adhérence du PRF. Les matériaux supports sont systématiquement préparés en surface par des moyens mécaniques de décapage de surface adaptés.

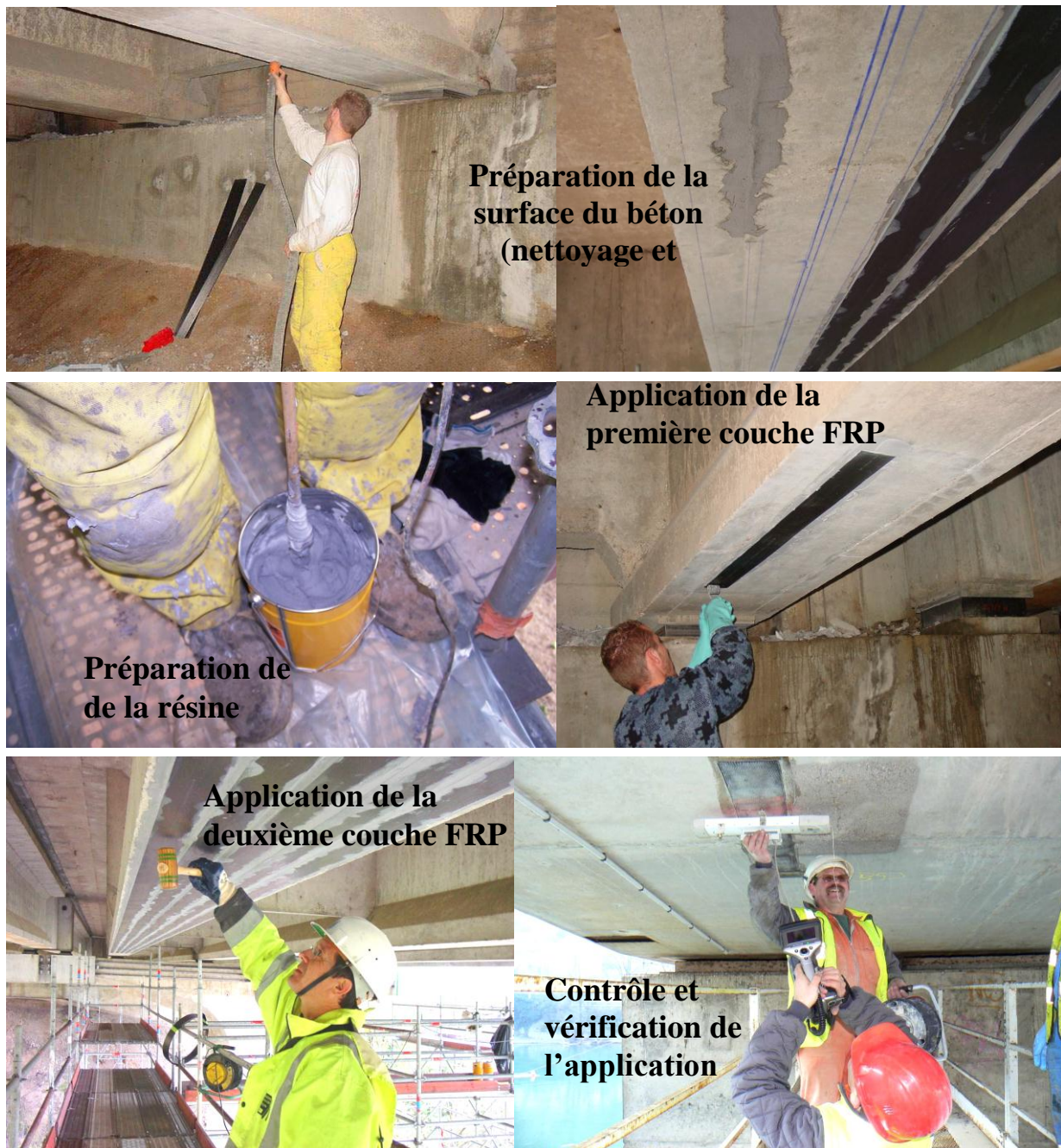
Bien que le PRF ait de grandes capacités à épouser les formes les plus diverses et ne peuvent pas être développable, il ne dispose pas de la capacité à suivre les défauts ponctuels de bétonnage tel que les bullages, les petites épaufrures, les nids de cailloux ou autres. Il y a donc nécessité dans certains cas d'effectuer des ragréages ou reprofilage de structures avant d'effectuer l'application du PRF.

Les défauts des supports de béton, sont repris par des produits à base de liant hydraulique ou synthétique selon la norme NF P95- 101 (Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie- Reprise du béton dégradé superficiellement. Ainsi, les arrêts vives, ou ruptures de plan doivent être abattues par chanfrein dont la dimension est communiquée par le concepteur.

Généralement le processus de renforcement en « PRF » des éléments structuraux en béton armé passe toujours par les étapes successive suivantes :

- 1- Inspecter la condition de surface de l'élément de structure à renforcer.
- 2- Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxyde et du mortier à résine époxydique.
- 3- Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules à main et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat, et la surface est parfaitement uniforme (Steiner 1996, Teng et al. 2002).
- 4- Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des feuilles de fibres.
- 5- Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
- 6- Appliquer les feuilles de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
- 7- Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les feuilles auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
- 8- Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.

La **Figure. II-22** montre l'application de ces étapes sur une poutre d'un ouvrage d'art.



**Figure. II-22 :** *Processus de renforcement en PRF (lamelle) sur une poutre de pont.*

De manière générale, toutes les parties d'un ouvrage sont susceptibles d'être renforcées par collage de matériaux composites. Il existe trois applications principales en fonction du type de renforcement recherché [ISI 06]:

- Les poutres, dalles et hourdis peuvent être renforcés à la flexion en collant des renforts composites unidirectionnels sur la face en traction, les fibres du composite étant orientées selon l'axe longitudinal de l'élément de structure, suivant ainsi la direction des contraintes principales de traction.

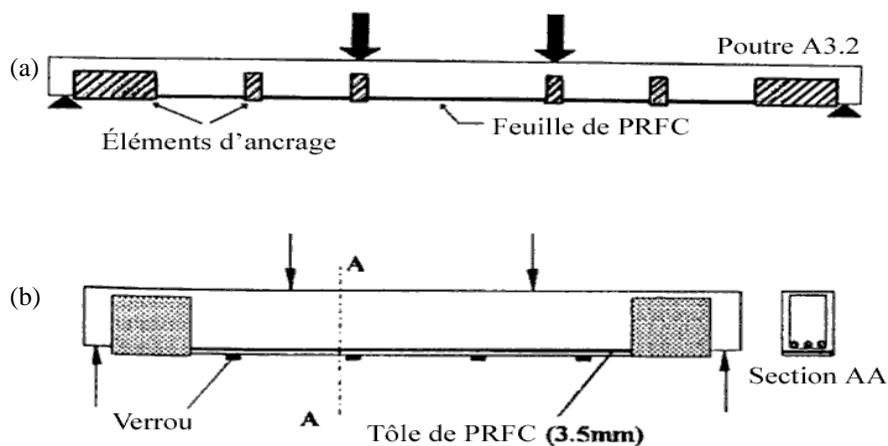
- les mêmes éléments peuvent être renforcés à l'effort tranchant par collage de PRF sur les faces latérales, les fibres étant orientées perpendiculairement par rapport à l'axe longitudinal de la structure
- Les colonnes peuvent être renforcées vis-à-vis des efforts axiaux, en les enveloppant par des PRF collés, les fibres étant orientées selon la direction circonférentielle

## II – 8– 2 Application au Poutres :

Les composites de fibres ont initialement été employés sur des poutres. Au milieu des années 90, l'Allemagne et la Suisse ont réhabilité les poutres de leurs structures de bâtiments à l'aide de composites de fibres par Meier et Kaiser [MEI-92] ou l'augmentation de la capacité portante était de 200%, puis par (Nanni, 1995) sous forme de tôles en polymère.

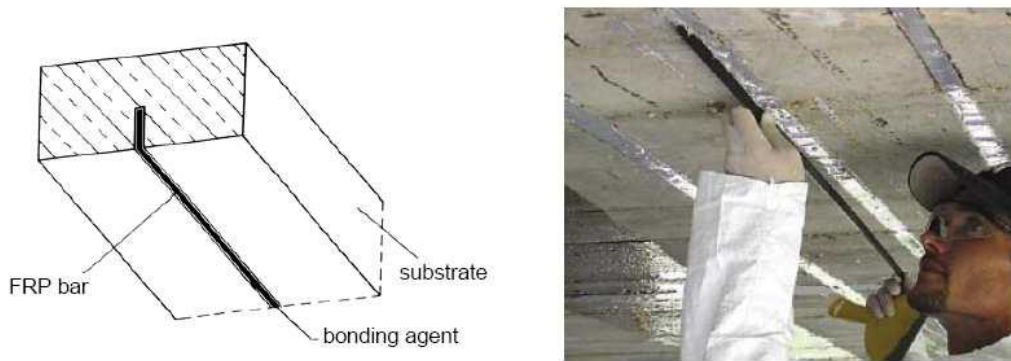
**Flexion** : Le renforcement relatif à la résistance à la flexion consiste à coller les feuilles de PRF sur le plan de tension de la poutre (à l'intrados de la poutre), après avoir préparé la surface du béton d'une manière uniforme pour améliorer la liaison avec le PRF. L'application du renforcement se fait de sorte que les fibres soient orientées de la même manière que les efforts. La technique la plus commune consiste à positionner le FRP dans la zone de sollicitations de moments positifs avec une longueur identique ou légèrement inférieure à celle de la poutre, et un ancrage adéquat (autour de la poutre : chemises en U) [Arduini et Nanni (1997) ] **Figure. II-23**. Cet ancrage permet aussi d'accroître la résistance au cisaillement de la poutre, ainsi que la capacité portante de 192% à 209% [GAR- 98].

Un système performant permettant d'éviter l'effet négatif du décollement du FRP est les « near-surfacebonded » barres, récemment mise au point. Il consiste à introduire le PRF dans une cavité, conduisant ainsi à améliorer l'adhérence **Figure. II-24**



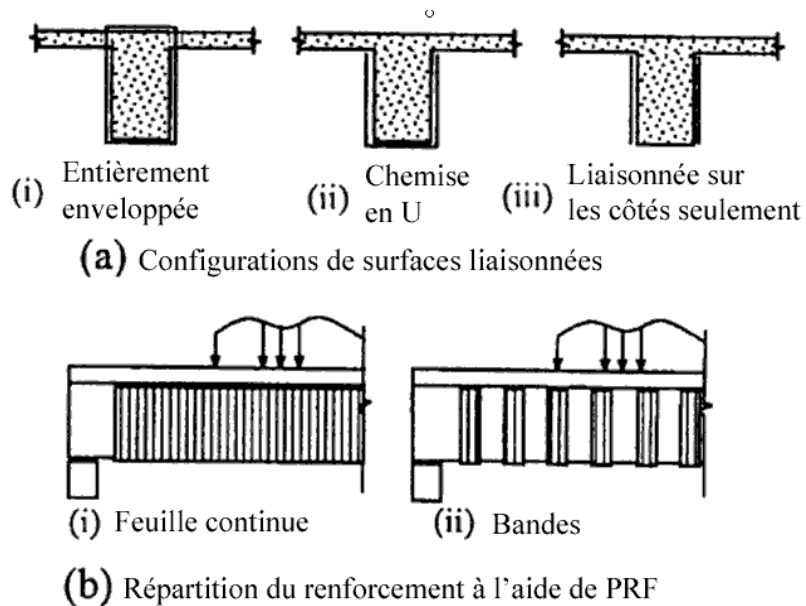
**Figure. II-23** : Trois types d'ancrage utilisé dans les études expérimentales :

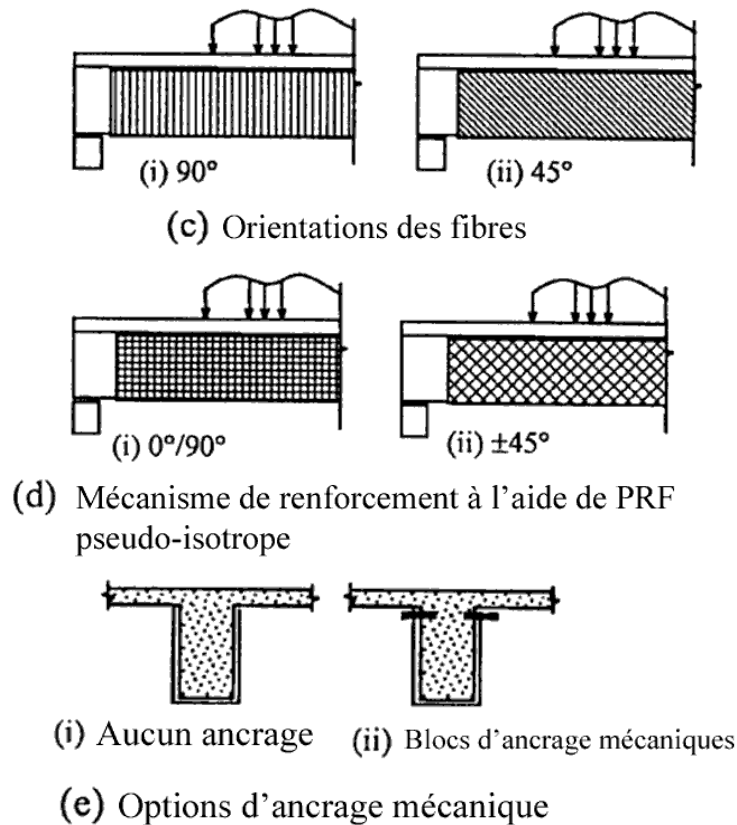
- (a) par des chemises en U et des bandes en acier (Spadea et coll. 1998);  
 (b) par des chemises en U et des verrous en acier (Mukhopadhyaya et coll. 1998);



**Figure. II-24:** Near-surface-mounted bars.

- **Cisaillement** : lorsqu'un élément fléchi précis doit être renforcé, il faut tenir compte des effets combinés de la résistance à la flexion et au cisaillement. de cela, les feuilles de PRF en forme de accroissent la résistance à la flexion tout en fournissant un ancrage qui empêche le décollage des feuilles inférieures tout en renforçant la résistance au cisaillement. **La figure II-25** montre plusieurs de ces configurations.





**Figure. II-25 :** Configurations de renforcement à l'aide de PRF (Khalifa et coll. 1998).

La longueur sur laquelle les étriers en PRF peuvent être ancrés est limitée (par la hauteur de la poutre), le béton existant (surface à traité) doit être de qualité acceptable conformément aux exigences du manufacturier du matériau composite. Afin d'éviter le risque d'une rupture des étriers en PRF par une concentration de contraintes aux coins de la section de la poutre, ces coins doivent être arrondis suivant un rayon minimal de 35 mm.

### II – 8 – 3 Application aux poteaux :

L'utilisation de FRP pour confiner les supports présente de nombreux avantages comparée à l'emploi d'acier. Tandis que l'acier maintient une tension de confinement constante, le FRP présente un comportement élastique qui provoque un accroissement de l'action de confinement sous dilatation.

Trois méthodes adaptées aux applications des composites « PRF » sur les poteaux à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «PRF» (**Figure. II-26**). Ce renforcement peut être partiel ou enveloppe complètement les poteaux (**Figure. II-27**). Cette technique améliora à la fois l'effort et la contrainte de compression ultime du béton (Mander et al. 1988), ainsi que la ductilité du poteau, et cela peut être atteint si la résistance à l'effort tranchant est supérieure à celle en flexion (strong shear-weak flexure philosophy design). Pour le renforcement en compression (augmentation de la capacité portante), le principe est de confiner les poteaux avec des PRF dont les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe du

poteau **Figure. II-28.** Nous détaillerons l'application de cette technique sur les poteaux dans les chapitres qui suivent.



a) Colonne partiellement enveloppée par des bandes PRF en spirale continue.

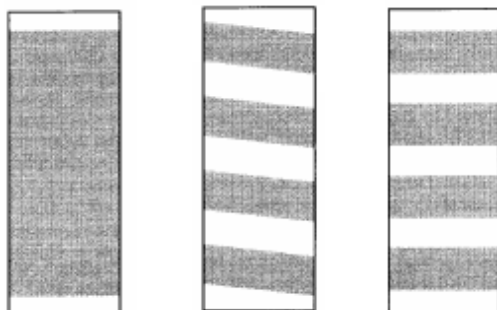


b) Mise en place d'une coquille en FRP (NCHRP, 2004)

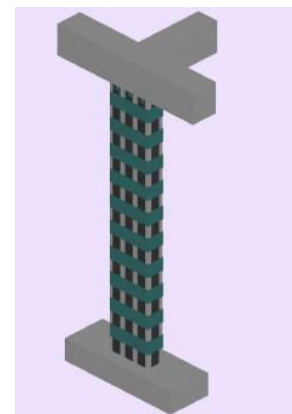


c) Robo Wrapper (L'enroulement filamentaire) (CRC, 2002)

**Figure. II-26** Exemples de renforcement des poteaux par matériaux composite



**Figure. II-27 :** Méthodes typiques d'enveloppement de poteaux en béton armé par « PRF »



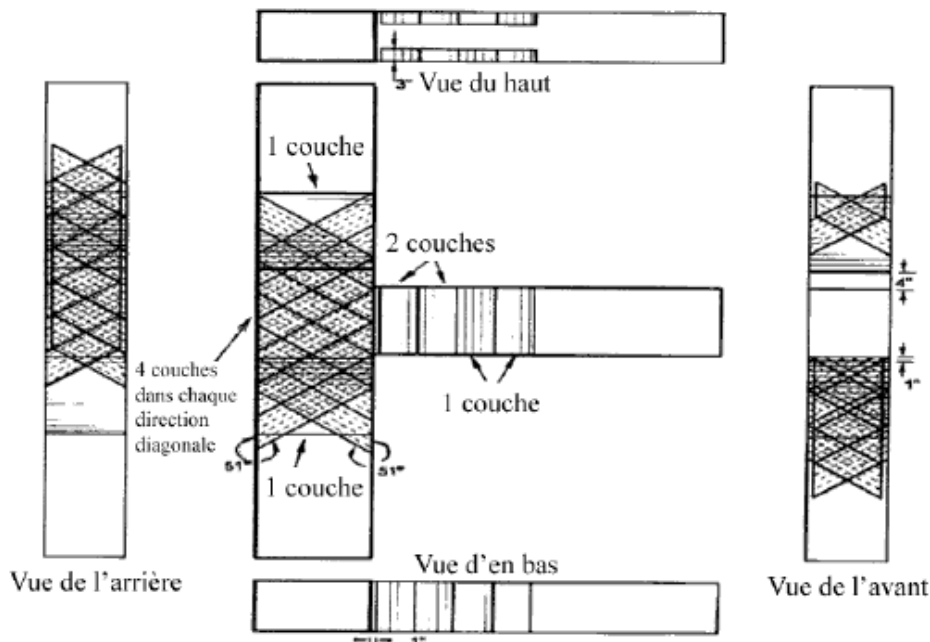
**Figure II-28.** Renforcement de poteau: dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la

#### II – 8– 4 Application aux assemblages poteau-poutre

Etant donné que les nœuds poteaux-poutre forment un point très sensible dans les structures en béton, il est bien évident qu'elle doit être renforcé indépendamment des poteaux et des poutres, ou avec les deux. Toutefois, très peu de recherches et d'études expérimentales ont été effectuées sur les techniques de renforcement des assemblages.

Pantelis et coll. (2000) ont effectué des études à la Utah University, Salt Lake City, afin d'évaluer l'efficacité du polymère sur le plan du renforcement de la résistance au cisaillement. (**Figure. II-29**) .Cependant, bien que le renforcement accroisse la résistance au déplacement, les cycles

d'hystérésis des spécimens renforcés indiquent un resserrement significatif (**Figure. II-30**), or cela n'est pas l'effet recherché. Aussi la mise en œuvre de la technique de renforcement poserait des problèmes pratiques en raison de la présence de dalles de plancher au niveau des assemblages poutre-poteau.



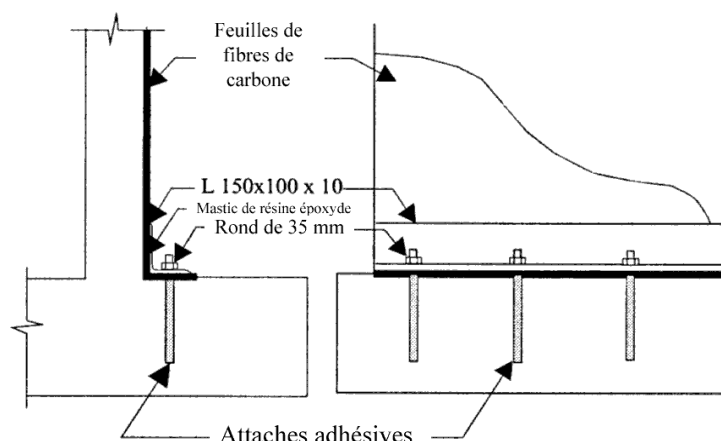
**Figure. II-29** Plan du renforcement du composite (Pantelidis et coll. 2000).



**Figure. II-30** Renforcement de la jonction poteau-poutre

## II – 8 – 5 Application aux murs de contreventement :

Le renforcement des murs de contreventement en béton armé à l'aide de feuilles de composite de fibres semble une solution de rechange possible. La résistance à la charge et la ductilité des murs renforcés et réparés s'améliorent lorsque des feuilles de composites de fibres sont ajoutées des deux côtés des murs. Toutefois, ces essais préliminaires indiquent également que le système d'ancrage entre les feuilles et la semelle joue un rôle primordial sur le plan de l'efficacité de ce système amélioré (Lombard et coll. 2000).



**Figure. II-31.** *Système d'ancrage pour les feuilles en fibres de carbone à la base du mur (Lombard et al, 2000)*

## II – 8 – 6. Application aux dalles :

Généralement ces éléments sont confinés par un maillage (bandes/lamelles croisées) de lamelles PRF sur la face tendu des dalles beaucoup plus travaillant en deux sens (Hau 1999) **Figure. II-32.**



**Figure. II-32.** *Dalle en béton armé renforcé dans les deux sens par des lamelles croisé*

## II – 9. CONCLUSION

Chronologiquement parlons, les matériaux de FRP (Fiber Reinforced Polymer) ne sont pas un matériau nouveau. L'évolution de la technique de fabrication des matériaux en FRP a entraîné une diminution du coût et leur application a pris un grand essor, notamment dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

La philosophie du renforcement au « PRF » se manifeste dans son efficacité d'accroissement de la résistance des éléments structuraux surtout aux séismes, et plus particulièrement les poteaux. Son application est relativement simple, très peu dérangeante pour les occupants des bâtiments et peu exigeante en main-d'œuvre. Ainsi, les caractéristiques non corrosives des fibres de carbone et leur résistance à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels, c.-à-d. une valeur plus économique à long terme. De cela il existe de réelles perspectives dans les prochaines années pour une large utilisation des polymères renforcé de fibres « PRF » en renforcement ou en réhabilitation des éléments structuraux.

## Référence :

- Module pédagogique d'ISIS Canada N°2 ;(Utilisation des composites PRF en construction)
- Généralités sur les matériaux composites (Laurent Gornet), Centrale de Nantes 2008.
- Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading (J. Li, M.N.S. Hadi 2003)
- SETRA 2011
- SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- Techniques et systèmes de renfort des structures en béton [J. Miranda Vizueté]
- Chai, Y. H., Priestley, M. J. N. et Seible F. (1991) “Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance”, *ACI Structural Journal*,
- Mander, J. B., Priestley, M.J.N. et Park, R. (1988) “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*,
- AFGC, (2011) – Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites - Recommandations provisoires, Février 2011.
- Spoelstra, M.R. et Monti, G. (1999) “FRP-confined concrete model” *Journal of Composites for Construction*
- Technique de l'ingénieur n°5
- Document Sika Wrap
- Module ISIS n°2
- Foo, S., Naumoski, N. et Saatcioglu, M. (2001) “Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens”, *Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civile, Ministère*
- Thèse doctorat *Raphaëlle SADONE- Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement.*
- Thèse doctorat *Riad BENZAID- 2013*
- Thèse doctorat *Youcef SI YOUCEF-2010*
- *Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens (Doc du : Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile)*

## Chapitre III

# Renforcement et réparation des poteaux en béton armé par matériaux composites « PRF »

### III – 1. INTRODUCTION

Les premières recherches dans l'utilisation des PRF ont vues le jour en 1979 au Japon [le rapport d l'ACI Committe440] ; tandis que l'applications du système de confinement sur des poteaux en béton armé était au Japon en 1980 (Fardis and Khalili 1981; Katsumata et al. 1987) mais sa pratique à grande échelle n'a commencé qu'après les séismes de Loma prieta (1994 Etats Unis) et Kobé (1995 Japon) [Mortazavi et al 2003], [JBDPA1999], [Fukuyama et al 2000], [Y.F.Li et al 2003], [Teng et al 2002], [Parvin et al 2002].

A l'US (Fyfe 1995) a adopté une méthode dite l'enroulement active (active wrapping) ou il a pompé des coulis de ciment entre la surfaces des poteaux initiales et la couche du composite .Peu de poteaux ont reconnu des fractures dans le composites. Cette méthode est remplacée plus tard par des enroulements passifs (passive wrap) par suppression du coulis de ciment. Et c'est (Nanni and Bradford 1995) qui ont utilisées de nouvelle jacket de composite d'épaisseur assez fine. Des recherches à l'université d'Arizona sont penché sur l'utilisation bandelette de verre( E-glasse) et de polyester d'épaisseur de 0.03 à 0.04inch pour confiner des poteaux existant avec des adhésive en époxy (Saadatmanesh et al. 1994). Le test de ces poteaux à augmenter la ductilité cinq foi de l'initial avec aucune rupture de cisaillement pour doubles charges

Depuis, cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches et est désormais préférée dans la réparation et le renforcement des constructions en béton où plusieurs applications ont été recensées à travers le monde concernant divers éléments structuraux (Lelli et al. 2003).

### III – 2. PROBLEMATIQUE DE L'ETAT DES COLONNES EN BETON ARME A RENFORCER

Les colonnes jouent un rôle prépondérant dans la capacité sismique des structures. Elles servent de contreventement (fournissent une résistance latérale) et lorsqu'elles parviennent à la rupture, elles entraînent souvent la ruine du système. Les colonnes de béton armé, particulièrement celles construites avant les années 1960, ont des détails de conception et de construction insuffisants. Ces colonnes dont l'acier transversal (étrier) offre peu de confinement au noyau du béton ou de support des barres d'acier longitudinales ont un comportement fragile permettant peu de déformation.

Également, parmi les autres déficiences majeures rencontrées dans les colonnes, on retrouve :

- ✓ Le chevauchement insuffisant de l'armature longitudinale à la base de la colonne provenant de la semelle;
- ✓ La longueur de développement insuffisant de l'armature longitudinale de la colonne dans la semelle;
- ✓ L'absence de renforcement dans la partie supérieure de la semelle.

Un des problèmes rencontrés fréquemment dans les colonnes conçues selon les codes et normes précédents les années 1970, est que le niveau de résistance de cisaillement est inférieur à celui correspondant à la résistance à la flexion. Ce type de conception résulte en une rupture en

cisaillement même à un faible niveau de ductilité en flexion pendant les tremblements de terre importants.

Finalement, les déficiences des colonnes de béton, conçues selon les codes d'avant 1970, peuvent être classées de la façon suivante :

- 1- Faible résistance latérale;
- 2- Faible ductilité en flexion;
- 3- Longueur de chevauchement insuffisante.

En effet, au cas de réparation il faut prendre garde à ne pas trop dissocier les différents modes de rupture de l'ensemble des éléments structuraux : renforcer un élément vis -à vis d'un désordre peut conduire à simplement déplacer le problème. Ça veut dire, renforcer un poteau vis-à-vis du cisaillement peut entraîner le développement d'une rotule plastique, qu'il faudra alors confiner. Il faut donc envisager une stratégie d'analyse globale de réhabilitation.

### **III – 2-1. PROBLEMATIQUE DE LA REHABILITATION DES POTEAU AVEC DES MATERIAUX COMPOSITES**

La majorité des dommages des structures de béton survenu lors de tremblements de terre, tels que celui de San Fernando en 1971, étudié par Saadatmanesh (1994), sont causés par des déficiences au niveau de détails de construction des éléments structuraux. L'insuffisance du nombre d'étriers, et la longueur inadéquate de chevauchement des barres longitudinales aux zones de jonction dalle-colonne ou colonne-semelle sont des exemples de ces déficiences.

Les colonnes construites à l'époque datant des années 1960, peuvent présenter une faible résistance en flexion, en cisaillement ainsi qu'une ductilité insuffisante en flexion pour répondre aux exigences requises aujourd'hui.

Les déficiences des colonnes ont conduit à la recherche de nouvelles méthodes de renforcement à partir de méthodes connues, telles que l'installation d'enveloppes d'acier (steel jacket) autour des colonnes de béton. L'intérêt pour des matériaux composites d'avant-garde offre des avantages évidents d'installation et une durabilité accrue comparativement à l'enveloppe d'acier conventionnelle.

Dès 1980, plusieurs chercheurs et manufacturiers développent des techniques d'utilisation adaptées au nouveau matériau. Mais, c'est depuis 1990 que l'utilisation des composites connaît sa véritable croissance comme méthode de réhabilitation. Les composites couramment utilisés sont à base de fibres de carbone et de fibres de verre. Ces fibres ont une résistance en tension, dans le sens longitudinal, supérieure à l'acier de structure. Par contre, ils ont des modules d'élasticité généralement inférieurs à l'acier.

Ainsi les différentes recherches menées sur l'utilisation des PRF pour le chemisage des poteaux, ont montré qu'outre les avantages cités précédemment, les PRF offraient de vrais gains en termes de performances mécaniques, notamment vis -à- vis de la ductilité et de la résistance en traction élevée. De plus, les schémas de mise en place des renforcements sont aisément adaptables aux

besoins spécifiques de l'élément défectueux. Cela est grâce aux propriétés des matériaux composites, tel que la facilité d'installation qui nécessite très peu d'interruption d'exploitation à mettre en œuvre du fait de leur légèreté (rapport résistance-poids), leur flexibilité et leurs excellente résistance à la corrosion.

Les propriétés mécaniques et chimiques varient selon le type et le volume de fibre et de résine, ainsi que de la qualité de la production. Ces facteurs influencent différemment le comportement des structures de béton renforcées en matériaux composites.

La conception de renforcement en composites exige une connaissance approfondie du comportement global de la structure renforcée à l'aide de composite car les matériaux composites ont un comportement à la rupture fondamentalement différent de celui des renforcements conventionnels. Les matériaux composites exigent donc des précautions spécifiques supplémentaires lors de leur utilisation. Par exemple, les fibres présentent généralement un type de rupture fragile et brusque, comparativement à l'acier qui offre une ductilité beaucoup plus grande.

Les composites sont principalement utilisés comme renforcement à la traction, dans le sens longitudinal de la fibre. Les propriétés mécaniques des composites varient énormément suivant leur sens d'utilisation car ce sont des matériaux fortement anisotropes. L'orientation des fibres a toute son importance car elle peut modifier le comportement structural du composite. Par exemple, des fibres orientées dans le sens transversal ne contribuent pratiquement pas à la résistance en flexion dans le sens longitudinal, mais offre un confinement intéressant dans le sens transversal. Par ailleurs, l'utilisation de composites bidirectionnels (composés des fibres orientées dans les deux directions) peut être une solution avantageuse pour améliorer le comportement aussi bien axial que transversal.

Finalement, les enveloppes de matériaux composites répondent généralement aux besoins que nécessitent les réhabilitations actuelles de colonnes de béton armé. Cette méthode permet d'augmenter la capacité axiale et les déformations maximales avant rupture. De plus, le comportement sismique de la colonne enveloppée de composite est grandement amélioré et permet ainsi de satisfaire aux normes de dimensionnement.

### **III – 3. RENFORCEMENT DES COLONNES DE BETON A L'AIDE DE MATERIAUX COMPOSITES**

Le changement des codes de béton, la détérioration des colonnes et les exigences de réhabilitation (Retrofit) sismiques requièrent un renforcement des colonnes qui peut être procuré par un confinement additionnel, afin d'assurer une résistance et une capacité de déformation adéquate.

Les enveloppes de matériaux composites appliquées aux colonnes augmentent le confinement du béton. Dans les régions de la rotule plastique, qui se trouve aux extrémités des colonnes, la déformation du béton avant la rupture est supérieure qu'au milieu des colonnes. En fait, c'est souvent cette zone qui définit la ductilité globale de la colonne. Pour cette raison, les méthodes utilisées ont pour objectif d'augmenter les forces de confinement, soit dans la région de la

rotule plastique ou sur l'ensemble de la colonne. Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par des chercheurs ont démontré une augmentation significative en ductilité et en résistance reliée à l'utilisation d'enveloppe de composites.

Les bénéfices de cette technique de renforcement sont multiples :

- 1) L'augmentation de la ductilité :
  - En raison du confinement, le béton se rompt à un plus haut niveau de déformation qu'un béton non confiné;
  - Selon le degré de confinement, la déformation à la rupture du béton peut être augmentée plusieurs fois.
- 2) L'augmentation de la résistance :
  - La pression latérale exercée par l'enveloppe de composites augmente la résistance en compression du noyau du béton et de la section de béton constituant l'enrobage;
  - La capacité axiale et latérale de la colonne est, par conséquent, plus élevée.
- 3) L'application aux colonnes circulaires et carrées :
  - la flexibilité des composites permet d'envelopper les colonnes de différentes géométries sans diminution de leur moment d'inertie.
- 4) La légèreté :
  - La faible densité des composites simplifie la construction et réduit les coûts de pose.
- 5) L'esthétique :
  - L'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures
- 6) La durabilité
  - Certaines fibres, comme la fibre de carbone, résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel-dégel et à l'humidité.

Par contre, les colonnes ne peuvent être réhabilitées avec une enveloppe de composites lorsque des déficiences structurales se situent dans la semelle. Il serait alors préférable d'utiliser une méthode conventionnelle de réhabilitation, telle que l'ajout d'acier armature et de béton en surépaisseur.

### **III – 4. MATERIAUX COMPOSITES DESTINES AU RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME.**

Dans le secteur du génie civil, et plus précisément dans l'application aux poteaux, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion) (**Figures III-1**). Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF.

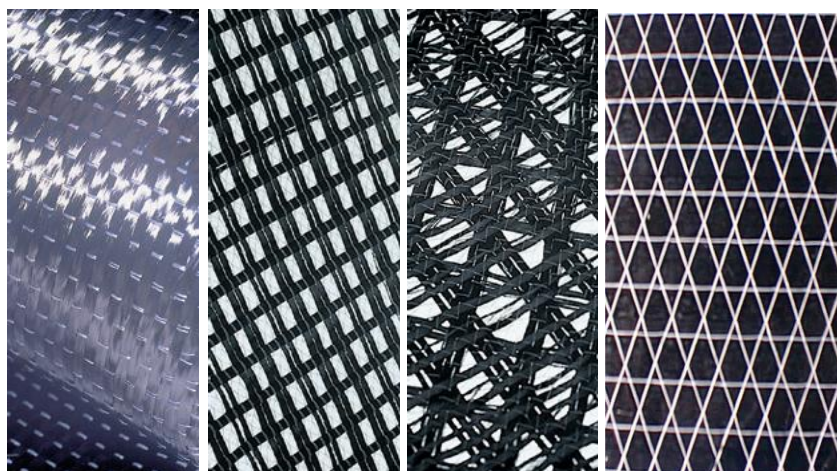
En ce qui concerne les lamelles (exemple lamelles en CPRF), sont fabriquées par extrusion en bandes de 250 à 500 mètres avec plus de 60 % de fibres (en volume). Elles présentent les caractéristiques suivantes:

- Couleur : noire,
- Épaisseur : 1,2 mm,
- Densité : 1,6 kg/cm<sup>2</sup>,
- Résistance à traction : 2400 N/mm<sup>2</sup>,
- Allongement en rupture : 1,4 %,
- Largeur : 50 mm.

Ainsi étant donné le rôle critique que peut jouer un poteau dans les diverses constructions et ouvrage d'art, d'autant plus que ces éléments structuraux devraient être proportionnés de manière à pouvoir supporter des déplacements latéraux importants tout en préservant l'équilibre global de la structure. Alors le choix du type de PRF à adopter tend toujours vers une présélection de tel sort que même au cas de sollicitation alterné, les poteaux se déforment sans perte excessive de résistance.

Toutes les descriptions des matériaux composites sont défini au Chapitre (II), néanmoins la plupart des recherches expérimentale ont penché sur l'utilisation des PRFC ou des PRFV en fibre continue (Tissu), en raison de leurs propriétés excellente (Figures III-1).

La famille des matériaux composites à fibres continues est relativement grande, cependant, pour les travaux en génie civil, et plus précisément les poteaux.



*Figures III-1 : Assortiment de produits de PRF en tissu utilisés pour le la réhabilitation des poteaux en béton*

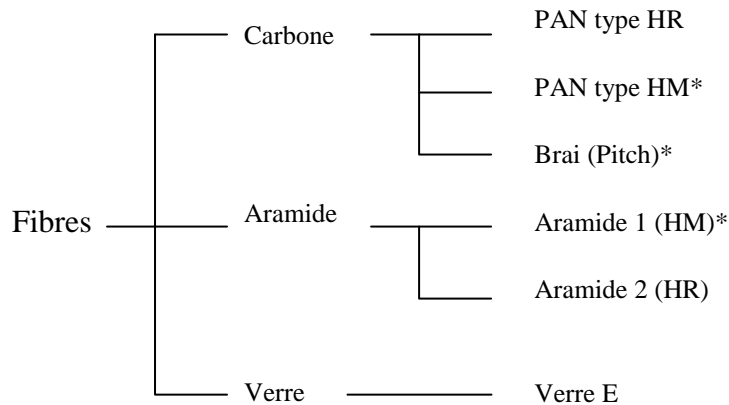
#### **III – 4 – 1 Fibres continues :**

Le terme fibres continue est un générique qui regroupe les familles de fibres qui ont un diamètre compris entre 5 et 20 $\mu$ m, avec de très grandes résistances en traction et à la corrosion, ils ont notamment un faible poids et sont non magnétiques [Fukuyama et al 2000]. On peut les rencontrer sous forme de fibres tissées ou en mats sous des bobines.

Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en mouvement dans deux directions (rotation autour de la structure à différentes hauteurs). Lorsque l'ensemble se met en mouvement,

les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer, préalablement enduit d'une résine. Après le dépôt des fibres, une couche de fermeture de résine assure la cohésion de l'ensemble. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes.

Les types de fibres considérés sont le carbone, l'aramide et le verre (Figure III-2), les caractéristiques mécaniques sont résumés dans le **tableau III-1** [Fukuyama et al 2000].



\* : Ne sont pas utilisées pour le renforcement parasismique

**Figure III - 2:** Classification des fibres [JBDPA1999], [ Fukuyama et al

### III – 4 – 2 Les tissus composite (PRF polymère renforcé de fibres)

Ils sont classés d'après leur grammage (poids au mètre carré) qui varie entre 200 et 415 g/m<sup>2</sup> [JBDPA1999], [Fukuyama et al 2000], selon l'orientation des fibres on distingue les tissus unidirectionnels où les fibres sont orientées dans le même sens, et les tissus bidirectionnels, où les fibres sont orientées dans deux directions. Les tissus peuvent aussi être pré-impregnés.

Le renforcement de poteaux à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'impregnation.

Les propriétés mécanique du composite sont déterminés à partir d'essais de traction et en ne considérant que la section des fibres, cela pour éviter d'avoir des variations dans les résultats et qui sont dues à la non uniformité de l'épaisseur du composite du fait qu'on ne peut pas bien contrôler la répartition de la résine [JBDPA1999], [Fukuyama et al 2000], [Teng et al 2002]. A titre indicatif, on donne les propriétés mécaniques des PRF de carbone, d'aramide et de verre dans le **tableau III-1**.

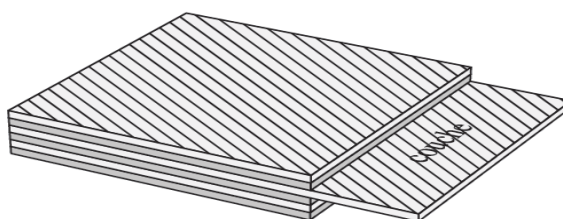
**Tableau III - 1 : Caractéristiques mécaniques des composites** [Teng et al 2002]

Composite unidirectionnel	Taux volumique en fibres (% en poids)	Poids volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité	Résistance en traction (Mpa)
Verre/polyester PRFV	50 – 80	1600 – 2000	20 – 55	400 – 1800
Carbone/époxy PRFC	65 – 75	1600 – 1900	120 – 250	1200 – 2250
Aramide/époxy PRFA	60 – 70	1050 – 1250	40 – 125	1000 – 1800

### III – 4 – 3 les composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. (Figure III-3). Les stratifié ont plusieurs structures, notamment :

- Des structures sandwiches
- Tissées multi-directionnelles
- 3D-Evolutif C/C
- 2D SiC-SiC



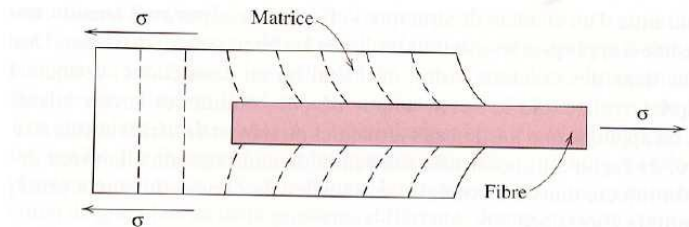
**Figure III-3 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées**

### III – 4 – 4. La résine

La matrice permet de lier les renforts entre eux, de les protéger de l'abrasion et de l'environnement, de répartir les contraintes et de les transmettre aux renforts par l'intermédiaire de l'interface. La transmission de l'effort est principalement assurée par les contraintes de cisaillement qui se développent dans la matrice entre les fibres (Figure III-4)

Il existe plusieurs types de résines, mais quand la fonction d'adhérence au béton est importante (renfort en flexion et effort tranchant), on utilise l'époxy [Teng et al 2002], il est important de noter

que lors de travaux à des températures inférieures à  $+5^{\circ}\text{C}$ , il faut utiliser des résines qui polymérisent à faible température tel que la méthacrylique [JBDPA1999].



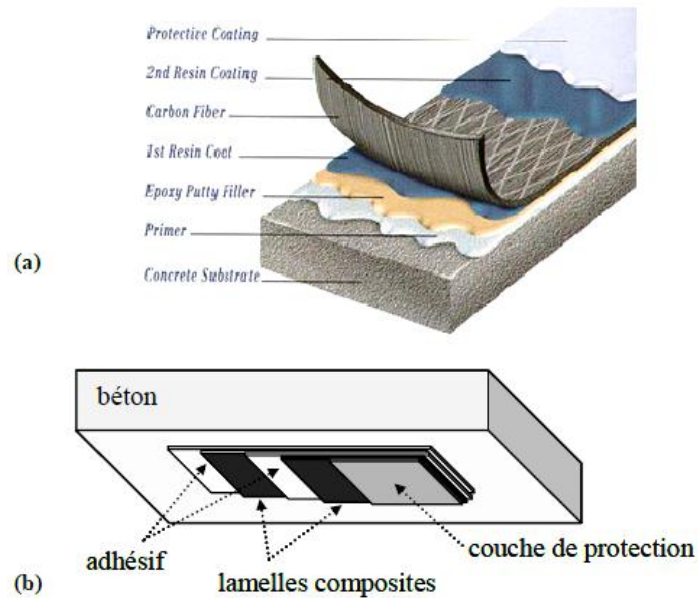
**Figure III-4 :** Déformation de la matrice autour d'une fibre soumise à une contrainte de traction.

### III – 5. MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES :

L'application des deux types de matériaux composite précédemment décrit (tissu et lamelle), il existe principalement deux méthodes pour la mise en œuvre des renforts composites et leur installation sur ouvrage :

- La première technique consiste à imprégner des tissus de fibres souples au moyen d'une résine époxy liquide et à les placer ensuite sur la structure à renforcer. Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton. La résine doit être suffisamment fluide pour assurer une bonne imprégnation du tissu et sa formulation doit permettre une polymérisation à température ambiante. La souplesse du tissu autorise l'emploi de cette technique pour le renforcement d'éléments de formes complexes.
- La seconde méthode consiste à utiliser des lamelles stratifiées rigides fabriquées en usine par le procédé de pultrusion (ce sont en général des composites carbone/époxy). Ces lamelles sont collées sur la surface en béton au moyen d'un adhésif époxy de consistance pâteuse et polymérisable à température ambiante. Les lamelles rigides ne pouvant pas épouser les formes du support, cette technique est plutôt adaptée à des surfaces planes ou ayant de grands rayons de courbure.

Dans les deux types de procédé, plusieurs couches de tissus ou de lamelles peuvent être superposées en fonction de la rigidité recherchée du renfort (**Figure III-5**).



**Figure III-5 :** Description des procédés de renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (a) ou par collage de lamelles composite (b) (ici deux lamelles superposées).

### III – 6. METHODES DE CONFINEMENT DES POTEAUX PAR LES « PRF »:

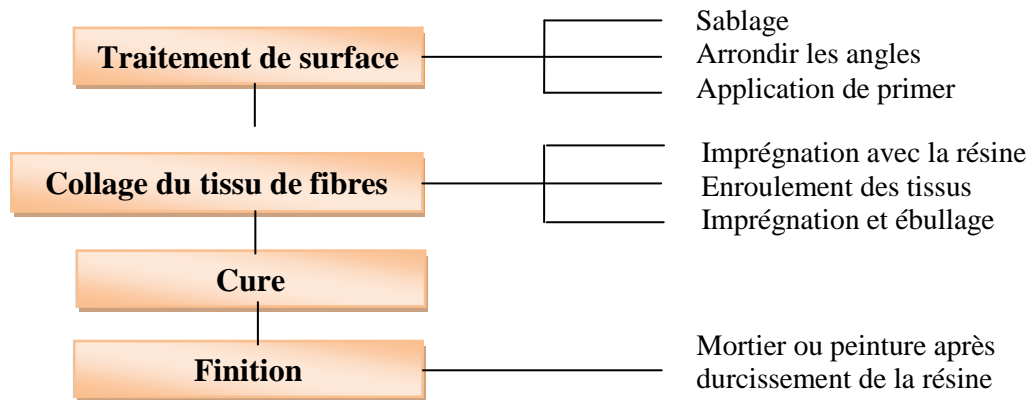
Il existe plusieurs méthodes qui permettent la mise en place des renforts en PRF sur un substrat béton ([Hamelin, 2002]), cependant les plus utilisées pour le renforcement des poteaux sont la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coque préfabriquées .

#### III – 6-1. Stratification au contact

La stratification au contact (stratification directe) est de loin la méthode la plus utilisée. Il s'agit d'un processus de moulage au contacte par enveloppement du matériau composite (exemple : tissu imprégné) autour des poteaux figure III-6. Cette fois la polymérisation se fait à température ambiante (le renfort atteint sa résistance totale au bout d'une semaine) selon les étapes résumées dans la figure III-7.



**Figure III-6 :** stratification au contact



**Figure III - 7 :** Etapes de mise en œuvre du renfort textile à fibres continues [JBDPA1999], [Fukuyama et al 2000].

Il est à noter que dans le processus de moulage au contact se fait par des tissus ou des lamelles, ou l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

### III - 6 -1-a) Traitement de surface

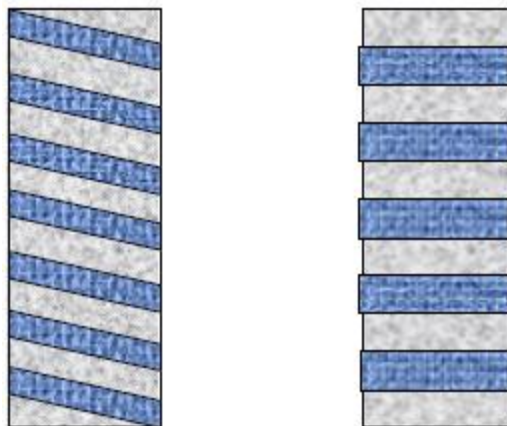
Cette étape permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées à court terme. Après avoir ragréé la surface de béton (sablage, application d'un mortier polymère). Aussi le traitement de surface a pour but d'optimiser les performances du renfort en améliorant l'adhérence sur le béton et en éliminant les angles saillant qui conduisent à des concentrations de contraintes et donc une rupture prématurée du renfort, le rayon de l'arrondi ne doit pas être inférieur à 10 mm. On procédera éventuellement au rebouchage des cavités pour avoir une bonne planéité.

### III - 6 - 1- b) Mise en place des tissus de fibres continues

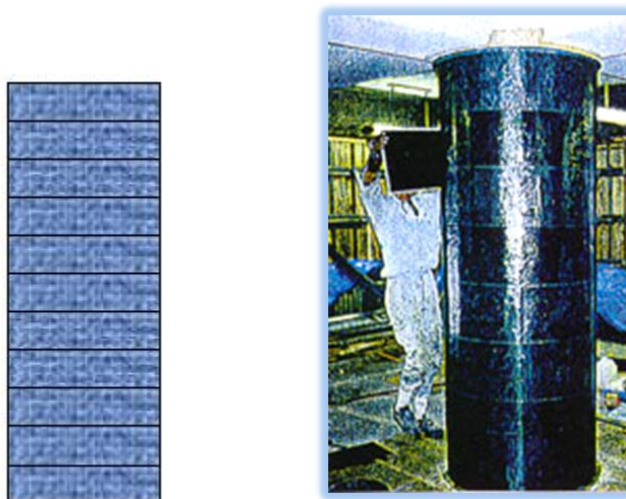
Le renfort est mis en place par moulage (stratification) au contact, (méthode manuelle) - figure III-6. En premier lieu, il faut découper les bandes de tissus PRF au dimensions voulues avec une paire de ciseaux ou un cutter en prenant toujours soin à considérer une sur longueur, généralement prise supérieure à 10 cm [JBDPA1999], après cela on applique la résine sur l'élément à renforcer et on colle le tissu, finalement on sature avec la résine et on chasse les bulles d'air avec le rouleau ébulleur, ces deux dernières étapes seront répétées autant de fois que de nombre de couches.

Pour le renforcement des poteaux, deux types de configurations de confinement peuvent être envisagés :

- Un confinement discontinu, réalisé avec des bandes en spirales continues ou en anneaux espacés sur toute la hauteur du poteau, et peuvent éventuellement être inclinées. (figure III-7)
- Un confinement continu, avec des bandes non espacées réalisées sur toute la hauteur du poteau. (figure III-8).



*Figure III-8a : Configurations du Confinement discontinu pour les poteaux*



*Figure III-8b : poteau entièrement confiné (Confinement continu)*

### **III - 6 - 1- c) La cure**

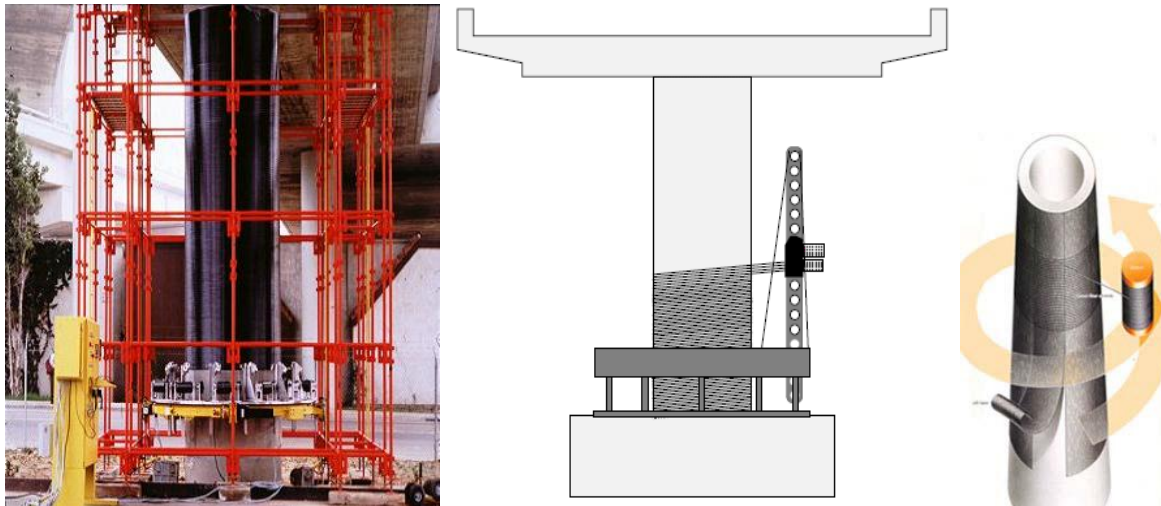
La durée de polymérisation de la résine est tributaire de la température ambiante, ainsi lors de travaux à l'extérieur, une cure s'avère nécessaire pour éviter que sable et poussière n'adhèrent à la résine encore fraîche.

### **III – 6 - 1- d) Finition**

Une fois la résine durcie, les finitions telles que peinture ou enrobage par mortier peuvent être effectués.

### III – 6 – 2. Enroulement filamentaire

Méthode utilisée pour les poteaux de section circulaire, les étapes de mise en œuvre sont les mêmes que pour la méthode précédente, sauf que la stratification est automatisée (utilisation de machine contrôlée) figure III-9, ce qui mène à un TVF élevé donc de meilleures performances. Cette technique a été initiée par Fardis et Khalili (1981).



*Figure III-9 : Enroulement filamentaire [Monti 2003]*

### III – 6 – 3. Chemisage par coques en PRF préfabriquée

Les poteaux en béton armé peuvent être renforcés avec des coques en PRF (Teng et al.2002), préfabriquées dans des conditions contrôlées. Ces coques sont imprégnées de résine avant leur mise en place au chantier, elles sont constituées de deux demi-cylindres ou deux demi-rectangles (Nanni et Norris 1995, Ohno et al. 1997), ou encore des cylindres avec une fente verticale (Xiao et Ma 1997), qui permet leur ouverture pour les placer autour des poteaux.

Pour que le FRP soit efficace, le vide entre la chemise et le poteau doit être rempli avec de la résine (Xiao et Ma 1997) ou du mortier (Nanni et Norris 1995, Ohno et al. 1997). L'intérêt des coques en PRF est qu'elles servent de coffrage permanent quand la forme de la section du poteau est modifiée de carré ou rectangulaire en circulaire ou elliptique (voir figure III-10)

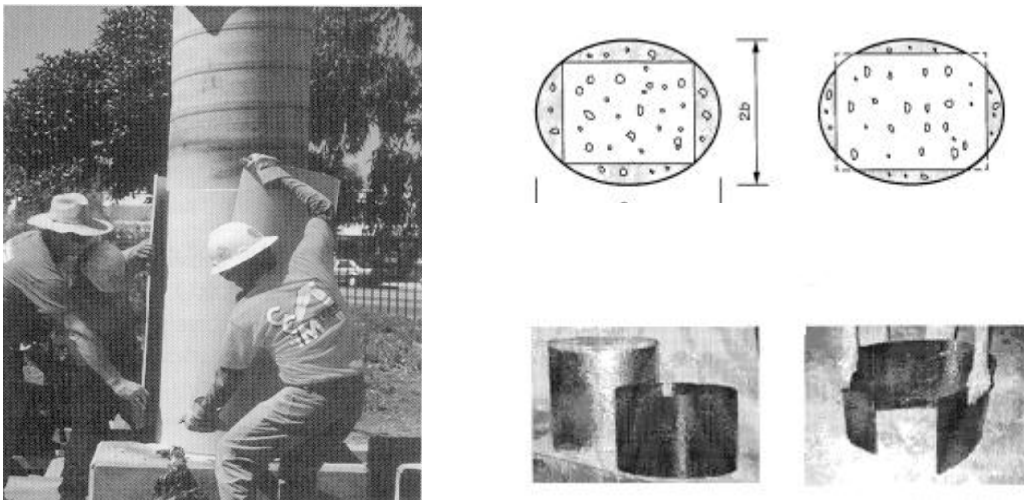


Figure III - 10 : Chemisage par coque en PRF [Monti 2003], [Teng et al 2002]

### III – 6-4. COMPARAISON DES METHODES DE MISE EN ŒUVRE

Les principaux avantages et inconvénients de ces trois méthodes sont résumés dans le tableau III-3

Tableau III - 2 : Comparaison entre les méthodes de mise en oeuvre [Teng et al 2002]

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Stratification au contact</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en œuvre facile, ne nécessite pas d'équipements spéciaux.</li> <li>- Bonne flexibilité ; peut être réalisée pour des poteaux de différentes formes de section.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La qualité du stratifié est moins bonne.</li> <li>- Nécessite le plus de travaux sur site.</li> </ul>
<b>Enroulement filamentaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliore la qualité.</li> <li>- réduit les travaux sur site.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité réduite.</li> <li>- Nécessite des équipements spéciaux.</li> </ul>
<b>Coques préfabriquées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleure qualité.</li> <li>- Nécessite le minimum de travaux sur site.</li> <li>- Utilisable pour changer la forme de la section du poteau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité limitée.</li> <li>- Coûts de la préfabrication.</li> </ul>

### III –7 CARACTERISTIQUES DU RENFORCEMENT DES POTEAUX PAR MATERIAUX COMPOSITES

Selon les différents paramètres du projet de renforcement, la durée des travaux est très variable, mais elle est en général inférieure à celle nécessaire pour le chemisage en béton armé ou en acier, cela s'explique en premier lieu par les étapes de préparation de surface qui ne nécessite pas

beaucoup de temps et en second lieu par les propriétés des matériaux utilisés, les tissus de fibres étant très légers, découpable facilement et épousent sans difficultés la forme de l'élément à renforcer en plus le chemisage par composite ne nécessite ni soudure, ni injection de mortier et ni coffrage, donc possibilité d'être fait dans des espaces relativement réduits.

Le coût du renforcement par matériaux composite est légèrement supérieur à celui du chemisage en béton armé ou en acier, cependant du fait du très faible coût d'entretien, à long terme il s'avère une solution économique [JBDPA1999], [Seible et al 2003].

En plus de tous ces avantages pratiques et économiques, du point de vue technique, et contrairement au renforcement par chemisage en béton armé ou en acier qui conduisent à une augmentation du poids de la structure et de la rigidité en flexion, ce qui implique l'augmentation des charges sismiques, le renforcement par composites s'avère le plus pertinent dans le domaine parasismique, en effet, du fait de l'anisotropie des PRF, le renforcement à l'effort tranchant ou en compression augmente la ductilité sans augmentation de la rigidité en flexion, ni du poids de la structure et donc pas d'augmentation de charges sismique avec une meilleure tenue, se qui veut dire qu'on arrive à des performances optimum.

### **III – 8. DISPOSITIFS CONSTRUCTIFS**

Comme il a déjà été présenté dans le chapitre (II), la préparation des surfaces du support est une exigence normalisée, mais d'autres aspects demeurent toujours des paramètres incontournables dans l'application du confinement ou dans la recherche. La technique de renforcement, propre aux colonnes en béton armé, consiste à envelopper ces colonnes de feuilles ou coque de PRF, Les fibres sont placées dans la direction circonférentielle. Cette enveloppe crée un effet de confinement du béton qui augmente la résistance de la colonne aussi bien à la compression qu'au cisaillement. NEAL et coll. (1997) rapportent que certaines recherches ont montré que cette méthode améliorerait le comportement des colonnes soumises à des chargements sismiques (comme chargement extrême). Et pour une bonne amélioration requise, d'autres recherches plus récentes sont penché dans la fixation des chemises de PRF, d'où plusieurs dispositifs sont proposés, sans négliger les multiples travaux préparatoire des supports de béton.

- La forme angulaire de la section des poteaux, devrait être amélioré en appliquant des arrondissements avec des rayons adéquat, puis un coulis de ciment expansif ou non (Nanni et Norris 1995, Ohno et al. 1997).
- Dans certain cas, il y a recours au reprofilage de la section. Cette idée de modification de la forme des colonnes a été explorée en premier par Priestley et Seible (1995).

#### **III – 8-1. AMELIORATION DES SECTIONS RECTANGULAIRE**

Il est approuvé que l'impact du confinement par matériaux composite dépend de la forme géométrique de la section du poteau ; ainsi (Karam et al, 2005) ont démontrèrent que la pression de confinement dans le volume du béton confiné, n'est pas toujours constante. Elle est maximale en

s'approchant des coins (angles) de la section et se diffuse envers le centre du béton. L'évaluation de cette pression est difficile mais, on peut estimer une valeur moyenne. (Figure III-11)

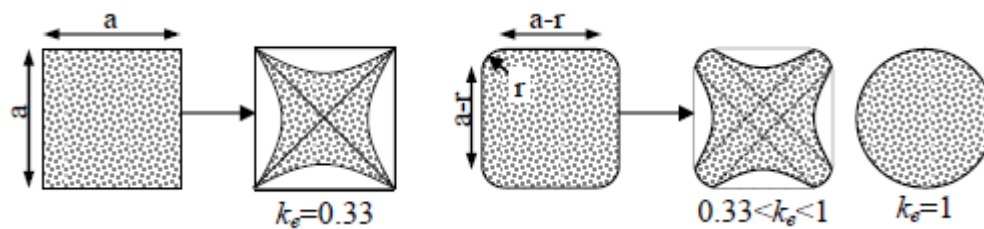


Figure III - 11 : Section efficace du béton confiné et évaluation du coefficient d'efficacité de confinement  $K_e$

[Mander et al, 1988] proposent un coefficient efficace de  $K_e$ , basé sur l'assimilation de la section rectangulaire et peut être divisé en deux parties : le confinement parfait et l'confinement .

### III –8-2. AMELIORATION DU RENFORCEMENT DES POTEAUX CONFINES PAR « PRF »

La technique de fixation par collage se révèle donc être une technique efficace. Néanmoins on constate que la ruine des systèmes collés survient majoritairement par décollement des PRF, et peut alors induire une rupture de type fragile chose à éviter au élément structuraux, notamment les poteaux. Ainsi, optimiser le renforcement par matériaux composites collés en incluant des systèmes d'ancrage peut s'avérer être une disposition constructive plus intéressante que le clouage ou le vissage. Alors les méthodes de fixation sont utilisées lorsque la capacité d'accroche générée par un simple collage du PRF sur son support est jugée insuffisante.

L'étude menée par Elsayed *et al.* ([Elsayed *et al.*, 2009]) permet d'illustrer le fonctionnement d'une connexions continue utilisées pour fixer des renforts en PRF. Nous présentons par la suite quelques techniques d'ancrage ou de fixation jugé les plus pertinentes.

#### a. Ancrage par mèches de PRF

Les mèches d'ancrage, constituées d'une partie ancrée dans le béton, et d'une partie que l'on nommera « fouet » constituée de fibres de carbone libres (Figure III - 12). Cette technique d'ancrage par mèches permet d'augmenter les efforts repris par le PRF et diverses études ont montré que l'utilisation de tels ancrages pouvait améliorer la résistance d'un élément ou d'un assemblage structural. L'utilisation de mèches d'ancrage peut permettre également d'améliorer le confinement de sections à géométrie non circulaire comme les poteaux carré ou rectangulaire, et notamment les formes irrégulière (les formes en L en T...), d'où une augmentation de la résistance de 59 % par rapport au même élément confiné sans mèches ([Karantzakis *et al.* 2005]) ; de plus la déformation ultime évolue de 4,5 % pour l'élément confiné sans mèches.

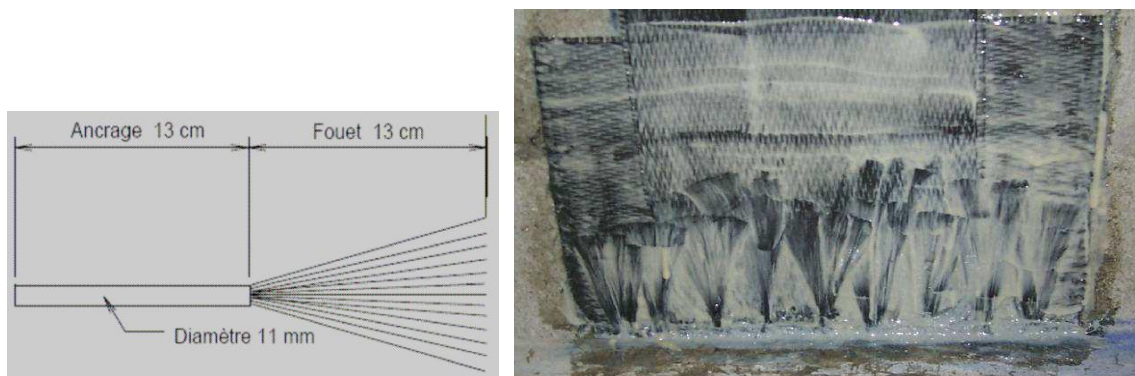


Figure III - 12: Mise en œuvre d'une mèche d'ancrage (procédé Freyssinet)

### b. la technique de « NSMB »

Il s'agit de la technique de NSMB (Near Surface Mounted Bar) consiste à réaliser une engravure dans le béton, puis à venir incurver l'extrémité du PRF (fabriqués à base de tissus) dans cette engravure. Cette extrémité est ensuite bloquée avec une barre (de PRFC ou PRFV par exemple). L'engravure est remplie avec de la résine (Figure III - 13), emprisonnant l'extrémité du PRF et créant ainsi un ancrage mécanique. Les essais réalisés par Eshwar *et al.* ([Eshwar *et al.*, 2008]) ont montré que l'utilisation de ce système pouvait améliorer les performances du renfort à la flexion de 7 à 51 %.

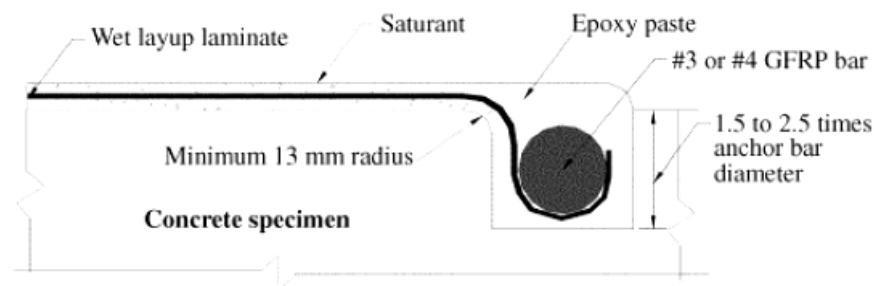


Figure III - 13: Système d'ancrage testé par [Eshwar *et al.*, 2008] – méthode NSMB

### c. la technique de « NSMB » simplifié

C'est une technique similaire à la technique NSMB consiste à coller le tissu de renfort sur l'élément à renforcer (représentatif d'un mur ou d'un poteau) puis à l'ancrer en le recourbant à son extrémité et en le fixant grâce à un profilé en L en acier, vissé dans la semelle de l'élément, comme indiqué sur le schéma de la (Figure III - 14), ([Nagy-Gyorgy *et al.* 2005]). L'élément ainsi renforcé a démontré des performances supérieures à celles d'un élément identique mais dont le renfort n'était pas ancré.

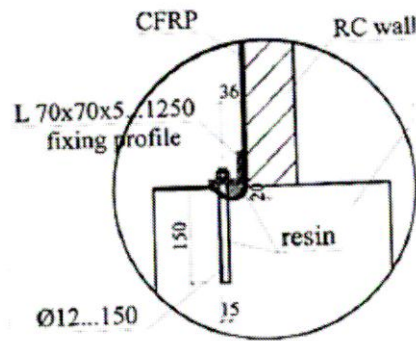


Figure III - 14 : Système d'ancrage testé par Nagy Gyorgy et al. ([Nagy Gyorgy et al., 2005]).

#### d. La technique de Huang et Chen

En addition des ancrages décrits précédemment, Huang et Chen ([Huang et Chen, 2005]) proposent un système d'ancrage original (Figure III - 15), composé d'une première couche de PRF confinant le poteau à tester, d'une couche viscoélastique (VE) recouvrant ce premier confinement, et d'une seconde couche de PRF ancrée dans la semelle.

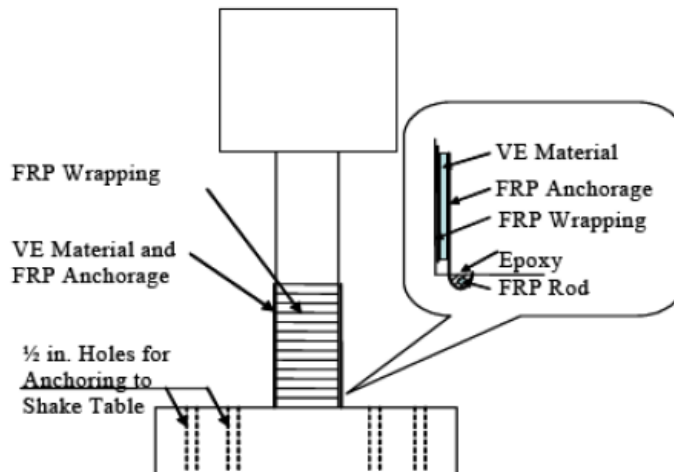


Figure II -15 : Système de renforcement testé par Huang et Chen ([Huang et Chen, 2005]).

#### e. La technique de Raphaëlle SADONE

En 2010, Raphaëlle SADONE en collaboration de l'entreprise Freyssinet, et dans l'objectif d'augmenter la résistance à la flexion et la ductilité des poteaux, ils ont donc menés à mettre au point un nouveau système d'ancrage des lamelles pultrudées dans la semelle du poteau (Figure III - 16 et 17).

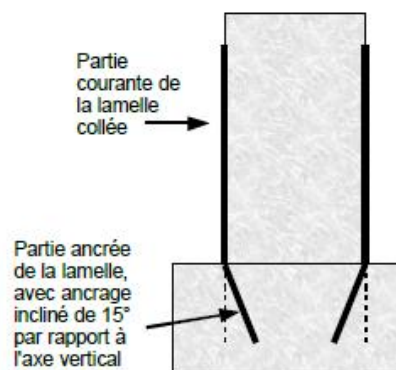


Figure II -16 : Schéma de principe de mise en place des lamelles ancrées sur un poteau.

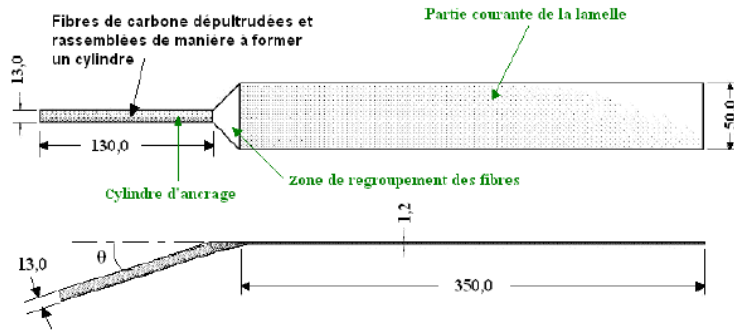


Figure II -17 : Géométrie des ancrages développés (cotes en mm).

### III -9. CONTRIBUTION DU FRP AU RENFORCEMENT

#### III -9-1. INTRODUCTION :

Ce paragraphe expose succinctement de quelle manière l'enchement par un polymère renforcé de fibres d'une colonne de béton contribue à améliorer ses propriétés mécaniques. Ceci facilitera la compréhension de l'influence des différents paramètres caractéristiques du FRP sur les propriétés de confinement d'un élément de structure en béton exposée ci-après.

La littérature est riche d'analyse pour différentes structures et différentes contraintes mais nous nous limitons volontairement à l'exemple d'éléments de colonne.

#### III -9-2. COMPORTEMENT DU BETON CONFINE A LA COMPRESSION

La littérature est riche d'analyse pour différentes structures et différentes contraintes mais nous nous limitons volontairement à l'exemple d'éléments de structure type colonne ou poteaux en béton (armé ou non) soumis à une charge uniaxiale de compression. En effet, c'est cette configuration qui sera testée dans la phase expérimentale de ce programme.

Une éprouvette en béton soumise à une charge uniaxiale de compression se dilate latéralement sous la contrainte.

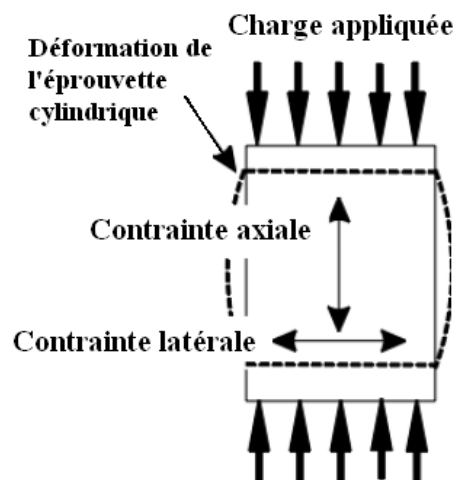
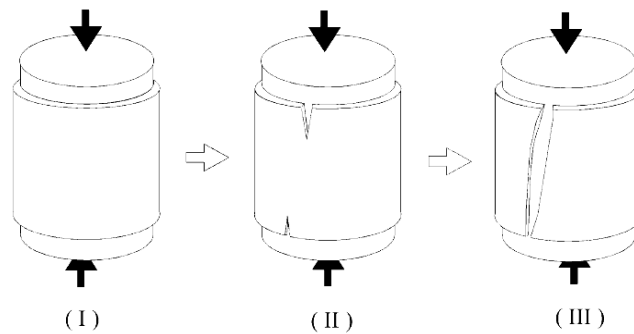


Figure II -18 : Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge uniaxiale de compression

L'enchemisement par un FRP permet donc de retarder la dilatation latérale de l'éprouvette de béton en la confinant, limitant la propagation de fissures internes ce qui repousse la charge nécessaire à la rupture du béton.



(I) : Application d'une charge en surface d'une colonne.  
(II) : Initialisation de fissures depuis le haut et le bas du renfort.  
(III) : Propagation des fissures vers le milieu de la colonne enveloppée.

**Figure II -19** : Mécanisme de rupture d'un béton enveloppé d'un FRP soumis à une charge de compression.

Le mécanisme de rupture suggère que le dimensionnement du renfort ne devrait pas être basé uniquement sur la résistance à la rupture ou sur la déformabilité de l'enveloppe de renfort et que les gains de résistance devraient être réduits selon l'augmentation de la friabilité et de l'excentricité du béton [Parvin et al. 2006]

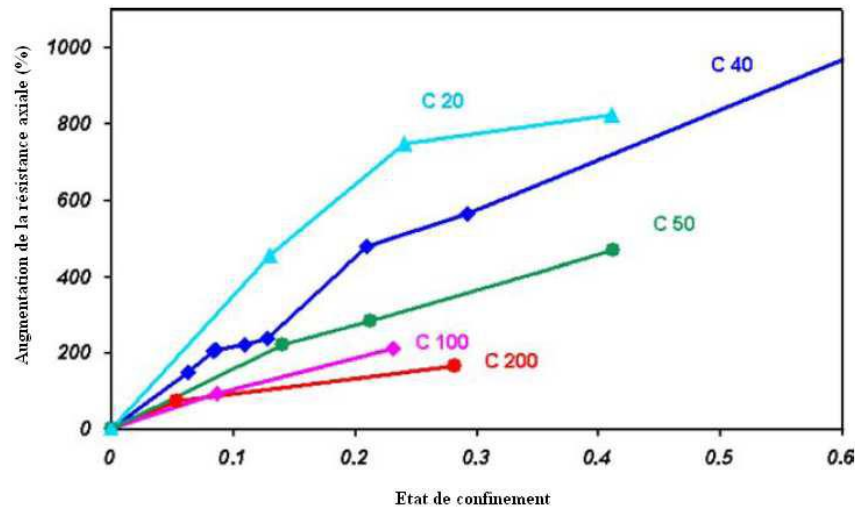


**Figure II -20** : Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP à base de fibres de verre et de résine époxy soumis à une charge de compression [Lau et al., 2001].

Les courbes de déformation en fonction de la contrainte de compression d'éprouvettes de béton renforcées présentent trois régions distinctes [Li et al. 2003a] :

- Une première zone similaire à celle d'un béton non renforcé, elle représente donc la réponse du béton à la sollicitation,
- Une zone intermédiaire de transition plus ou moins importante selon la présence d'armatures,
- Une troisième zone pseudo-plastique caractéristique du FRP : une fois seulement le béton endommagé le renforcement prend le contrôle des déformations de l'éprouvette et sa

participation à la résistance peut être mesurée. La forme et la pente de cette droite dépendent de la rigidité du renforcement. L'effet du renforcement sur la résistance limite à la rupture est d'autant plus important que le béton initialement est résistant [Parvin et al. 2006].

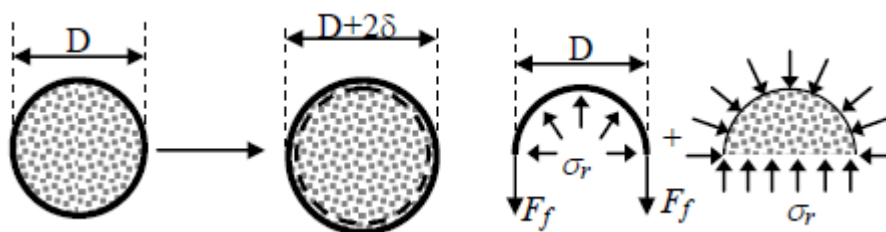


**Figure III -21:** Influence de la résistance initiale du béton sain sur la résistance axiale du béton renforcé pour différents confinements [Berthet et al. 2005].

### III -9-3. EQUATIONS D'EQUILIBRE DE LA SECTION DE BETON CONFINE

En béton armé, il est connu que la résistance du béton comprimé est augmentée par le phénomène de confinement créé par le ferrailage transversal. La résistance du noyau devient ainsi plus élevée que le béton d'enrobage. Dans le cas d'un renforcement de poteaux par tissus en FRP, celui-ci est enroulé et collé autour des faces extérieures créant ainsi une ceinture totalement adhérente.

Sous une sollicitation de compression excentrée ou non, le béton comprimé raccourcis longitudinalement et gonfle transversalement en sollicitant le tissu de FRP; l'interaction entre le béton et l'enveloppe en FRP produit une sollicitation de traction circulaire dans l'enveloppe et une compression radiale du béton. C'est cet état d'action et de réaction entre le béton et l'enveloppe en FRP qui est à la source de la naissance du phénomène de confinement. En absence de gonflement, le confinement est inexistant, pour cela la réaction de l'enveloppe est dite passive.



**Figure III -22:** Confinement d'un poteau circulaire

La Figure III -22 montre la section transversale de diamètre  $D$  d'un poteau entourée d'une enveloppe en FRP. Sous l'effet de la compression, le béton gonfle et le diamètre augmente de  $2\delta$  l'interaction béton-enveloppe développe une pression d'interface  $\sigma_r$ , qui comprime le béton et qui

tend les fibres de l'enveloppe avec une force  $F_f$  (force par mètre de hauteur du poteau). Cette force s'écrit :

$$F_f = \sigma_f . t . n \quad (1)$$

Où  $\sigma_r$  est la contrainte circonférentielle qui agit dans l'enveloppe en FRP, est l'épaisseur d'une couche de FRP et le  $n$  nombre de couches.

En supposant une répartition parfaitement uniforme de la pression  $\sigma_r$  et de la déformation latérale correspondante  $\varepsilon_r$  du béton, le gonflement  $\delta$  du béton induit une déformation latérale de :

$$\zeta_r = \frac{2\delta}{D} \quad (2)$$

L'enveloppe en FRP s'allonge et se déforme de  $\zeta_r = \frac{\left(2\pi\left(\frac{D}{2}\right) - 2\pi\frac{D}{2}\right)}{2\pi\frac{D}{2}} = 2\delta / D \quad (3)$

D'où on déduit l'égalité des déformations  $\varepsilon_r = \varepsilon_f$ .

En se basant sur un système de coordonnées cylindriques, le module de confinement  $E_{cn}$  est défini comme étant le rapport entre l'incrément de la contrainte de confinement  $\Delta\sigma_r$  et la déformation

radiale (ou transversale)  $\Delta\varepsilon_r$  du béton confiné:  $E_r = -\frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_r}$ , où le signe (-) représente la réaction passive de l'enveloppe qui s'oppose au gonflement latéral du béton (déformation d'expansion).

La force de traction circonférentielle  $F_{cn}$  qui se crée dans l'enveloppe s'écrit :

$$F_f = \frac{1}{2} \int_0^\pi \frac{\sigma_r D}{2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\sigma_r D}{2} \quad (4)$$

On déduit que :  $\sigma_r = \frac{2F_f}{D} = \frac{2tn}{D} \sigma_f \quad (5)$

Où «  $n$  » est le nombre de couches de PRF dans l'enveloppe et «  $t$  » l'épaisseur d'une couche du PRF

Ainsi le module de confinement s'écrit :  $E_r = -\frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_r} = \frac{2tn}{D} \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_r} \quad (6)$

En supposant que la loi de comportement des FRP est du type élastique fragile, le module de l'enveloppe

s'écrit alors :  $E_f = -\frac{\Delta\sigma_f}{\Delta\varepsilon_f} = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_r} \quad (7)$

Ainsi le module de confinement peut être complètement connu en fonction du diamètre de l'éprouvette, du nombre «  $n$  » de couches de FRP, de l'épaisseur d'une couche, et du module d'élasticité du composite  $E_f$

$$E_r = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_r} = -\frac{2tn}{D} E_f \quad (8)$$

La pression maximale que le tissu de FRP peut exercer sera atteinte lorsque la déformation circonférentielle

de celui-ci atteint sa déformation ultime, par conséquent, la pression ultime s'écrira :  $\sigma_{ru} = \frac{2tn}{D} \sigma_{fu}$

Qui s'écrit aussi :  $\sigma_{ru} = \frac{2tn}{D} \varepsilon_{fu} E_f = E_r \varepsilon_{fu}$  (9)

On constate que la performance du confinement est affectée par le module de confinement et par la résistance de l'enveloppe en FRP en plus de la géométrie du spécimen en béton confiné.

Pour un spécimen de forme carrée ou rectangulaire confiné par une enveloppe en FRP, l'efficacité du confinement exposé ci-avant diminue. En effet la forme de la section transversale influe sur l'efficacité du confinement (Mander et al, 1988). La section est composée d'une zone pleinement confinée et une autre zone non confinée. (Mander et al, 1988). Les zones non confinées sont mitoyennes des quatre faces et sont limitées par des paraboles, tel-que l'angle formé par les tangentes de ces surfaces et les côtés de la section transversale est de 45° (Mander et al, 1988). La zone confinée est réduite au noyau en contact avec les angles arrondis d'un rayon, comme montré sur la Figure III -23.

Le coefficient de forme est défini comme le rapport  $\frac{A_c - A_u}{A_c}$ , où  $A_c$  est la surface de la zone confinée et  $A_u$

est la surface de la zone non confinée. Ceci permet d'écrire l'expression du coefficient de forme comme suit:

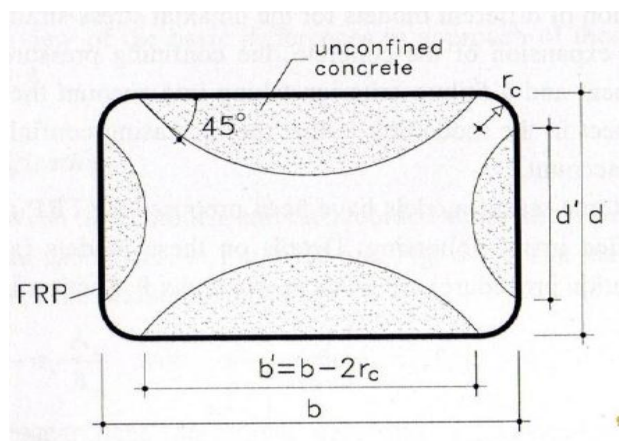
$K_e = 1 - \frac{b^2 + d^2}{3A_g(1 - \rho_{sg})}$  ; Où  $A_g$  est la section totale du béton et  $\rho_{sg}$  le rapport de la section d'acier

longitudinaux sur la section totale du béton (Verok K., 2005).

Cette expression est recommandée par la fédération internationale du béton *fib*.

Une correction est apportée à l'expression de de la forme circulaire pour tenir compte de l'effet forme pour

les sections rectangulaire, qui devient:  $\sigma'_{ru} = k_e \sigma_{ru}$



**Figure III -23:** Zone de confinement dans une section rectangulaire

### **III –9- 4. Conclusion:**

References:

- rapport d l'ACI Committe440 [Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures ]

## Chapitre IV

# Travaux expérimentaux sur le confinement des poteaux en béton par matériaux composites

## INTRODUCTION

En 1928-29, Richart et al ont effectué une série de tests utilisant la pression d'eau pour le confinement des colonnes circulaires. Ils ont observé que l'augmentation de la force était directement proportionnelle à la pression de confinement. Quand le béton est soumis à une charge de compression axiale, celui-ci se déforme latéralement, cette déformation provoque au fur et à mesure que la charge augmente des micro fissures qui se développent et se propagent en macro fissures jusqu'à la rupture du béton. Si le béton est latéralement confiné dans le but de réduire cette déformation, sa résistance et sa ductilité se voit augmentée considérablement, et cela que le matériau utilisé soit de l'acier [Richart et al 1928,1929], [Mander et al 1988], ou du composite de PRF [Teng et al 2002], [Wu 2002], [Harries et Kharel 2003], [Shahawy et al 2000], [Lin et Liao 2004], [Cole et Belarbi 2001], [Y.F.Li et al 2003], [Karabinis et Rousakis 2002], [Mortazavi et al 2003], [Parvin et al 2002], [Nanni et Norris 1995], [Lau et Zhou 2001], [Saadatmanesh 1997], [Sheikh 2002], [Seible et al 1997], [Seible et al 2003], [Cheng et al 2003], [Toutanji 1999], [Toutanji et Deng 2002], [Maalej et al 2003], [Nanni et Bradford 1995], [Lam et Teng 2003], [Berthet et al 2005], [Suter et Pinzelli 2001]. Cela est dû au fait que l'application circonférentielle du PRF permet, en limitant les déformations transverses du béton, de modifier de façon significative son comportement en compression. Donc dans cette partie, et à fin de mieux comprendre l'influence du PRF, on va traiter tout d'abord la mécanique de rupture du béton sous chargement axial, et ensuite entrer dans une étude paramétrique du confinement à travers quelques travaux expérimentaux trouvés dans la littérature. Les paramètres les plus pertinents sont : l'épaisseur du renfort, sa rigidité ; la forme géométrique de la section du poteau et la résistance initiale du béton. On essayera aussi de parler de l'instrumentation utilisée (jauges de déformations, LVDT) et son emplacement pour obtenir de bons résultats, exploitables par la suite. On distingue dans ce qui suit les essais fait sur des éprouvettes de section circulaire, carrée, ferrillées ou non et dont l'application du composite est en vue d'un renforcement (éprouvettes saines) ou d'une réparation (éprouvettes endommagées). La durabilité dans des conditions sévères est notamment traitée.

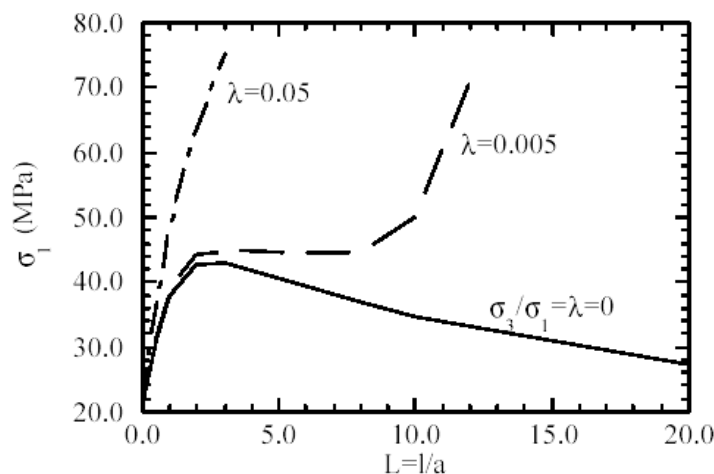
- **comportement du béton confiné**

Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes de béton soumises à la charge de compression axiale augmente considérablement la contrainte et la ductilité de ces colonnes [SAA 99, SAM 98, KAR 93, FAR 82, MIR 97 et TOU 99]. La figure 1 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression  $f_{cc}$ ,  $f_{co}$  et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression  $\sigma_{cc}$   $\sigma_{co}$ ; il augmente aussi de façon considérable le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions séismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des

## IV – 1 MECANIQUE DE LA RUPTURE DU BETON SOUS COMPRESSION AXIALE ET LE MECANISME DE SON CONFINEMENT

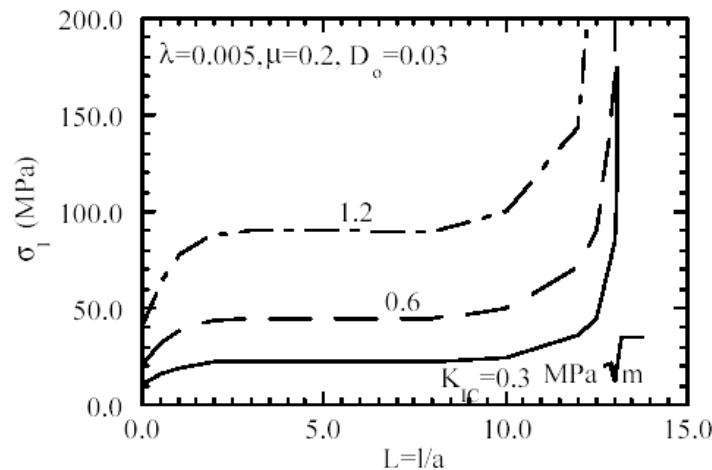
La rupture du béton sous compression axiale est le résultat de l'inter connexion des micro fissures qui s'ouvrent d'avantage au fur et à mesure de l'augmentation du chargement en provoquant une expansion radial du béton, à un certain niveau critique de chargement, la propagation des fissures devient instable, les déformations transversale sont plus accéléré et provoque ainsi la rupture du béton avec des fissures parallèle au chargement. Il est donc possible d'augmenter la résistance du béton en compression en limitant la propagation des fissures (déformation transversal), dans cette optique sont apparus les bétons de fibres, où les fissures sont pontés par les fibres (reprise des efforts de traction par les fibres), d'une manière quasi analogue, on peut augmenter la résistance du béton en pontant les fissures mais avec une pression de confinement, fourni par un matériau à haute résistance de traction de manière à ce qu'il résiste à l'expansion du béton .

Le confinement par PRF (en général passif, on peut avoir un confinement actif par collage de coques préfabriqués et en injectant un mortier expansif mais c'est une pratique assez rare), et qui peut être obtenu en vertu du phénomène de Poisson limite la propagation des fissures en augmentant les forces de frottement (cohésion) du béton, cela est bien visible dans la **figure IV-1**, quand la pression de confinement est absente ( $\lambda = \sigma_3 / \sigma_1 = 0$ ), la propagation des fissures devient instable immédiatement lorsque le pique de résistance est atteint, avec un confinement faible, on peut stabiliser la propagation des fissures (voir la courbe  $\lambda = 0,005$  de la **figure IV-1**). Pour un confinement modéré ou haut niveau de confinement, la propagation instable des fissures peut être complètement inhibée. Il faut préciser que la rupture du béton confiné par PRF se produit par rupture du renfort (la chemise en PRF) [Wu 2002], [Teng et al 2002], [Lam et Teng 2003], [Shahawy et al 2000], [Harries et Kharel 2003], [Nanni et Bradford 1995], [Campioni et Miraglia 2003], [G.Li et al 2003], [Cole et Belarbi 2001], [Lin et Liao 2004], [Mortazavi et al 2003], [Berthet et al 2005] qui est plus ou moins explosive, cela dépend du module d'élasticité des fibres.



**Figure IV - 1:** Propagation des fissures en fonction du chargement axial (longueurs normalisés où  $a$  =moitié de la longueur initiale de la fissure,  $L$  = accroissement de la fissure) [Wu 2002]

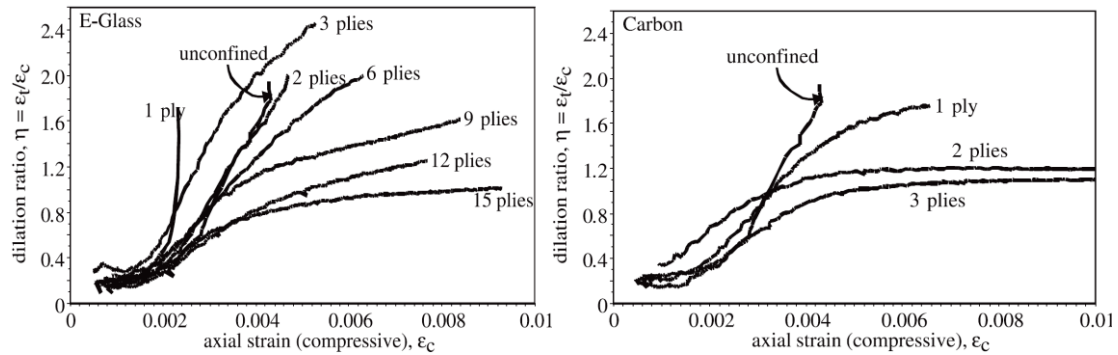
L'efficacité du confinement en utilisant le même PRF pour des bétons avec des ténacités (résistance à la propagation des fissures) différentes, montre que celle-ci devient directement dépendante de la résistance en traction et indirectement de la résistance en compression (voir **figure IV-2**). La rupture des éprouvettes, indépendamment du type de béton est survenu par rupture du PRF.



**Figure IV - 2** : Propagation des fissures en fonction du chargement axial pour des bétons de différentes ténacités ( $K_{IC} = 0.3 \text{ Mpa.m}^{1/2}$  pour mortier, 0.6 béton ordinaire, et 1.2 pour BHR) [ Wu 2002]

Pour comprendre le comportement du béton sous différents niveaux de confinement, et pour déterminer la pression générée, on doit déterminer le coefficient de dilatation qui est le rapport de la déformation transverse sur la déformation axiale ( $\eta = \varepsilon_t / \varepsilon_c$ ), pour des chargement petits, le coefficient de dilatation se confond avec le coefficient de Poisson qui est une constante propre au matériau, on peut donc dire que le coefficient de Poisson n'est rien d'autre que le coefficient de dilatation initial du béton. Le coefficient de dilatation du béton non confiné est constant et égale au coefficient de Poisson jusqu'à 70% de la résistance en compression du béton non confiné notée  $f'_{co}$ , au-delà de 70 % de  $f'_{co}$ , le coefficient de dilatation augmente rapidement pour atteindre une valeur de 0,5 lorsqu'on arrive à  $f'_{co}$ , et devient instable dans le domaine post-pique, la **figure IV-3** montre l'évolution du coefficient de dilatation du béton (appelé aussi coefficient de Poisson apparent) avec différents niveaux de confinement [Harries et Kharel 2003].

Afin de mieux mettre en évidence ce point, et apporter des éclaircissements sur la variation du coefficient de dilatation du béton en fonction de la pression de confinement, nous allons faire un petit aperçu sur les travaux qui ont été faits par [Harries et Kharel 2003] et qui ont testés des éprouvettes cylindriques ( $152\text{mm} \times 305\text{mm}$ ) en compression axiale, avec des différents niveaux de confinement et en varient aussi le type de fibres (verre et carbone). Les résultats des diagrammes de l'évolution du coefficient de dilatation sont représentés dans les **figures IV-3**



**Figure IV -3:** Evolution du coefficient de dilatation en fonction de la déformation axiale pour différents niveaux de confinement (gauche, confinement par PRF de verre E ; droite, confinement par PRF de carbone) [Harries et Kharel 2003]

Les conclusions qu'on peut tirer de ce qui précède sont :

- Le coefficient de dilatation varie avec la déformation axiale, on voit que le coefficient de dilatation initial est égal au coefficient de Poisson et reste constant jusqu'à 60 % de la déformation ultime du béton non confiné notée  $\epsilon_{co}$ , au delà de  $0,6 \epsilon_{co}$  il continue à augmenter avec la déformation axiale, à la valeur de  $2 \epsilon_{co}$ , le coefficient de dilatation se stabilise.
- La limitation du coefficient de dilatation est inversement proportionnelle au niveau de confinement.

## IV –2. PANORAMA DE QUELQUES TRAVAUX EXPERIMENTAUX SUR LES SECTIONS CIRCULAIRES

### • Introduction

Beaucoup de travaux ont été fait pour les éprouvettes cylindriques [Lam et Teng 2003], [Teng et al 2002], [Nanni et Bradford 1995], [Harries et Kharel 2003], [Karabinis et Rousakis 2002], [Mortazavi et al 2003], [Y.F.Li et al 2003], [Lau et Zhou 2001], [Shahawy et al 2000], [Berthet et al 2005] et bien d'autres, notre choix s'est fait sur les deux études de [Shahawy et al 2000], [Berthet et al 2005] et [Lin et Liao 2004] pour leur clarté et la pertinence des paramètres pris en compte.

### IV –2 – 1 Travaux de Shahawy et al (2000)

Shahawy et al (2000) ont utilisés dans leur étude 45 éprouvettes confinés par PRFC (polymère renforcé de fibres de carbone) et 10 non confinées de dimensions  $152,2 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$ , les paramètres considérés sont la résistance du béton et l'épaisseur de renfort (nombre de plis), deux types de bétons ont été utilisés, le premier à une résistance en compression de  $19,4 \text{ MPa}$  et le deuxième  $49,0 \text{ MPa}$ , les résistances visées au début de l'étude sont  $20,7$  et  $41,4 \text{ MPa}$  respectivement, c'est pour cela que les deux bétons seront désignés par ces valeurs plutôt que les résistances réelles. Les éprouvettes de béton  $20,7 \text{ MPa}$  ont été confinées avec 1, 2, 3, 4 et 5 plis de carbone, et celles de  $41,4 \text{ MPa}$  avec 1, 2, 3 et 4 plis de carbone. A chaque fois pour le même

béton et le même nombre de plis, 5 éprouvettes ont été faites, les tissus unidirectionnels de fibres de carbone avait une épaisseur de  $0,5\text{ mm}$ , sa résistance en traction était de  $3654\text{ MPa}$  et son module  $207\text{ GPa}$  (valeurs du fournisseur), les essais au laboratoire ont donnés  $2275\text{ MPa}$  en résistance et  $82,7\text{ GPa}$  en module. La résine utilisée avait une résistance en traction de  $65\text{ MPa}$  avec un module de  $3,1\text{ GPa}$ .

Pour ce qui est de l'instrumentation (voir figure VI-4-a), les éprouvettes ont été équipées de 3 capteurs de déplacement type LVDT (Linear Voltage Displacement Transformer) à  $120^\circ$  d'écartement afin de mesurer les déformations axiales et s'assurer que le chargement n'est pas excentré. Pour mesurer les déformations radiales, 2 jauges de déformations ont été mises sur le composite parallèle au sens des fibres avec un écartement de  $180^\circ$ , et une jauge supplémentaire a été collée directement sur le béton. Le chargement a été fait en contrôle de déplacement avec un pas de  $5,6\text{ mm/min}$ .

#### IV -2 - 1 - a) Observations

Le mode de rupture typique se présentait par rupture du composite au voisinage de la mi-hauteur de l'éprouvette (voir **figure IV-4-b**), dans la partie rompue, le béton reste adhérent au PRF, et la forme conique du noyau de béton était bien visible. La rupture qui est précédée par des craquements est brutale, conséquence d'une libération d'une grande quantité d'énergie, cela est essentiellement dû à la rigidité du renfort (module des fibres), la rupture des poteaux confinés par PRF de verre est beaucoup moins explosive.



**Figure IV - 4:** a) Instrumentation ; b) mode de rupture [Shahawy et al 2000]

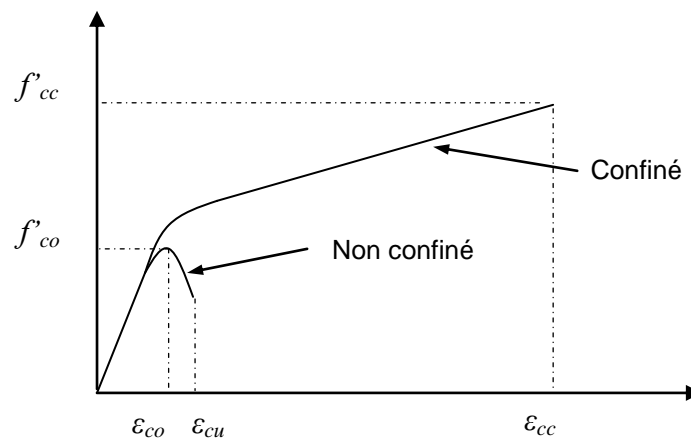
#### IV -2 - 1 - b) Résultats

Les résultats sont résumés dans le **tableau IV-1** ci-dessous, où  $f'_{cc}$  et  $\epsilon_{cc}$  sont la résistance maximum et la déformation correspondante du béton confiné et qui pour des niveaux de confinement moyen ou important sont confondus avec la résistance et la déformation ultime.  $f'_{co}$  et  $\epsilon_{co}$  sont la résistance maximum et la déformation correspondante du béton non confiné (voir **figure IV-5**),  $E_c$  est le module d'élasticité du béton et  $\nu_{ave}$  est le coefficient de Poisson apparent calculé avec les déformations axiales et latérales moyennes.

**Tableau IV - 1 : Résultats des éprouvettes confinées par PRFC**

Résistance du béton (MPa)	Nombre de plis	$f'_{co}$	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}^*$	$E_c(GPa)$	$\nu_{ave}$
<b>Ciblée = 20,7 Réelle 19,4</b>	0	19,4	1,00	0,0033	2,00	16,376	0,3000
	1	33,8	1,74	0,0159	7,95	25,718	0,1025
	2	46,4	2,39	0,0221	11,05	15,376	0,0860
	3	62,6	3,23	0,0258	12,90	14,480	0,0846
	4	75,5	3,90	0,0356	17,80	14,411	0,0500
	5	80,2	4,13	0,0342	17,10	13,928	0,1080
<b>Ciblée = 41,4 Réelle 49,0</b>	0	49,0	1,00	0,0029	1,45	22,409	0,1500
	1	59,1	1,21	0,0062	3,10	23,443	0,0660
	2	76,5	1,56	0,0097	4,85	25,925	0,1460
	3	98,8	2,02	0,0126	6,30	27,925	0,0975
	4	112,7	2,30	0,0190	9,50	22,409	0,0870

Note :  $\epsilon_{co}^* = 0,002$  pour le béton non confiné



**Figure IV - 5: Représentation des résistances et déformations considérées**

Les figures IV-6 et IV-7 montrent les tracés moyens des diagrammes contrainte-déformation axiale et radiale pour les deux types de béton, les déformations radiales sont négatives (traction). La réponse est bilinéaire avec une première pente (module d'élasticité) qui est celle du béton non confiné, cependant la deuxième pente dépend du nombre de plis et de la rigidité du PRF, la zone de transition entre les deux branches correspond à l'activation du PRF (début du confinement).

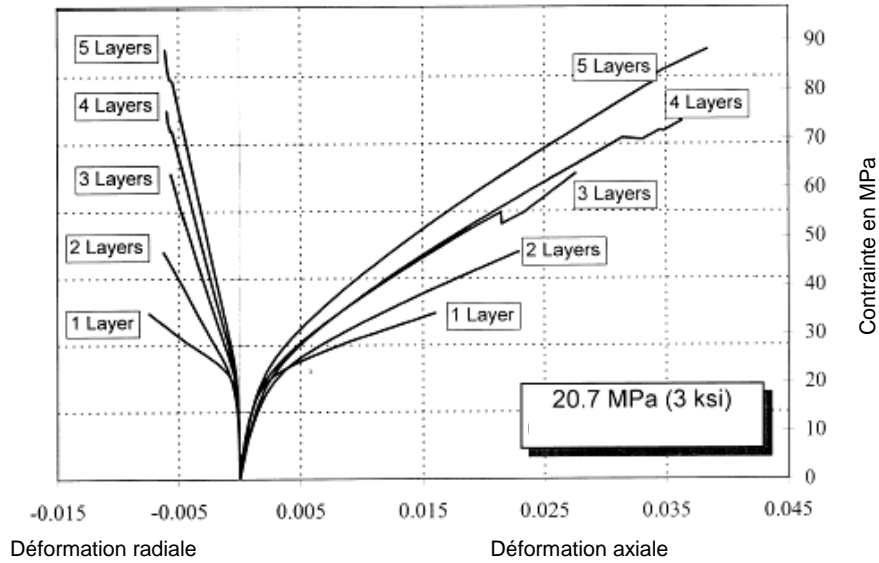


Figure IV-6: Diagramme contrainte-déformation pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]

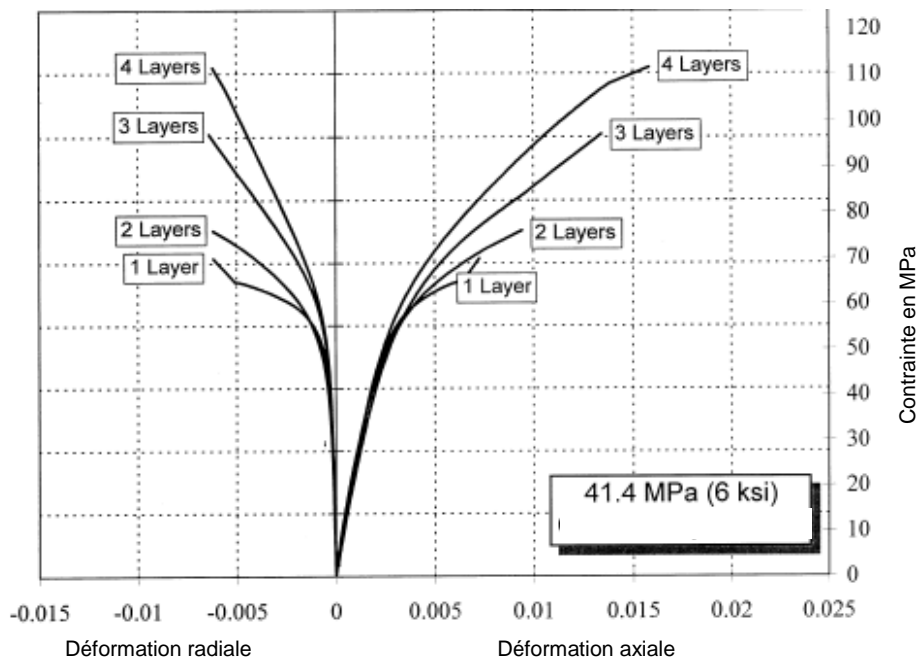


Figure IV-6: Diagramme contrainte-déformation pour le béton 41,4 MPa [Shahawy et al 2000]

Les courbes moyennes de déformation volumétrique en fonction de la charge axiale sont représentés dans les figures IV-7 et IV-8 pour les deux types de béton, on note que la déformation volumétrique (dilatation volumétrique) est le changement de volume par unité de volume du béton notée  $\varepsilon_v = \Delta V/V = \varepsilon_c + 2 \varepsilon_r$

Où  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_c$  et  $\varepsilon_r$  sont la déformation volumétrique, axiale et radiale du béton,  $\Delta V$  représente la variation de volume.

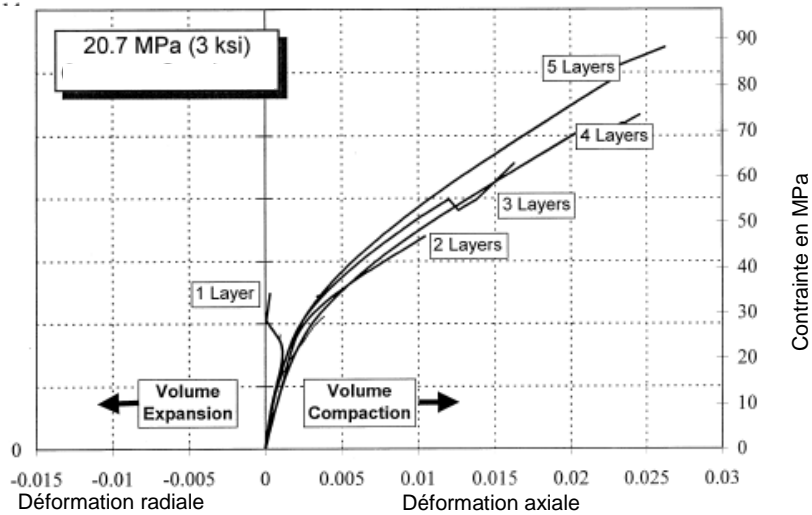


Figure VI - 7: Déformation volumétrique pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]

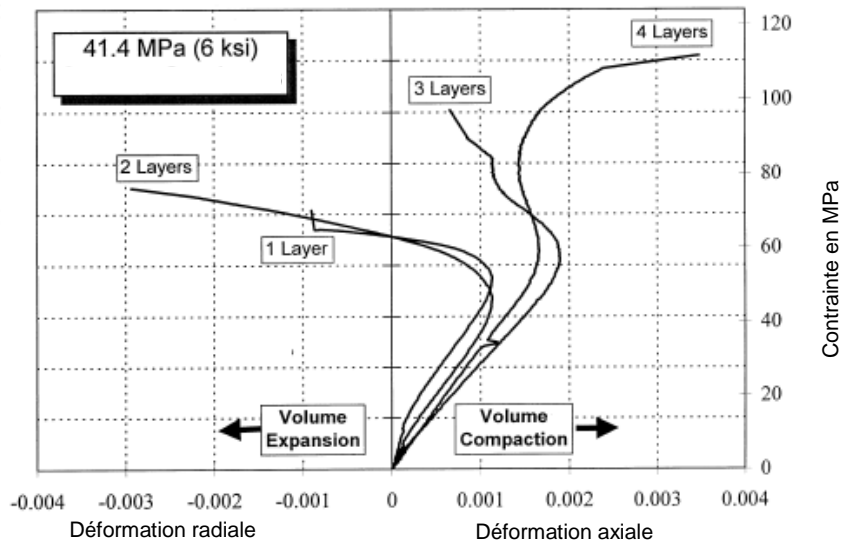


Figure IV - 8: Déformation volumétrique pour le béton 41,4 MPa [Shahawy et al 2000]

Pour le béton 20,7 MPa on remarque qu'un seul plis de carbone suffit pour bloquer la dilatation du béton, alors que pour celui de 41,4 MPa, même deux plis n'ont pas pu bloquer la dilatation, ce phénomène est lié à l'indice de confinement (niveau de confinement)  $f_l/f'_{co}$  qui représente le rapport de la pression latérale de confinement (le calcul de la pression de confinement est détaillé dans le chapitre V) à la résistance du béton non confiné, donc plus le béton à renforcer est résistant et plus la pression latérale de confinement doit être grande, se qui se traduit par un grand nombre de plis, ou changement du type de fibres par exemple prendre du carbone au lieu du verre ; le module des fibres de carbone est à peu près 3 fois celui des fibres de verre.

Le taux de dilatation est défini comme le coefficient de Poisson tangent, ou dérivée de la courbe déformation axiale-radiale.

$$\mu_{exp} = \Delta \varepsilon_r / \Delta \varepsilon_c$$

Les figures IV-9 et IV-10 montrent les courbes moyennes des taux de dilatation en fonction de la charge axiale pour les deux types de béton et pour les différents nombres de plis, les courbes peuvent être divisées en trois parties (ce qui est aussi le cas des fibres de verre). La première partie correspond à la microfissuration du béton et donc une expansion rapide, le pic de l'expansion latérale représente la déformation ultime du béton non confiné, ce qui veut dire que le béton s'appuie sur la chemise en PRF. A partir de ce point, la chemise en PRF commence à confiner le béton et réduit le taux de dilatation jusqu'à le stabiliser avant la rupture. En général, plus l'épaisseur du composite est grande, et plus le pic et la dilatation ultime sont faibles. Pour le béton à 41,4 MPa, le pic et la dilatation ultime sont plus grands que pour le béton 20,7 MPa et cela pour le même nombre de plis, cela est la conséquence du faible niveau de confinement pour les bétons de meilleure résistance, en d'autres termes, même si la pression de confinement est la même (même type de fibres et nombre de plis), le niveau de confinement diminue avec l'augmentation de la résistance en compression du béton.

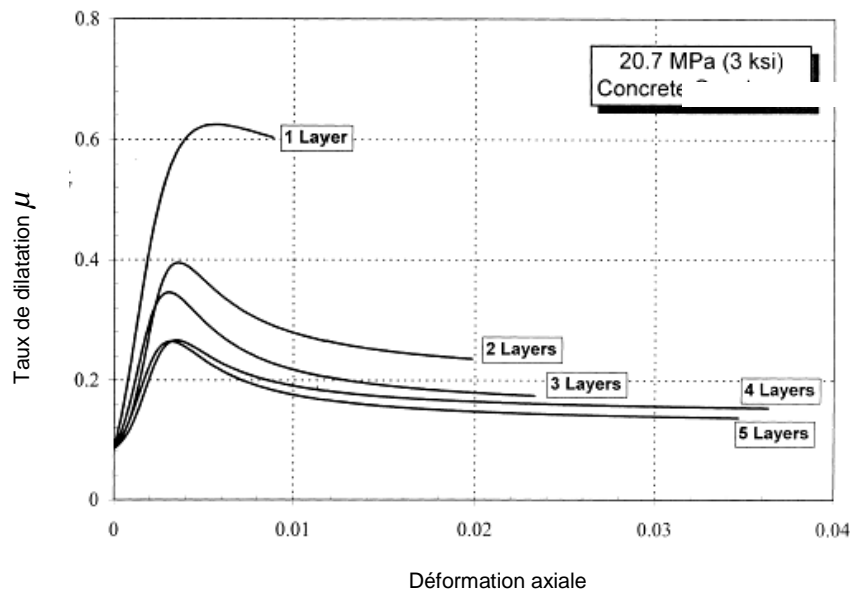


Figure IV - 9: Taux de dilatation pour le béton 20,7 MPa [Shahawy et al 2000]

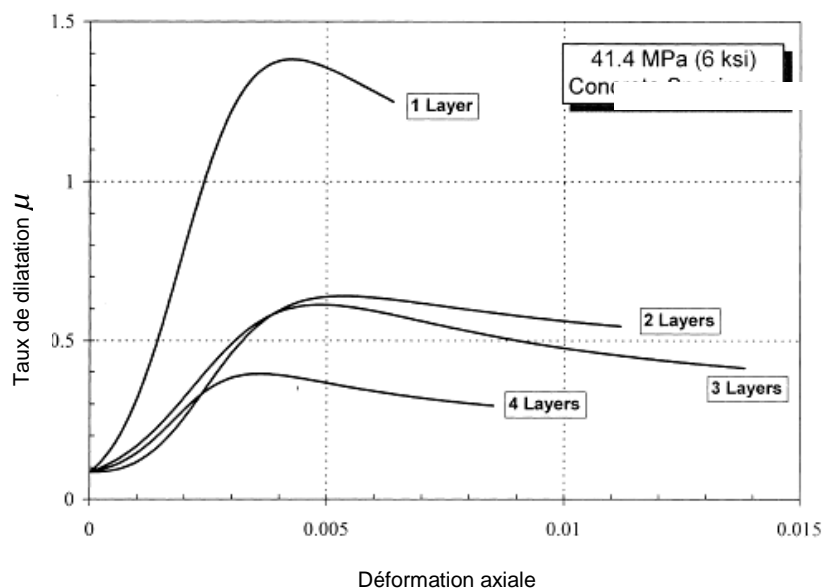


Figure IV - 10: Taux de dilatation pour le béton 41,4MPa [Shahawy et al 2000]

#### IV –2 – 2 Travaux de Berthet et al (2005)

La deuxième étude choisie est celle de Berthet et al (2005), les essais se sont fait sur des bétons ayant 5 classes de résistance différentes, allant du béton ordinaire (25 MPa) au béton hautes performances BHP (170 MPa), selon la classe de résistance visée au départ, les bétons sont appelés C 20 ( $f'_{co} = 20 \text{ MPa}$  à 28 jours), C 40 ( $f'_{co} = 40 \text{ MPa}$  à 28 jours), C 50 ( $f'_{co} = 50 \text{ MPa}$  à 28 jours), C 100 ( $f'_{co} = 100 \text{ MPa}$  à 28 jours) et C 200 ( $f'_{co} = 200 \text{ MPa}$  à 28 jours). Les éprouvettes ont des dimensions de 160 mm × 320 mm pour les trios premières classes et 70 mm × 140 mm pour les deux dernières. Les trois premiers bétons ont été choisis pour étudier le confinement du béton dans le cadre de la réhabilitation, et les deux derniers pour les nouvelles constructions avec des poteaux à hautes performances. Les éprouvettes ont été confinées avec des fibres de carbone (notées C) ou de verre E (notées GE) avec des épaisseurs allant de deux à 12 plis de tissus unidirectionnels dont les fibres sont orientés perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, les plis sont dit orientés à 0° (zéro degré), les propriétés des fibres sont résumées dans le tableau IV-2

**Tableau IV - 2 : Propriétés des fibres utilisées**

Caractéristiques des tissus	Carbone HR		Verre E (GE)	
	C 1	C 1,5	GE 1	GE 1,5
Unidirectionnel				
Résistance en traction (MPa)	3200	3200	2500	2500
Module d'élasticité (GPa)	230	230	74	74
Section (cm <sup>2</sup> /m)	1,1	1,65	1,1	1,65
Grammage des tissus (g/m <sup>2</sup> )	200	290	290	430

Pour tous les spécimens, la même résine époxy a été utilisée. Pour chaque configuration trois éprouvettes ont été réalisées, ce qui fait un total de 63 éprouvettes : 15 non confinées (témoins) et 48 confinées dont 33 avec des fibres de carbone et 15 avec des fibres de verre.

#### IV –2 – 2– a) Instrumentation

Les éprouvettes ont été testées en compression uni axiale monotone, le chargement est contrôlé en déplacement avec un pas de 0,2 mm / min. les déformations axiales et radiales sont mesurées avec des LVDT comme le montre la figure IV-11. Trois LVDT sont placés à 120° pour avoir la moyenne des déformations axiales, idem pour les déformations radiales. Pour finir, des jauges de déformation ont été placé horizontalement et verticalement sur le béton des spécimens non confinés et sur le PRF pour les spécimens confinés.

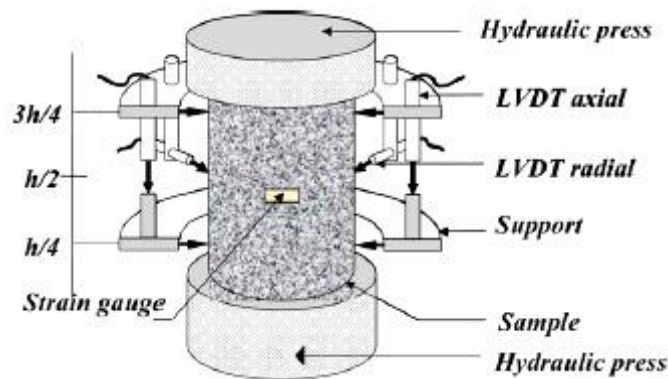


Figure IV - 11: Détails des instruments de mesure

#### IV -2 - 2 - b) Résultats

Les résultats reportés dans les figures IV-12 et IV-13 montrent que le confinement augmente d'une manière significative la résistance et la déformation ultime du béton, les diagrammes contrainte-déformation sont bilinéaires pour tous les spécimens. On remarque que les premières branches des diagrammes du béton confiné et non confiné sont confondues, ce qui veut dire que la première branche ne dépend que des propriétés du béton, tandis que la deuxième branche semble dépendre des propriétés du PRF, notamment sa rigidité, c'est pour cela que la pente de la deuxième branche augmente avec l'augmentation du niveau de confinement.

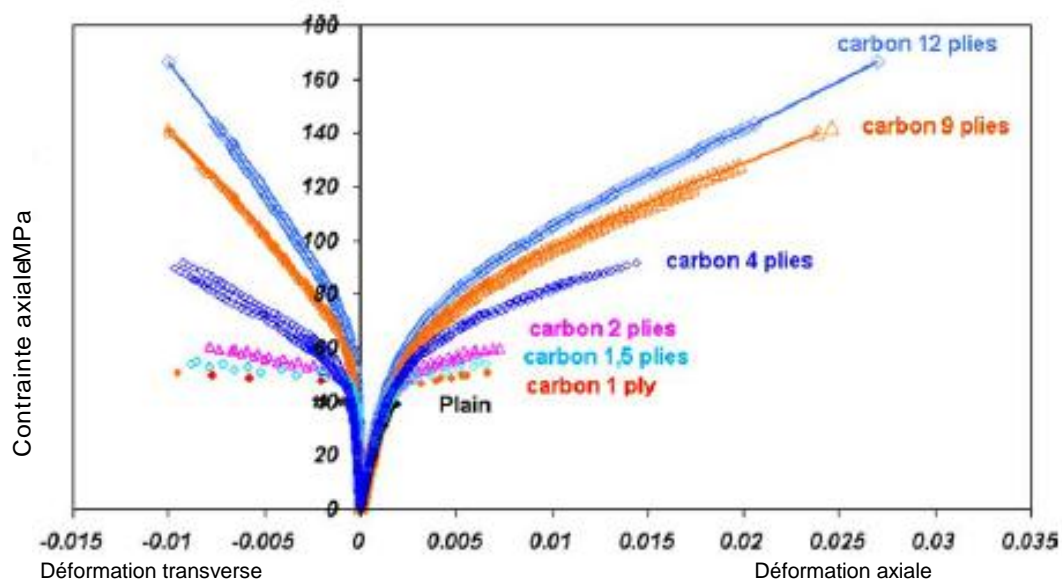


Figure IV - 12: Diagrammes contraintes-déformation du béton C 40 confiné par PRFC [Berthet et al 2005]

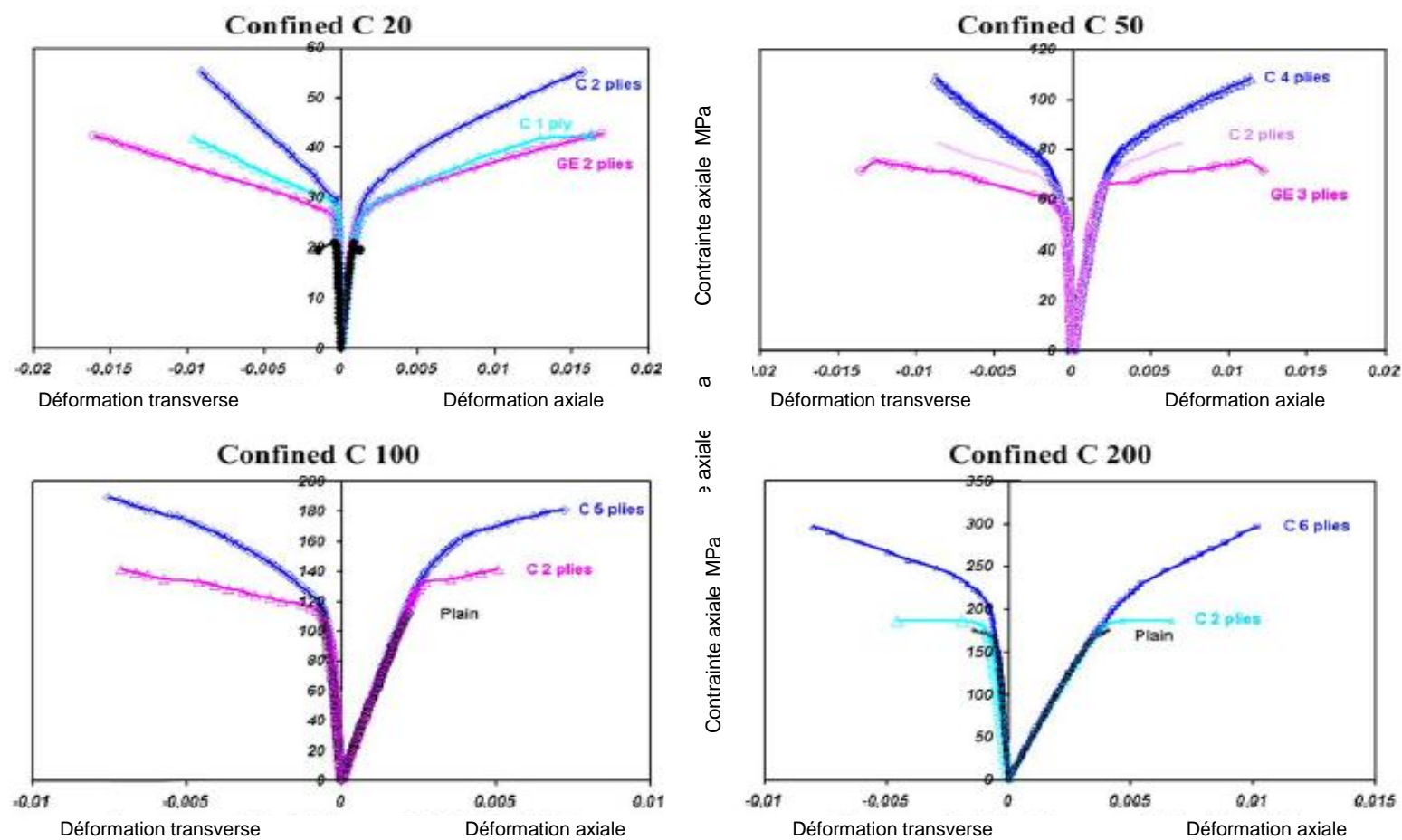


Figure IV - 13: Diagrammes contraintes-déformation des bétons C20, C50, C100 et C 200 confinés par PRFC et PRFV [Berthet et al 2005]

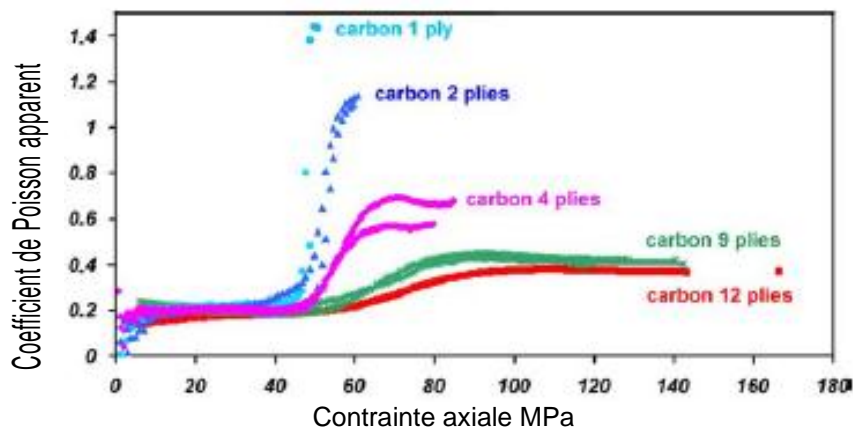


Il est bien visible que le confinement change le comportement du béton, ce dernier soumis à un chargement axial, exhibe un comportement fragile, mais devient ductile en compression triaxiale. L'expansion du béton se divise en trois phases (voir figure IV-14):

*Phase 1* : quand le chargement est inférieur à la résistance ultime du béton non confiné, l'expansion latérale est insignifiante, donc le confinement est trop faible pour pouvoir influencer le comportement du béton.

*Phase 2* : dès que le chargement dépasse la résistance ultime du béton non confiné, le coefficient de poisson apparent (coefficient de dilatation) augmente. Les déformations transverses augmentent plus rapidement que les déformations axiales, résultat de la fissuration du béton. Cette phase correspond à l'activation du composite en empêchant l'expansion du béton fissuré.

*Phase 3* : pour des niveaux de confinement élevés, le coefficient de Poisson apparent (plastique) se stabilise à la valeur maximum jusqu'à la rupture, dans cette phase le béton n'a plus de cohésion et devient comparable à du gravier.



*Figure IV - 14: Evolution du coefficient de Poisson apparent (dilatation) en fonction du nombre de plis [Berthet et al 2005]*

#### • **Mode de rupture**

Le mode de rupture des éprouvettes se produit après rupture du PRF, plus le niveau de confinement est élevé et plus la rupture est brutale. La déformation ultime du composite enregistrée lors des essais de traction sur éprouvettes planes n'est pas atteinte, plusieurs hypothèses ont été établies :

- Effet de la courbure des éprouvettes qui a tendance à diminuer la résistance en traction par rapport au stratifié plat [Teng et al 2002], [Lam et Teng 2003], [Yang et al 2001], [Berthet et al 2005].
- Sensibilité des renforts en PRF de faible épaisseur aux défauts de mise en œuvre et aux irrégularités de surface [Berthet et al 2005], [Shahawy et al 2000].

Le mode de rupture du béton ordinaire qui est caractérisé par la propagation de microfissures initiées dans l'interface pâte-granulats qui s'ouvrent et se transforment en macrofissures est complètement différent de celui du béton à hautes performances (BHP) qui lui, suite à des fissures verticales ne romps pas par écrasement mais par création de petites colonnes verticales (voir figures IV-15 et 16)



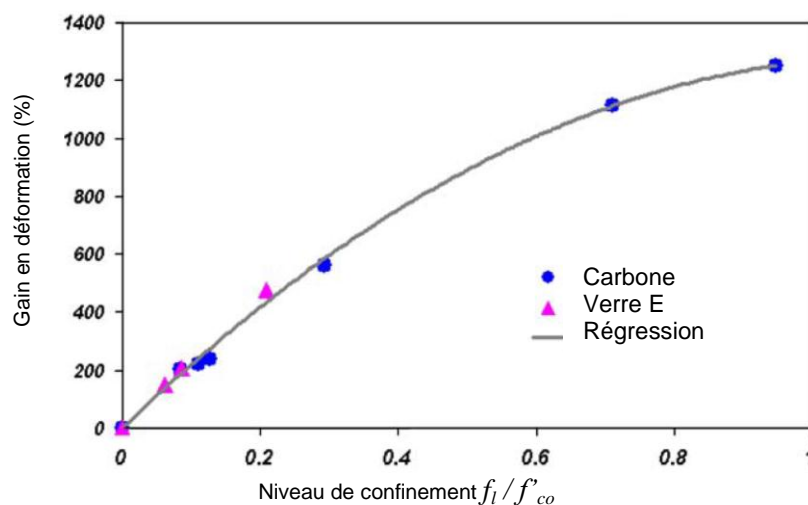
**Figure IV – 15 :** Rupture des éprouvettes en béton ordinaire confiné par PRFC et PRFV [Berthet et al 2005]



**Figure IV – 16 :** Rupture des éprouvettes en BHP confiné par PRFC [Berthet et al 2005]

- **Influence de la pression ultime de confinement**

La résistance et la déformation ultime en compression est directement liée à la pression de confinement, le gain de résistance augmente linéairement avec le niveau de confinement  $f_l / f'_{co}$ . Pour la déformation, à un faible niveau de confinement, l'augmentation de la déformation axiale est linéaire avec le niveau de confinement, ce qui n'est pas le cas lorsque ce dernier atteint des grandes valeurs, à ce moment là, le gain de déformation diminue comme le démontre la figure IV-17. La diminution de la déformation axiale s'explique par la compaction du béton qui ferme les réseaux capillaires.



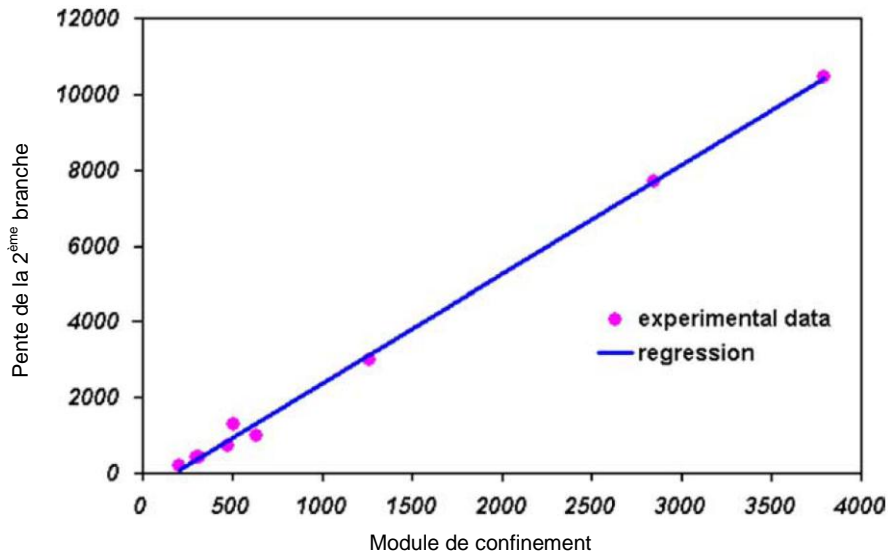
- **It** **Figure IV - 17 :** Relation entre le gain en déformation et le niveau de confinement [Berthet et al 2005]

Les résultats montrent qu'à une rigidité égale, la chemise en PRF de verre ou de carbone ont le même comportement, les éprouvettes confinées par un pli de carbone ou trois plis de verre (rigidité équivalente du renfort) ont pratiquement le même diagramme contrainte-déformation. La Figure IV-18 nous confirme que la pente de la deuxième branche est gouvernée le module de confinement, et la relation qui les lie est linéaire. Le module de confinement est défini par :

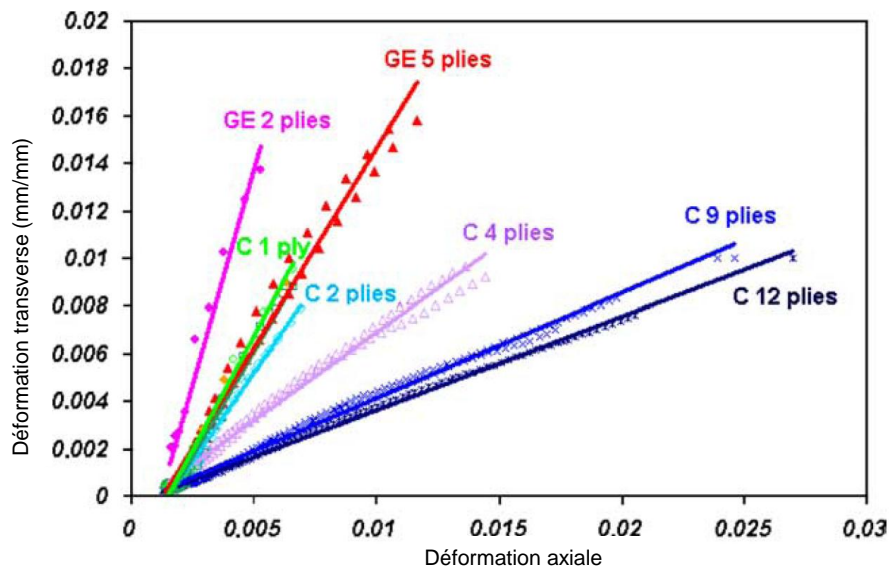
$$E_l = E_f \times t / R$$

Où  $E_f$  et  $t$  sont le module et l'épaisseur du composite,  $R$  étant le rayon de l'éprouvette.

On remarque aussi que le rapport déformation transverse-axiale est inversement proportionnel au module de confinement (voir figures IV-19).



**Figure IV - 18 :** Influence du module de confinement sur la pente de la 2<sup>ème</sup> branche [Berthet et al 2005]



**Figure IV - 19 :** Influence du module de confinement sur la distribution des déformations [Berthet et al 2005]

• **Influence de la classe de résistance du béton**

Le gain de résistance augmente linéairement avec le niveau de confinement quelque soit la résistance du béton (voir figure IV-20) cependant le coefficient de d'efficacité du confinement  $k_l$  que l'on trouvera dans les modèles de confinement (chapitre IV) varie avec la résistance en compression du béton, ainsi pour les bétons à hautes performances, on remarque une diminution de  $k_l$  comme le montre la figure IV-21. Pour les bétons ordinaires ( $f'_{co} \leq 50 \text{ MPa}$ ), l'augmentation de la résistance ne dépend que de la pression de confinement ( $k_l$  constant) alors que pour les bétons à hautes performance elle dépend aussi de la classe de résistance. La diminution de  $k_l$  est de 15 % pour le C 100 et 25 % pour le C 200

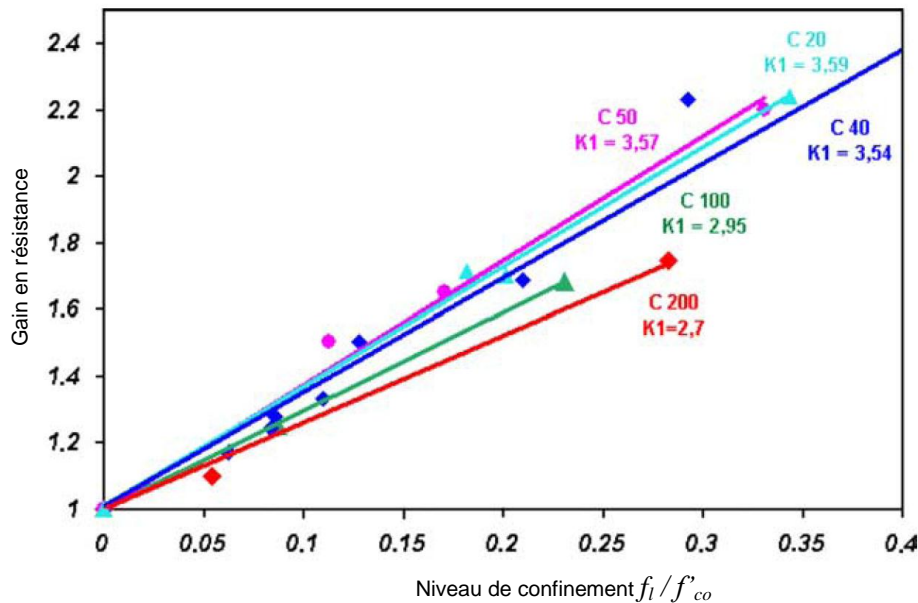


Figure IV - 20 : Influence de la résistance du béton non confiné sur l'efficacité du confinement [Berthet et al 2005]

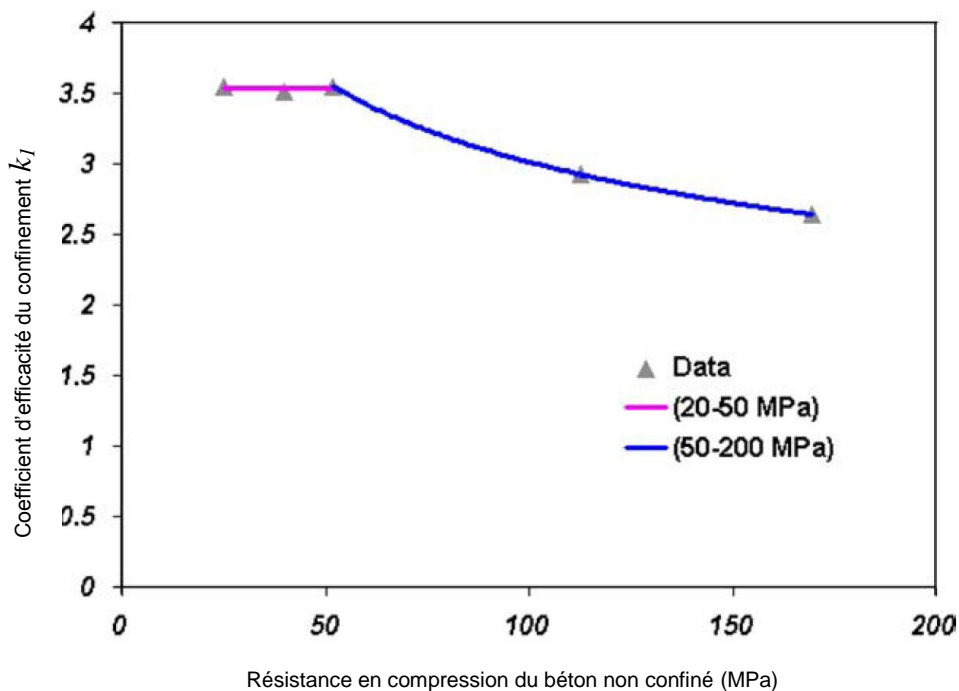
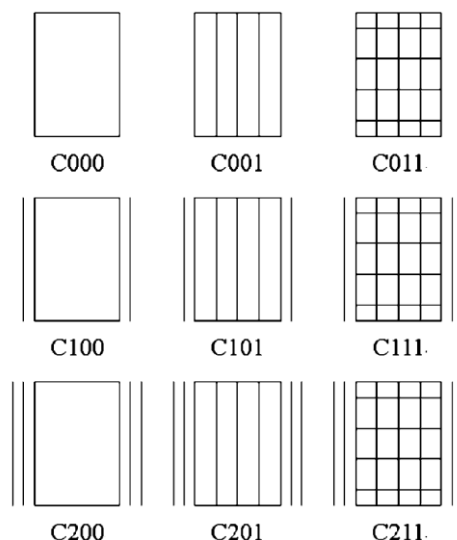


Figure IV - 21 : Influence de la résistance du béton non confiné sur le coefficient d'efficacité du confinement [Berthet et al 2005]

### IV –2 – 3 Travaux Lin et Liao (2004)

Un lot d'éprouvettes divisé en neuf groupes est utilisé pour étudier la résistance du béton armé et non armé confiné par PRF de verre, la figure IV-22 décrit le renforcement de chaque groupe, les dimensions des éprouvettes cylindriques sont de  $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  et le diamètre des armatures utilisées est de  $3,5\text{ mm}$ .



**Figure IV - 22:** Configurations des renforcements (acier et PRF) [Lin et Liao 2004]

Chaque groupe à une appellation comme suit C, X, Y, Z, tel que :

C : Veut simplement dire colonne.

X : Exprime le nombre de plis de verre.

Y : Exprime l'existence (1) ou non (0) des armatures transversales.

Z : Exprime l'existence (1) ou non (0) des armatures longitudinales.

Donc C 201 veut dire que l'éprouvette ne contient que des armatures longitudinales et confinée par deux plis de PRF de verre. Le tableau IV-3 montre les propriétés des matériaux

**Tableau IV - 3:** Propriétés des matériaux utilisés

Propriété	Résultat
Résistance des armatures utilisées dans C 001 C 101 et C 201 (MPa)	422,9660
Module d'élasticité des armatures utilisées dans C 001 C 101 et C 201 (GPa)	212,4046
Résistance des armatures utilisées dans C 011 C 111 et C 211 (MPa)	616,3970
Module d'élasticité des armatures utilisées dans C 011 C 111 et C 211 (GPa)	206,2344
Résistance en traction d'un pli de PRF de verre (MPa)	455,347
Module d'élasticité d'un pli de PRF de verre (GPa)	23,8253
Epaisseur d'un pli de PRF de verre (mm)	1,84
Résistance en traction de deux plis de PRF de verre (MPa)	403,141
Module d'élasticité de deux plis de PRF de verre (GPa)	22,4579
Epaisseur de deux plis de PRF de verre (mm)	3,89

- **Résultats**

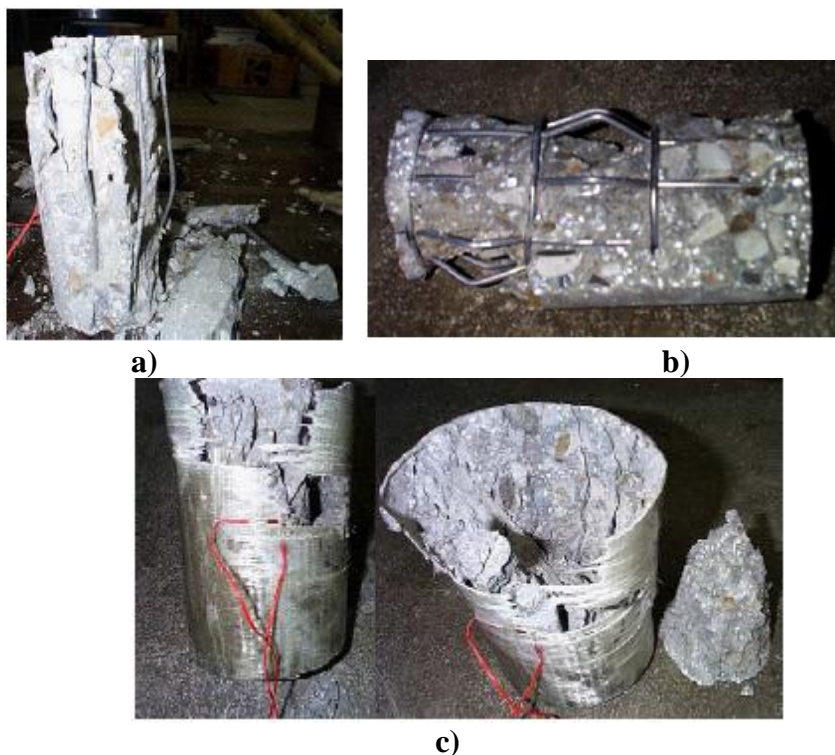
Les résultats des essais de compression uni-axiale sont dans le tableau IV-4

**Tableau IV- 4: Résultats des écrasements des différentes éprouvettes**

Résultats	C 000	C 001	C011	C100	C101	C111	C 200	C 201	C 211
Résistance moyenne en compression (MPa)	23,907	31,917	37,213	61,975	69,995	76,317	91,076	102,36	108,58
Gain de résistance (MPa)	0	8,010	13,306	38,068	46,088	52,410	67,169	78,453	84,673

- **Mode de rupture**

Pour les C 001 et C 011, la rupture s’est produite par flambage des armatures longitudinales après éclatement de l’enrobage (voir figures IV-23 a et b) pour les éprouvettes confinées par PRF de verre, on a en premier lieu rupture du béton, après c’est les armatures longitudinales qui flambent (dans le cas du béton armé), en fin c’est le composite qui romps, l’éprouvette est complètement cassée ce qui est visible dans la figure IV-23 c.



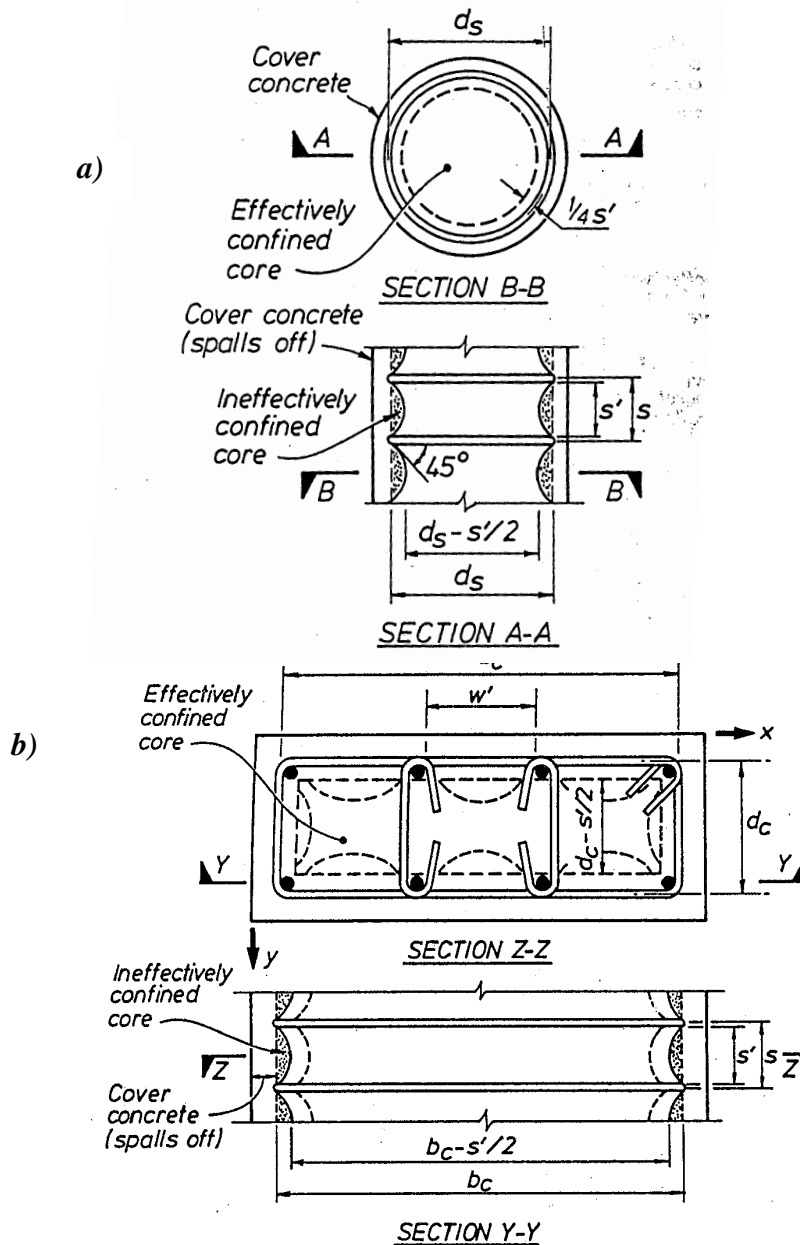
**Figure IV - 23: Modes de rupture des éprouvettes en béton armé (a et b) et en béton confiné par PRF de verre(c) [Lin et Liao 2004]**

- **Linéarité du renforcement**

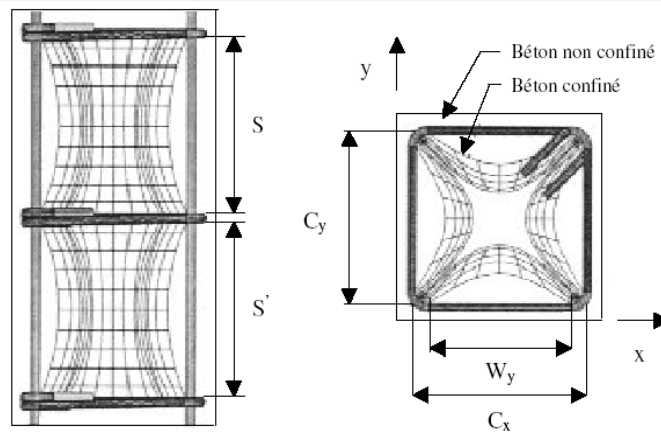
A partir du tableau IV-4 on peut conclure que la résistance du béton armé confiné avec le PRF est égale à la somme des contribution du béton, de l’acier et du composite, en effet l’éprouvette de béton seul à une résistance de 24 MPa, le gain de résistance des éprouvettes C 001, C 011, C 100 et C 200

$$f'_{cc(C211)} = f'_{co} + f_{Al} + f'_{At} + f'_{frp} = 24 + 8 + 5 + 67 = 104 \text{ MPa}$$

La moyenne expérimentale sur trois éprouvettes donne pour C 211  $f'_{cc} = 108,58 \text{ MPa}$ , cet écart de 4% est acceptable. On peut aussi déduire que l'apport du PRF à la résistance en compression est plus important que celui de l'acier, cela peut s'expliquer outre les caractéristiques des matériaux par le fait que le confinement par PRF est uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette, ce qui n'est pas le cas du confinement par acier (voir figure IV-24 et 25) et aussi parce que la surface de la section confinée est égale à la surface de l'éprouvette alors que pour l'acier, le béton d'enrobage n'est pas confiné.



**Figure IV - 24:** Béton effectivement confiné dans un poteau en béton armé (confinement par acier) pour ;a)une section circulaire ; b) une section rectangulaire [Mander et al 1988 a]



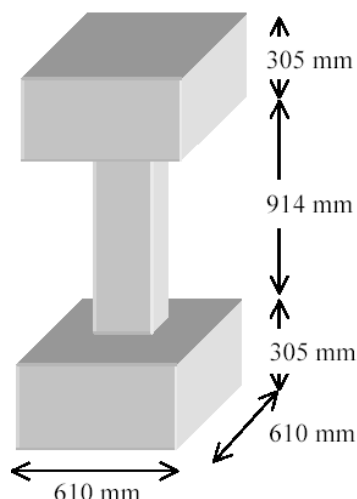
**Figure IV - 25:** Béton effectivement confiné dans un poteau en béton armé (confinement par acier) pour une section carrée

### IV – 3 PANORAMA DE QUELQUES TRAVAUX EXPERIMENTAUX SUR LES SECTIONS RECTANGULAIRES

Il est intéressant de traiter le cas des poteaux de section rectangulaire confinés par PRF, cela en premier lieu parce que la majorité des poteaux dans le bâtiment sont de section rectangulaire, et aussi parce que différemment de sections circulaires où la pression de confinement est uniforme, cette dernière est maximum aux angles des sections rectangulaires et plus faibles sur les faces, ce qui provoque des concentrations de contraintes aux angles et donc rupture prématurée du renfort composite [Maalej et al 2003], [Teng et al 2002 ], [Yang et al 2001], pour atténuer ce phénomène, l'arrondissement des angles est indispensable. Les paramètres à traiter dans ce qui suit sont : l'arrondi des angles, rapport géométrique de la section (rapport du plus grand côté sur le plus petit), type de fibres et l'épaisseur du PRF.

#### IV –3 – 1 Travaux de Cole et Belarbi (2001)

Cole et Belarbi (2001) ont utilisé des éprouvettes qui représentent des poteaux à échelle réduite 1/3 ( figure IV-26), le béton utilisé à une résistance en compression de 21 MPa, tout les poteaux ont la même section  $323 \text{ cm}^2$ , les rapports géométriques utilisés sont 1 ; 1,5 et 2, chaque poteau faisait 914 mm de hauteur, encastré dans deux semelles ( $610 \times 610 \times 305 \text{ mm}^3$ ), cette configuration force la rupture à se produire en dehors des extrémités, et simule une connexion avec une poutre ou semelle de fondation.



**Figure IV - 26:** Dimensions des éprouvettes [Cole et Belarbi 2001]

Le ferrailage longitudinal est constitué de 4 barres de diamètre 12,7 mm, et le ferrailage transversal était fait avec des barres de diamètre 6,35 mm espacées de 178 mm. Les angles des poteaux ont été arrondi en deux étapes : en premier un chanfrein est réalisé (réservation dans le coffrage) et après décoffrage, les chanfreins ont été élargis sur une certaine distance, ce qui donne la forme elliptique aux angles (voir figure IV-27).

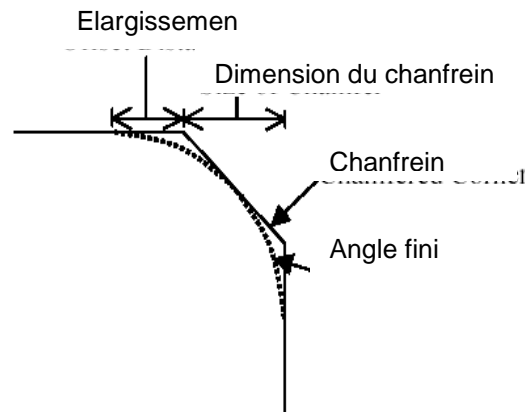


Figure IV - 27: Arrondi des angles

Les propriétés des fibres utilisées, et les différentes configurations des éprouvettes sont résumées dans les tableaux IV-5 et IV-6 respectivement :

Tableau IV – 5 : Propriétés des fibres utilisées

Type de fibres	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)
Aramide	2000	117	1,7
Carbone	3790	228	1,7
Verre E	1520	74,4	2,1

Tableau IV – 6 : Configurations des éprouvettes

désignation	Nombre de plis	Type de fibres	Dimensions de la section	Angles	variable
Rect 1/1	-	-	181 × 181	a	Témoin
2 PRFC- Rect 1/1	2 plis	PRFC	181 × 181	b	Rapport géométrique de la section
2 PRFC- Rect 2/3			146 × 222		
2 PRFC- Rect 2/1			127 × 254		
2 PRFC- Rect 1/1	2 plis	PRFC	181 × 181	c	Rayon de courbure des angles
2 PRFC- Rect 1/1			181 × 181	d	
1 PRFC- Rect 1/1	1 pli	PRFC	181 × 181	b	Efficacité du PRFC
1 PRFV- Rect 1/1	1 pli	PRFG	181 × 181	b	Efficacité du PRFV
2 PRFV- Rect 1/1	2plis				
3 PRFV- Rect 1/1	3plis				
1 PRFA- Rect 1/1	1 pli	PRFA	181 × 181	b	Efficacité du PRFA
2 PRFA- Rect 1/1	2plis				
3 PRFA- Rect 1/1	3plis				

Notes relatives aux angles :

a : chanfrein de 13 mm

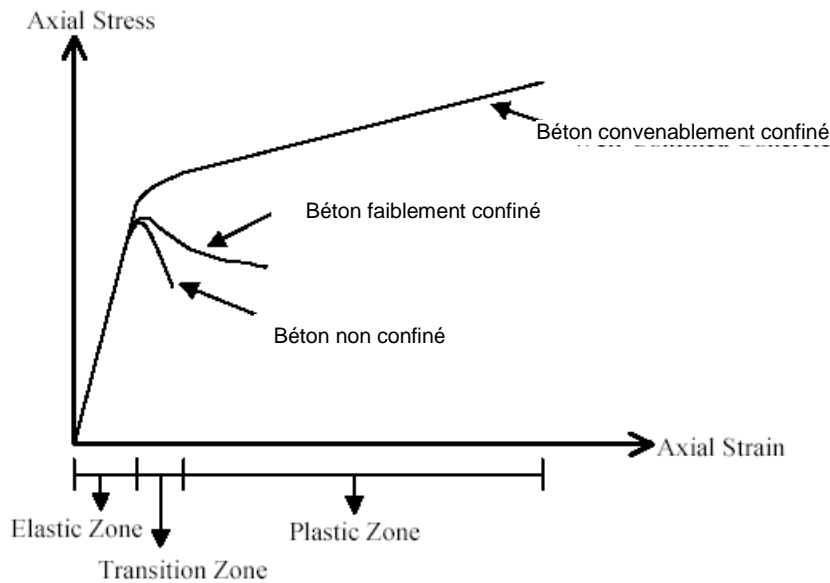
b : chanfrein de 13 mm et arrondi sur 9,5 mm

c : chanfrein de 6,4 mm et arrondi sur 4,8 mm

d : chanfrein de 19 mm et arrondi sur 14 mm

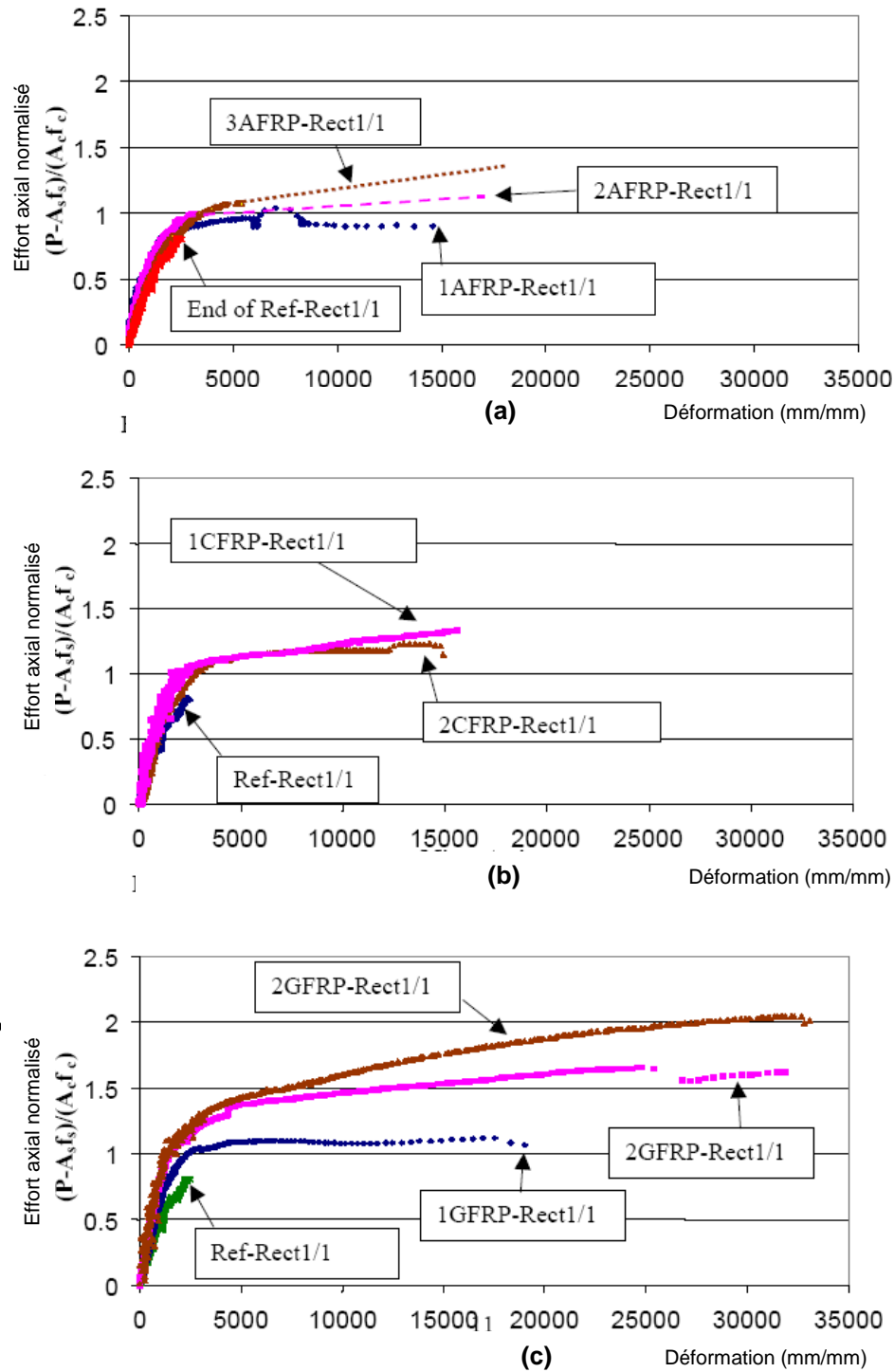
- **Résultats**

Comme pour les sections circulaires, le diagramme contrainte-déformation est bilinéaire, la première branche (élastique) est la même que pour le béton non confiné, la deuxième branche (plastique) dépend du niveau du confinement comme c'est représentée dans la figure IV-28.



**Figure IV - 28:** Comportement typique du béton confiné par PRF  
[Cole et Belarbi 2001]

Le diagramme  $\sigma$ - $\epsilon$  pour les colonnes confinées avec les différents types de fibres sont représentés dans la figure IV-29, ce qu'on peut remarquer de ces diagrammes, c'est que pour un pli de renfort, il n'y a pas une grande différence entre la résistance en compression des poteaux confinés par les différents types de fibres, on ne peut pas en dire autant pour deux et trois plis car on voit nettement que les fibres de verre ont une performance meilleures que celles des fibres de carbone et d'aramide, et cela aussi bien en résistance qu'en déformation. Ces performances inattendues à cause du faible module et résistance en traction des fibres de verre par rapport aux fibres de carbone et d'aramide s'expliquent par le fait que l'allongement ultime des fibres de verre est supérieur à celui des fibres de carbone et d'aramide, ces résultats ont aussi été confirmé par [Maalej et al 2003].



**Figure IV - 29:** Relation contrainte normalisée-déformation pour les poteaux confinés par PRF ; a) d'aramide ;b) de carbone ;c) de verre [Cole et Belarbi 2001]

L'effet de l'arrondi des angles sur la résistance des poteaux de section carrée confinés par deux plis de carbone est représenté sur la figure IV-30, on en déduit que la résistance augmente avec l'augmentation de l'arrondi. La figure IV-31 nous montre que pour les poteaux confinés par deux plis de carbone, la résistance diminue avec l'augmentation du rapport géométrique de la section, le confinement est donc plus effectif sur les sections carrée que sur les sections rectangulaires [Maalej et al 2003], [Teng et al 2002]

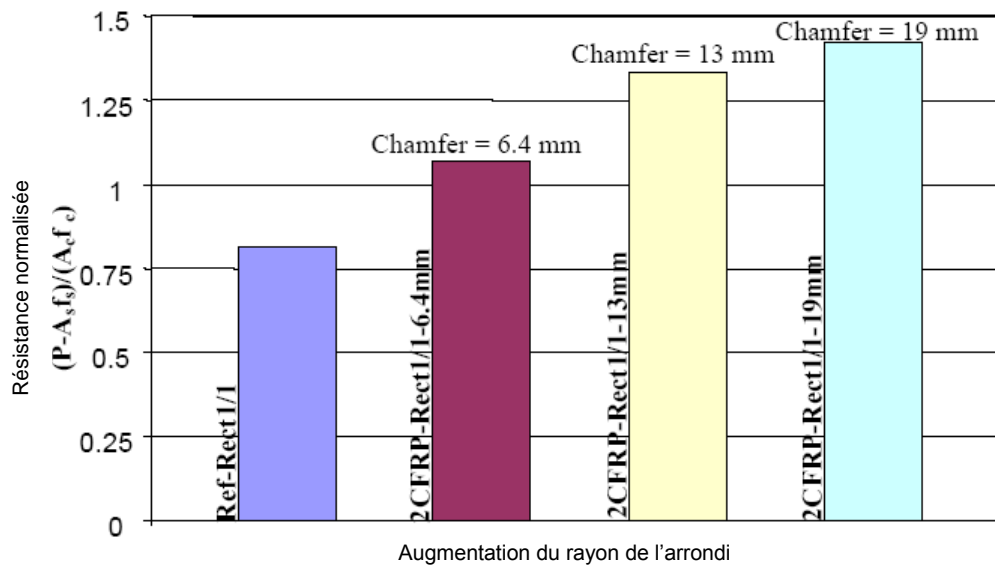


Figure IV - 30: Effet de l'arrondi des angles sur la résistance en compression des éprouvettes confinées avec 2plis de PRF de carbone [Cole et Belarbi 2001]

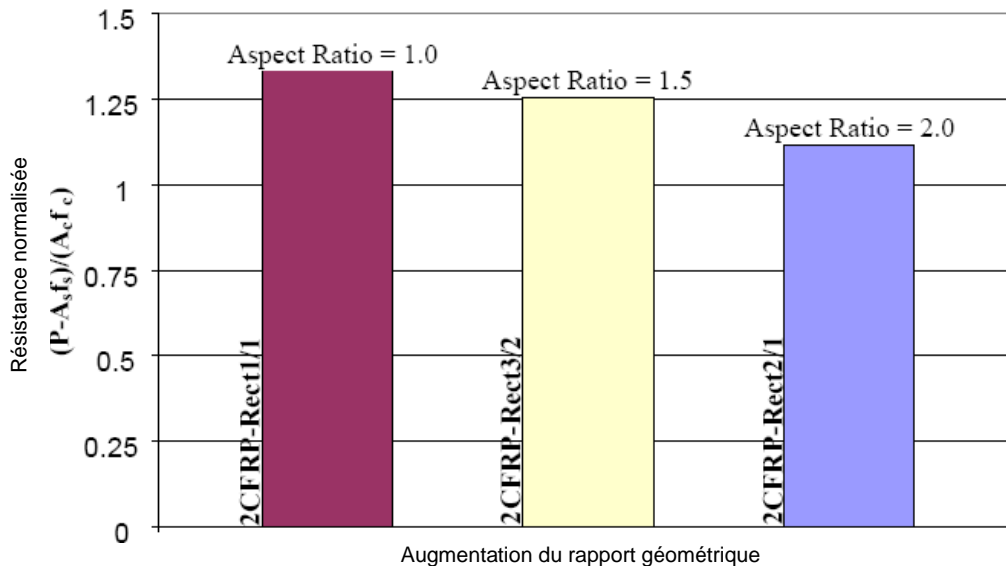


Figure IV - 31: Effet du rapport géométrique sur la résistance en compression des éprouvettes confinées avec 2plis de PRF de carbone [Cole et Belarbi 2001]

## IV – 4 PANORAMA DE QUELQUES TRAVAUX EXPERIMENTAUX SUR LA REPARATION DES POTEAUX PAR « PRF » ET LEUR DURABILITE

### IV – 4 – 1 Travaux de G.Li et al (2003)

Il est important de connaître pour un poteau endommagé (séisme, choc de véhicules...) le niveau de performances qu'il peut atteindre après sa réparation, afin de bien illustrer ce point, on va exposer les travaux de [G.Li et al 2003 a] et [G.Li et al 2003 b] qui ont testés en compression axiale des colonnes courtes cylindriques en béton armé de dimensions  $152,4\text{ mm} \times 609,6\text{ mm}$  et qui ont été pré endommagées par essai de fendage (essai Brésilien). La réparation consiste à confiner les colonnes avec du PRF de verre, cependant trois types de résines ont été utilisés et cela afin d'étudier aussi la durabilité du renfort. Les résines utilisées sont :

- Résine époxy qui a une durée de cure de 24 heures en enceinte chauffée.
- Résine vinylester qui polymérise avec le rayon ultra-violet, la cure peut être achevée en 20 minutes avec les rayons du soleil ou une lampe ultra violet (UV).
- Tissu de verre pré-imprégné de résine phénolique et qui a un temps de cure de 1 h 30 min à 135°C.

Les propriétés des résines sont dans le tableau IV- 7

**Tableau IV - 7: Caractéristiques mécaniques des matériaux**

Matériau	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Epoxy	83	3,8
Vinylester	70	4,2
Pré-imprégné	330	24,8
Tissu de verre E	3000	70,0

Les colonnes courtes ont été armées longitudinalement avec 4 barres de diamètre 12,7 mm et transversalement avec des barres 9,5 mm espacées de 50,8 mm.

Les éprouvettes ont été endommagées par essai de fendage (essai Brésilien) du fait de la difficulté de l'endommagement par compression ou flexion, malgré que ces deux derniers essais reflètent mieux la réalité. Les dommages affligés aux colonnes sont bien visibles sur la figure IV-32. Après avoir été endommagées, les éprouvettes ont été réparées avec les trois types de résines, pour l'époxy et la vinylester, la stratification manuelle a débuté par l'imprégnation de l'éprouvette ( $300 \text{ g/m}^2$  pour l'époxy et  $200 \text{ g/m}^2$  pour la vinylester), après cela, le tissu de fibres de verre a été enroulé avec une sur longueur de 50 mm, la saturation des fibres se faisait au fur et à mesure que le tissu été enroulé. Les bulles d'air ont été chassées avec un rouleau éboueur. En fin, une dernière couche de résine est appliquée pour s'assurer que le tissu est bien saturé. Pour le tissu pré-imprégné, il a été enroulé autour de l'éprouvette avec toujours 50 mm de sur longueur, et pour pas qu'il ne se déroule, un bandage élastique a été lui aussi enroulé autour de l'éprouvette.



**Figure IV - 32: Essai de fendage (gauche) et éprouvette endommagée (gauche) [G.Li et al 2003 a]**

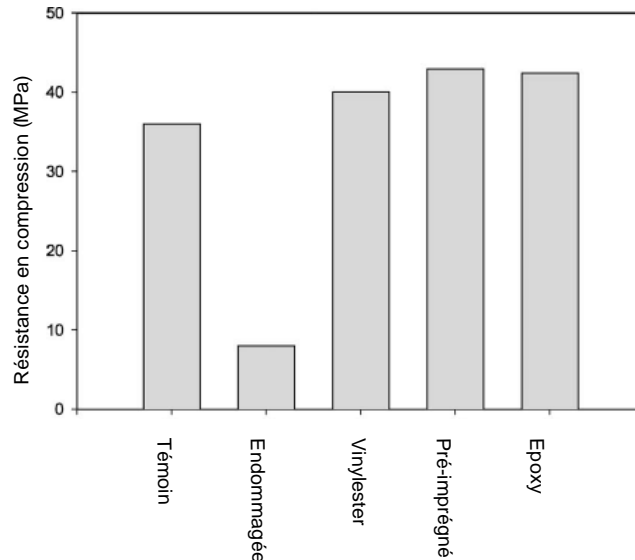
Afin d'avoir une idée sur la durabilité des renforts de PRF, neuf éprouvettes réparées ont été mises dans l'eau de mer bouillante et ont subis des rayonnements UV ayant des longueurs d'onde entre 280 et 340 nm et cela pendant une durée de 7 jours.

- **Résultats**

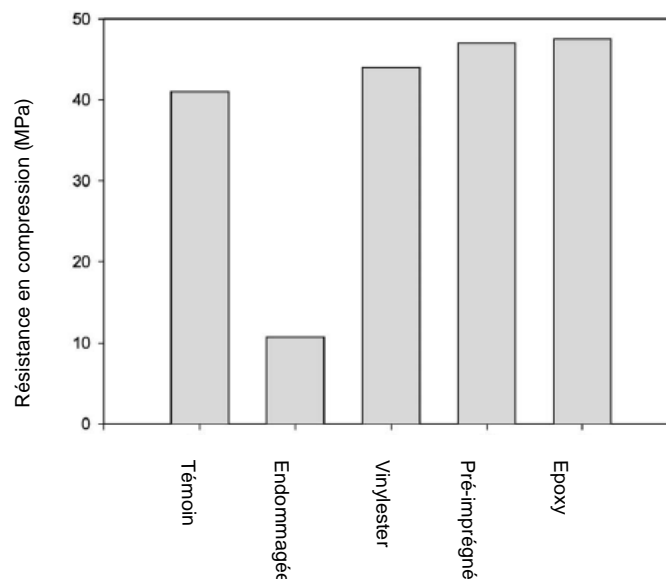
Les figures IV-33 et 34 montrent que l'endommagement des éprouvettes réduit notablement leur résistance en compression, pour les éprouvettes qui n'ont pas été exposées aux conditions environnementales, la résistance des éprouvettes non confinées est seulement égale à 22 % de l'éprouvette non endommagée. Pour celles exposées à l'eau de mer, chaleur et rayons UV, la résistance résiduelle est de 25 % de l'éprouvette non endommagée.

- **Effet du type de PRF**

La figure IV-33 montre que deux plis de PRF de verre suffisent à récupérer la perte en résistance enregistrée après endommagement des éprouvettes, la résistance des colonnes réparées en utilisant la résine vinylester, époxy et phénolique (pré-imprégné) est respectivement de 4,86 ; 5,80 et 5,36 fois celle des éprouvettes endommagées.



**Figure IV - 33:** Résistance en compression des éprouvettes sans conditionnement [G.Li et al 2003 a]



**Figure IV - 34:** Résistance en compression des éprouvettes avec conditionnement [G.Li et al 2003 a]

• **Effet de l'agressivité de l'environnement**

Les éprouvettes réparées et exposées à des conditions extrêmes, exhibent un bon comportement, en effet, la figure IV-34 montre que l'augmentation de la résistance des spécimens réparés en utilisant la résine vinylester, époxy et phénolique (pré-imprégné) par rapport au témoins endommagés et non réparés est respectivement de 4,15 ; 4,39 et 4,44. Donc les performances des PRF ont légèrement diminués et cela de 14,6 % ; 17,2 % respectivement pour les PRF à base de résine vinylester et époxy, et de 17,2 % pour les tissus pré-imprégnés (résine phénolique). La raison de la dégradation des performances des renforts en PRF s'explique en premier lieu par l'absorption d'eau à des températures élevées, ce qui conduit à la détérioration de l'adhérence interfaciale fibre-matrice. La pénétration de l'eau dans le PRF se fait par diffusion à travers la matrice (résine) et par capillarité à travers les vides (bulles d'air présentes dans la résine).

L'absorption d'humidité crée des contraintes résiduelles dans la résine qui peut plastifier, elle entraîne aussi la perte d'adhérence fibre-matrice. En deuxième lieu, l'attaque par le sel aussi affaiblit l'adhérence fibre-matrice et endommage les fibres de verre E. En troisième lieu, le rayonnement UV peut endommager les liaisons chimiques des molécules organiques, ce qui a pour conséquence de rendre la matrice plus fragile et de détériorer l'interface fibre-matrice. Il est à noter que la résine vinylester qui polymérise avec les rayons UV a été moins endommagé que les autres, cela s'explique par le fait qu'il soit possible que la polymérisation n'était pas achevée et que l'exposition aux rayons UV l'ait terminé.

**IV – 4 – 2 Travaux de Toutanji (1999)**

La durabilité des poteaux en béton confinés par PRF à été étudiée en utilisant 4 types de PRF ; deux fibres de carbone (C1 et C5) et deux en fibres de verre (GE 1 et GE 2), deux types de résine époxy ont été utilisées, nommées type A et type B, le conditionnement des éprouvettes consiste en 300 cycles de mouillage séchage ; les spécimens été noyés dans l'eau de mer, puis séchés avec de l'air chaud (35°C).

Les éprouvettes en béton utilisées était cylindriques de dimensions 78 mm × 305 mm avec une classe de résistance de 30 MPa, un premier groupe de 18 éprouvettes qui ne sera pas conditionné est constitué de 16 éprouvettes confinées dont 8 en utilisant la résine A et 8 la résine B, les deux éprouvettes qui restent sont des témoins non confinées. Le deuxième groupe est identique au premier sauf que lui va être exposé au conditionnement. Les tissus de fibres utilisés sont des unidirectionnels, ils ont été stratifiés avec les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, on dit qu'ils sont appliqués à 0°. La surlongueur été de 76 mm, toutes les éprouvettes ont été confinés avec deux plis de PRF, les propriétés de fibres sont dans le tableau IV-8

**Tableau IV - 8: Propriétés des fibres**

Tissus de fibres	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)	Epaisseur (mm)
GE 1	1518	69	2,1	0,118
GE 2	2270	72	3,2	1,3
C1	3485	228	1,5	0,165
C5	2940	373	0,8	0,165

Afin de s'assurer que la résine a bien polymérisée, le conditionnement a commencé une semaine après la stratification.

Le premier groupe témoin a été laissé pendant 75 jours à température ambiante tandis que le deuxième groupe été placé dans une chambre spéciale (voir figure IV-35), les éprouvettes ont été exposées à l'eau de mer pendant 300 cycles mouillage/séchage (air chaud à 35°C et 90% d'humidité). Les spécimens restaient trempés 4 heures puis séchait durant deux heures durant les 75 jours. A la fin des 300 cycles, toutes les éprouvettes ont été testées en compression axiale contrôlée en charge avec un pas de 0,24 MPa/s, les déformations axiales et radiales ont été mesurées avec des jauges de déformation, un LVDT a été aussi placé verticalement. Toutes les éprouvettes ont reçues un surfaçage au soufre.

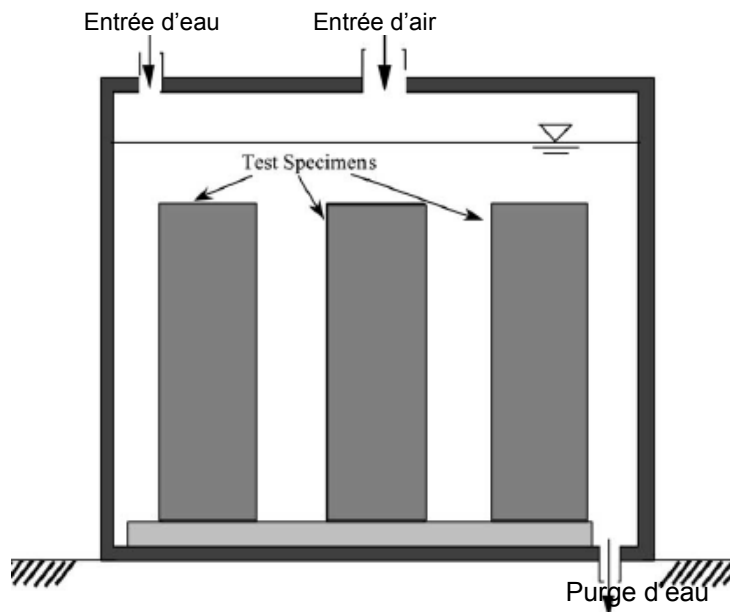


Figure IV - 35 : Enceinte de conditionnement [Toutanji et Deng 2002]

• **Résultats**

Les résultats du premier groupe pour les deux types de résines (A et B) sont illustrés dans la figure IV-36

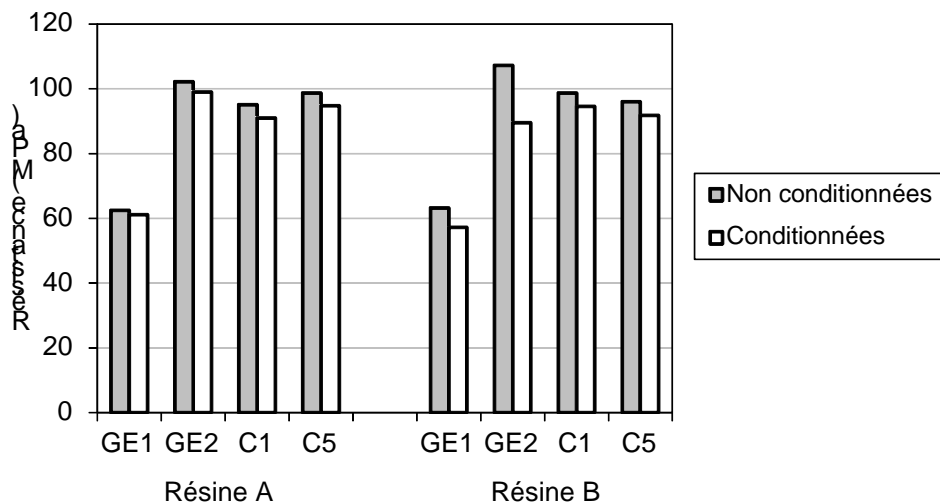


Figure IV - 36 : Résultats des spécimens conditionnés et non conditionnés avec les deux matrices [Toutanji 1999]

On remarque que pour les éprouvettes de ce groupe et qui n'ont pas subis les agressions du conditionnement, les deux types de résine donnent les mêmes résultats, la rupture des éprouvettes confinées est brutales surtout pour celles avec les fibres C5.

- **Effets du conditionnement**

On remarque que pour les éprouvettes confinées avec le PRF de verre et la résine A, la résistance a chuté de 10 % et 18 % respectivement pour GE1 et GE2, cependant pour les éprouvettes confinées avec le PRF de verre et la résine époxy B, la chute en résistance est insignifiante ; 3 et 4 % pour GE1 et GE2 respectivement.

Les éprouvettes confinées par PRF de carbone ont enregistré une faible diminution de la résistance (< 5%) et cela quelque soit le type de résine utilisée.

La chute de résistance des spécimens GE1 et GE2 exposés aux cycles mouillage/séchage s'explique par l'endommagement de la résine époxy A, ce qui permet la pénétration l'eau salée et la chaleur dans la matrice provoquant l'altération de l'interface fibre-matrice et la fragilisation des fibres de verre. La résine époxy B a une meilleure tenue vis à vis des agressions hydrique et thermiques et par ce fait protège mieux les fibres, cependant pour les PRF de carbone, même si la matrice est endommagée, la chute en résistance est très faible, ce qui implique que les fibres de carbone sont moins sensibles aux agressions hydrique et thermiques et ont donc une meilleure durabilité que les fibres de verre E.

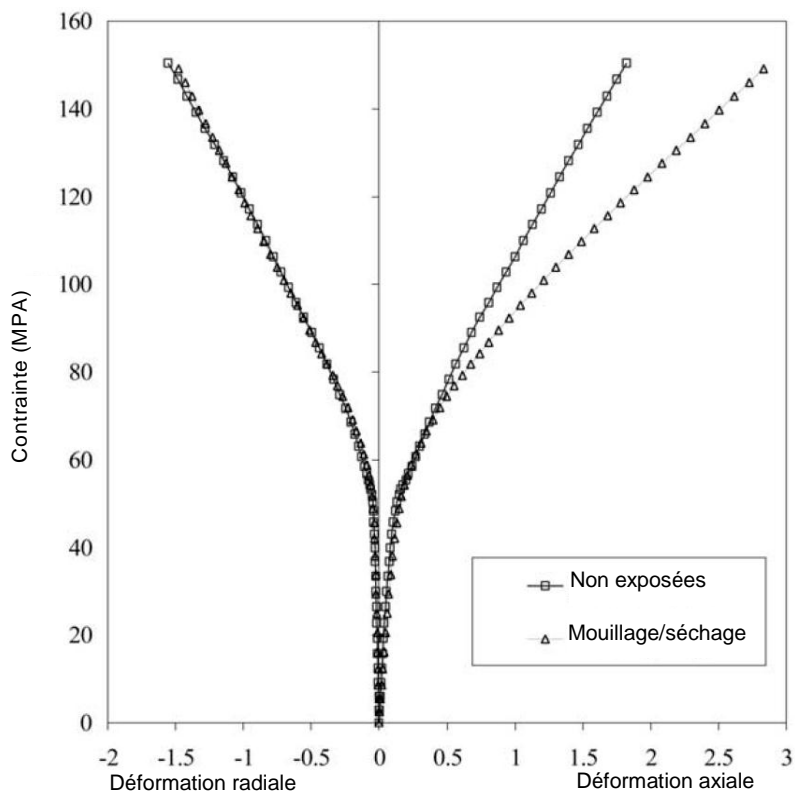
On note que les cycles séchage/mouillage ont eu un effet bénéfique pour la résistance des éprouvettes non confinées (gain de 20 %), cela s'explique simplement par le fait que les cycles mouillage/séchage au jeune âge ont pour effet d'hydrater le ciment non réagit dans le béton et donc d'augmenter la résistance de ce dernier.

#### IV –4 – 3 Travaux de Toutanji et Deng (2002)

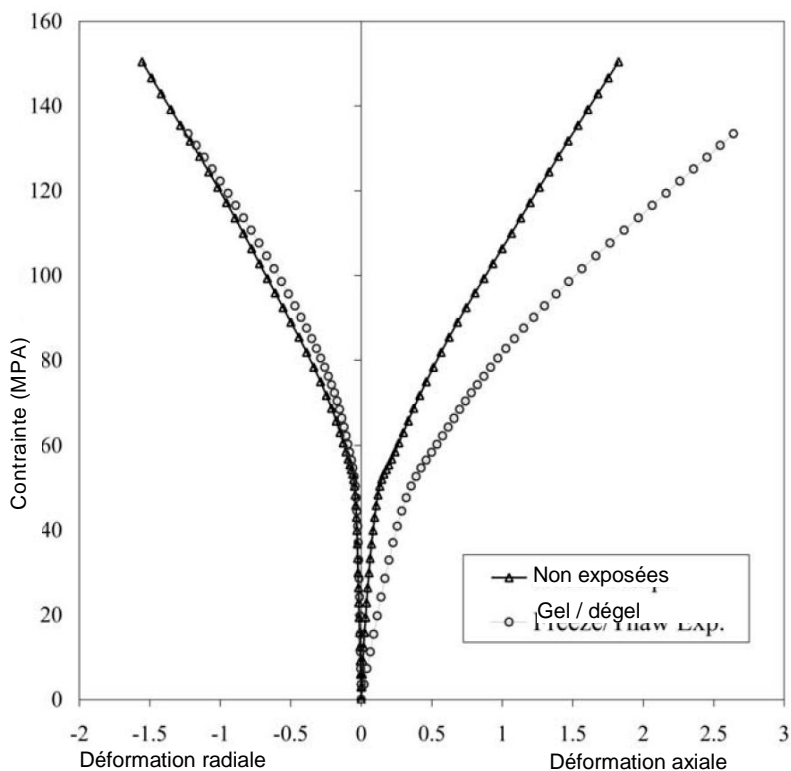
Toutanji et Deng (2002) ont testé la durabilité du béton confiné par PRF d'aramide soumis a des cycles mouillage/séchage et gel/dégel, 24 éprouvettes cylindriques (76 mm × 305 mm) ont été préparées, dont 12 confinées par deux plis de PRF d'aramide et 12 non confinées, la résistance du béton été de 44 MPa. L'exposition aux cycles mouillage/séchage a été la même que pour l'étude précédente [ Toutanji 1999], alors que pour les cycles gel/dégel, la température passe de 4,4°C à – 17,7°C et remonte de –17,7°C a 4,4°C en 4 heures, la durée des 300 cycles est de 50 jours. Tous les résultats sont résumés dans le tableau IV-9 et les figures IV-37 et 38

**Tableau IV - 9:** Résultats après conditionnement des éprouvettes confinées et non confinées.

spécimens	Non conditionnés		Mouillage-séchage		Gel-dégel	
	f'c (Mpa)	εa (%)	f'c (Mpa)	εa (%)	f'c (Mpa)	εa (%)
Non confiné	44	0,19	51,8	0,13	-	-
Confiné	150,5	2,05	150,0	3,17	138,6	2,64



**Figure IV-37:** Comparaison entre les éprouvettes confinées par PRFA exposées ou non aux cycles mouillage / séchage [ Toutanji et Deng 2002]



**Figure IV-38:** Comparaison entre les éprouvettes confinées par PRFA exposées ou non aux cycles gel / dégel [ Toutanji et Deng 2002]

A partir des **figures IV-37** et **38** on remarque que l'exposition aux cycles mouillage/séchage, n'affecte pas la résistance des éprouvettes confinées par PRF d'aramide, cependant on remarque une petite diminution de la pente de la 2<sup>ème</sup> branche (baisse de rigidité du PRF), par ailleurs l'exposition aux cycles gel/dégel réduit la résistance de 7,9 % et on remarque une diminution de la pente des deux branches du diagramme contrainte-déformation, ce qui veut dire que même le béton a été endommagé.

## Référence :

- Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading (J. Li, M.N.S. Hadi 2003)
- Chai, Y. H., Priestley, M. J. N. et Seible F. (1991) “Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance”, *ACI Structural Journal*,
- Mander, J. B., Priestley, M.J.N. et Park, R. (1988) “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*,
- Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1981) “Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic”, *ACI Material Journal Proceedings*
- Lam, L. et Teng, J.G. (2002) “Strength models for FRP-confined concrete”, *Journal of Structural Engineering*
- Mirmiran. A., et Shahawy, M., (1997) “Behavior of concrete columns confined with fiber composites”
- Monti, G., et Spoelstra, M. R. (1997) “Fiber-section analysis of RC bridge piers retrofitted with FRP jackets”, *Proceedings of Structures Congress XV Building to Last*
- Nanni, A., et Bradford, N.M. (1995) “FRP jacketed concrete under uniaxial compression”, *Construction and Building Materials*,
- Priestley, M.J. N., Seible, F., Fyfe, E., (1992) “Column seismic retrofit using fiber glass epoxy jackets”, *First International Conference, Advanced Composite Materials for Bridges and Structures*
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. et Li, M. W. (1994) “Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps”
- Seible, F., (1997) “Bridge pier rehabilitation with continuous carbon fiber wraps”, *Recent Advances in Bridge Engineering: Advanced Rehabilitation, Durable Materials, Nondestructive Evaluation and Management*, Meier, U. and Betti, R., Editors, *Proceedings of the U.S / Canada Europe Workshop on Bridge Engineering*
- Xiao, Y. et Wu, H. (2003) “Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets”
- Thèse doctorat *Riad BENZAID- 2013*
- Thèse doctorat *Youcef SI YOUCEF-2010*
- *Thèse doctorat Y.Hannachi 2012*

- Berthet, J.F., Ferrier E. et Hamelin P. (2005) “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A: Experimental study”. *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 223-232.
- Berthet, J.F., Ferrier E. et Hamelin P. (2006) “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part B: Modeling”. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp. 338-347
- Ching, A. (2001) “Behavior of FRP confined concrete”, *Master of Science Thesis*, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 244 p.
- Cole, C. et Belarbi, A. (2001) “Confinement characteristics of rectangular FRP-jacketed RC column”, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*, July 16-18, Cambridge, UK, pp. 823-832.
- Campione, G., Miraglia, N. (2003) “Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 31-41.
- Campione, G. et Fossetti, M. (2007) “Compressive behaviour of concrete elliptical columns confined by single hoops”, *Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 408-417.
- Demers, M. et Neale, K.W. (1994) “Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets”, *Development in short and Medium Span Bridge Engineering’94*, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada, pp. 895-905.
- De Lorenzis, L. (2001) “A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composites”, *Publication: 01:04*, work N°46, Division of Building Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 81 p.
- Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1981) “Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic”, *ACI Material Journal Proceedings*, Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.
- Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1982) “FRP-encased concrete as a structural material”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202.

- Li, Y-F., Lin, C-T. et Sung Y-Y. (2003) “A constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics”, *Mechanics of Materials*, Vol. 35, pp. 603-619.
- Lin, H-J. et Liao, C-I. (2004) “Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material”, *Composite Structures*, Vol. 65, pp. 239-250.
- Master Builders, Inc. and Structural Preservation Systems. (1998) “MBrace Composite Strengthening System: Engineering Design Guidelines”, 2<sup>nd</sup> edition. Cleveland, OH: Master Builders, Inc.
- Mirmiran, A., Shahawy, M. Samaan, M. et El Echary, H. (1998) “Effect of column parameters on FRP-confined concrete”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.
- Matthys, S., Taerwe, L., Audenaert, K. (1999) “Test on axially loaded columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping”, In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, Editors: Dolan, CW., Rizkalla, S.H., and Nanni, A., ACI, Farmington Hills, Mich., pp. 217-228.
- Monti, G. (2003) “Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP”, *Technical report*, Teheran, 22 July 2003, 29 p.
- Mortazavi, A.A., Pilakoutas, K. et Son, K.S. (2003) “RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP”, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 491-497.
- Nanni, A. et Norris, M.S. (1995) “«FRP» jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression”, *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 5, pp.273-281.
- Nanni, A., et Bradford, N.M. (1995). “FRP jacketed concrete under uniaxial compression”, *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 115-124.
- Neale, K.W. et Labossiere, P. (1997) “State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibre in Canada”, *Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium*, Sapporo, Japan, pp. 25-39.

- Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. et Higashibata, Y. (1997) “Bond properties of CFRP plate joint”, *Non-Metallic («FRP») Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium*, Sapporo, Japan, pp. 241-248.
- Priestley, M. J. N. et Seible, F. (1995) “Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 6, p. 365-377.
- Purba, B.K. et Mufti, A.A. (1999) “Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer CFRP jackets”, *Canadian Journal of civil Engineering*, Vol. 26, pp. 590-596.
- Rochette P, Labossiere P. (2000) “Axial testing of rectangular column models confined with composites”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 4, No. 3, pp. 129-136.
- Rousakis, T.C. (2001) “Experimental investigation of concrete cylinders confined by carbon FRP sheets under monotonic and cyclic axial compressive load”, *Division of Building Technology*, Publication No. 01:02. Work No. 44. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Tan, K.H. (1997) “State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibres Southeast Asian perspective-status, prospects and research needs”, *Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium*, Sapporo, Japan, pp. 13-23.
- Toutanji, H. (1999) “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets.” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 397-404.
- 
- Thériault, M. et Neale, K.W. (2000). “Design equations for axially-loaded reinforced concrete columns strengthened with FRP wraps”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 1011-1020.

## Chapitre V

# Modélisation du béton confiné par matériaux composites

## INTRODUCTION

La modélisation d'un matériau est un moyen de transcrire son comportement et les lois qui la régissent. Plusieurs expressions, ont été développées sur la base des études expérimentales, ainsi le premier modèle de confinement pour béton a été élaboré le siècle dernier par Richart *et al*, en premier (en 1928) et dans l'année qui suivit, il a étudié le confinement passif du béton par des armatures transversales en spirales avec un espacement très petit [Y.F.Li *et al* 2003], [Nanni et Bradford 1995].

En 1971 Kent et Park ont proposés un modèle de confinement du béton avec un diagramme contrainte-déformation constitué d'une première branche ascendante parabolique, et une deuxième branche linéaire descendante. En 1978 Maguruma *et al* ont établis un modèle avec deux branches paraboliques du deuxième degré. Sheikh et Uzumeri (1980,1982) ont proposés un modèle qui représente le diagramme contrainte-déformation, dans lequel la contrainte maximum est fonction de la pression (contrainte) effective de confinement, cette dernière est obtenue en multipliant la contrainte de confinement par un coefficient de confinement qui est fonction de la configuration des armatures transversales. Park *et al* (1982) ont modifiés le modèle de Kent et Park en ajoutant la résistance du béton non confiné et l'accroissement de résistance due au confinement. [Mander *et al* 1988] ont modifiés la contrainte maximum et ont établis une fonction qui retrace toute l'histoire du diagramme contrainte-déformation. En 1988, Fujii et Kobayashi ont proposés un modèle qui divisait la branche ascendante du diagramme contrainte-déformation en une première partie parabolique du deuxième degré et une seconde du troisième degré. Staatcioglu et Razvi (1992,1999) ont proposé une première branche ascendante parabolique, et une deuxième linéaire descendante et un modèle de confinement pour les bétons à hautes résistances inspiré de l'équation de Mander *et al*. En 1997, Hoshicoma *et al* ont comparés quelques uns des modèles suscités et ont proposés une équation polynomiale du *n*ème degré pour la branche ascendante et une partie descendante linéaire. Tous ces modèles ont été développés pour avoir le diagramme contrainte-déformation du béton confiné par acier.

Dans les premières années de l'utilisation des PRF pour le renforcement ou la réparation des poteaux, le dimensionnement se faisait avec le modèle de Mander *et al* (1988) [Teng *et al* 2002], [Y.F.Li *et al* 2003], [Nanni et Bradford 1995], [Shahawy *et al* 2000], généralement basé sur les modèles du confinement par acier. De nombreuses recherches faites sur le comportement du béton confiné par PRF (Fardis et Khalili 1981 ; Ahmad *et al* 1991, Harmon et Slattery 1992 ; Demers et Neal 1994 ; Howie et Karbhari 1994; Nanni et Bradford 1995 ; Karbhari et Gao 1997 ; Mirmiran *et al* 1998 ; Demers et Neal 1999 ; Miyauchi *et al* 1999 ; Pruba et Mufti 1999 ; Saafi *et al* 1999 ; Toutanji 1999 ; Rochette et Labossiere 2000 ; Xiao et Wu 2000 ; Zhang *et al* 2000) et ont montrées que le comportement du béton confiné par PRF est différent du comportement du béton confiné par acier (Mirmiran et Shahawy 1997, Samaan *et al* 1998, saafi *et al* 1999, Spoelstra et Monti 1999), et que l'utilisation de modèles de confinement par acier pour dimensionner l'épaisseur du renfort par PRF donne des résultats qui surestiment le gain de résistance (sous-estimation du nombre de plis) ce qui n'est pas dans le sens de la sécurité [Teng *et al* 2002].



## V – 2. POTEAUX DE SECTION CIRCULAIRE

### V – 2 – 1 Pression de confinement

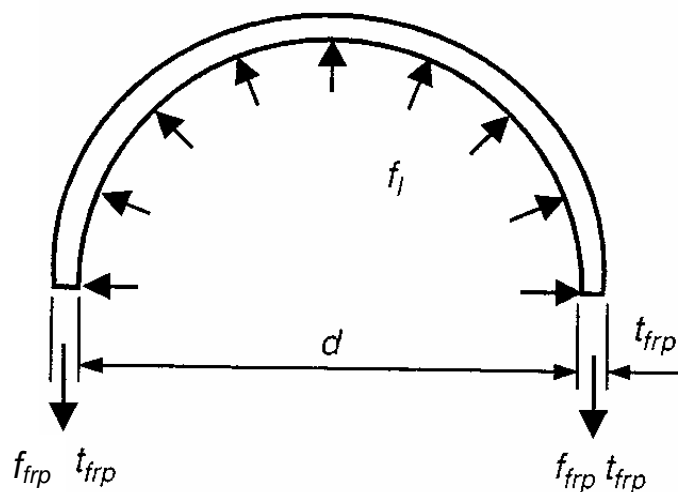
Quand un poteau confiné par PRF (une ceinture totalement adhérente autour des faces extérieures), est soumis à une compression axiale (excentrée ou non), cela provoque dans le béton un raccourcissement longitudinal et une expansion latérale par effet de Poisson, cette expansion est empêchée (confinée) par l'enveloppe de PRF ; l'interaction entre le béton et l'enveloppe en FRP produit une sollicitation de traction circulaire dans l'enveloppe et une compression radiale du béton. Le mécanisme de confinement des poteaux en béton confiné par PRF est illustré dans la **figure V-2** où l'interaction béton-enveloppe développe une pression d'interface  $f_l$ , qui comprime le béton et qui tend les fibres de l'enveloppe avec une force  $f_{prf}$ . En absence de gonflement, le confinement est inexistant, pour cela la réaction de l'enveloppe est dite passive.

Pour les sections circulaires, le béton est sujet d'un confinement uniforme et la pression maximum de confinement fournie par le PRF est liée à la quantité et l'épaisseur du composite ainsi que le diamètre de la section du béton, cette pression est calculée comme suit :

$$f_l = \frac{2t_{prf} \times f_{prf}}{d} = \frac{\rho_{prf} \times f_{prf}}{2} \quad (1)$$

Où  $f_l$  est la pression latérale de confinement,  $f_{prf}$  est la résistance en traction du PRF dans la direction circonférentielle,  $t_{prf}$  est l'épaisseur totale de l'enveloppe en PRF (ou épaisseur équivalente dans le cas où le confinement est réalisé par bandes avec un petit espacement),  $d$  est le diamètre de la section du béton confiné et  $\rho_{prf}$  est le rapport volumétrique du PRF calculé comme suit :

$$\rho_{prf} = \frac{\pi d \times t_{prf}}{\pi d^2 / 4} = \frac{4t_{prf}}{d} \quad (2)$$



**Figure V – 2 : Mécanisme de confinement par PRF pour des sections circulaires**

Comme le PRF est tendu dans la direction circonférentielle, la rupture se produit quand la résistance en traction circonférentielle est atteinte, ce mode de rupture a été remarqué dans la majorité des études faites sur le confinement des poteaux en béton par PRF [Nanni et Bradford 1995], [Nanni et Norris 1995], [Saadatmanesh 1997], [Toutanji 1999], [Anido et Karbhari 2000], [Shahawy et al 2000], [Lau et Zhou 2001], [Cole et Belarbi 2001], [Suter et Pinzelli 2001], [Teng et al 2002], [Wu 2002], [Sheikh 2002], [Parvin et al 2002], [Toutanji et Deng 2002], [Karabinis et Rousakis 2002], [Seible et al 2003], [Cheng et al 2003], [Maalej et al 2003], [Lam et Teng 2003], [Y.F.Li et al 2003], [Mortazavi et al 2003], [Harries et Kharel 2003], [Lin et Liao 2004], [Berthet et al 2005]. Cependant, quelques ruptures prématurées dues au décollement du PRF dans la zone de recouvrement (joint de collage) ont été enregistrées, ces ruptures prématurées sont dues à des longueurs de recouvrement (sur longueur) insuffisantes.

Il est important de savoir que les résultats expérimentaux montrent que la résistance en traction  $f_{prf}$  n'est pas atteinte lors de la rupture du PRF [Lam et Teng 2003] [De Lorenzis 2001]. Dans le tableau V-1 on trouve les rapports moyens entre les déformations (allongements) circonférentielles enregistrées à la rupture du PRF ( $\varepsilon_{h,rupt}$ ) lors d'essais de confinement et la déformation ultime du PRF ( $\varepsilon_{prf}$ ) déterminée à partir d'essais de traction normalisés sur des éprouvettes planes en composite (flat coupon tensile test). Les éprouvettes mentionnées dans le tableau et qui sont au nombre de 76 ont un diamètre entre 100 et 200 mm et la résistance du béton non confiné varie entre 26,2 et 55,2 MPa. On remarque que le rapport moyen change selon le type de fibres utilisées dans le PRF, c'est pour cela que la valeur de la pression de confinement réelle est :

$$f_{l,r} = \frac{2t_{prf} \times E_{prf} \times \varepsilon_{h,rupt}}{d} \quad (3)$$

**Tableaux V – 1 : Rapports entre les allongements ultimes des PRF lors d'essais de confinement et de traction sur éprouvettes planes en composite.**

Type de fibres	Nombre de spécimens	Allongement ultime en traction du PRF déterminé par essais sur éprouvettes planes ( $\varepsilon_{prf}$ )		Rapport entre l'allongement à la rupture lors d'essais de confinement et celui lors d'essais de traction plane $\varepsilon_{h,rupt} / \varepsilon_{prf}$ (%)	
		Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<b>PRFC (HR)</b>	52	0,0148	0,0015	58,6	15,3
<b>PRFC (HM)</b>	8	0,0045	0,0027	78,8	16,8
<b>PRFA</b>	7	0,0223	0,0068	85,1	9,5
<b>PRFV</b>	9	0,0280	0,0136	62,4	36,4
<b>Total</b>	76	0,0160	0,0080	63,2	20,5

Note : PRFC (HR) Polymère Renforcé de Fibres de Carbone à Haute Résistance.  
PRFC (HM) Polymère Renforcé de Fibres de Carbone à Haut Module.

Donc le niveau de confinement réel est calculé avec le rapport entre  $f_{l,r}$  et  $f'_{co}$  et l'hypothèse que la rupture du PRF survient lorsque la contrainte dans ce dernier atteint sa résistance en traction déterminée par les essais de traction sur éprouvettes plane n'est pas vraie pour le béton confiné par PRF. La figure V-3 montre le rapport entre la déformation circonférentielle ultime et la déformation enregistrée lors des essais en fonction du niveau de confinement réel  $f_{l,r} / f'_{co}$ , et on voit bien la dispersion des résultats. On remarque en particulier que pour les bétons faiblement confinés, la rupture est prématurée et survient pour de faibles allongements qui sont inférieurs à 20% de la déformation ultime du PRF déterminée par traction sur éprouvettes planes, le niveau de confinement pour ces éprouvettes est seulement de 0,034.

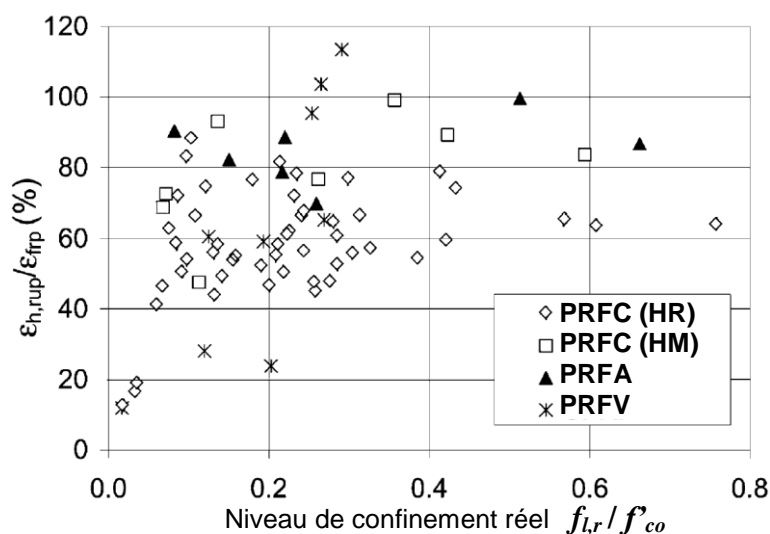


Figure V - 3 : Déformations circonférentielles ultimes du renfort en PRF [Lam et Teng 2003]

Les raisons pour lesquelles la déformation et donc la résistance ultime du composite ne sont pas atteintes sont :

- Effet de la courbure des éprouvettes qui a tendance à diminuer la résistance en traction par rapport au stratifié plan [Teng et al 2002], [Lam et Teng 2003], [Yang et al 2001], [Berthet et al 2005].
- L'adhérence du PRF au béton fait que sous compression axiale, il existe un faible état de contrainte biaxial [Shahawy et al 2000].
- Existence de concentrations de contraintes du fait de l'hétérogénéité et la fissuration du béton [Lam et Teng 2003], [Shahawy et al 2000].
- Sensibilité des renforts en PRF de faible épaisseur aux défauts de mise en œuvre et aux irrégularités de surface [Berthet et al 2005] , [Shahawy et al 2000].

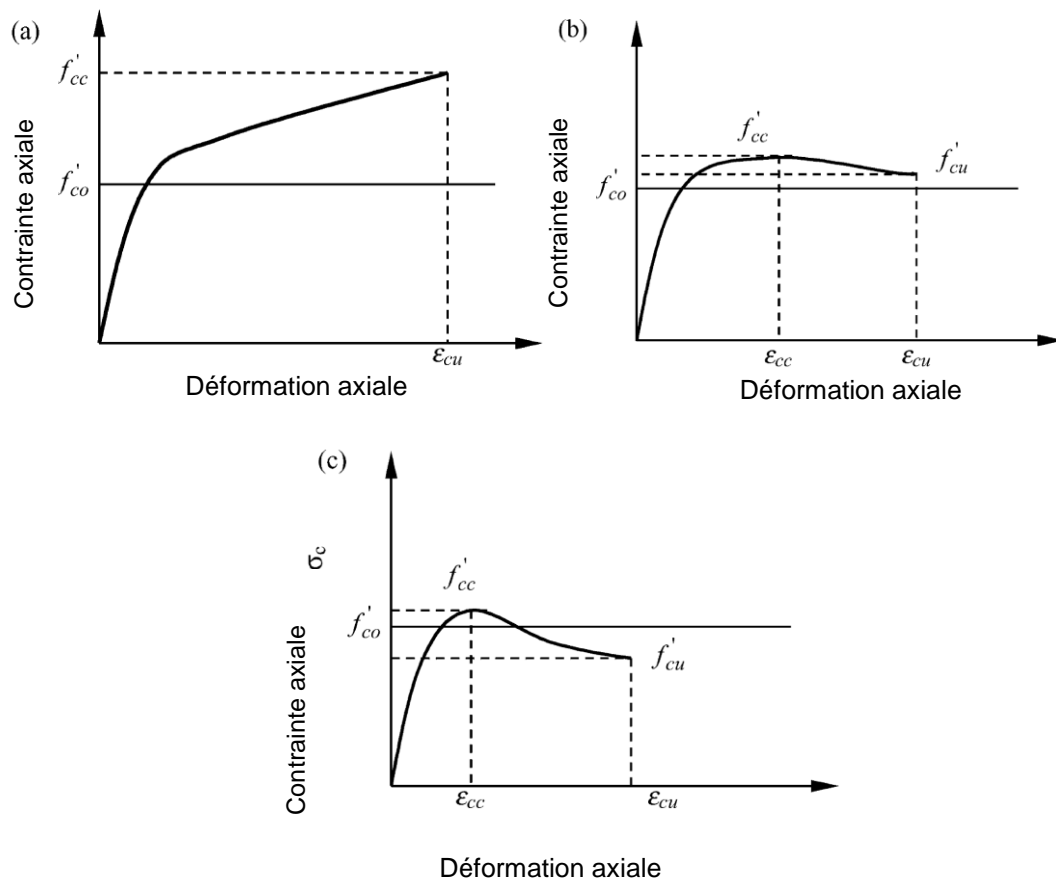
### V – 2 – 2 Allure du diagramme contrainte-déformation

Comme on l'a vu dans la partie expérimentale de plusieurs études , et qui a bien été confirmé par [Teng et al 2002], [Wu 2002], [Harries et Kharel 2003], [Shahawy et al 2000] , [Lin et Liao 2004], [Cole et Belarbi 2001], [Y.F.Li et al 2003], [Karabinis et Rousakis 2002] , [Mortazavi et al 2003], [Parvin et al 2002], [Anido et Karbhari 2000], [Nanni et Norris 1995], [Lau et Zhou 2001],

[Saadatmanesh 1997], [Sheikh 2002], [Seible et al 2003], [Cheng et al 2003], [Toutanji 1999], [Toutanji et Deng 2002], [Maalej et al 2003], [Nanni et Bradford 1995], [Lam et Teng 2003], [Berthet et al 2005], [Suter et Pinzelli 2001], le diagramme contrainte-déformation des poteaux en béton confinés par PRF est bilinéaire avec une zone de transition qui se situe aux alentours de la résistance maximum du béton non confiné ( $f'_{co}$ ), à moins que le niveau de confinement ne soit très petit pour augmenter la résistance et la ductilité du béton.

En réalité, pour l'allure du diagramme contrainte-déformation il existe deux cas de figure :

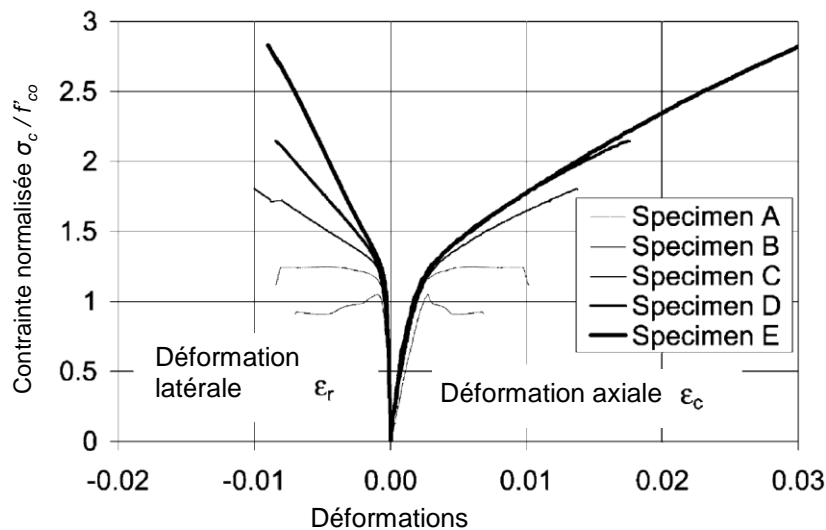
- Le 1<sup>er</sup> cas est celui le plus fréquemment observé expérimentalement, dans lequel le diagramme contrainte-déformation est bilinéaire ascendant (figure V- 4 a), ce type de comportement est le résultat du haut niveau de confinement, la résistance et la déformation ultimes du béton confiné sont atteintes au même moment et sont considérablement augmentés par rapport au béton non confiné.
- Cependant les résultats expérimentaux montrent un 2<sup>ème</sup> type de comportement où le diagramme contrainte-déformation n'est pas bilinéaire, et présente une branche post-pique descendante ce qui implique que la résistance ultime en compression  $f'_{cu}$  est inférieure à  $f'_{cc}$ . Ce type de comportement est lui-même subdivisé en deux (voir figure V- 4 b et c), si la résistance ultime du béton  $f'_{cu}$  est supérieure à  $f'_{co}$ , ce qui est le cas de la figure V- 4 b, le renfort en PRF améliore tout de même la résistance en compression du béton, mais si  $f'_{cu}$  est inférieure à  $f'_{co}$ , le béton est insuffisamment confiné et le gain en résistance est très faible (voir figure V- 4 c).



**Figure V- 4 :** Classification des diagrammes contrainte-déformation pour le béton confiné par PRF : a) type ascendant ; b) type descendant avec  $f'_{cu} > f'_{co}$  ; c) type descendant avec  $f'_{cu} < f'_{co}$  [Lam et Teng 2003]

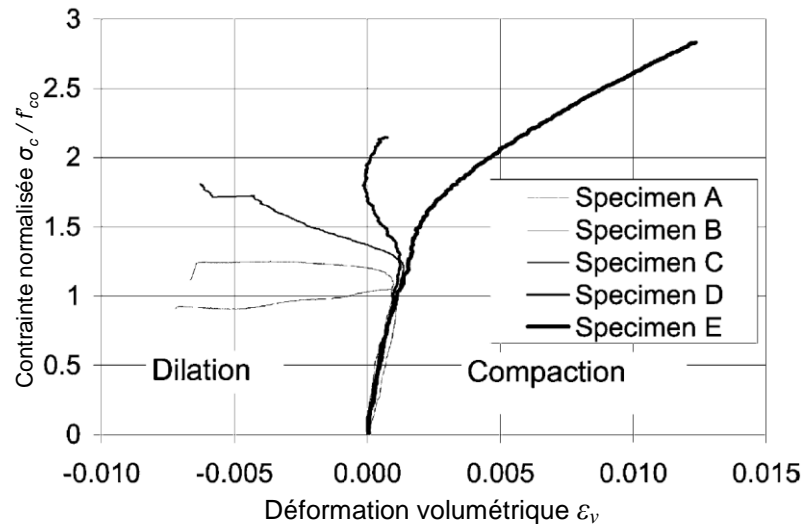
Pour conforter ce qui vient d'être dit, on va présenter dans la figure V- 5 les diagrammes contrainte-déformation réels pour des éprouvettes confinées avec des quantités différentes de PRF (différents niveaux de confinement), les contraintes axiales sont normalisées par rapport à la résistance en compression du béton non confiné ( $f'_{co}$ ). Le spécimen « A » a une résistance en compression non confinée de  $55,2 \text{ MPa}$  et a été confiné avec 1 pli de PRF de carbone, le « B », « C » et « D » ont eux une résistance en compression non confinée de  $43,8 \text{ MPa}$  et ont été confinés avec un, deux et trois plis de PRF de carbone. Pour le spécimen « E », la résistance en compression non confinée est de  $33,7 \text{ MPa}$  et il a été confiné avec trois plis de PRF de carbone. Le niveau de confinement réel ( $f_{l,r} / f'_{co}$ ) pour les 5 spécimens est de 0,067 ; 0,097 ; 0,202 ; 0,302 et 0,421 respectivement.

Le spécimen « A » a une faible augmentation en résistance ( $f'_{cc}$ ) avec un comportement post-pique du type descendant où la résistance ultime est inférieure à la résistance du béton non confiné ( $f'_{cu} < f'_{co}$ ), ceci est le résultat du faible niveau de confinement aggravé par la sensibilité des renforts avec un faible nombre de plis aux déformations non uniformes du béton. Le spécimen « B » aussi a un comportement post-pique descendant mais la résistance ultime est supérieure à la résistance du béton non confiné ( $f'_{cu} > f'_{co}$ ). Les spécimens « C », « D » et « E » ont tous un comportement bilinéaire ascendant, avec une augmentation de la résistance et de la déformation ultimes proportionnelle au nombre de plis.



**Figure V - 5 :** Diagrammes  $\sigma - \epsilon$  typiques pour le béton confiné par PRF [Lam et Teng 2003]

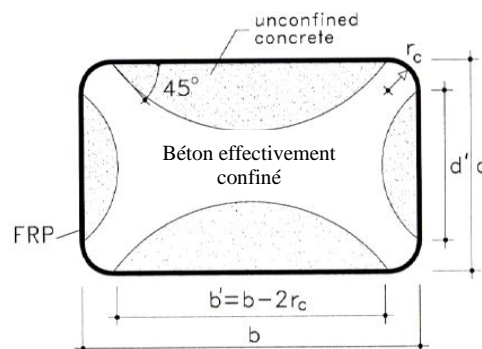
La dilatation volumétrique  $\epsilon_v = \Delta V / V = \epsilon_c + 2 \epsilon_r$  en fonction de la contrainte axiale normalisée des 5 spécimens est représentée dans la figure V- 6, comme déjà mentionné auparavant, les valeurs positives représentent la compaction et les valeurs négatives représentent la dilatation. On peut voir pour les spécimens « A », « B » et « C » que les variations volumétriques changent de compaction en dilatation à un niveau de contrainte supérieur à la résistance en compression du béton non confiné, la dilatation augmente jusqu'à la rupture, pour le spécimen « D » la compaction change en dilatation à un niveau de contrainte normalisé égale à 1,75 approximativement alors que le spécimen « E » n'a subi aucune dilatation durant toute l'histoire du chargement.



**Figure V - 6 :** Déformation volumétrique pour les 5 spécimens confinés par PRF de carbone [Lam et Teng 2003]

### V – 3. POTEAUX DE SECTION RECTANGULAIRE

Pour un spécimen de forme carrée ou rectangulaire confiné par une enveloppe en FRP, l'efficacité du confinement exposé en section circulaire diminue. En effet la forme de la section transversale influe sur l'efficacité du confinement (Mander et al, 1988). La section est composée d'une zone pleinement confinée et une autre zone non confinée. (Mander et al, 1988). Les zones non confinées sont mitoyennes des quatre faces et sont limitées par des paraboles, tel-que l'angle formé par les tangentes de ces surfaces et les côtés de la section transversale est de  $45^\circ$  (Mander et al, 1988). La zone confinée est réduite au noyau en contact avec les angles arrondis d'un rayon  $r$ , comme montré sur la Figure V – 7.



**Figure V – 7 :** schéma indiquant la non-uniformité du confinement dans le cas des sections rectangulaires/carrées.

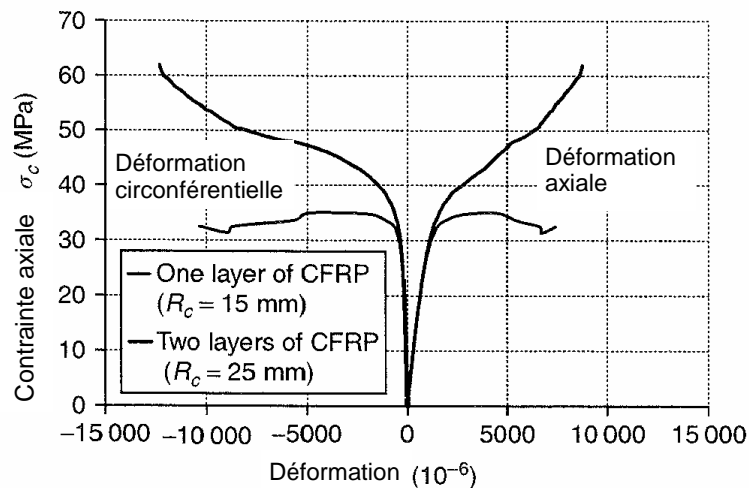
Comme on l'a déjà vu dans la partie expérimentale, le confinement par PRF est beaucoup plus performant pour les sections circulaires que pour les sections rectangulaires, même si les angles de

ces dernières sont arrondis, et cela parce que la pression de confinement est non uniformément répartie dans les sections rectangulaires (concentration des contraintes aux angles) en plus de cela, seulement une petite partie du noyau de béton est effectivement confinée. La ruine se produit généralement par rupture du composite aux angles comme on le montre la figure V- 8.



**Figure V - 8 :** Rupture du renfort aux angles  
[Cole et Belarbi 2001]

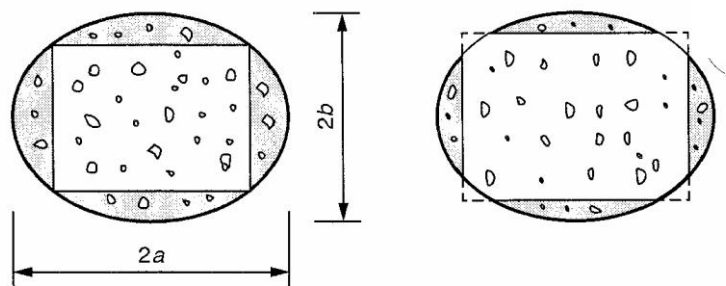
Le diagramme contrainte-déformation du type descendant est plus fréquent que pour les sections circulaires, le comportement typique des sections rectangulaires est représenté dans la figure V - 9, on voit que le spécimen avec un petit rayon d'arrondi ( $R_c = 15 \text{ mm}$ ) et un pli de PRF de carbone a un comportement post-pique, donc la résistance maximum est atteinte avant la déformation ultime.



**Figure V - 9 :** Diagrammes  $\sigma - \epsilon$  typiques pour les sections carrées confinées par PRF de carbone [Teng et al 2002]

#### V – 4. POTEAUX DE SECTION ELLIPTIQUE

Afin d'améliorer les performances du confinement des poteaux de section rectangulaire, on peut transformer ces dernières en section elliptique comme le montre la figure V- 10.



**Figure V – 10** : Modification des sections rectangulaires avec et sans arrondi des angles (droite et gauche respectivement) [Teng et al 2002].

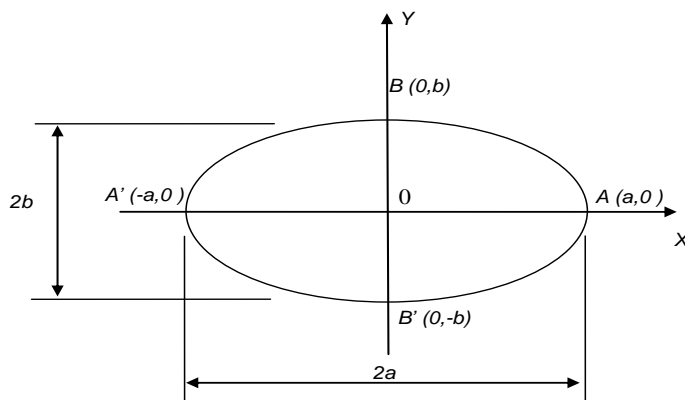
Dans ce cas le renfort utilisé est une coque préfabriquée en PRF constituées de demi-cylindres ou encore de cylindres avec une fente verticale qui permet leur ouverture pour les placer autour des poteaux, le vide entre le renfort et l'ancien béton est rempli soit avec de la résine ou du mortier.

La figure V-11 montre une ellipse avec un axe principal  $A-A'$  de longueur  $(2a)$  et un axe secondaire  $B-B'$  de longueur  $(2b)$ , mathématiquement une ellipse est caractérisée par son excentricité

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}}$$

Dans ce qui suit le rapport  $a/b$  de la plus grande dimension à la plus petite (rapport géométrique de la section) est considéré.

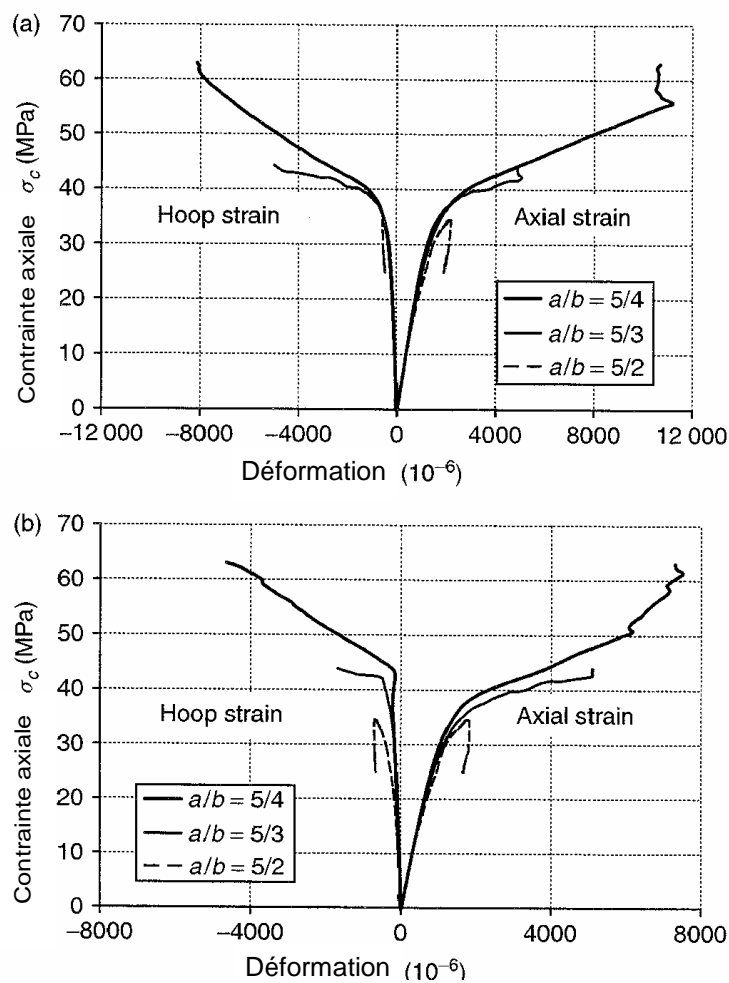
Pour le même rapport volumétrique en fibres  $\rho_{prf}$ , le confinement apporté par une enveloppe (chemise) en PRF pour une section elliptique se situe entre celui d'une section rectangulaire et une section circulaire. En d'autres termes le confinement d'une section rectangulaire transformée en section elliptique est moins efficace que celui du poteau de section circulaire, mais plus efficace que celui d'un poteau de section rectangulaire. Le comportement dépend aussi du rapport géométrique de la section  $a/b$ , si ce rapport est petit et proche de 1, le comportement sera proche de celui des sections circulaires, mais au fur et à mesure que  $a/b$  augmente, l'efficacité du confinement par PRF diminue, ce qui a été remarqué aussi pour les sections rectangulaires.



**Figure V – 11** : Caractéristiques d'une ellipse

La rupture du PRF est généralement localisée aux coins lorsque le rapport géométrique de la section est grand (comme pour les sections rectangulaires), mais quand ce dernier diminue, la rupture survient dans des endroits très variables (comme pour les sections circulaires).

Le diagramme contrainte-déformation des sections elliptiques confinées par PRF pour trois rapports géométrique de la section est représenté dans la figure V-12, pour les rapports 5/4 et 5/3, la réponse est bilinéaire ascendante alors que pour le rapport 5/2, on note la présence d'un comportement post-pique descendant. Les deux courbes illustrent bien l'effet du rapport géométrique sur le comportement des sections elliptiques confinées par PRF.



**Figure V – 12 :** Diagrammes  $\sigma - \epsilon$  typiques pour les sections elliptiques confinées par PRF de carbone ; a) axe secondaire ; b) axe principale [Teng et al 2002]

## V – 5. RESISTANCE EN COMPRESSION AXIALE DES POTEAUX DE SECTION CIRCULAIRE CONFINE PAR « PRF »

### Généralités

Pour le dimensionnement, il est important de pouvoir estimer le gain de résistance apporté par le confinement du PRF, pour les bétons confinés par acier il existe déjà plusieurs modèles de résistance. La plupart des modèles de résistance du béton confiné par matériaux composites (Karbhari et Gao 1997, Samaan et al 1998, Miyauchi et al 1999, Saafi et al 1999, Toutanji 1999), ont la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (4)$$

Où  $f'_{cc}$  et  $f'_{co}$  sont la résistance en compression du béton confiné et non confiné respectivement,  $f_l$  est la pression latérale de confinement définie dans l'équation (1) (certains modèles intègrent lors de leurs calage et validation la rupture prématurée du PRF à travers  $k_1$  ce qui permet d'utiliser  $f_l$  au lieu de  $f_{l,r}$ ),  $k_1$  est le coefficient d'efficacité du confinement. Cette forme a été en premier proposée par Richart et al en 1928 pour le béton confiné par pression hydrostatique (confinement actif) avec une valeur de ( $k_1 = 4,1$ ). En 1929 les mêmes auteurs ont trouvés que leur modèle été aussi valable pour le béton confiné par acier (confinement passif) [Teng et al 2002]. Les essais ont été faits sur des éprouvettes cylindriques de  $250 \times 1000 \text{ mm}$  armées avec des spirales en acier espacées de  $25 \text{ mm}$ , la résistance du béton non confiné été comprise entre  $14$  et  $21 \text{ MPa}$  [Nanni et Bradford 1995]. Fardis et Khilili (1982) ont suggérés que le modèle de Richart et al 1928 peut être utilisé pour le béton confiné par PRF. Cependant des études plus récentes ont montré que l'estimation de la résistance du béton confiné par PRF avec des modèles établis pour le confinement par acier n'été pas appropriée du fait que ces derniers surestiment la résistance en compression du béton confiné par PRF (Mirmiran et Shahawy 1997, Samaan et al 1998, saafi et al 1999, Spoelstra et Monti 1999).

Plusieurs modèles de résistance du béton confiné par PRF ont repris l'équation (4) mais en changeant la valeur de  $k_1$  (Karbhari et Gao 1997, Samaan et al 1998, Miyauchi et al 1999, Saafi et al 1999, Toutanji 1999). Miyauchi et al 1999 ont proposés  $k_1 = 2.98$  basés sur leur propres résultats expérimentaux d'éprouvettes confinées par PRF de carbone, la résistance du béton non confiné variait entre  $20$  et  $100 \text{ MPa}$ . Dans les autres modèles (Karbhari et Gao 1997, Samaan et al 1998, Saafi et al 1999, Toutanji 1999)  $k_1$  n'est pas constant et dépend de  $f_l / f'_{co}$ , les modèles de Samaan et al 1998, Saafi et al 1999 ont été établis avec les résultats de tubes en PRF remplis de béton alors que les autres modèles ont été établis avec les résultats d'éprouvettes en béton sur lesquelles le PRF a été stratifié manuellement (enveloppées avec du PRF). Mirmiran et al ont pris en compte l'élancement des éprouvettes ( $L/d$ ).

Dans ce qui suit, on va détailler quelques modèles de résistance faisant une distinction entre les modèles basés sur les modèles faits pour le confinement par acier (steel based models), les modèles empiriques ou analytiques [De Lorenzis 2001], [Teng et al 2002], [Karbhari et Gao 1997], [Mander et al 1988], [Lam et Teng 2003].

### V – 5 – 1 Modèles de résistance basés sur les modèles de confinement par acier

Avant tout, il ne faut pas perdre de vue que ce genre de modèles comme déjà mentionné auparavant surestiment la résistance ultime du béton confiné par PRF, il seront cités à titre indicatif, le dimensionnement doit se faire avec les modèles analytiques, empiriques ou semi analytiques.

#### V – 5 – 1 – a) Fardis et Khalili (1981)

L'une des premières tentatives est celle de ( Fardis et Khalili , 1981). Ils se basèrent sur le travail de Richart et al (1928) pour estimer la résistance en compression du béton confiné par PRF. Les auteurs ont réalisé une campagne d'essais à la compression sur des éprouvettes cylindriques de 76x152mm et 102x204mm confinées par un tissu bidirectionnel en fibres de verre, leur modèle avait donc la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4,1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (5)$$

Ils ont aussi utilisé l'équation (empirique) de Newman (1972)

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,7 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.86} \quad (6)$$

Où  $f_l$  est calculée avec l'équation (1). La validation de ces deux équations a été faite avec leurs résultats expérimentaux qui étaient des éprouvettes cylindriques 75×150 mm et 100×200 mm confinées par PRF de verre, le niveau de confinement  $f_l/f'_{co}$  été compris entre 0,1 et 0,6.

#### V – 5 – 1 – b) Saadatmanesh et al (1994)

Saadatmanesh et al ([Saadatmanesh et al., 1994]) ont étendu le modèle de confinement du béton par chemisage en acier (modèle exposé dans [Mander et al ; 1988 ]) au confinement par PRF ,ce dernier propose une relation non linéaire entre la résistance du béton confiné et la pression de confinement comme suit :

$$\frac{f_l}{f'_{co}} = 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1,254 \quad (7)$$

Pour les poteaux partiellement confinés avec un grand espacement entre les bandes de PRF, Saadatmanesh et al proposent d'utiliser l'équation (7) mais en remplaçant  $f_l$  par  $f'_l$  tel que :

$$f'_l = k_g \times f_l \quad (8)$$

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

$$k_g = \frac{(1 - S_{prf} / 2d)^2}{1 - \rho_{sc}} \quad (9)$$

$S_{prf}$  est l'espace entre les bandes de PRF,  $\rho_{sc}$  est le pourcentage des armatures longitudinales dans la section du poteau.

## V – 5 – 2 Modèles de résistance empiriques ou analytiques

### V – 5 – 2 – a) Miyauchi et al (1997)

Le modèle proposé par Miyauchi et al a la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4,1 \times k_e \times \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (10)$$

On remarque que ce modèle ne diffère de celui de Richart et al que par l'ajout d'un « coefficient d'efficacité » empirique a partir de leurs résultats expérimentaux, et pour un niveau de confinement allant de 0,1 à 0,5, la valeur de  $k_e$  a été trouvée égale à 0,85 ce qui donne donc  $k_l = 3,48$ . En 1999 cette valeur a été révisée à  $k_l = 2,98$

### V – 5 – 2 – b) Karbhari et Gao (1997)

Le modèle de Karbhari et Gao pour estimer la résistance en compression du béton confiné par PRF est lui aussi inspiré du modèle de Richart et al et a la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2,1 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.87} \quad (11)$$

A partir de ce moment, ce modèle sera nommé le modèle de Karbhari et Gao (I) car ils ont un autre modèle (Karbhari et Gao (II)) qui a la forme suivante :

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3,1 f'_{co} \nu_c \frac{2t_{prf}}{d} \frac{E_{prf}}{E_c} + 2 \frac{f_{prf} \times t_{prf}}{d} \quad (12)$$

Où  $\nu_c$ ,  $E_c$  sont le coefficient de Poisson et le module d'élasticité du béton,  $f_{prf}$  est la résistance en traction du PRF dans la direction circonférentielle,  $t_{prf}$  est l'épaisseur totale de l'enveloppe en PRF et  $d$  est le diamètre de l'éprouvette.

### V – 5 – 2 – c) Kono et al (1998)

Kono et al ont développé une équation empirique dans laquelle  $f'_{cc} / f'_{co}$  sont linéairement reliés à la pression latérale de confinement ( $f_l$ ) au lieu du niveau de confinement  $f_l / f'_{co}$ .

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0,0572 f_l \quad (13)$$

Le niveau de confinement des spécimens utilisés pour valider le modèle est entre 0,37 et 1,19 ce qui est un peu élevé, le béton non confiné avait une résistance comprise entre 32,3 et 34,8 MPa. Les mesures des déformations circonférentielles ont montré que la rupture du PRF survenait pour des

déformations de l'ordre de 38 à 59 % de la déformation ultime obtenue par essai de traction sur éprouvettes planes. Ce modèle prend en compte de la rupture prématurée du PRF.

**V – 5 – 2 – d) Mirmiran et al (1998)**

Le modèle de Mirmiran et al tiens compte de l'élancement de l'éprouvette, pour trouver la résistance en compression d'une éprouvette avec un élancement quelconque, on considère la résistance en compression d'une éprouvette d'élancement  $L/d = 2$  notée  $f'_{cc2:l}$ , l'équation qui permet cette transition est :

$$f'_{cc} = f'_{cc2:l} \left[ 0,0288 \left( \frac{L}{d} \right)^2 - 0,263 \left( \frac{L}{d} \right) + 1,418 \right] \quad (14)$$

**V – 5 – 2 – e) Samaan et al (1998)**

Le modèle de Samaan et al a la forme suivante :

$$f'_{cc} = f'_{co} + 0,6 f_l^{0,7} \quad (15)$$

La validation de cette équation s'est faite avec des tubes en PRF remplis de béton, le niveau de confinement variait entre 0,31 et 0,84, la déformation circonférentielle à la rupture était très proche de la déformation ultime du PRF obtenue par essais de dilatation sur éprouvettes annulaires (ring splitting test), c'est pour cela que ce modèle ne tiens pas compte de la rupture prématurée du PRF. Il faut noter que les valeurs des déformations obtenues avec essai de traction sur éprouvettes planes en PRF ne donnent pas de bonnes prédictions avec ce modèle.

**V – 5 – 2 – f) Toutanji (1999)**

Le modèle de Toutanji ressemble à celui de Karbhari et Gao et a la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,85} \quad (16)$$

**V – 5 – 2 – g) Saafi et al (1999)**

Le modèle de Saafi et al ressemble à celui de Toutaji, sauf que pour Saafi et al, la régression s'est faite sur de des tubes en PRF remplis de béton contrairement a Toutanji qui lui a utilisé les résultats d'éprouvettes en béton sur lesquelles le PRF a été stratifié manuellement. La différence entre ces deux modèles est attribuée à la différence de l'adhérence au béton des deux types de confinement. Le modèle de Saafi et al a la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2,2 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,84} \quad (17)$$

### V – 5 – 2 – h) Spoelstra et Monti (2000)

Comme on le verra par la suite, le modèle de [Spoelstra et Monti2000] est inspiré du modèle de Mander et *al* (1988), il a la forme suivante :

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 0,2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \quad (18)$$

### V – 5 – 2 – i) Xiao et Wu (2000)

L'équation proposée par Xiao et Wu est la suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,10 + \left( 4,1 - 0,75 \frac{f'^2_{co}}{E_l} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (19)$$

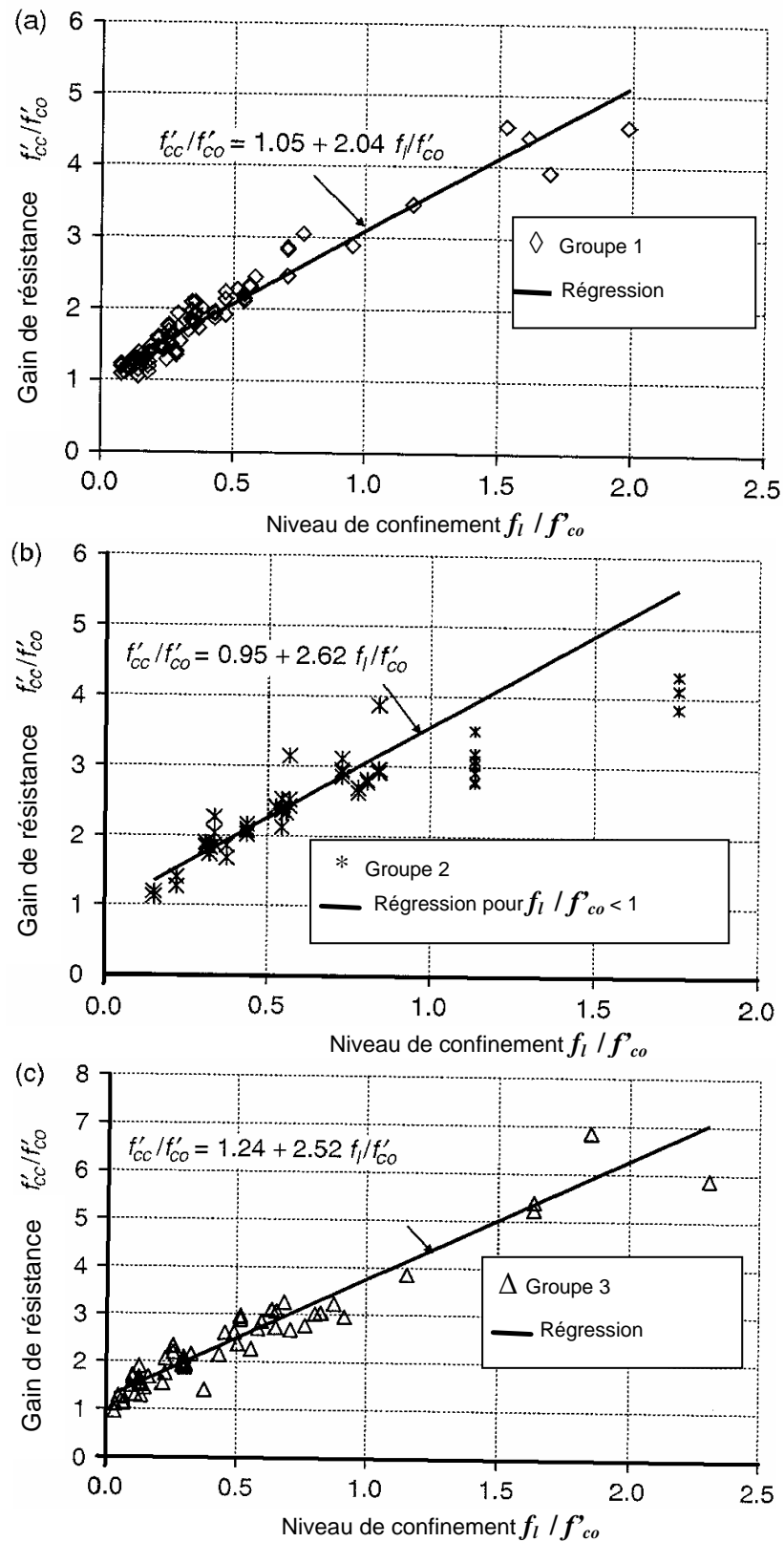
Où :  $E_l = 2 \frac{t_{prf}}{d} E_{prf}$ , cette équation empirique a été validée avec leurs résultats expérimentaux, le niveau de confinement variait entre 0,14 et 0,70. Les mesures des déformations circonférentielles ont montré que la rupture du PRF survenait pour des déformations entre 50 et 80 % de la déformation ultime obtenue par essai de traction sur éprouvettes planes, cependant le modèle de Xiao et Wu ne tiens pas compte de la rupture prématurée et pour des faibles niveaux de confinements, les prédictions du modèles représentent mal les résultats expérimentaux [Teng et *al* 2002].

### V – 5 – 3 Travaux de Lam et Teng (2001)

Vu que ce modèle est le plus simple et le plus pertinent, on se propose de le détailler et par la suite de faire une comparaison entre les modèles. Le modèle de Lam et Teng a été établi à partir des résultats de 199 éprouvettes (résultats de plusieurs chercheurs trouvés dans la littérature). La résistance du béton non confiné était comprise entre 18 et 65 MPa, les éprouvettes était confinées avec des PRF de carbone, de verre et d'aramide, le mode de rupture était par rupture en traction des PRF, leur base de données expérimentales ne contient pas les BHP, les éprouvettes partiellement confinées et les éprouvettes dont le mode de rupture est autre que la rupture en traction des PRF. Pour les propriétés des PRF des 199 éprouvettes, à peu près les 2/3 ont été établis par les chercheurs eux-mêmes soit par essai de traction sur éprouvettes planes (flat coupon tensile test) ou bien par traction circonférentielle obtenue par dilatation d'éprouvettes annulaires (ring splitting test). Pour le reste des éprouvettes, les propriétés sont celles données par le fournisseur, donc selon l'origine des propriétés du PRF on a trois groupes, le 1<sup>er</sup> est celui dont les propriétés ont été obtenue par essai de traction sur éprouvettes planes, le 2<sup>ème</sup> groupe est celui dont les propriétés ont été obtenue par traction circonférentielle obtenue par dilatation d'éprouvettes annulaire et le 3<sup>ème</sup> groupe comprends le reste des éprouvettes (propriétés données par le fournisseur des fibres). Les trois groupes sont illustrés séparément dans la figure V-13, pour voir la différence de la relation gain de résistance-niveau de confinement, les résultats statistiques sont dans le tableau V-2. A partir de ce dernier et de la figure V-13 on vois nettement que la relation entre le gain en résistance et le niveau de confinement est linéaire pour les trois groupes malgré que pour le 2<sup>ème</sup> groupe les dix points avec un très haut niveau de confinement

(c à d  $f_l / f'_{co} > 1$ ) sont en dessous de la ligne de tendance (régression). Le tableau V-2 montre aussi que pour le 3<sup>ème</sup> groupe  $k_l$  prends la plus grande valeur, cela s'explique par le fait que les fournisseurs donnent des caractéristiques garanties donc avec une marge de sécurité.

On vois aussi que pour le 1<sup>er</sup> groupe,  $k_l$  est inférieur à celui du 2<sup>ème</sup> groupe, cette différence peut être attribuée au différents essai pour mesurer la résistance en traction du PRF, en effet cette dernière est plus petite pour l'essai de dilatation des éprouvettes annulaires que pour l'essai de traction sur éprouvettes plane, cependant les déformations ultimes enregistrés avec l'essai de dilatation sont plus proches de celles obtenue lors de la rupture du PRF dans les essais de confinement.

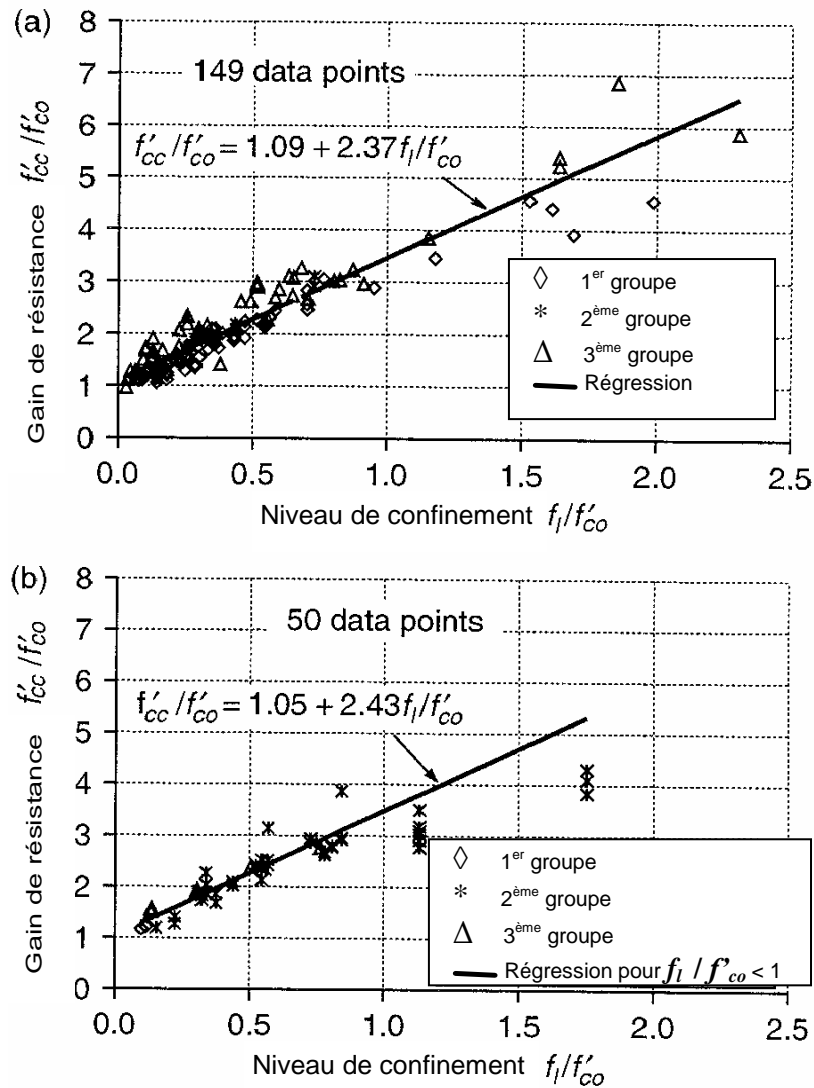


**Figure V- 13 :** Effet des types d'essais pour caractériser le PRF sur la régression :  
 a) 1<sup>er</sup> groupe caractérisé avec l'essai de traction sur éprouvette plane ;b) 2<sup>ème</sup> groupe caractérisé par dilatation d'éprouvettes annulaire ;c) propriétés données par le fournisseur [Lam et Teng 2002]

**Tableau V – 2 : Résultats statistiques de la base de données expérimentales [Lam et Teng 2002]**

Groupe	Nombre d'éprouvettes	Coefficient d'efficacité du confinement $k_1 = (f'_{cc} - f'_{co}) / f_l$		Meilleure régression	
		Moyenne	Ecart type	Equation	Coefficient de corrélation $R^2$
1 <sup>er</sup> groupe	83	2,10	0,59	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,05 + 2,04 \frac{f_l}{f'_{co}}$	0,94
2 <sup>ème</sup> groupe	47	2,31	0,60	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0,95 + 2,62 \frac{f_l}{f'_{co}}$	0,83
3 <sup>ème</sup> groupe	69	3,45	1,46	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,24 + 2,52 \frac{f_l}{f'_{co}}$ Pour $f_l / f'_{co} < 1$	0,93
Total	199	2,62	1,15	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,15 + 2,16 \frac{f_l}{f'_{co}}$	0,87

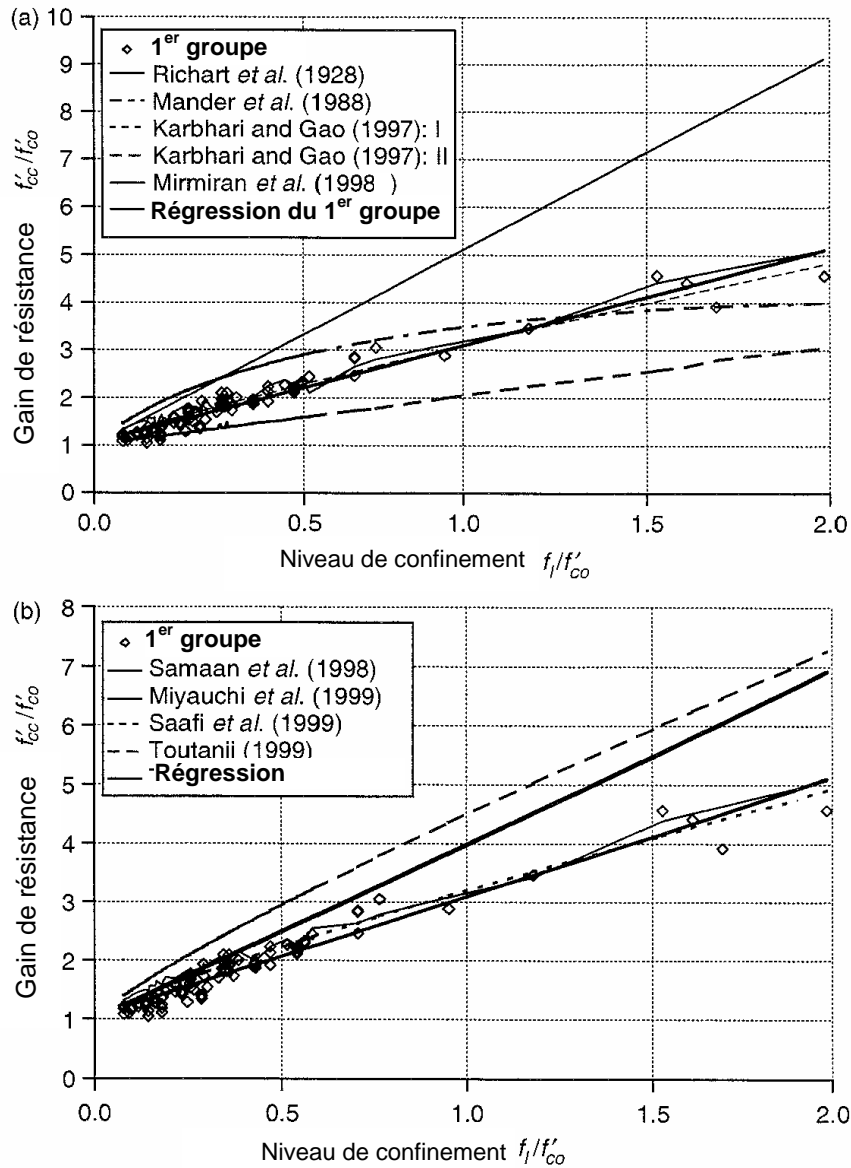
La majorité des éprouvettes cylindriques en béton ont été confinées (enveloppées) par stratification manuelle ou par enroulement filamenteux, cependant il existe aussi un nombre important de tubes en PRF remplis avec du béton, la différence entre ces éprouvettes est que l'enveloppe en PRF est collée au béton avec la résine pour le 1<sup>er</sup> type ce qui n'est pas le cas du 2<sup>ème</sup> type. Mirmiran et al pensent qu'il n'y a pas de différence entre ces spécimens alors que Saafi et al pensent qu'il y a une différence entre l'efficacité de confinement. Lam et Teng (2002) ont comparés les résultats de ces deux types de spécimens (éprouvettes en béton stratifiés avec du PRF et les tubes en PRF remplis de béton) et les résultats sont représentés dans la figure V-14 qui montre que toute fois pour les niveaux de confinements inférieurs à 1, les régressions sont identiques. Il est important de noter que les 10 points en dessous de la régression (ligne de tendance) sont les résultats de tubes en PRF de verre remplis de béton dont les fibres sont orientées à  $\pm 55,83^\circ$ , donc le PRF a subi de sollicitations hors axes d'orthotropie ce qui réduit ses performances. Lam et Teng ont aussi étudié les effets de la résistance du béton non confiné, le diamètre des éprouvettes, leur élancement et le type de PRF et ont trouvé que pour leur base de données, ces paramètres ont une faible influence sur l'efficacité du confinement du PRF.



**Figure V – 14 :** Comparaison entre les éprouvettes dont le PRF a été stratifié sur le béton (bonne adhérence) et les tubes en PRF remplis de béton (mauvaise adhérence) [Lam et Teng 2002]

**V – 5 – 3 – a) Performance des modèles en résistance**

Vu que les propriétés du PRF sont dans la majorité des cas obtenue par essai de traction sur éprouvettes planes (flat coupon tensile test), la comparaison entre les modèles de résistance (figure V-15) s’est faite avec le 1<sup>er</sup> groupe d’éprouvettes. Dans le coin gauche des figures V- 15 a et b où la résistance du béton est au maximum triplée (vu qu’en pratique il n’est pas fréquent de vouloir augmenter plus de trois fois la résistance du béton) certains modèles donnent de bonnes prédictions alors que d’autre non. Les performances statistiques sont dans le tableau V- 3.



**Figure V – 15 :** Comparaison entre les différents modèles de résistance en utilisant les résultats des éprouvettes du 1<sup>er</sup> groupe [Lam et Teng 2002]

Parmi les 9 modèles, ceux de Karbhari et Gao (I), Saafi *et al* donnent des résultats très proches des résultats expérimentaux, alors que pour ceux de Richart *et al*, Mander *et al* qui sont fait pour le confinement par acier, on remarque que le premier surestime sur toute l'étendue des résultats alors que le deuxième ne surestime que pour les niveaux de confinement faibles à modéré et sous-estime la résistance pour les hauts niveaux de confinement. Le modèle de Toutanji lui aussi surestime la résistance du béton confiné par PRF, celui de Miyauchi *et al* est le seul proposé pour le béton confiné par PRF et dans lequel la relation entre le gain de résistance ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) et le niveau de confinement ( $f_i/f'_{co}$ ) est linéaire, mais lui aussi surestime la résistance en compression du béton confiné par PRF. Le modèle de Karbhari et Gao (II) est quant à lui et contrairement aux autres très conservatif. Pour

confirmer ces résultats, Lam et Teng ont comparé ces modèles avec le 2<sup>ème</sup> groupe expérimental et sont sorti avec les mêmes conclusions.

**Tableau V – 3 : Performances statistiques des modèles de résistance pour le 1<sup>er</sup> groupe [Lam et Teng 2002]**

Modèle	Rapport entre $f'_{cc}$ expérimentale et prédite par le modèle		
	Moyenne	Ecart type	Covariance (%)
Richart et al (1928)	0,74	0,09	11,6
Mander et al (1988)	0,77	0,11	14,4
Karbhari et Gao (1997) I	0,96	0,09	9,5
Karbhari et Gao (1997) II	1,27	0,20	15,3
Mirmiran et al (1998)	0,91	0,11	11,4
Samaan et al (1998)	0,90	0,09	10,1
Miyauchi et al (1999)	0,87	0,08	9,3
Saafi et al (1999)	0,93	0,09	9,4
Toutanji (1999)	0,74	0,06	8,6

**V – 5 – 3 – b) Modèle de Lam et Teng 2001**

Comme on le vois sur les résultats expérimentaux, la résistance du béton confiné par PRF ( $f'_{cc}$ ) augmente linéairement avec la pression latérale de confinement ( $f_l$ ) (figure V- 12 et .13) donc choisir un modèle avec une forme complexe comme celui de Karbhari et Gao (1997), Mirmirane et al (1998), Samaan et al (1998), Saafi et al (1999) ou Toutanji (1999) s’avère inutile. Lam et Teng ont trouvé que l’équation (4) avec un coefficient  $k_l = 2,15$  donne de très bonnes prédictions pour le 1<sup>er</sup> groupe de spécimens comme on le vois dans le tableau V- 4. Cependant pour les haut niveaux de confinement ( $f_l / f'_{co} > 1$ ), ce modèle surestime légèrement la résistance en compression du béton confiné par PRF (voir figure V- 15) c’est pour cela que la valeur de  $k_l$  a été modifiée et cela dans le but d’exploiter ce modèle pour le dimensionnement, on obtient donc :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \frac{f_l}{f'_{co}} \tag{20}$$

Cette équation est légèrement conservative et plus simple que tous les autres modèles établis pour le béton confiné par PRF (elle a été aussi proposée par [Lin et Liao 2004]), comme cette équation a été validée avec le 1<sup>er</sup> groupe de spécimens, il est donc plus approprié lors de son utilisation pour le dimensionnement de prendre les propriétés du PRF obtenues par essais de traction sur éprouvettes planes. Il est aussi important de noter que pour les tubes en PRF remplis avec du béton, la caractérisation du PRF se fait avec l’essai de traction par dilation d’éprouvettes annulaires et

l'utilisation de l'équation (20) pour le 2<sup>ème</sup> groupe de spécimens a donné de bons résultats légèrement conservatif pour ( $f_l / f'_{co} < 1$ ), voir la figure V- 16.

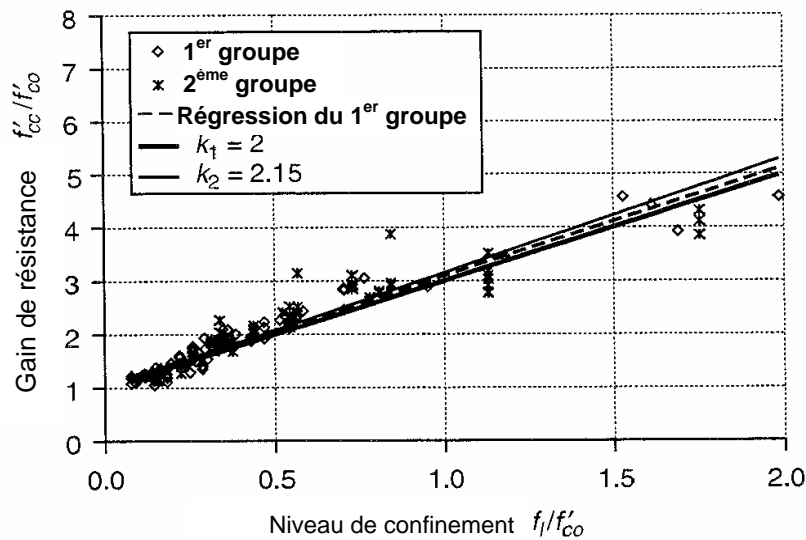


Figure V – 16 : Comparaison entre le modèle de résistance de Lam et Teng et les résultats expérimentaux [Lam et Teng 2002]

## V – 6 . RELATION CONTRAINTE-DEFORMATION POUR LE BETON CONFINE PAR PRF

### • Généralités

Afin de pouvoir dimensionner le renfort en PRF nécessaire, il est impératif de connaître le comportement contrainte-déformation, particulièrement quand le poteau est en flexion composée ou quand la ductilité pour des sollicitations sismique est requise. Bien qu'il existe plusieurs modèles contrainte-déformation pour le béton confiné par acier (Kent et Park 1971, Ahmad et Shah 1982, Mander et al 1988...etc.) et que le modèle de Mander et al 1988 a été le plus utilisé pour le béton confiné par PRF, ce type de modèles ne peut pas être utilisé pour le béton confiné par PRF comme on l'a déjà parce qu'il ne retrace pas le comportement bilinéaire de ce dernier. Pour éviter toute ambiguïté dans ce qui suit, il est important de noter que les modèles contrainte-déformation qu'on va traiter concernent uniquement les sections circulaires, il n'existe pas de modèles bien établis pour les sections rectangulaires.

Comme pour les modèles de résistance, on va détailler quelques modèles contrainte-déformation en faisant une distinction entre les modèles basés sur les modèles faits pour le confinement par acier (steel based models), les modèles empiriques ou analytiques [De Lorenzis 2001], [Teng et al 2002], [Karbhari et Gao 1997], [Mander et al 1988], [Lam et Teng 2003].

### V – 6 – 1 Modèles contrainte-déformation basés sur les modèles pour confinement par acier

Les premières recherches sur le béton confiné par acier (Richart et al 1929) ont démontrées que la déformation axiale  $\varepsilon_{cc}$  au pique de résistance en compression est reliée à la pression latérale de confinement par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (21)$$

Où  $\varepsilon_{co}$  est la déformation axiale du béton non confiné correspondante à la résistance maximum,  $k_2$  est le coefficient d'augmentation des déformations. Richart et al 1929 ont suggérés pour  $k_2$  la valeur de 5  $k_1$  pour le béton confiné par acier,  $k_1$  étant le coefficient d'efficacité du confinement et qui est égale à 4,1 pour le confinement par acier.

#### V – 6 – 1 – a) Fardis et Khalili (1981)

Le premier modèle contrainte-déformation pour le béton confiné par PRF a été proposé par Fardis et khalili en 1981 et a la forme suivante :

$$\sigma_c = \frac{E_{co} \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_c \left( \frac{E_{co}}{f'_{cc}} - \frac{1}{\varepsilon_{cc}} \right)} \quad (22)$$

Où  $E_{co}$ , est le module d'élasticité du béton non confiné.

Ils ont aussi proposé pour le calcul de la déformation axiale du béton confiné correspondante au pique de résistance la formule suivante :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,001 \frac{E_{prf} \times t_{prf}}{d \times f'_{co}} \quad (23)$$

Où  $\varepsilon_{co} = 0,002$ ,  $E_{prf}$  est le module d'élasticité du PRF dans le sens circonférentiel.

#### V – 6 – 1 – b) Saadatmanesh et al (1994)

Comme on l'a déjà vu, Saadatmanesh et al ont utilisés le modèle de Mander et al 1988, ce modèle lui-même basé sur l'équation de Popovics 1973 comme suit :

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (24)$$

Où  $f'_{cc}$  est calculée avec l'équation (7),  $x = \varepsilon_c / \varepsilon_{cc}$  et  $r = E_c / (E_c - E_{esc})$ .

Avec  $E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc}$ .

La déformation axiale correspondante a la résistance maximum  $f'_{cc}$  est calculée en modifiant l'équation (21) en prenant  $k_2 = 5 k_1$  comme suit :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right) \quad (25)$$

La courbe contrainte-déformation de l'équation (24) se termine quand la déformation ultime du béton confiné  $\varepsilon_{cc}$  est atteinte, cette déformation est définie comme étant la déformation axiale à laquelle survient la première rupture circonférentielle (Scott et al 1982), Mander et al (1988) ont proposés pour la déformation ultime une approche énergétique (energy balance approach) qui s'écrit comme suit :

$$U_{sh} = U_{cc} + U_{sc} - U_{co} \quad (26)$$

Où  $U_{sh}$ ,  $U_{cc}$ ,  $U_{sc}$  et  $U_{co}$  sont les énergies de déformation par unité de volume du matériau de confinement, du béton confiné, des armatures longitudinales et du béton non confiné respectivement [Mander et al 1988].

En se basant sur ce principe, Prestley et al (1996) ont trouvés :

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4\rho_{sh} \times \varepsilon_{su} \times f_{yh}}{f'_{cc}} \quad (27)$$

Où  $\rho_{sh}$  est le taux volumétrique,  $f_{yh}$  est la contrainte à la limite élastique des armatures transversales et  $\varepsilon_{su}$  est la déformation des armatures correspondante à la contrainte maximum. Dans la même philosophie, [Seible et al 1997] ont proposés pour le béton confiné par PRF :

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{2,8\rho_{prf} \times \varepsilon_{prf,rup} \times f_{prf}}{f'_{cc}} \quad (28)$$

Où  $\varepsilon_{prf,rup}$  est la déformation ultime du PRF dans la direction circonférentielle. Le modèle contrainte-déformation de Mander et al (1988) pour le béton confiné par acier est illustré dans la figure V-1.

Comme on l'a déjà évoqué, pour le béton correctement confiné par PRF, la déformation axiale ultime et la résistance maximum sont atteintes au même moment.

## V – 6 – 2 Modèles contrainte-déformation empiriques ou analytiques

### V – 6 – 2 – a) Miyauchi et al (1997, 1999)

Miyauchi et al (1997) ont proposés deux équations empiriques pour trouver  $\varepsilon_{cc}$  comme suit :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1,0 + 10,6 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,373} \quad \text{Pour } f_{co} = 30MPa \quad (29 a)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1,0 + 10,5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,525} \quad \text{Pour } f_{co} = 50MPa \quad (29 b)$$

Ces équations ont été validées avec les valeurs expérimentales de  $\varepsilon_{co}$ , les déformations latérales n'ont pas été mesurées, il n'est donc pas possible de savoir si la rupture du PRF correspondait ou non avec la contrainte maximum de compression. Cependant par analogie aux résultats expérimentaux obtenus

par différents auteurs, il est très probable que la rupture du PRF s'était produite à des allongements inférieurs à ceux obtenus par essai de traction sur éprouvettes planes, si c'est le cas, cela veut dire que les équations (10) et (29) prennent compte de la rupture prématurée du PRF.

Pour le modèle de Miyauchi et *al* (1999), les équations pour tracer le diagramme contrainte-déformation sont :

**Cas des courbes ascendantes :**

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad \text{Pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (30 \text{ a})$$

$$\sigma_c = f'_{cu} - \lambda(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c) \quad \text{Pour } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (30 \text{ b})$$

Où  $\varepsilon_t = \varepsilon_{co} - \lambda \frac{\varepsilon_{co}^2}{2f'_{co}}$

$$\lambda = \frac{1}{\varepsilon_{co}^2} \left[ -2f'_{co} (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) + \sqrt{4f'_{co} (f'_{co} \varepsilon_{cu}^2 - 2f'_{co} \varepsilon_{cu} \varepsilon_{co} + f'_{cu} \varepsilon_{co}^2)} \right]$$

$f'_{cu}$  est la contrainte dans le béton confiné correspondante à la déformation ultime  $\varepsilon_{cu}$ .

Dans ce cas  $f'_{cu} = f'_{cc}$ ,  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \times \left[ 1,0 + (15,87 - 0,093f'_{co}) \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,246+0,0064f'_{co}} \right]$

**Cas des courbes descendantes :**

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad \text{Pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}$$

$$\sigma_c = f'_{co} + (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \frac{(f'_{cu} - f'_{co})}{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co})} \quad \text{Pour } \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (30 \text{ c})$$

**V – 6 – 2 – b) Karbhari et Gao (1997)**

Le modèle de Karbhari et Gao (I) ne donne pas l'allure de la courbe contrainte-déformation, il donne seulement la déformation axiale ultime alors que le modèle (II) lui est complet.

**Modèle (I) :**

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,01 \times \frac{2f_{prf} \times t_{prf}}{d \times f'_{co}} \quad (31)$$

**Modèle (II) :**

Au point « A » dans la figure V- 17 :

$$\sigma_c = f'_{co} + 4,1f'_{co} \nu_c \frac{2t_{prf}}{d} \frac{E_{prf}}{E_c} \quad (32)$$

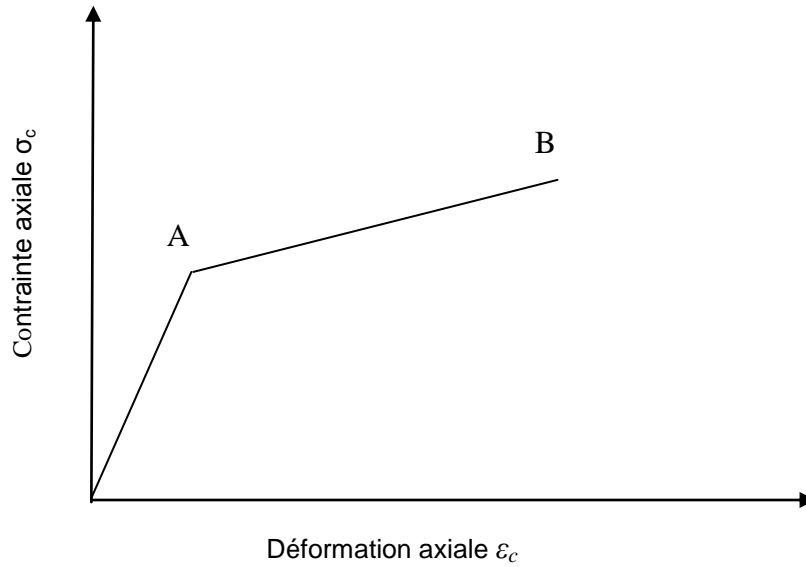
Où  $E_c = f_c / E_{eff}$

$$E_{eff} = E_c \frac{A_c}{A_c + A_{prf}} + E_{prf} \frac{A_{prf}}{A_c + A_{prf}}$$

Au point « B » dans la figure V- 16 :

$$\sigma_c = f'_{co} + 3,1f'_{co} \nu_c \frac{2t_{prf}}{d} \frac{E_{prf}}{E_c} + \frac{2t_{prf} \times f_{prf}}{d} \quad (33)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cc} = 1 - \frac{1,004 \left[ 1 - \frac{f'_{co}}{E_{eff}} - 4,1f'_{co} \nu_c \left( 2 \frac{t_{prf}}{d} \right) \left( \frac{E_{prf}}{E_c E_{eff}} \right) \right]}{(1 + \varepsilon_{prf, rup})^2} \quad (34)$$



**Figure V- 17 :** Modèle contrainte-déformation de Karbhari et Gao pour le béton confiné par PRF [Karbhari et Gao 1997]

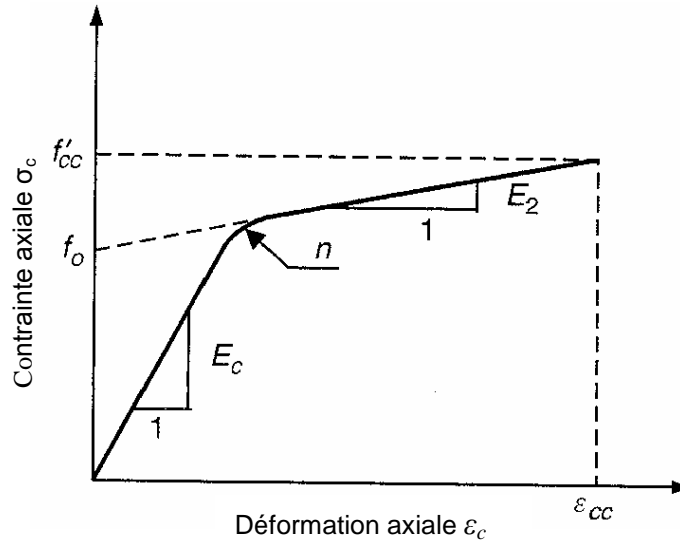
**V – 6 – 2 – c) Kono et al (1998)**

Kono et al ont seulement proposé une équation pour trouver la déformation axiale ultime comme suit :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 0,280 f_l \quad (35)$$

**V – 6 – 2 – e) Samaan et al (1998)**

Samaan et al ont utilisé les paramètres du modèle contrainte-déformation de Richard et Abbott (1975) voir figureV-18.



**Figure V- 18 :** Modèle contrainte-déformation de Samaan et al pour le béton confiné par PRF

$$\sigma_c = \frac{(E_c - E_2)\varepsilon_c}{\left[1 + \left((E_c - E_2)\frac{\varepsilon_c}{f_0}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} + E_2\varepsilon_c \quad (36)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f'_{cc} - f_0}{E_2} \quad (37)$$

Où :  $E_c = 3950 \sqrt{f'_c}$

$$E_2 = 245,61 f_{co}^{0,2} + 1,3456 \frac{E_{prf} \times t_{prf}}{d}$$

$$f_0 = 0,872 f'_{co} + 0,371 f_l + 6.258$$

$$n = 1.5$$

**V – 6 – 2 – f) Toutanji (1999)**

Le modèle rhéologique présenté par Toutanji ([*Toutanji, 1999*]) est composé de deux régions. La première région  $0 \leq \varepsilon_h \leq 0,002$ , dans laquelle l'expansion latérale du béton n'est pas significative, décrit un comportement similaire à celui du béton. Dans la deuxième région  $0,002 \leq \varepsilon_h \leq \varepsilon_{prf,rup}$ , le PRF devient actif et la réponse  $\sigma$ - $\varepsilon$  dépend alors principalement de la raideur du PRF. Le modèle contrainte-déformation de Toutanji se présente comme suit :

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left( \frac{E_c}{f_{u,a}} - \frac{2}{\varepsilon_{u,a}} + E_{u,a} \frac{E_c \varepsilon_{u,a}}{f_{u,a}^2} \right) \varepsilon_c} \quad \text{Pour } 0 \leq \varepsilon_h \leq 0,002 \quad (38)$$

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 1 + 3,5 \left( \frac{2E_{prf} \times t_{prf} \times \varepsilon_h}{d \times f'_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (39)$$

$$\text{Et } \varepsilon_c = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (310,57\varepsilon_h + 1,9) \left( \frac{\sigma_c}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad \text{Pour } 0,002 \leq \varepsilon_h \leq \varepsilon_{prf,rup} \quad (40)$$

$$\text{Où } f_{u,a} = f'_{co} \left[ 1 + 0,0178 \left( \frac{2t_{prf} \times E_{prf}}{d \times f'_{co}} \right)^{0,85} \right]$$

$$\varepsilon_{u,a} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 0,0448 \left( \frac{2t_{prf} \times E_{prf}}{d \times f'_{co}} \right)^{0,85} \right]$$

$$E_{u,a} = 0,3075 \frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}}$$

$\varepsilon_h$  est la déformation circonférentielle.

### V – 6 – 2 – g) Saafi et al (1999)

Le modèle de Saafi et al :

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left( \frac{E_c}{f_{u,a}} - \frac{2}{\varepsilon_{u,a}} + E_{u,a} \frac{E_c \varepsilon_{u,a}}{f_{u,a}^2} \right) \varepsilon_c + \left( \frac{1}{\varepsilon_{u,a}^2} - E_{u,a} \frac{E_c}{f_{u,a}^2} \right) \varepsilon_c^2} \quad \text{Pour } 0 \leq \varepsilon_h \leq 0,002 \quad (41)$$

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 1 + 2,2 \left( \frac{2E_{prf} \times t_{prf} \times \varepsilon_h}{d \times f'_{co}} \right)^{0,84} \right] \quad (42)$$

$$\text{Et } \varepsilon_c = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (537\varepsilon_h + 2,6) \left( \frac{\sigma_c}{f'_{co}} + 1 \right) \right] \quad \text{Pour } 0,002 \leq \varepsilon_h \leq \varepsilon_{prf,rup} \quad (43)$$

$$\text{Où } f_{u,a} = f'_{co} \left[ 1 + 0,0213 \left( \frac{t_{prf} \times E_{prf}}{d \times f'_{co}} \right)^{0,84} \right]$$

$$E_{u,a} = 0,272 \frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}}$$

### V – 6 – 2 – h) Spoelstra et Monti (2000)

Le modèle de [Spoelstra et Monti2000] qui est inspiré du modèle pour béton non confiné sous compression axiale de Pantazopoulou et Mills (1995) et du modèle du béton confiné par acier de Mander et *al* (1988) est comme suit :

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 1,25 \frac{E_c}{f'_{co}} \varepsilon_{prf,rup} \times \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \quad (44)$$

### V – 6 – 2 – i) Xiao et Wu (2000)

Le modèle bilinéaire de Xiao et Wu est comme suit :

**1<sup>ère</sup> branche :**

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c + \frac{2E_l \nu_c^2}{1 + \frac{E_l}{E_c} (1 - \nu_c - 2\nu_c^2)} \quad \text{Avant } f'_{co} \quad (45)$$

$\nu_c$  est le coefficient de Poisson du béton

$$E_l = 2 \frac{t_{prf}}{d} E_{prf}$$

**2<sup>ème</sup> branche :**

$$\sigma_c = 1,10 f'_{co} + \left( 4,1 - 0,75 \frac{f_{co}^2}{E_l} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \quad \text{Après } f'_{co} \quad (46)$$

Et la déformation ultime :

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\varepsilon_{prf,rup} - 0,0005}{7 \left( \frac{f'_{co}}{E_l} \right)^{0,8}} \quad (47)$$

### V – 6 – 3 Travaux de Lam et Teng (2001)

L'établissement du modèle contrainte-déformation est basé sur les résultats expérimentaux de 171 éprouvettes divisées en trois groupes comme pour ceux qui ont servi à l'établissement du modèle de résistance. La déformation axiale du béton confiné par PRF est un des paramètres clé pour retracer la courbe contrainte-déformation, et peut être reliée à la pression latérale de confinement  $f_l$  [Karbhari et Gao 1997], [Lam et Teng 2001]. Lam et Teng ont remarqué que la relation entre la déformation axiale ultime et le niveau de confinement pour le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> groupes d'éprouvettes est grossièrement linéaire, et cela malgré la dispersion illustrée dans la figure V-18 dans laquelle la déformation ultime à été normalisée par rapport à la déformation du béton non confiné  $\varepsilon_{co}$  correspondante au pique de résistance et qui est prise égale à 0,002. Pour le 3<sup>ème</sup> groupe on remarque une faible corrélation avec une allure linéaire qui est attribuée aux incertitudes sur les propriétés du PRF.

Lam et Teng ont remarqué qu'il n'y a pas de différence dans le comportement entre le béton confiné par PRF (stratifié) et les tubes en PRF remplis de béton (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> groupe respectivement).

Spoelstra et Monti ont remarqué que la déformabilité du béton confiné par PRF de verre est égale au double de celle du béton confiné par PRF de carbone.

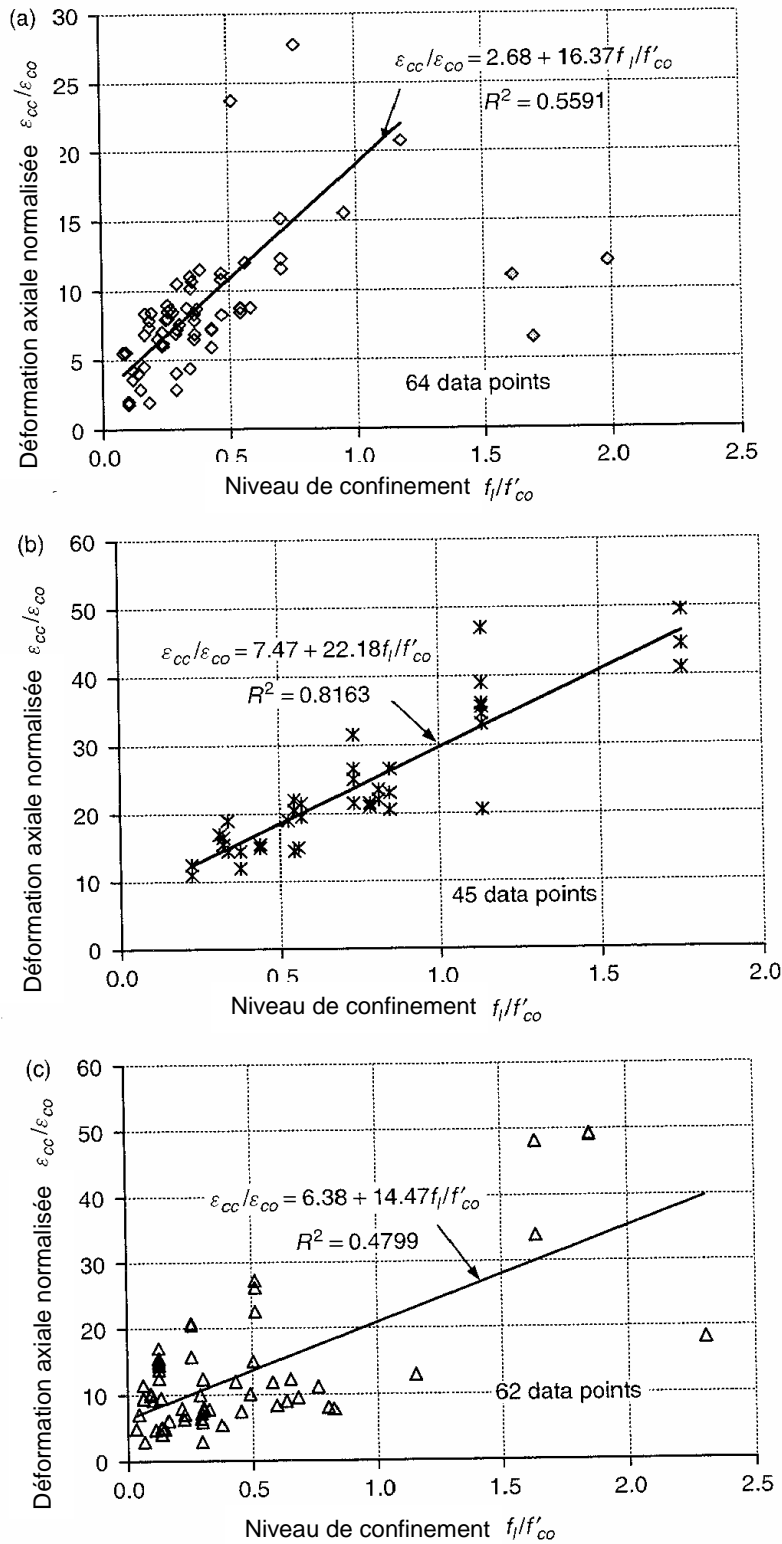
Lam et Teng se sont penché sur l'effet des différents types de fibres sur la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF pour le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> groupe d'éprouvettes, ils ont relié la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF à la pression de confinement comme suit :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (48)$$

Où  $k_2$  est le coefficient d'augmentation de déformabilité du béton, ce dernier dépend du type de PRF. Le tableau V- 4 montre les performances des spécimens avec les différents types de PRF en termes d'augmentation de la déformabilité. Pour le béton confiné par PRF de verre E, verre S et l'aramide, le coefficient d'augmentation de déformabilité  $k_2$  est le même et beaucoup plus grand que celui du béton confiné par PRF de carbone à haut module (HM), pour le carbone (HR)  $k_2$  se trouve au milieu.

**Tableau V - 4 :** Effet du type de fibre sur le coefficient d'augmentation de déformabilité du béton [Teng et al 2002].

Type de fibres	Type de spécimens	Type d'éprouvette pour l'essai de traction	Nombre de spécimens	Allongement ultime à la rupture du PRF ( $\varepsilon_{prf,rupt}$ )		$k_2 = \frac{\varepsilon_{cc}/\eta_{co} - 2}{f_l/f'_{co}}$	
				Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Carbone HM	Stratifiée	Plane	4	0,003	0	6,4	5,1
Carbone	Stratifiée	Plane	37	0,014	0,002	16,3	7,1
Carbone HM	Stratifiée	Plane	1	0,003	-	-2,0	-
Carbone	Stratifiée	Plane	1	0,013	-	13,8	-
Carbone et verre	Stratifiée	Plane	1	0,013	-	31,7	-
Verre E	Stratifiée	Plane	9	0,020	0,002	26,7	5,6
Verre S	Stratifiée	Annulaire	4	0,029	0	33,7	4,8
Verre E	Tube	Annulaire	37	0,018	0,005	32,6	9,0
Verre S	Tube	Annulaire	4	0,029	0	30,0	2,2
Aramide	Stratifiée	Plane	7	0,022	0,007	29,9	8,9
	Total		105	0,017	0,006	24,7	11,4



**Figure V - 19 :** Effet de la source des propriétés du PRF ; a) essai de traction sur éprouvettes planes ; b) traction circonférentielle obtenue par dilatation d'éprouvettes annulaires ; c) propriétés données par le fournisseur [Teng et al 2002]

La figure V-19 compare les déformations axiales ultimes normalisées en fonction du niveau de confinement du béton confiné par PRF de carbone HR, et les tubes en PRF de verre E et S remplis de béton (les PRF de carbone HM sont exclus), les propriétés des PRF sont obtenues par traction sur éprouvettes planes et annulaire respectivement. Les figures V-20 a et b montrent une meilleure corrélation entre  $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{co}$  et  $f_l / f'_{co}$  que dans la figure V-20 c. Cela veut dire que la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF ne dépend pas que de la pression de confinement mais aussi du type de PRF, ce qui n'est pas le cas de la résistance en compression du béton confiné par PRF qui elle a une dépendance très faible du type du PRF. La déformation axiale ultime du béton confiné par PRF de carbone peut être évaluée avec la formule suivante :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 15 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (49)$$

Alors que pour les tubes en PRF de verre remplis de béton elle devient :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 27 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,7} \quad (50)$$

### V – 6 – 3 – a) Croisement de la 2<sup>ème</sup> branche linéaire avec l'axe des contraintes

Pour caractériser la courbe bilinéaire  $\sigma$ - $\varepsilon$  du béton confiné par PRF, Samaan et al (1998) proposent le paramètre  $f_0$  (voir figure V-20) qui se trouve à l'intersection du prolongement de la 2<sup>ème</sup> branche avec l'axe des ordonnées (contraintes),  $f_0$  peut se calculer comme suit :

$$f_0 = 0,872 f'_{co} + 0,371 f_l + 6,258 \quad (\text{En MPa}) \quad (51)$$

Basés sur leur base expérimentale, Lam et Teng ont mesurés  $f_0$  à partir de 60 courbes  $\sigma$ - $\varepsilon$  du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> groupe et ont trouvés que dans la majorité des cas, le rapport entre  $f_0$  et  $f'_{co}$  se trouve entre 0,9 et 1,2 (figure V-21) avec une moyenne de 1,08 et un écart type de 0,11. Ils ont aussi remarqué que la dépendance  $f_0 / f'_{co}$  et  $f_l / f'_{co}$  est très faible.

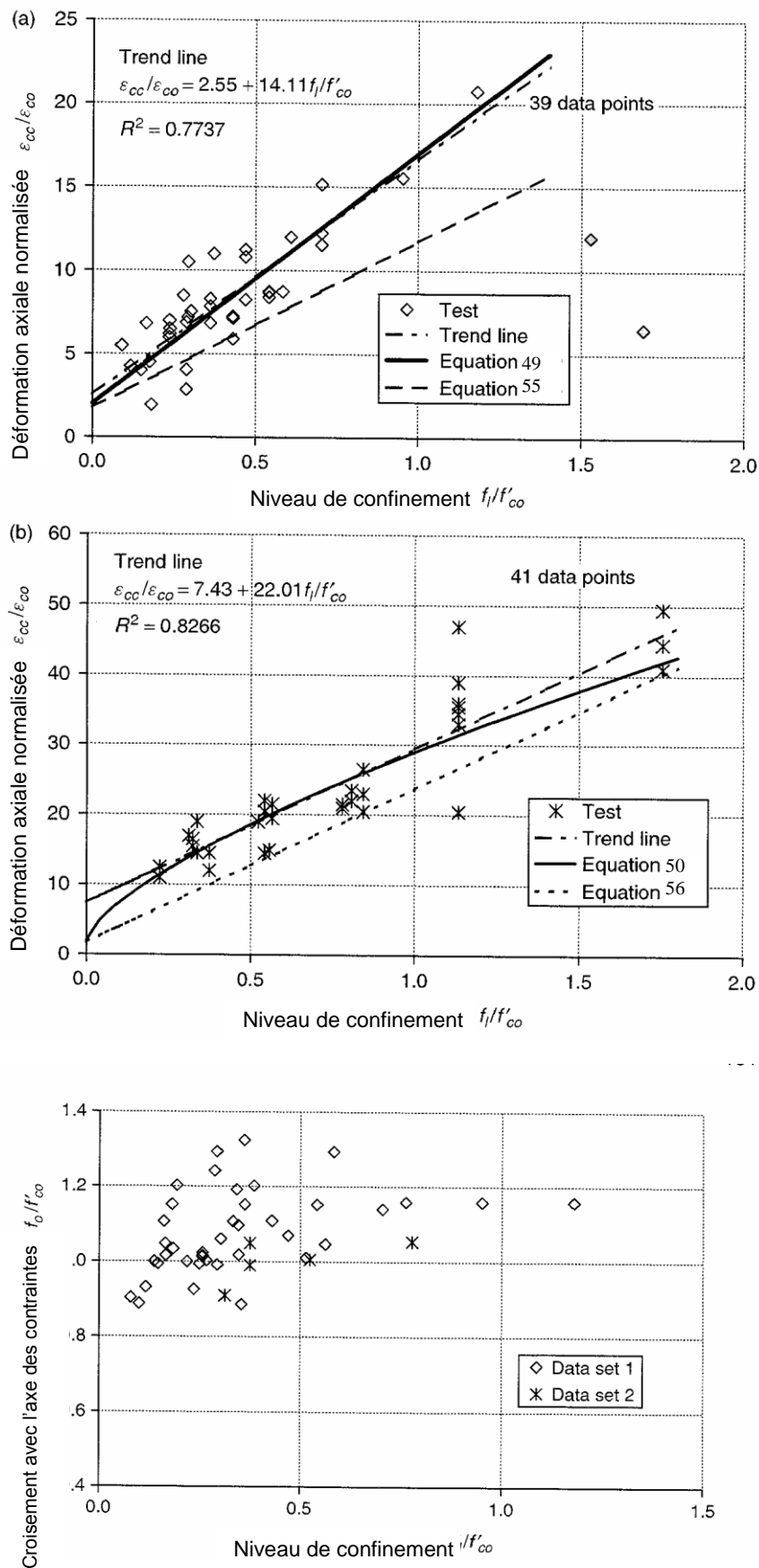


Figure V - 21 : Croisement de la 2<sup>ème</sup> branche avec l'axe des contraintes [Teng et al 2002].

### V – 6 – 3 – b) Rupture circonférentielle du PRF

Xiao et Wu, Shahawy et *al* ont trouvé que pour les éprouvettes cylindriques en béton confinées par PRF, l’allongement circonférentiel lors de la rupture du renfort en PRF n’atteint pas l’allongement à la rupture lors d’essais de traction sur éprouvettes planes, Shahawy et *al* proposent que la caractérisation des PRF doit se faire avec l’essai de traction par dilatation d’éprouvettes annulaires. Lam et Teng ont remarqué que le coefficient d’efficacité du confinement  $k_l$  est plus petit pour le béton confiné par stratifié de PRF que pour les tubes en PRF remplis de béton, cela revient au fait que la déformation ultime du PRF est plus petite pour les éprouvettes annulaires que pour les éprouvettes planes. Lam et Teng ont comparé la déformation circonférentielle ultime ( $\epsilon_{h,rupt}$ ) à la déformation ultime du PRF obtenue par traction d’éprouvettes planes ( $\epsilon_{prf,rupt}$ ) de 79 spécimens appartenant au 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> groupe (béton enveloppé par stratifié de PRF et tubes en PRF remplis de béton respectivement) et ont trouvé que le rapport  $\epsilon_{h,rupt} / \epsilon_{prf,rupt}$  variait entre 0,24 et 1,35 avec une moyenne de 0,79 et un écart type de 0,28. Pour les 44 spécimens du 1<sup>er</sup> groupe, ce rapport varie entre 0,24 et 0,90 avec une moyenne de 0,64 et un écart type de 0,20, alors que pour les 35 restant du 2<sup>ème</sup> groupe  $\epsilon_{h,rupt} / \epsilon_{prf,rupt}$  variait entre 0,61 et 1,35 avec une moyenne de 0,99 et un écart type de 0,23. Le niveau de confinement n’affecte pas ces résultats comme on le voit sur la figure V-21, ces statistiques renforcent la suggestion de Shahawy et *al*.

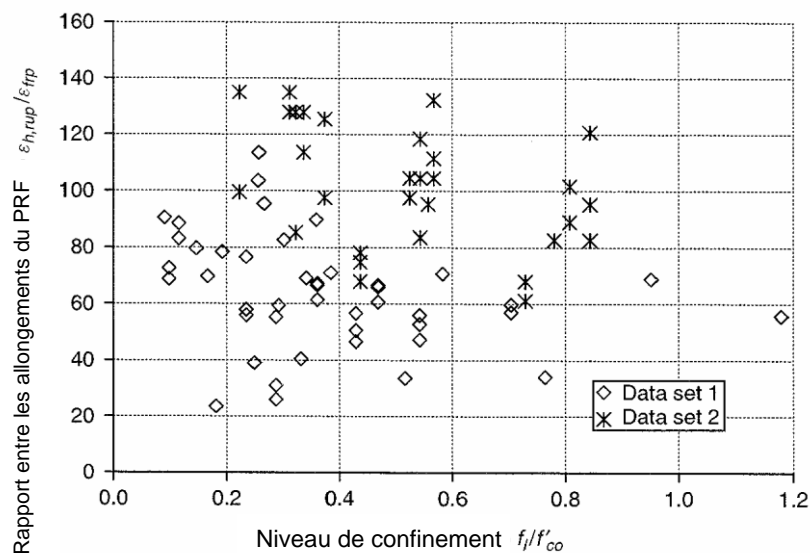


Figure V - 22 : Rapport des allongements circonférentiels du PRF en fonction du niveau de confinement [Teng et al 2002].

### V – 6 – 3 – c) Performances des modèles $\sigma$ - $\epsilon$ pour le béton confiné par PRF

- **Déformation axiale ultime** : Tous les modèles  $\sigma$ - $\epsilon$  du béton confiné par PRF donnent des prédictions de la déformation axiale ultime, le tableau V-5 montre les prédictions de quelques

modèles pour la même base expérimentale, il faut noter que  $E_c = 4730 \sqrt{f'_c}$  et  $\nu_c = 0,18$  pour les modèles dans lesquelles ces paramètres sont nécessaires. Dans le modèle de Xiao et Wu l'allongement circonférentiel ultime est pris égale à la moitié de celui obtenu par traction sur éprouvettes planes en PRF, le tableau V-5 a est réalisé à partir des résultats d'éprouvettes en béton confiné par stratifié de PRF de carbone alors que le tableau V-5 b lui est réalisé avec les résultats de tubes en PRF de verre E et S remplis de béton. On peut voir à travers le tableau V-5 que la majorité des modèles surestiment la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF de verre. Pour le béton confiné par PRF de carbone, le modèle de Fardis et Khalili donne les meilleurs résultats, alors que pour le béton confiné par PRF de verre, se sont les modèles de Saafi et al, Spoelstra et Monti qui donnent les meilleurs résultats. Le point commun entre ces deux modèles c'est qu'ils ne tiennent pas compte du type de PRF.

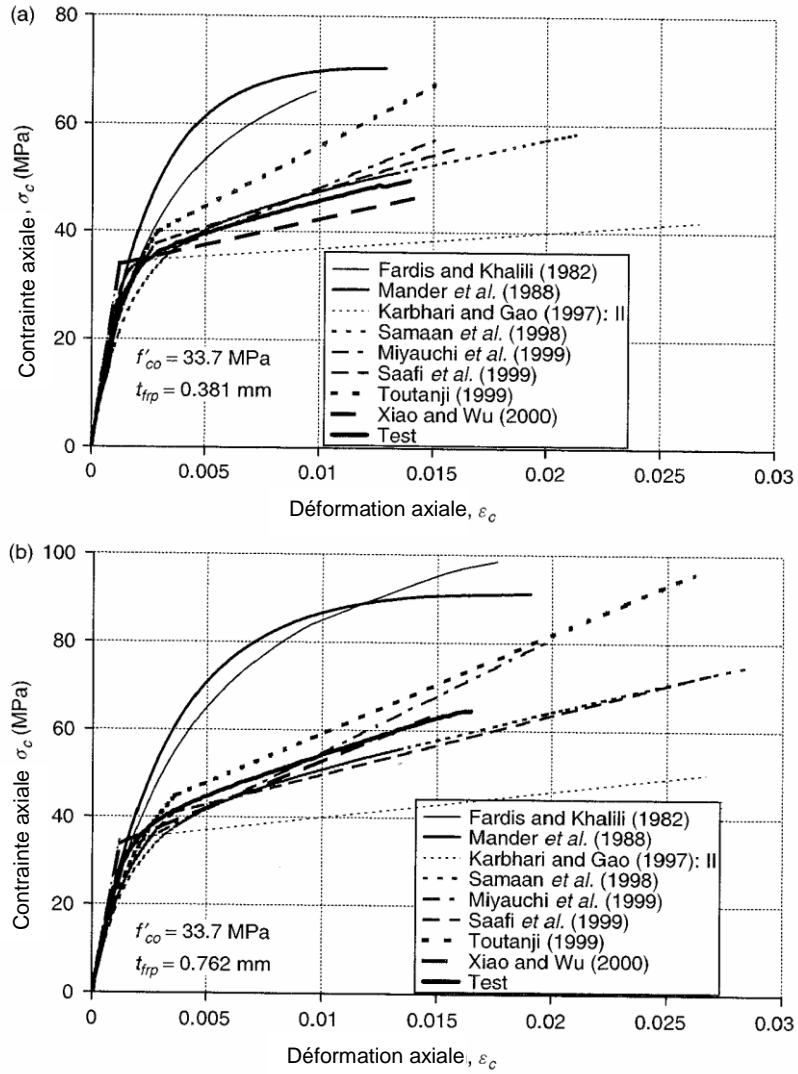
**Tableau V - 5 a : Eprouvettes en béton confiné par PRF de carbone**

Modèle	Rapport entre $\varepsilon_{cc}$ expérimentale et prédite par le modèle		
	Moyenne	Ecart type	Covariance (%)
Fardis et Khalili (1982)	1,03	0,33	32
Seible et al (1997)	0,82	0,31	38
Karbhari et Gao (1997) I	2,65	0,77	29
Karbhari et Gao (1997) II	0,70	0,37	53
Samaan et al (1998)	0,66	0,30	46
Miyauchi et al (1999)	0,92	0,24	26
Saafi et al (1999)	0,89	0,40	45
Spoelstra et Monti (1999)	0,77	0,26	33
Toutanji (1999)	1,32	0,51	39
Xiao et Wu (2000)	1,26	0,48	38

**Tableau V - 5 b : Tubes en PRF de verre remplis de béton**

Modèle	Rapport entre $\varepsilon_{cc}$ expérimentale et prédite par le modèle		
	Moyenne	Ecart type	Covariance (%)
Fardis et Khalili (1982)	2,31	0,64	28
Seible et al (1997)	1,52	0,42	28
Karbhari et Gao (1997) I	5,20	0,92	18
Karbhari et Gao (1997) II	1,40	0,36	26
Samaan et al (1998)	1,44	0,39	27
Miyauchi et al (1999)	1,93	0,37	19
Saafi et al (1999)	1,23	0,47	33
Spoelstra et Monti (1999)	1,28	0,30	24
Toutanji (1999)	1,90	0,65	34
Xiao et Wu (2000)	2,15	0,50	23

**Diagramme  $\sigma$ - $\varepsilon$  :** Lam et Teng ont comparé les modèles  $\sigma$ - $\varepsilon$  existant avec les courbes expérimentales de Xiao et Wu (2001), les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques  $152 \times 305$  mm confinées avec un à trois plis de PRF de carbone, la résistance en traction et le module du PRF de carbone sont  $1577$  MPa et  $105$  GPa respectivement, obtenus par traction d'éprouvettes planes, la résistance du béton variait entre  $33,7$  et  $55,2$  MPa. la comparaison des modèles  $\sigma$ - $\varepsilon$  et les courbes expérimentales sont illustrés dans la figure V-22, on remarque la différence entre tous ces modèles, pour ceux basés sur les modèles de confinement pour acier (Fardis et Khalili, Mander et al) on voit une surestimation importante en résistance. Il semble que le modèle de Xiao et Wu, Miyauchi et al et Saafi et al donnent des prédictions plus réalistes.



**Figure V - 23 :** Comparaison entre les prédictions des modèles  $\sigma$ - $\varepsilon$  et les résultats expérimentaux [Teng et al 2002].

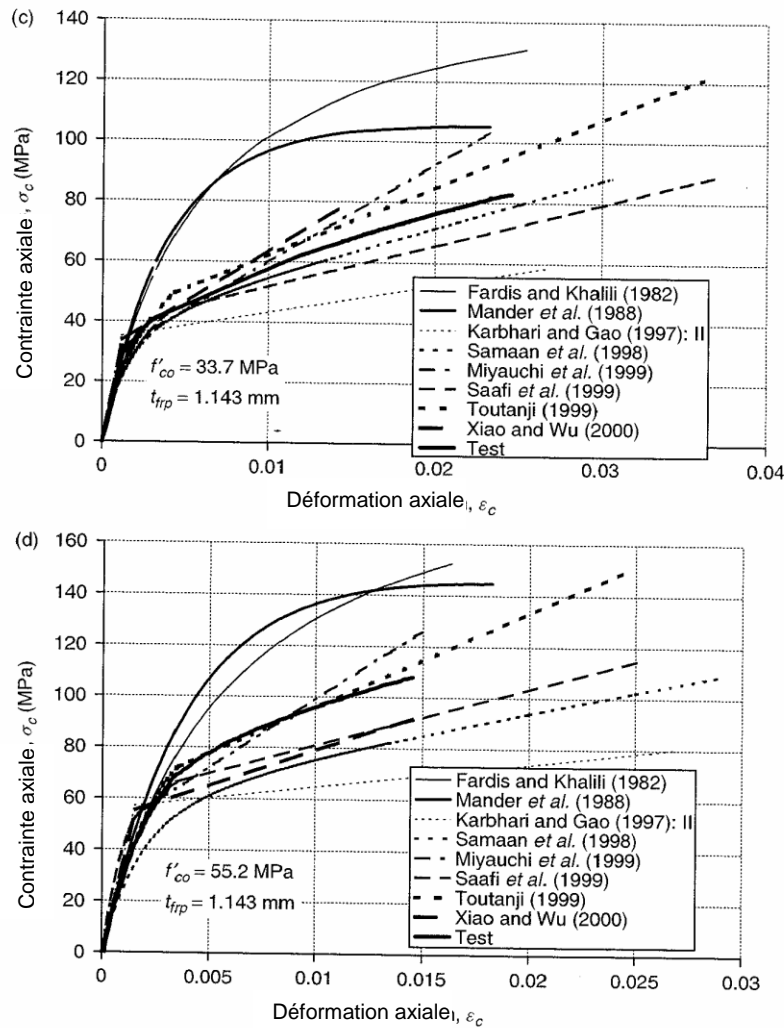


Figure V - 23 : Suite

### V – 6 – 3 – d) Modèle $\sigma$ - $\epsilon$ de Lam et Teng

Basé sur les modèles déjà existant et leur base expérimentale, Lam et Teng ont proposé un modèle  $\sigma$ - $\epsilon$  simple et qui donne de bons résultats, ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

1. la 1<sup>ère</sup> branche du diagramme  $\sigma$ - $\epsilon$  est parabolique.
2. la 2<sup>ème</sup> branche du diagramme  $\sigma$ - $\epsilon$  est linéaire.
3. la transition entre les deux branches se fait progressivement.
4. le prolongement de la 2<sup>ème</sup> branche linéaire croise l'axe des contraintes à la valeur de la résistance en compression du béton non confiné  $f'_{co}$ .
5. la 2<sup>ème</sup> branche se termine lorsque la résistance et la déformation ultimes sont atteintes simultanément.

A partir de ces hypothèses, Lam et Teng ont établi leur modèle  $\sigma$ - $\epsilon$  pour le béton confiné par PRF.

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}} \epsilon_c^2 \quad \text{Pour } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \quad (52 \text{ a})$$

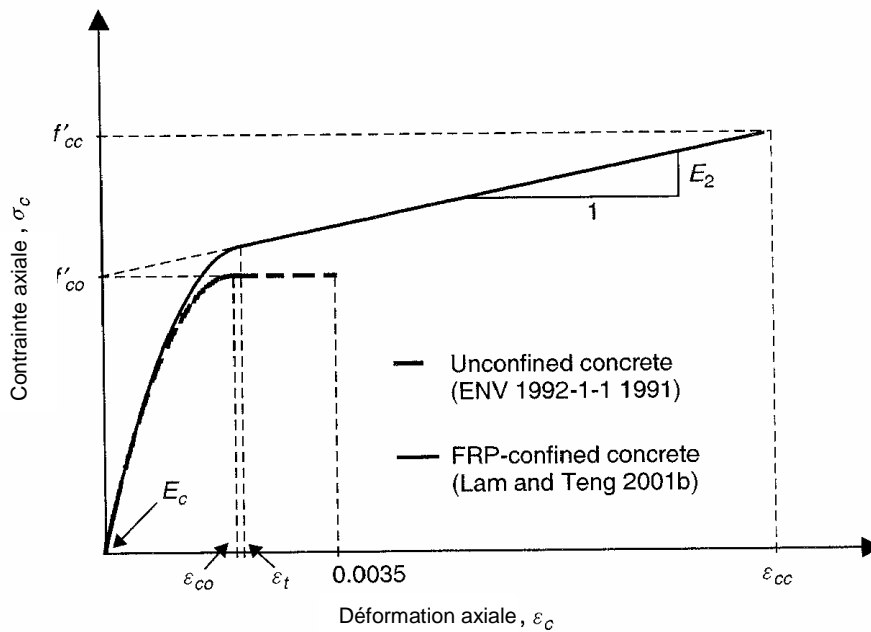
$$\text{Et } \sigma_c = f'_{co} + E_2 \epsilon_c \quad \text{pour } \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (52 \text{ b})$$

L'équation (52) donne une courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  bilinéaire ascendante (voir figure V-23) avec une 1<sup>ère</sup> branche parabolique et une 2<sup>ème</sup> linéaire, la transition entre ces deux branches est progressive au point  $\varepsilon_t$  tel que :

$$\varepsilon_t = \frac{2f'_{co}}{E_c - E_2} \quad (53)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cc}} \quad (54)$$

Pour déterminer  $E_2$ , la résistance et la déformation ultime en compression du béton confiné doivent être connues. En remplaçant la valeur de  $(f'_{cc} - f'_{co})$  à partir de l'équation (20) on trouve  $E_2 = \frac{2f_l}{\varepsilon_{cc}}$



**Figure V - 23 :** Modèle  $\sigma$ - $\varepsilon$  de Lam et Teng pour le béton confiné par PRF [Teng et al 2002].

Comme on l'a déjà vu, Lam et Teng ont proposé deux équations (49 et 50) pour calculer la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF de carbone et de verre respectivement, la comparaison de ces deux équations avec les résultats expérimentaux est dans le tableau V- 6. On voit que les résultats fournis sont très réalistes, cela est dû au fait que le modèle de Lam et Teng est le premier modèle  $\sigma$ - $\varepsilon$  pour le béton confiné par PRF qui prend en compte le type de fibres utilisées pour le confinement.

**Tableau V - 6 : Comparaison du modèle  $\sigma$ - $\varepsilon$  de Lam et Teng avec les résultats expérimentaux**

Equation	Données expérimentales		Rapport entre $\varepsilon_{cc}$ expérimental et prédit		
	Type de spécimens	Nombre de spécimens	Moyenne	Ecart type	Covariance (%)
49	Stratifié avec du PRFC	39	1,01	0,31	31
50	Tubes en PRFV	41	1,03	0,18	17

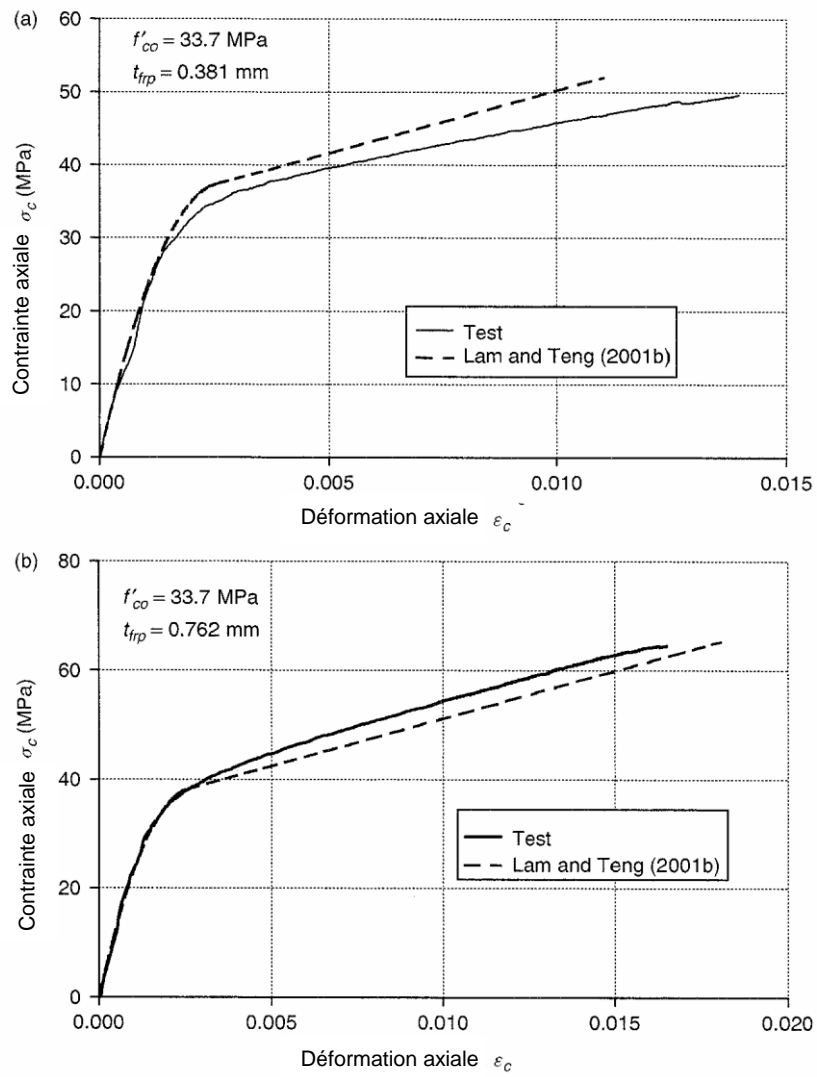
Dans la figure V- 25 sont représentées les prédictions du modèle  $\sigma$ - $\varepsilon$  de Lam et Teng et les résultats expérimentaux de Xiao et Wu, on voit que le modèle donne de bons résultats. Cependant pour le dimensionnement, en a vu que le modèle de résistance (équation 20) peut être directement utilisé, comme modèle  $\sigma$ - $\varepsilon$  Lam et Teng proposent :

*Pour le béton confiné par PRF de carbone*

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1,75 + 10 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (55)$$

*Pour les tubes en PRF de verre remplis de béton*

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1,75 + 22 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (56)$$



**Figure V - 24 :** Comparaison entre les prédictions du modèle  $\sigma$ - $\epsilon$  de Lam et Teng et les résultats expérimentaux [Teng et al 2002].

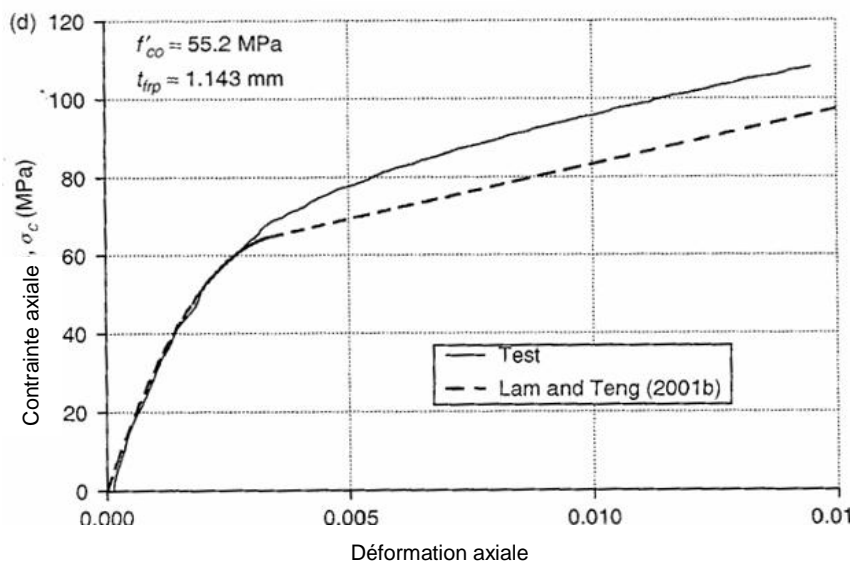
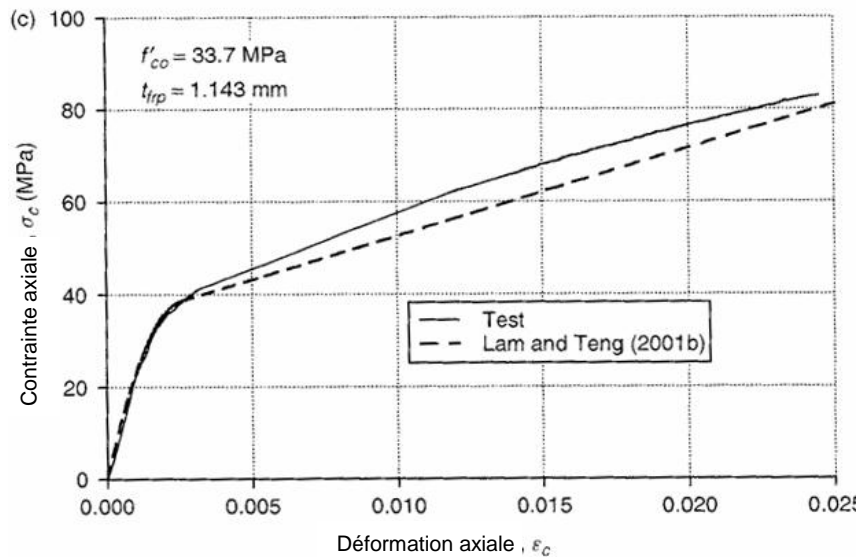


Figure V - 24 : Suite

## V – 7 . RESISTANCE EN COMPRESSION AXIALE DES POTEAUX DE SECTION RECTANGULAIRE CONFINES PAR PRF

### • Généralités

Dans ce qui a précédé on a traité les modèles prévisionnels pour trouver la résistance en compression et l'allure du diagramme contrainte-déformation du béton confiné par PRF. Ces modèles ont été établis (calés et validés) avec les résultats expérimentaux d'éprouvettes cylindrique en béton confiné par PRF et sont directement applicable pour les poteaux de section circulaire, cependant on ne peut pas en faire autant pour les poteaux de section rectangulaire. Comme on l'a vu précédemment le confinement dans les sections rectangulaires n'est pas uniforme [Teng et al 2002], [Campione et Miraglia 2003], [Harries et Kharel 2003], [Lin et Liao 2004], cela a pour conséquence de réduire l'efficacité du confinement il en résulte que la distribution des contraintes n'est plus uniforme dans la section du poteau. L'approche retenue pour les sections non circulaires en béton confiné est de trouver un modèle équivalent en terme de contraintes moyennes axiales. Ce genre de modèles est réalisé à partir des résultats d'éprouvettes de section rectangulaire ou carrée.

### V – 7 – 1 Modèles existant

#### V – 7 – 1 – a) Equations générales

Un poteau de section rectangulaire est illustré dans la figure V-25 où la largeur est notée «  $b$  » et supposée plus petite que la hauteur «  $h$  », le rapport géométrique  $h/b$  définit la section. Le rayon de l'arrondi de l'angle est noté «  $R_c$  » et comme ce dernier est limité par la présence des armatures longitudinales, il est généralement petit (inférieur à l'épaisseur de l'enrobage [JBDPA1999]). Les études faites sur le confinement des sections rectangulaires (Mander et al 1988, Cusson et paultre 1995) ont menés à des propositions simples à savoir que le béton à l'intérieur des quatre paraboles du 2<sup>ème</sup> degré comme illustré dans la figure V-25 est entièrement confiné alors que le confinement du béton restant est négligeable. Ces paraboles croisent les angles à 45°. Cette proposition a été appliquée pour le béton confiné par PRF par quelques chercheurs (Resterpol et De Vino 1996, Harries et al 1998, Challal et Shahawy 2000), de ce fait ils admettent que le confinement par PRF est moins efficace pour les sections rectangulaires que pour les sections circulaires dans lesquelles tout le béton est confiné au même niveau. Basé sur la section totale, une pression effective de confinement  $f'_l$  peut être définie en utilisant un coefficient de forme  $k_s$  qui est fonction de la géométrie de la section.

$$f'_l = k_s \times f_l \quad (57)$$

Où  $f_l$  est la pression latérale de confinement fournie par une enveloppe en PRF de la même épaisseur pour un poteau équivalent de section circulaire de diamètre «  $D$  », on obtient donc :

$$f_l = \frac{2f_{prf} \times t_{prf}}{D} \quad (58)$$

Afin de déterminer la pression effective de confinement en utilisant ces deux équations, le coefficient de forme et le diamètre équivalent doivent être définis. Une fois ces deux paramètres connus, la résistance du béton confiné par PRF peut être calculée avec un modèle de résistance pour les sections circulaires confiné par PRF en remplaçant la pression de confinement par la pression effective de confinement comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 k_s \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (59)$$

Où  $k_1$  est le coefficient d'efficacité du confinement et pris égale à 2 comme on l'a vu auparavant dans le modèle de résistance de Lam et Teng.

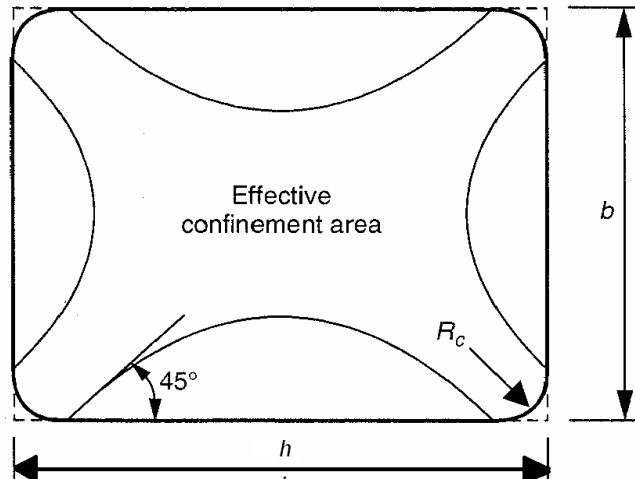


Figure V - 25 : Section effective du béton confiné

### V – 7 – 1 – b) Coefficient de forme

La proposition illustrée dans la figure V- 25 qui a été établie à l'origine pour le béton confiné par acier a été aussi utilisée pour trouver les coefficients de forme pour les poteaux en béton pour les sections rectangulaires avec des angles arrondis confinés par PRF. Le coefficient de forme est défini comme étant le rapport de la section effectivement confinée «  $A_e$  » sur la section totale du béton qui est entourée par le PRF «  $A_c$  » comme suit :

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[ (b - 2R_c)^2 + (h - 2R_c)^2 \right] / (3A_g - \rho_{sc})}{1 - \rho_{sc}} \quad (60)$$

Où  $A_g$  est la section brute du béton et  $\rho_{sc}$  est le pourcentage d'armatures longitudinales.

L'équation (60) est appelée modèle de la section effectivement confinée (pour le coefficient de forme), dans cette équation on déduit le double de la section des armatures en dehors des paraboles. La section brute du béton peut être calculée comme suit :

$$A_g = bh - (4 - \pi)R_c^2 \quad (61)$$

Par ailleurs Mirmiran et al (1998) ont proposé un coefficient de confinement modifié «  $m$  » pour les poteaux de section rectangulaire pour remplacer le rapport ( $f_l / f'_{co}$ ) utilisé dans les sections circulaires, le coefficient de confinement modifié est égale à :

$$m = \left( \frac{2R_c}{h} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (62)$$

Où  $f_l$  est la pression latérale de confinement d'un poteau de section circulaire équivalent. Mirmiran et al (1998) ont montré que pour des valeurs de «  $m$  » inférieures à 15%, le confinement était insuffisant, et l'augmentation de la résistance en compression était négligeable. Ils ont suggéré l'utilisation du modèle de Samaan et al (1998) pour des valeurs de  $m > 15\%$ , et proposent un coefficient de forme comme suit :

$$k_s = \frac{2R_c}{h} \quad (63)$$

Cette équation est appelée modèle de rayon de courbure (pour le coefficient de forme)

### ***V – 7 – 1 – c) Diamètre du poteau circulaire équivalent***

Dans les études de Resterpol et De Vino 1996, Harries et al 1998, Challal et Shahawy 2000, le diamètre du poteau circulaire équivalent pour trouver la pression de confinement nominale  $f_l$  des poteaux rectangulaires confinés par PRF n'est pas défini malgré que dans les études de Cusson et Paultre (1995) pour les poteaux en béton confinés par acier,  $D$  est la moyenne de la longueur des côtés  $(b+h)/2$ , cette expression a été utilisée par Lam et Teng avec le modèle de la section effectivement confinée (pour le coefficient de forme).

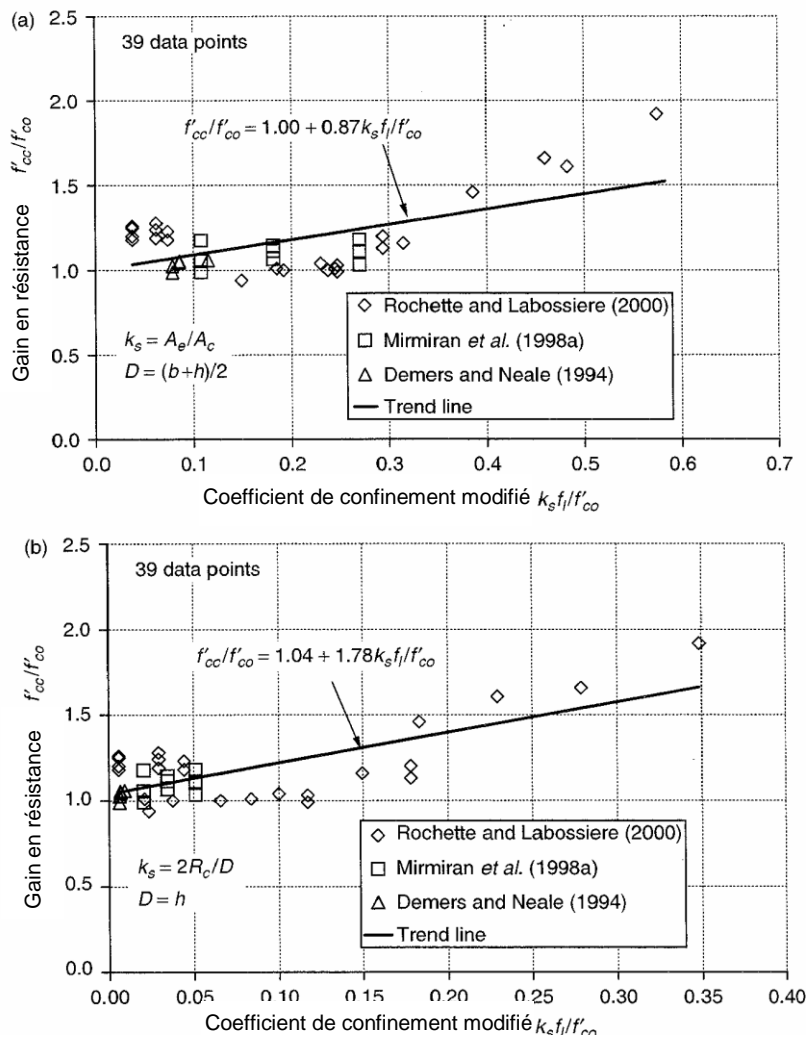
Mirmiran et al (1998) ont testé des poteaux de section carrée et ont défini  $D$  comme la longueur du côté de la section mais il a été confirmé que  $D$  doit être la plus grande dimension dans le cas des sections rectangulaires.

### ***V – 7 – 2 Travaux de Lam et Teng***

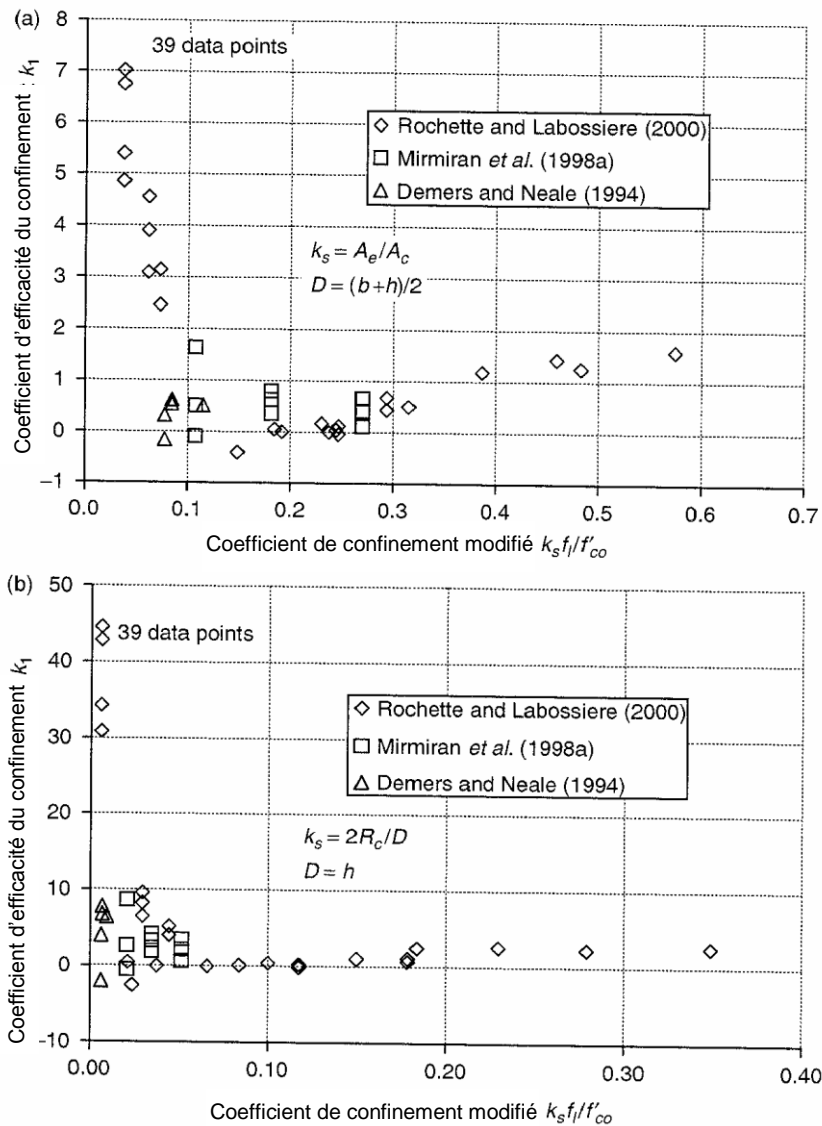
Les travaux sur le confinement par PRF des poteaux en béton de section rectangulaire sont peu nombreux, les 39 spécimens utilisés par Lam et Teng pour la validation du modèle de la section effectivement confinée (pour le coefficient de forme) et celui du rayon de courbure (pour le coefficient de forme) sont de section carrée ou rectangulaires avec une hauteur de section variant entre 152 et 203 mm et des angles arrondis entre 5 et 38 mm.

La résistance du béton variait entre 32,5 et 43,7 MPa, le confinement été réalisé par enroulement (stratification) des tissus de PRF ou par des tubes en PRF remplis de béton. Les résultats des 39

éprouvettes sont représentés dans la figure V-26 avec le coefficient de confinement modifié (coefficient de forme  $\times$  coefficient de confinement du poteau circulaire équivalent) pour les deux coefficients de forme (équation 60 et 63). Dans les deux cas, la relation est quasi linéaire avec une faible corrélation, néanmoins pour les petites valeurs de  $f'_l$  et avec  $k_l$  déduit avec l'équation (59), le modèle de la section effectivement confinée présente moins de dispersion que celui du rayon de courbure ce qui est illustré dans la figure V-27 où  $k_l$  varie entre -0,4 et 7,0 pour le premier modèle et entre -2,6 et 45 pour le 2<sup>ème</sup> modèle. Comme la majorité des essais a été faite avec une faible quantité de PRF et une faible augmentation des résistances, ces comparaisons ne sont pas concluantes.



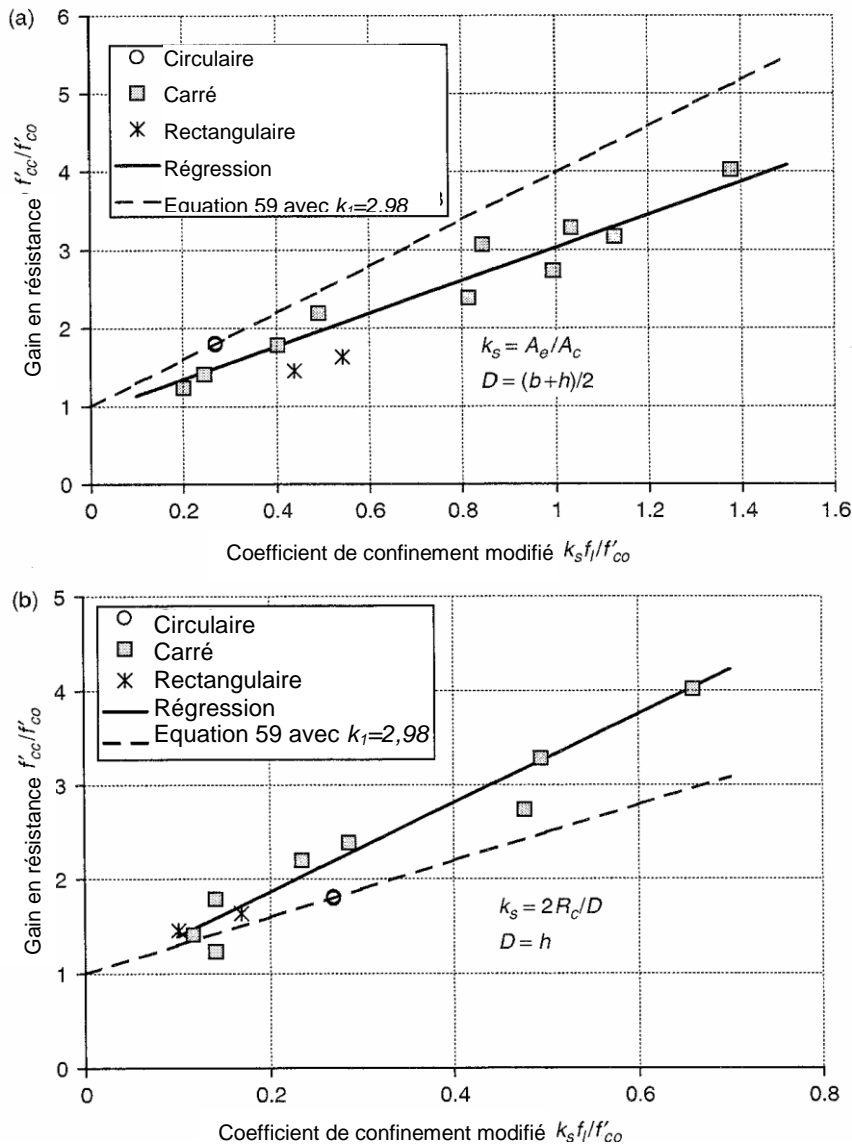
**Figure V - 26 :** Comparaison entre la relation gain de résistance-coefficient de confinement modifié pour les deux coefficient de forme ;a) modèle de la section effectivement confinée ;b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]



**Figure V - 27 :** Comparaison entre la relation coefficient d'efficacité du confinement--coefficient de confinement modifié pour les deux coefficient de forme ;a) modèle de la section effectivement confinée ;b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]

### V – 7 – 2 – a) Modèle de Lam et Tang

Lam et Teng ont testé 10 éprouvettes de section carrée et deux de section rectangulaire, plusieurs épaisseurs du renfort et valeurs du rayon de l'arrondi ont été prises pour avoir différents niveaux de confinement, deux éprouvettes circulaires ont aussi été testées et qui ont un coefficient d'efficacité de confinement  $k_l = 2,98$  (à utiliser dans l'équation 59). La figure V-28 compare les résultats expérimentaux avec les prédictions des deux modèles de coefficient de forme. Le modèle de la section effectivement confinée n'est pas conservatif (surestime les résultats) alors que celui du rayon de courbure est conservatif mais plus dispersé.



**Figure V - 28 :** Comparaison entre les deux coefficients de forme et les résultats expérimentaux de Lam et Teng ; a) modèle de la section effectivement confinée ; b) modèle du rayon de courbure [Teng et al 2002]

Pour améliorer les prédictions de résistance, en compression du béton confiné par PRF, Lam et Teng proposent un modèle amélioré de la section effectivement confinée, dans ce modèle la section effectivement confinée est comprise entre quatre paraboles illustrées dans la figure V-29 avec une pente initiale égale à celle des diagonales adjacentes, donc elle est égale à un pour les sections carrées. Le rapport de la section effectivement confinée à la section totale ( $A_e / A_c$ ) devient :

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[ (b/h)(h - 2R_c)^2 + (b/h)(b - 2R_c)^2 \right] / (3A_g - \rho_{sc})}{1 - \rho_{sc}} \quad (64)$$

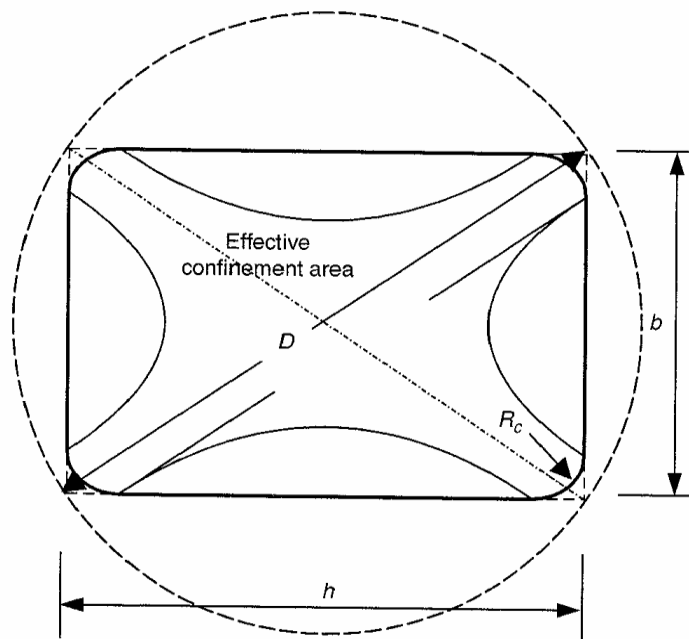
Le coefficient de forme  $k_s$  est donné par le rapport de la section effectivement confinée à la section totale divisé par le rapport géométrique de la section ce qui donne :

$$k_s = \frac{b A_e}{h A_c} \quad (65)$$

Le diamètre  $D$  du poteau circulaire équivalent est défini par la diagonale de la section (voir la figure V-29), la pression de confinement équivalente  $f_l$  est égale à :

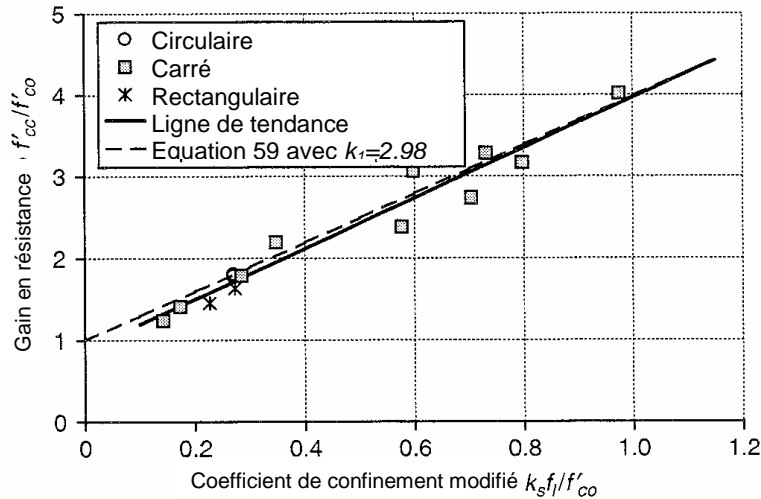
$$f_l = \frac{2t_{prf} \times f_{prf}}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (66)$$

Où  $\sqrt{h^2 + b^2}$  est la longueur de la diagonale de la section rectangulaire.

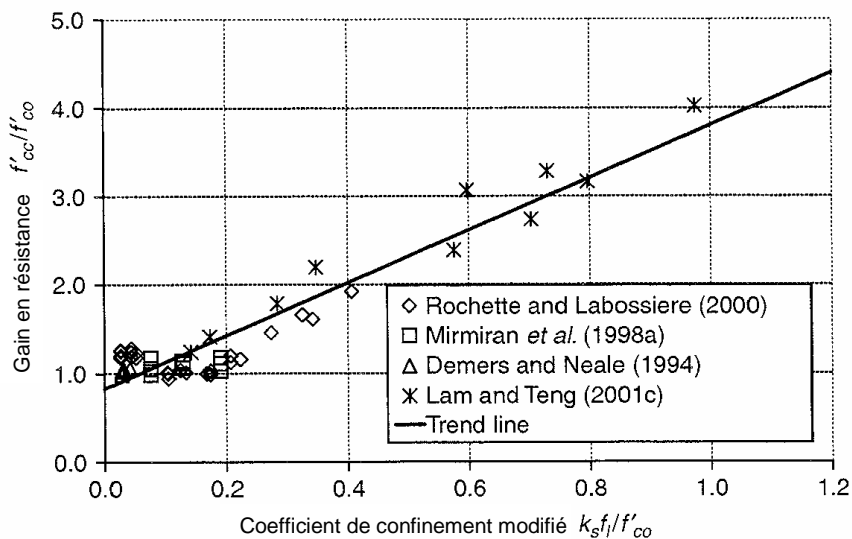


**Figure V - 29 :** Modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire [Teng et al 2002]

La figure V-30 compare les prédictions du modèle de Lam et Teng avec les résultats expérimentaux, le modèle donne de très bons résultats quasiment confondus avec la régression. La figure V-31 compare ce modèle avec les résultats expérimentaux d'autres chercheurs, les prédictions sont très bonnes malgré la dispersion des résultats expérimentaux à des faibles niveaux de confinement.



**Figure V - 30 :** Performance du modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire avec leurs résultats expérimentaux [Teng et al 2002]



**Figure V - 31 :** Performance du modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les poteaux de section rectangulaire avec tous les résultats expérimentaux [Teng et al 2002]

### V – 8. COMPARAISON DE QUELQUES MODELES

La figure V - 32 suivante établie en termes de prédiction  $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$  de quelques modèles précités :

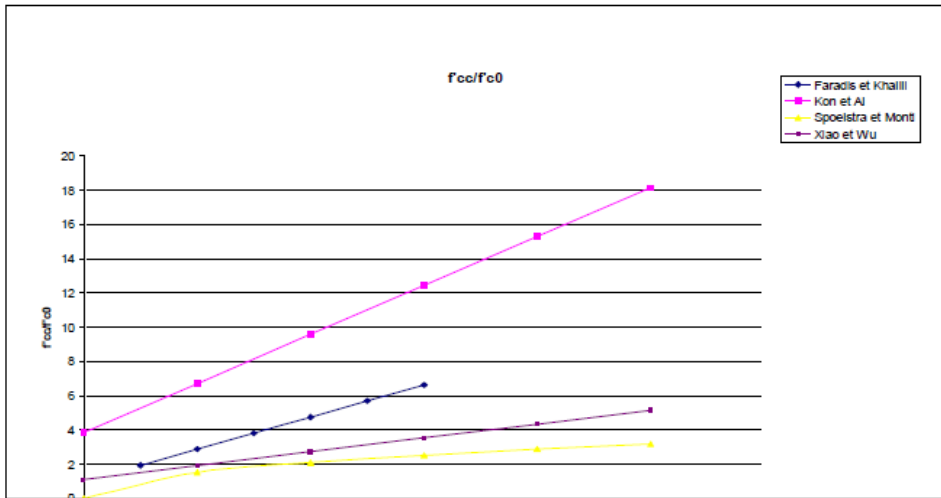


Figure V - 32 : Comparaison des différents modèles pour la prédiction de  $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$

La diversité des paramètres utilisés entre les différents modèles ne permet pas de bien estimer la différence entre ses modèles. Les différents modèles disponibles sont résumés dans ce tableau :

Tableau V- 7 : Expressions de contrainte et de la déformation axiale maximum pour le béton

Auteur	Type de confinement	Contrainte	Déformation axiale ultime $\epsilon_{co}$
Fardis & Khalili (1981)	GFRP-encased concrete	$f_{co} \left[ 1 + 2.05 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{E_f t_f}{D \cdot f_{co}} \right) \right]$
Karbahari & Eckel (1993)	FRP-encased concrete	$f_{co} \left[ 1 + 2.1 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.87} \right]$	$0.002 \left[ 1 + 5 \left( \frac{2 \cdot t_f \cdot f_f}{D \cdot f_{co}} \right) \right]$
Mirmiran & Shahawy (1997)*	GFRP-encased concrete	$f_{co} + 4.269 f_l^{0.587}$	
Miyauchi et al. (1997)**	CFRP-wrapped concrete	$f_{co} \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[ 1 + 10.6 \left( \frac{2 \cdot t_f \cdot f_f}{D \cdot f_{co}} \right)^{0.373} \right]$
Samaan et al. (1998)*	GFRP-encased concrete	$f_{co} + 6.0 f_l^{0.7}$	$\frac{f_{cc} - 0.872 f_{co} - 0.371 f_f - 6.258}{245.61 f_{co}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f t_f}{D}}$
Saafi et al. (1999)	CFRP and CFRP encased concrete	$f_{co} \left[ 1 + 2.2 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.84} \right]$	$\epsilon_{co} \left[ 1 + (537 \epsilon_f + 2.6) \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Toutanji (1999)	CFRP and GFRP wrapped concrete	$f_{co} \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.85} \right]$	$\epsilon_{co} \left[ 1 + (310.57 \epsilon_f + 1.9) \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Spoelstra & Monti (1999)	CFRP and GFRP wrapped and encased concrete	$f_{co} \left[ 0.2 + 3 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.5} \right]$	$\epsilon_{co} \left[ 2 + 1.25 \frac{E_c}{f_{co}} \epsilon_f \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \right]$

## V – 9. RESISTANCE EN COMPRESSION AXIALE DES POTEAUX DE SECTION ELLIPTIQUE CONFINES PAR PRF

Dans la pratique, à fin d'optimiser le renforcement des poteaux de section rectangulaire, ces derniers peuvent être transformés en poteaux de section elliptique.

A fin d'établir un modèle de résistance, des essais ont été faits sur éprouvettes elliptiques avec un rapport géométrique  $a/b$  (voir figure V-9) entre 1 et 2,5 sans et avec confinement par PRF de carbone. Les résultats des essais ont montré que l'efficacité du confinement chute avec l'augmentation de rapport géométrique. Basé sur ces résultats et avec l'équation (59) un modèle de résistance pour poteaux de section elliptique confinés par PRF a été proposé [Teng et Lam 2002] comme suit :

$$\rho_{prf} = \frac{t_{prf} [1,5(a+b) - \sqrt{ab}]}{ab} \quad (67)$$

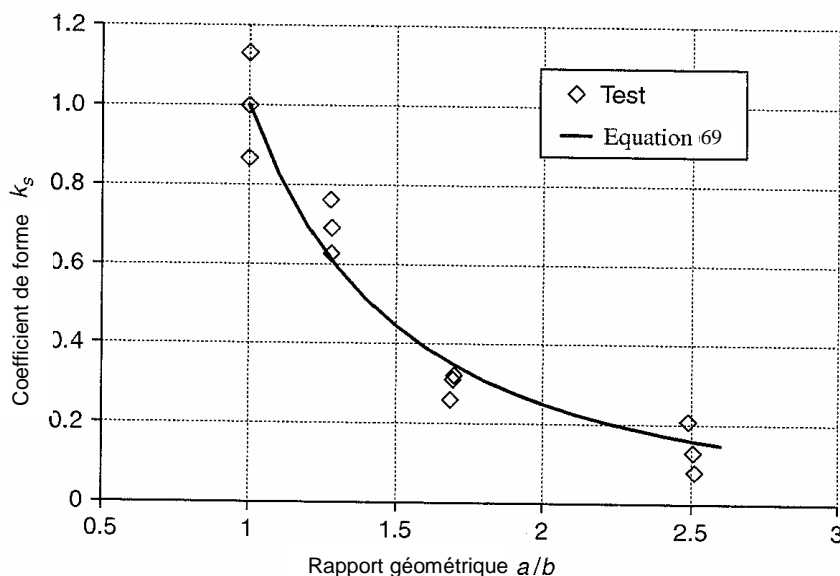
La pression de confinement est donnée par :

$$f_l = \frac{\rho_{prf} \times t_{prf}}{2} = \frac{t_{prf} [1,5(a+b) - \sqrt{ab}] \times f_{prf}}{2ab} \quad (68)$$

Le coefficient de forme est égale à :

$$k_s = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (69)$$

Ce modèle donne de bons résultats (voir figure V-33)



**Figure V - 33 :** Performance du modèle de coefficient de forme de Teng et Lam pour les poteaux de section elliptique avec les résultats expérimentaux [Teng et Lam 2002]

## V – 10. RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES POTEAUX CONIFES PAR PRF

### V – 10 – 1. Expression générale de la résistance en compression du béton confiné par PRF

Basé sur ce qui a été vu précédemment, la résistance en compression du béton confiné par PRF peut être reliée à celle du béton non confiné comme suit :

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 k_g k_s f_l \quad (70)$$

Où les valeurs de  $k_l$ ,  $k_g$  et  $k_s$  recommandés pour le dimensionnement sont dans le tableau V-7, le coefficient de d'espacement  $k_g$  introduit pour tenir compte du confinement discontinu par bandes (équation 9) est utilisable uniquement pour les sections circulaires confinées par PRF malgré qu'il soit applicable pour les sections rectangulaires confinées par acier. Pour les sections circulaires confinées par PRF, l'équation (9) montre que si la distance entre les bandes est inférieure à 5% du diamètre du poteau, l'effet sur la pression de confinement est inférieur à 5% et peut être négligé.

**Tableau V- 8** :  $k_l$ ,  $k_g$ ,  $k_s$  et  $f_l$  recommandés pour le dimensionnement

Forme de la section du poteau	Coefficient d'efficacité du confinement $k_l$	coefficient de d'espacement $k_g$	coefficient de forme $k_s$	Pression latérale de confinement $f_l$
Circulaire	2	$\frac{(1 - S_{prf} / 2d)^2}{1 - \rho_{sc}}$	1	$\frac{2t_{prf} \times f_{prf}}{d}$
Rectangulaire	2	-	$\frac{b A_e}{h A_c}$	$\frac{2t_{prf} \times f_{prf}}{\sqrt{h^2 + b^2}}$
Elliptique	2	-	$\left(\frac{b}{a}\right)^2$	$\frac{t_{prf} [1,5(a+b) - \sqrt{ab}] \times f_{prf}}{2ab}$

## V – 11. PROPOSITION D'UN MODELE SIMPLIFIE DE CALCUL

### • Introduction

Depuis les dernières années du développement de la technologie du confinement par matériaux composites, Mirmiran et al ont distinguées trois techniques proposées :

- a) Utilisation des modèles avancé pour le confinement par matériaux composites basé sur les model du confinement par armatures en acier
- b) Le développement de nouveaux modèles empiriques pour le confinement par matériaux composites.
- c) L'utilisation des éléments finis avec l'approche de plasticité

Cette démarche est appeler à aboutir les résultats les plus approximatifs, après une validation par une série d'expérience tout en prenant en compte des paramètres clé dans la formulation du model de calcul décrivant le comportement du béton confiné de PRF.

Selon (Miriman 1997a), les recommandations fondamentales pour un model utilisable sont :

- ✓ les bases rationnelles dans le comportement physique,
- ✓ la précision, et
- ✓ la simplicité.

La plupart des modèles proposés ont tendance d'être encombrées et compliqué dans leurs applications, ce qui conduit à un processus d'itération incrémentale

Dans notre proposition, on s'intéresse à élaborer un modèle simple basé sur la compréhension de model choisi de la littérature et jugé parmi les modèles les plus pertinent

### V – 11 -2. PRINCIP DE CALCUL DES POTEAUX EN BETON CONFINE PAR LES « PRF »

La capacité de charge de colonnes peut être augmentée si on confine la colonne avec des matériaux FRP. Le confinement empêche la déformation transversale de la colonne, ce qui génère une contrainte tri-axiale dans le béton. La résistance à la compression du béton est ainsi augmentée.

Les calculs sont toujours basés sur les hypothèses suivantes :

- Les poteaux ne sont pas exposés au flambage.
- Les poteaux ont une moindre excentricité de la charge ( $e/h < 0,10$ ).
- Les poteaux sont enveloppés complètement en FRP sur toute la hauteur.
- Il n'y a pas de glissement entre les renforts et le béton.
- adhérence parfaite entre le "Polymère Renforcé en Fibre " et le support béton (loi de compatibilité).
- Toutes les fibres du poteau comprimé subissent la même déformation longitudinale.

### V – 11 -3. FORMULATION DU MODEL

Dans cette proposition, tout en basant sur l'équation (70), on a choisi le model de Lam et Teng ([Lam et Teng, 2003]), ces derniers ont présenté un modèle voulu plus complet que les précédents et ne se basant plus sur une courbe bilinéaire pour rendre compte du comportement du béton confiné par PRF. Ce modèle est fondé sur les hypothèses suivantes :

- la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$  est constituée d'une première partie parabolique et une deuxième partie linéaire (deuxième partie similaire à celle décrite dans [Saaman et al., 1998]) (Figure 1 -30),
- la pente initiale de la parabole (première partie) est la même que celle du béton non confiné ( $E_c$ ),
- la portion parabolique (fin de première partie) rejoint la portion linéaire (deuxième partie) sans changement de pente abrupt,
- la partie linéaire (deuxième partie) se termine lorsque la contrainte ultime et la déformation axiale ultime sont atteintes.

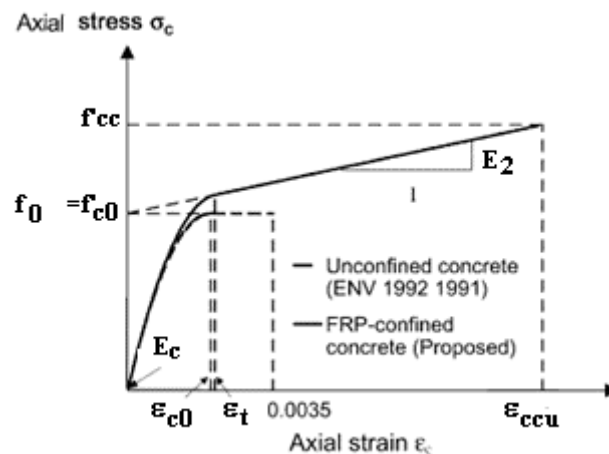


Figure V - 33 : Modèle proposé par Lam et Teng ([Lam et Teng, 2003]) pour le confinement du béton par PRF.

$$\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 \cdot f_0} \epsilon_c^2 \quad \text{pour } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \quad (71)$$

$$\sigma_c = f_0 + E_2 \cdot \epsilon_c \quad \text{pour } \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{ccu} \quad (72)$$

ou

$$\epsilon_t = \frac{2 \cdot f_0}{(E_c - E_2)} \quad (73)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f_0}{\epsilon_{cu}} \quad (74)$$

Et  $f_0$  peut être prise égale à la résistance de compression du béton non confiné  $f_c$

D'où la résistance en compression du béton confiné est comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f_c} = 1 + 1.33 \frac{f_{l,a}}{f_c} \quad (75)$$

$f_{l,a}$  représente la pression maximale de confinement

$$f_{l,a} = \frac{2 \cdot E_{u,f} \cdot t_f \cdot \varepsilon_{u,f}}{d} \quad (76)$$

Avec  $d$  : représentant le diamètre du cœur du béton confiné.

Tenant en compte que le modèle de ([Lam et Teng, 2003]), est calibrés sur le comportement des poteaux cylindrique, d'où le facteur de la forme ne satisfait pas totalement les autres forme géométrique ( carré, rectangle,.....), et en incorporant l'équation (70) , on peut tirer ce qui suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f_c} = 1 + 1.33(k_g k'_s) \frac{f_{l,a}}{f_c} \quad (77)$$

Ou

$$k'_s = \alpha k_s = \alpha \left( \frac{b}{a} \right)^2 \quad (78)$$

$\alpha$  est un coefficient rectifiant le  $k_s$ , sachant que, si  $d$  est la longueur de la diagonale de la section rectangulaire (diamètre fictive) **Figure V - 29**, la correction du paramètre  $k_s$  devient nécessaire pour éviter le double emploi du diamètre  $d$ .

Admettant que la valeur de  $\alpha$  peu varié de 0 à 1, et que la section du rectangle occupe un pourcentage de 70% de la forme circulaire fictive ; on peut déduire :

$$\alpha = 0.34$$

D'où l'équation (75) devient :

$$\frac{f'_{cc}}{f_c} = 1 + 0.45 k_g \frac{f_{l,a}}{f_c} \quad (79)$$

## V – 11. CONCLUSION

Les bilans des différents modèles de calcul des poteaux confinés par le PRF, s'inscrivent dans une démarche mondiale entraînée par une prise de conscience quant à la nécessité de mieux comprendre le comportement des poteaux en béton renforcé par des matériaux composites. Il est à noter par ailleurs que la complexité évoquée par la multitude de paramètres à prendre en compte dans l'expérimentation notamment, les paramètres de forme, d'élanement, des caractéristiques du béton, ainsi que son état (endommagé ou non), aussi bien que l'élaboration des modèles de calcul et leur validation ; les acteurs de la recherche, restent toujours loin à unifier des procédures de calcul afin de remplir la bonne connaissance du système de renforcement par les matériaux composites. Il est donc nécessaire de disposer d'outils de dimensionnement des PRF permettant de justifier et d'optimiser les opérations de renforcement des structures, et notamment des poteaux soumis à des efforts plus complexes tels que la flexion ou flexion composée.

Actuellement il existe différents codes de calculs, principalement édités par des pays régulièrement touchés par les séismes comme le Japon et les États-Unis. L'Eurocode 8 ([EN 1998]) est récemment entré en vigueur en Europe ; il succède aux règles PS92 ([Règles PS 92]) en France. Ces codes proposent des méthodes de dimensionnement des PRF dans le domaine de la construction parasismique et de la réhabilitation ; néanmoins, ils ne permettent pas encore de traiter de manière complète le renforcement par PRF vis-à-vis d'une sollicitation sismique.

Par ailleurs, l'utilisation des PRF dans le confinement des poteaux est largement justifiée par les chercheurs et permet ainsi :

- Les PRF donnent une résistance aux déformations dues aux charges axiales, qui résulte d'un confinement des contraintes développées dans le béton, ce qui améliore à la fois la contrainte de compression ultime et la ductilité du béton.
- L'augmentation du niveau de confinement a peu d'effet sur la pente de la portion initiale (zone élastique) de la relation contrainte-déformation, mais a un effet significatif sur la pente de la seconde portion (zone plastique).
- Plus la résistance initiale du béton ( $f'_{co}$ ) est élevée, moins le gain procuré par le confinement est important.
- Pour un béton de haute résistance confiné par PRFC, une amélioration significative de résistance et de ductilité ne peut être observée que si le rapport de confinement ( $f_l / f'_{co}$ ) est supérieur à 0,10.
- Le modèle de type résistance offre des prédictions satisfaisantes en ce qui concerne la contrainte et la déformation du béton confiné avec des composites PRF.

# Conclusion Générale et Perspectives

## ❖ CONCLUSION

La réduction de la vulnérabilité des ouvrages et construction neuf ou existant est un enjeu majeur, de mieux en mieux appréhendé, qui a notamment conduit à de nombreuses évolutions et modifications de la réglementation des réhabilitations ou renforcement. Le renforcement d'un ouvrage entraîne de coûteux travaux qui peuvent être envisagés dans une démarche volontaire.

Parmi les diverses méthodes de renforcement, l'utilisation des PRF s'est progressivement imposée comme une technique de référence, notamment du fait des nombreuses qualités mécaniques de ces matériaux. De plus l'emploi des PRF en renfort externe nécessite des moyens d'installation généralement plus simples, plus légers et moins coûteux que ceux déployés dans les techniques traditionnelles. L'emploi des PRF de renforcement est ainsi en pleine expansion depuis plusieurs années,

Il faut garder à l'esprit que la réponse d'une structure est un phénomène complexe qui résulte de la réponse mécanique des différents sous-éléments de la structure ainsi que de la réponse des jonctions entre ces éléments.

Les éléments porteurs des constructions sont toujours les premiers à recevoir des opérations de confortement, notamment, le confinement des colonnes en béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces enveloppes appliquées aux colonnes par diverse procédures, améliorent le confinement du béton, ainsi que sa ductilité et sa résistance en compression. Les différents composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné.

Les comportements mécaniques et physiques des poteaux peuvent être modulés en modifiant les éléments suivants : la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres. Mais il faut marquer l'existence d'insuffisances en termes de dispositions constructives et de dimensionnement vis-à-vis des poteaux existants. Il importe de savoir comment les réparer et les rendre conformes aux réglementations

Toutefois, la connaissance spécifique du comportement des poteaux renforcés vis-à-vis de sollicitations extrêmes (chocs, explosions ou séismes) reste encore à établir. Elle est nécessaire, voire indispensable, pour formuler et calibrer les méthodes de calculs permettant de dimensionner au mieux les renforts à mettre en œuvre. Cette connaissance doit se fonder sur des jeux de données expérimentales aussi complets que possible afin de rester pertinente pour une large gamme de composites, de techniques de mise en œuvre, de configurations de renforcement, et vis-à-vis des différentes sollicitations envisagées sur les poteaux à renforcer.

A partir de ce constat, une vaste action de recherche a été réalisée depuis plus de 30ans pour contribuer à l'étude du renforcement des poteaux par matériaux composites collés, soumises à différents types d'action. Plus particulièrement, il a été démontré que la jonction poteau-poutre ou poteau-semelle est un élément sensible nécessitant bien souvent d'être renforcé. De plus, cette jonction étant souvent le lieu d'une discontinuité géométrique, elle induit de fait une discontinuité du système de renfort qui se trouve ainsi localement inopérant.

L'étude d'éléments poteaux en béton armé a été au préalable largement développée de manière analytique ou graphique.

Les bilans des différents modèles de calcul des poteaux confinés par le PRF revus dans la littérature, s'inscrivent dans une démarche de mieux comprendre le comportement des poteaux en béton renforcé par des matériaux composites. Il est à noter par ailleurs que la complexité évoquée par la multitude de paramètres à prendre en compte dans l'expérimentation notamment, les paramètres de forme, d'élançement, des caractéristiques du béton, ainsi que son état ( endommagé ou non ), aussi bien comme l'élaboration des modèles de calcul et leur validation ; les acteurs de la recherche, restent toujours loin à unifier des procédures de calcul afin de remplir la bonne connaissance du système de renforcement par les matériaux composites.

Il est à noter que certains essais ont été complétés par des travaux de modélisation numérique permettant de rendre compte de manière jugée globalement conforme du comportement du béton confiné. Ces outils numériques (exemple ANSYS) pourraient donc dans de futurs travaux être utilisés lors d'études d'optimisation de la géométrie des poteaux.

## ❖ PERSPECTIVES

L'importante base de données collectée lors des essais revus dans la littérature réalisée sur les poteaux confinés permettra un calage rigoureux de modèles aux éléments finis cherchant à reproduire les essais. Elle permettra notamment de valider des modélisations plus complètes incluant la représentation explicite des différents phénomènes critiques. D'autres configurations de renfort ou de géométrie des corps d'épreuve pourront ensuite être envisagées pour réaliser des « essais numériques » fiables qui viendront compléter les essais expérimentaux.

Dans une perspective de dimensionnement, une attention particulière doit être apportée au coefficient d'efficacité de confinement des matériaux composites. En effet, il a été démontré lors des essais que les renforts en PRF permettaient d'augmenter significativement la capacité des éléments à supporter des déplacements latéraux importants, ce qui pourrait donc amener les poteaux à changer de classe de ductilité, permettant ainsi de considérer les capacités réelles des poteaux confinés.

Cependant, pour proposer une modification du coefficient d'efficacité de confinement consécutive à une opération de renforcement par PRF, il est nécessaire d'avoir une approche approfondie sur les différentes formes et hauteurs des poteaux à tester. Seule la méthode des éléments finis peut s'approcher à l'élaboration de ce paramètre.

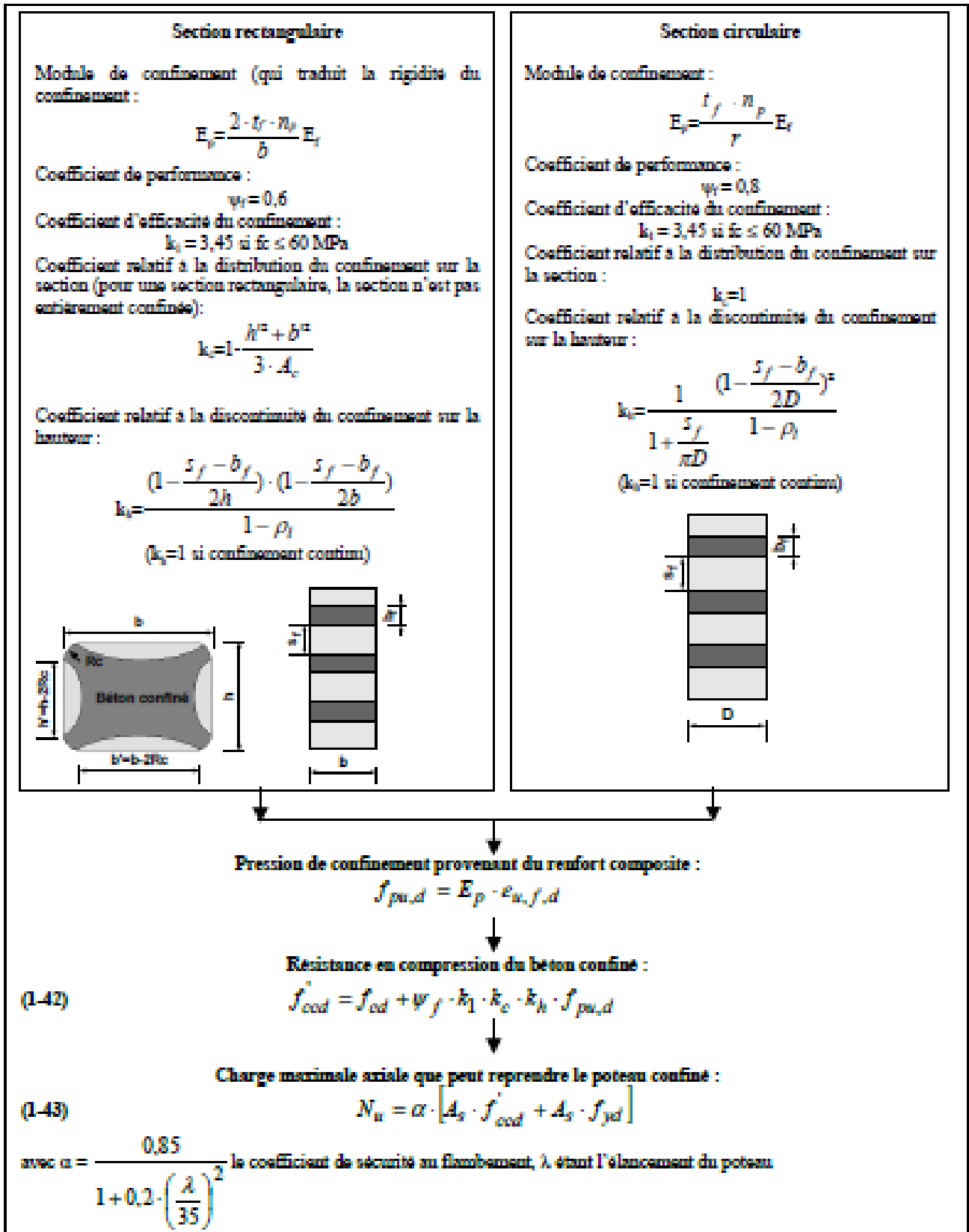
A l'issue de notre travail présenté et afin de permettre une compréhension plus approfondie du comportement des poteaux confinés renforcés par des enveloppes en FRP, on envisage les perspectives suivantes :

- Déterminer expérimentalement les caractéristiques cycliques, sous un chargement de compression cyclique excentrée, afin de mieux s'approcher de la réalité.
- Etudier le comportement des poteaux préalablement endommagé sous différents effets pathologiques
- Réaliser une simulation numérique par le biais d'un code de calcul à l'instar d'ANSYS.

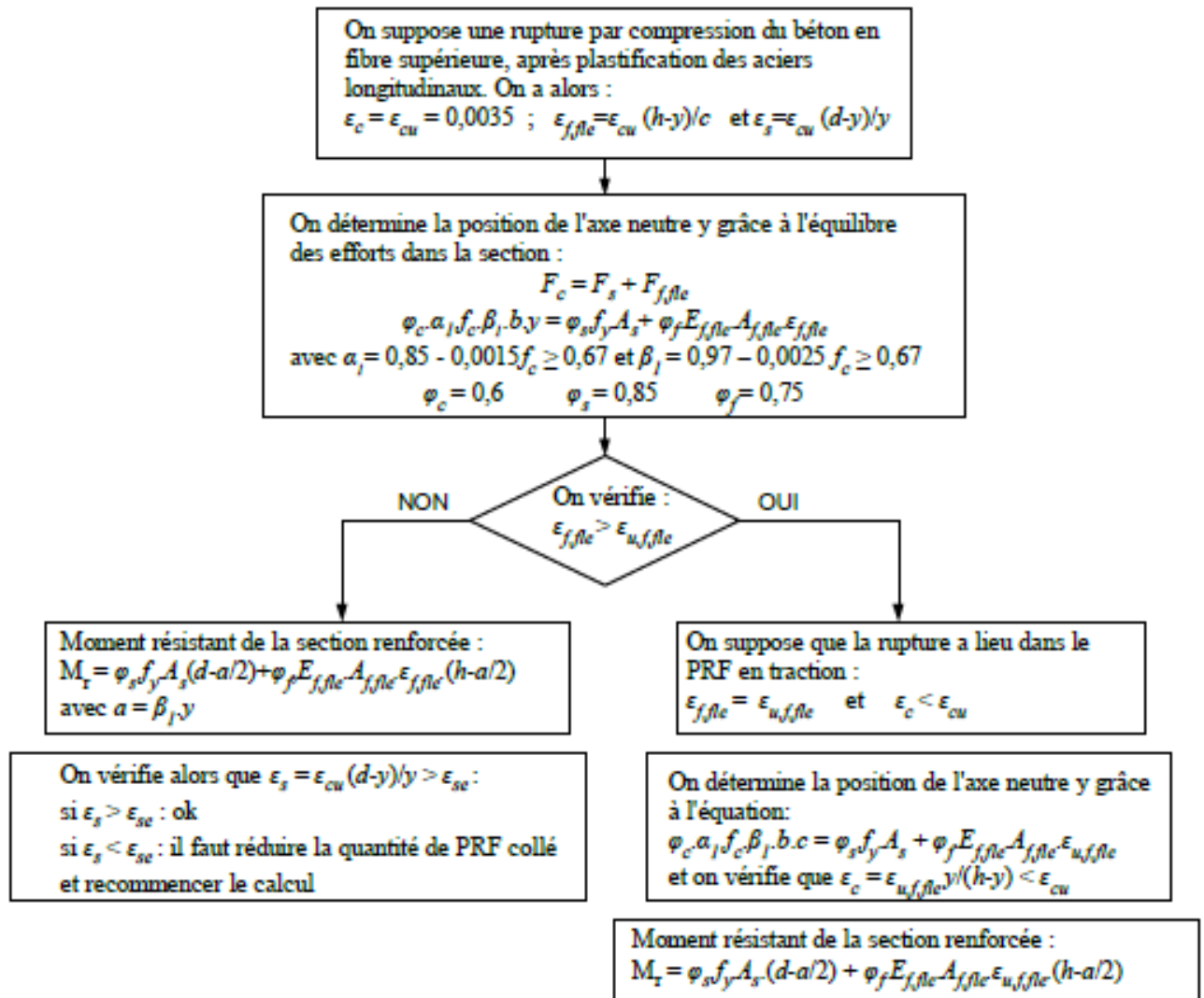
**Annexe1 : Tableau 1 : Points traités par les différents codes de calcul**

	Aspects sismiques	Aspects renforcement par PRF
<b>Eurocode 8</b>	Dimensionnement en capacité de déplacement uniquement. Prise en compte de l'aspect sismique uniquement via la capacité de déformation.	Uniquement le chemisage (action de confinement).
<b>Guide [AFGC, 2011]</b>	L'action sismique en tant que telle (flexion composée) n'est pas abordée. Dimensionnement en résistance (en compression ou en flexion)/ pas de dimensionnement en capacité de déplacement.	Flexion composée non traitée. Compression simple traitée avec prise en compte du confinement. Flexion simple de poutres traitée, avec renforts PRF en face inférieure.
<b>Règles italiennes [CNR, 2004]</b>	L'action sismique (flexion composée) est traitée. Dimensionnement en capacité de déplacement et en résistance.	Compression simple traitée avec prise en compte du confinement. Flexion simple et composée de poutres traitée, avec renforts PRF en face inférieure uniquement.
<b>Règles japonaises [JBDPA, 1999]</b>	L'action sismique (flexion composée) est traitée. Dimensionnement en résistance / pas de dimensionnement en capacité de déplacement.	Les PRF sont pris en compte pour le renforcement à l'effort tranchant.
<b>Règles d'ISIS Canada Research Network [ISIS Canada, 2006]</b>	L'action sismique en tant que telle est abordée. Dimensionnement en résistance (en compression ou en flexion)/ pas de dimensionnement en capacité de déplacement.	Flexion composée traitée avec prise en compte du confinement et de renforts PRF longitudinaux en face tendue.
<b>Règles de l'ACI</b>	L'action sismique (flexion composée) est traitée. Dimensionnement en résistance / pas de dimensionnement en capacité.	Flexion simple de poutres traitée, avec renforts PRF en face inférieure. Pour le cas de la flexion composée, les calculs prennent en compte l'action de confinement par chemisage mais pas l'action du renfort à la flexion.

**Annexe2- Organigramme de la méthode [AFGC, 2011] pour le renforcement de poteaux par confinement.**



**Annexe3. Méthode de dimensionnement des PRF collés pour le renforcement des poutres en flexion (d'après [ISIS Canada, 2006]).**



# Résumé

---

Les éléments structuraux, particulièrement les poteaux en béton armé, sont sensibles à de multiples sollicitations dont les conséquences peuvent être plus désastreuses en présence d'imperfections de forme, par le vieillissement, par des défauts d'exécution ou tout simplement par des erreurs de conception. La réduction de la vulnérabilité aux sollicitations extrêmes des structures existantes est un enjeu majeur d'où la nécessité d'un renfort qui doit être mené dans le but de leur redonner leur état de service initial (réparation) ou de leur donner un nouveau état de service (renforcement). Cependant, en complément des procédés classiques (béton projeté, béton fibré projeté, collage de plats métallique, précontrainte additionnelle...), une des solutions palliatives à ce problème est le renforcement extérieur par adjonction de matériaux composites, cette pratique connaît actuellement un essor important, d'autant plus qu'elle peut devenir aussi une application préventive ou un nouveau procédé de construction.

Pour ce faire, l'initiation à la connaissance des différents matériaux composites employés dans le génie civil, permet d'identifier certaines techniques du chemisage des poteaux par PRF, ainsi que le choix des méthodes de mise en œuvre avec une importance accordée aux travaux préparatifs dans le choix du type des PRF, et la protection de l'interface.

Le travail présenté s'insère dans une étude globale visant à éclaircir la contribution des matériaux composites étant un confinement externe; dans le comportement des poteaux en béton, à partir des travaux exposés dans la littérature. Dans cette optique, plusieurs recherches se sont intéressées à intégrer l'apport d'un polymère renforcé de fibres (PRF) dans le développement du nouveau comportement du béton exprimé par les différentes équations d'équilibre ainsi que dans le développement graphique des diagrammes.

Ainsi la contribution des PRF, a fait preuve des gains significatifs en matière de déformations et de résistance par une revue du comportement à la rupture des poteaux confinés. L'étude paramétrique du confinement à travers un panorama de quelques travaux expérimentaux trouvés dans la littérature :

rapport volumétrique du «PRF», l'élançement et la résistance initiale du béton.

Durant plus de 20ans, un certain nombre de modèles simples des recherches ultérieures, permettant de prédire le comportement du béton confiné par un matériau linéaire élastique tel que le matériau composite (PRF). Certaines recommandations et lacunes présentes dans les études ayant conduit à l'élaboration de normes et modèles les plus aboutis, visent à obtenir une corrélation satisfaisante de la loi contrainte-déformation avec les résultats expérimentaux des travaux de recherche en question. Les caractéristiques mécaniques et géométriques des spécimens de béton, ainsi que les paramètres du chemisage, interviennent alors.

Toutefois, le manque d'un guide pertinent et universel dans le domaine du chemisage des poteaux par PRF, rend l'application d'un modèle ou d'un autre attributaire au choix du concepteur qui prend en considération le code de sa région, tel que l'Eurocode 8-3, le guide de l'AFGC 2011 et le *module ISIS*. Pour cela certaines pistes peuvent être proposées ; et nous avons conduit de procéder à une analyse critique de quelques modèles.

**Mots clés :** poteaux béton armé, renforcement, Polymères Renforcés de Fibres (PRF), ancrage

## *Abstract*

---

Structure elements, particularly the concrete columns are susceptible to severe loadings, which their consequences can be worsened by the presence of shape imperfections, by ageing, by execution defects or simply by design errors. The reducing vulnerability of existing structures in severe loadings, is thus an important issue, where retrofitting is necessary. One of the palliative solutions in addition to classical procedures is strengthening with external composite materials. There has been a worldwide increase in the use of composite materials for the new constructions.

In order to achieve this objective, the review examines the properties of different ranges of FRPs used in civil engineering identifies some techniques of fiber bonding and their implementing methods. An importance is given to preparation works, FRP type, and surface treatments.

The present work is presented as a part of a more wide study carried out whose purpose is the contribution of composite external material in concrete columns behavior, through literature works. Within this present study it was considered an interest to integrate the contribution of a Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in the analytical development of the various equilibrium equations like in the graphic development of the diagrams.

Therefore, the contribution of FRP shows the specific gain on strain and stress offered by FRPs within the behavior of confined columns. A parametric study focuses on the main parameters of mechanical behavior as the reinforcement thicknesses, rigidity, geometric shapes of columns, volumetric ratio of FRP, slenderness and first concrete stress.

In addition, the fifth chapter assesses some simple models that lead to predict the columns behavior confined with an elastic linear material such as FRP. Some recommendations and lists shortcomings found in the studies that lead to elaborate norms and models which predict a satisfying correlation between the stress-strain law and the experimental results of some researches. Mechanics of columns and bonding FRP's parameters are reached in.

Over the last 40 years, a certain number of simplified design models are conducted to predict the concrete behavior with a focusing attention on the linear elastic quality of the FRPs. Given the lack of guidance or regulation in this area, models application are depending on the researcher's choices how considered the specific code of region as the Eurocode 8-3, the AFGC 2011 code and the ISIS modules. Therefore, some ways are proposed with a critical analysis of some models.

*Keywords:* concrete columns, strengthening, Fiber-Reinforced Polymer (FRP), anchorage, design.

العناصر الهيكلية خاضه ا ندي , ة تاثيرات خارجية مما يجعلها هشة بسبب . كل ه يادي الي الحاجة لتدعيم هذه العناصر .  
بالضافة الي الطرق الكلاسيكية توجد حاليا طرق ج ناجعة هي اللدائن المركبة المعززة بألياف (PRF). هذه الموا ها خاضه الهي .

اللدائن المركبة المعززة بألياف يتحكم في اختيار طرق تطبيقها في تدعيم ندي و حمايتها .

تهتم هذه الدراسة بالسلوك الميكانيكي المحوري و القطري الناتج عن تأثير الحصر الخارجي الذي يقدمه اللدائن المركبة المعززة بألياف (PRF). مكاسب المقاومة للضغط المحوري و التشوهات المحورية و القطرية للخرسانة المحصورة خارجيا بالمواد المركبة (PRF) تم تقييمها و تحليلها على أساس عدد طيات مغلف (PRF) ، مقاومة الضغط للخرسانة غير المحصورة ، النسبة الحجمية لل PRF ( )  
( PRF )  
( ) إلى قطر العينات (L/D) .

اخيرا . القوانين الخاصة السلوك الميكانيكي ندي  
بألياف غي كافية لد الان نهيا عن قوانين ( 3-8 Eurocode -1' - AFGC 2011 -1' ISIS module )

ندي - التدعيم - اللدائن المركبة المعززة بألياف -