

17/5/31.6/17

**Université du 8 mai 1945 Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin D'études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Option : Conception et Production Industrielle

Présenté par : Amar BOULFAFA

=====

***Etude de l'efficacité du renforcement par recouvrement en matériau composite des colonnes en béton armé***

=====

Sous la Direction de :

**Pr. Abderrezak BEZAZI**

**Année universitaire 2011/2012**

---

## Remerciement

*Nous remercions chaleureusement*

*Le Pr Bezazi Abdelrezak et M<sup>me</sup> BOUCHELAGHEM Hafida*

*d'avoir encadré ce travail,*

*Pour Tous les précieux conseils qu'ils nous ont apportés.*

*Plus généralement, tout le personnel*

*Enseignant, du département de Génie Mécanique.*

*Merci à nos collègues qui*

*Nous avons accompagnés dans nos parcours.*

*Nous voudrions remercier tout*

*Particulièrement nos parents ainsi que tous*

*Les membres de nos familles de leur soutien et*

*Leur encouragement.*

---



---

## Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A MES PARENT pour leurs tendresses et sacrifices.*

*A mon*

*Très cher amis , Classe  
CPI, Riad, Ahmedboulahya, Ahmed Nakaa, Charif , Pitch, et  
tous pour leur soutien et leur sacrifices.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce*

*Travail.*

*Boulafaammar*

---

## SOMMAIRE

### Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction générale	1
<u>Article: 1</u>	
1.1 Résumé	2
1.2 Objectif visé par cet article :	2
1.3 Modélisation du confinement (relation contrainte-déformation)	2
1.4 Comparaison entre les résultats expérimentaux et analytiques	4
<u>Article: 2</u>	
2.1 Résumé:	5
2.2 Objectif visé par cet article :	5
2.3 Investigations antérieures du comportement et de la modélisation du confinement du béton	5
2.4 Equations de base pour un chargement de compression monotone	6
2.5 Pression de confinement latérale effective et coefficient d'efficacité de confinement	7
2.6 Efficacité effective de confinement pour des sections confinées en Spirales ou en cercles	8
<u>Article: 3</u>	
3.1 Résumé :	10
3.2 Objectif visé par cet article :	10
3.3 Force et ductilité des cylindres confinés FRP avec des réponses contrainte- durcissement	10
3.3.1 Base de données expérimentale	10
3.3.2 Résistance ultime du béton confiné par FRP	11
3.3.2.1 Modèles existants	11
3.3.2.2. Nouveau modèle	11
3.4. Déformation ultime des cylindres en béton confinés par FRP	14
3.4.1. Modèles existants	14
3.4.2. Modèle proposé	16
<u>Article: 4</u>	
4.1 Résumé :	19
4.2 Objectif visé par cet article :	19
4.3. Propriétés de dilatation	20
4.4 Mécanisme de confinement	21
4.5. Efficacité confinement	21
<u>Article: 5</u>	
5.1 Résumé:	23
5.2 Objectif visé par cet article :	23
5.3. Modèle de confinement proposé	23

5.4 Modélisation des déformations latérales	26
Conclusion	27
Références Bibliographiques	28
<b>Chapitre II : Etude expérimentale</b>	
1. Introduction	30
2. Préparation des éprouvettes et banc d'essai utilisé	31
2. 1. Préparation, dimension des éprouvettes	31
2. 2. Recouvrement des éprouvettes	31
2. 3. Machine d'essai et instrumentation	32
2. 4. Matériaux composites	33
3. Résultats et discussions	33
3. 1. Efficacité de confinement du béton non renforcé par matériau composite	33
3. 1. 1. Comportement Charge/temps des éprouvettes non confinées	33
3. 1. 2. Modes d'endommagement et de rupture	34
3. 1. 3. Comportement charge/temps des cylindres en béton confinées par PRFV	35
<i>Béton_00</i>	35
3. 1. 4. Modes d'endommagement et faciès de rupture	36
<i>Béton_02</i>	37
3. 1. 5. Modes d'endommagement et de rupture	39
4. Comparaison entre les types du béton utilisé	39
5. Deuxième série d'essai avec jauges	41
5. 1. Modes d'endommagement et de rupture	43
5. 2. Efficacité du renforcement du béton par matériaux composites	43
5. 2. 1. Comportement charge/temps des cylindres en béton confinés	43
<i>Béton_00</i>	43
5. 2. 2. Modes d'endommagement et faciès de rupture des éprouvettes	44
5. 3. Effet de la grille métallique sur le comportement des cylindres confinés	45
<i>Béton_02</i>	45

<b>5. 4. Modes d'endommagement et de rupture</b>	<b>47</b>
<b>6. Comparaison entre les types du béton</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion</b>	<b>52</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>53</b>

**Chapitre I :**  
**Etude bibliographique**

## Introduction

Le rôle des matériaux composites dans le domaine du renforcement des structures est incontestable. De nombreux travaux de recherches et des réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments de renforcement extérieur. Au début des plaques d'acier étaient utilisées comme éléments de renforcement, mais elles ont été remplacées progressivement par les matériaux composites. L'utilisation de plus en plus fréquente des matériaux composites s'explique d'un part par leurs meilleures propriétés mécaniques et d'autre part, par le progrès dans les procédés de leur fabrication durant ces dernières décennies. Devenus plus accessibles sur un plan économique, les matériaux composites sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art.

Il existe à présent de nombreuses possibilités d'application de cette technique de renforcement. Dans une structure courante en béton armé il est possible de renforcer presque tous les éléments de construction : colonnes, poutres, dalles. Cette technique permet d'améliorer :

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

En effet l'utilisation des composites «PRF» dans les structures étant une pratique relativement nouvelle, il existe peu de modèles mathématiques simples capables de décrire adéquatement le comportement des colonnes en béton confinées avec ce type de matériau.

La plupart des modèles empiriques disponibles ont été développés pour les colonnes confinées avec des tubes d'acier. Ces modèles, qui supposent un comportement élastique parfaitement plastique de l'acier, considèrent la pression de confinement constante dès que la résistance axiale du béton est atteinte. Pour un matériau de confinement qui présente un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture, comme dans le cas des composites à base de fibres, cette hypothèse n'est plus valable car la pression de confinement augmente jusqu'à la fin du chargement. Pour cette raison, il est difficile d'adapter les modèles empiriques existants et les résultats qu'ils donnent sont peu fiables.



## **Article 1: Houssam Toutanji**

**"Strength and Durability of Concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets"**

**"Résistance et durabilité du béton chargé axialement et confinés avec des feuilles de composite d'APRF"**

### **1.1 Résumé :**

La performance de colonnes en béton enveloppé extérieurement composite polymère renforcé par des fibres d'aramides est présentée dans cet article. Les éprouvettes confinées et non confinées (contrôle) ont été chargées en compression uniaxiale. La charge axiale et les déformations circonférentielles ont été mesurées afin d'évaluer le comportement contrainte-déformation, résistance ultime, la rigidité, et la ductilité de l'éprouvette enveloppée. Les résultats montrent que le confinement externe du béton par des composites polymères renforcés de fibres (PRF) peuvent améliorer considérablement la résistance, la ductilité et la capacité d'absorption d'énergie. Un modèle analytique développé antérieurement par l'auteur permet de prédire la réponse contrainte-déformation des éprouvettes en béton enveloppées par des composites PRF a été appliquée. La comparaison entre les résultats expérimentaux et analytiques montre que le modèle fournit des prévisions satisfaisantes de la réponse contrainte-déformation. Le papier présente également la performance des éprouvettes de bétons enveloppés soumises à des conditions environnementales sévères telles que les cycles humide-sèche et de gel-dégel. Les éprouvettes ont été exposées à 300 cycles de mouillage et de séchage en utilisant de l'eau salée. Les résultats montrent que les éprouvettes enveloppées avec des fibres d'aramide ne révèlent aucune diminution de la résistance due à l'exposition des cycles humide/sec, mais une certaine réduction a été observée pour les expositions gel/dégel.

### **1.2 Objectif visé par cet article :**

Les performances des colonnes en béton confinées avec des composites polymères renforcés de fibres d'aramide (APRF) dont les résultats expérimentaux et les prédictions analytiques sont présentées dans cet article. Ce papier fournit un cadre pour une meilleure compréhension du comportement des colonnes en béton enveloppées par composites. Les effets environnementaux humide/sec et de gel/dégel sur les performances des éprouvettes en béton enveloppées par APRF sont également évalués.

### **1.3 Modélisation du confinement (relation contrainte-déformation) :**

Le modèle, développé auparavant par Toutanji [1], a été utilisé pour des éprouvettes en béton confinées avec des composites polymères renforcés de fibres de carbone (CPRF) et des fibres de verre (GPRF). Dans cette étude, pour valider plus loin le modèle, il a été employé pour prévoir la réponse entière de la contrainte-déformation pour les éprouvettes en bétons confinés par des composites polymères renforcés de fibres d'aramide (APRF).

Le modèle se compose de deux régions distinctes. Dans la première région, le comportement est similaire à celui du béton ordinaire, puisque l'expansion latérale du

béton confiné est insignifiante. On identifie la deuxième région dans laquelle la jaquette composite FRP est entièrement activée, la rigidité est généralement stabilisée autour d'un taux de béton. La réponse dans cette région dépend principalement de la rigidité de la jaquette composite PRF. Les états de frontière sont nécessaires pour développer les équations pour la première région. Pour la simplicité, les équations de la relation contrainte-déformation sont d'abord développées pour la deuxième région.

L'effort axial ( $f_a$ ) dans chaque point de la deuxième région est calculé en utilisant le rapport suivant [1, 2].

$$f_a = f_c' + k_1 f_1 \quad (1.1)$$

Où,  $f_c'$  est la résistance du béton non confiné,  $f_1'$  est la contrainte latérale appliquée au béton par la jaquette composite FRP, et  $k_1$  est le coefficient d'efficacité du confinement. Les valeurs du coefficient  $k_1$  peuvent être obtenues sous forme d'une fonction entre la contrainte latérale et la résistance du béton ( $f_1/f_c'$ ), comme c'est montré dans l'équation (1.2) [1].

$$k_1 = 3,5 \left( \frac{f_1}{f_c'} \right)^{-0.15} \quad (1.2)$$

Substitution  $k_1$  dans l'équation (1.1), une expression pour calculer la contrainte axiale des éprouvettes de bétons confinés par PRF dans la deuxième région est obtenue.

$$f_a = f_c' \left[ 1 + 3,5 \left( \frac{f_1}{f_c'} \right)^{0.85} \right] \quad (1.3)$$

Mander et al. [3] en montrant que la déformation axiale ( $\varepsilon_{ca}$ ) à la contrainte maximale peut être exprimée en fonction de la résistance du béton confiné ( $f_{cc}$ ).

$$\varepsilon_{ca} = \varepsilon_0 \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c'} - 1 \right) \right] \quad (1.4)$$

En changeant la constante 5 pour la variable  $k_2$ ,  $f_{cc}$  pour contrainte axiale ( $f_a$ ) et  $\varepsilon_{ca}$  pour la contrainte axiale ( $\varepsilon_a$ ), dans l'équation (1.4) l'expression devient

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \left[ 1 + k_2 \left( \frac{f_a}{f_c'} - 1 \right) \right] \quad (1.5)$$

Où  $\varepsilon_0$  est la contrainte axiale de confinement le béton. Les augmentations  $k_2$  de coefficient avec l'augmentation de la contrainte latérale ( $\varepsilon_1$ ). Employer une analyse de régression,  $k_2$  est calculé comme [1]

$$k_2 = 310,57 \varepsilon_1 + 1,90 \quad (1.6)$$

La substitution de  $k_2$  dans l'équation (1.5) permet de donner une expression pour calculer la déformation axiale dans chaque point de la deuxième région du béton confiné par des composites PRF est obtenue :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \left[ 1 + (310,57 \varepsilon_1 + 1,90) \left( \frac{f_a}{f_c'} - 1 \right) \right] \quad (1.7)$$

Le point de rencontre entre la première et la deuxième région est adopté lorsque la déformation latérale est égale à 0,002. Le point d'intersection à une déformation égale à 0,002 semble produire une bonne prédiction des données expérimentales des éprouvettes en bétons confinés par FRP.

Pour construire la première région de la réponse contrainte-déformation comme indiqué ci-dessus, il est supposé (on assume) que le point d'intersection entre la première et la deuxième région se produit lorsque la déformation latérale ( $\varepsilon_{ul}$ ) est égale à 0,002. En substituant cette valeur dans les équations (1.1), (1.3) et (1.7), les expressions suivantes sont obtenues :

$$\varepsilon_{ul} = 0.002 \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_{ua} = \varepsilon_0 \left[ 1 + 0,0448 \left( \frac{E_l}{f'_c} \right)^{0.85} \right] \quad (1.9)$$

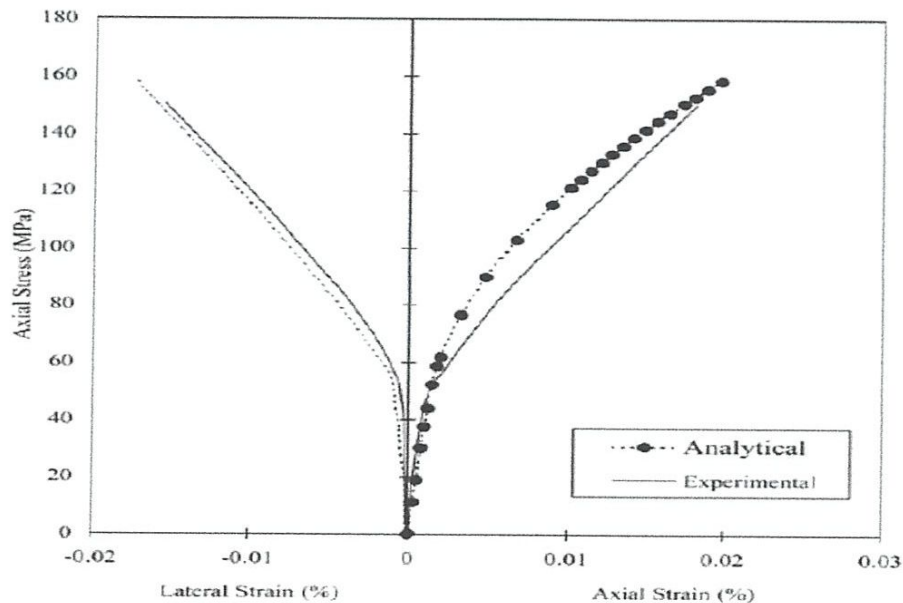
$$f_{ua} = f'_c \left[ 1 + 0,0178 \left( \frac{E_l}{f'_c} \right)^{0.85} \right] \quad (1.10)$$

$$E_{ul} = 7,557 E_l \left( \frac{f'_c}{E_l} \right)^{0.15} \quad (1.11)$$

$$E_{ua} = 0,3075 E_1 \frac{f'_c}{\varepsilon_0} \quad (1.12)$$

#### 1.4 Comparaison entre les résultats expérimentaux et analytiques :

La comparaison des résultats expérimentaux et analytique pour des éprouvettes confinées par des composites AFRP est présentée dans la **Figure 1.1**. La déformation ultime est assumée égal à 0,002. La comparaison entre les courbes expérimentaux et analytiques révèle que le modèle proposé permet une bonne prédiction de la réponse contrainte déformation.



**Figure. 1. 1.** Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques.

## **Article 2: Mander, j. B, Priestley, M. J. N. and Park, R.**

**"theoretical stress-strain model for confined concrete"** *Journal of Structural Engineering, ASCE, VOL. 114, No. 8, pp. 1804-1826.*

**"Modèle théorique de contrainte-déformation pour le béton confiné"** *Journal of Structural Engineering, ASCE, VOL. 114, No. 8, pp.1804-1826.*

### **2.1 Résumé :**

Un modèle de contrainte-déformation est développé pour le béton soumis à une charge de compression uni-axiale et confinés par un renforcement transversale. La section de béton peut généralement contenir n'importe quel type de confinant d'armature d'acier: soit en spirale ou cerceaux circulaires ou rectangulaires avec ou sans traverses supplémentaires. Ces traverses peuvent avoir des confinements égaux ou inégaux le long de chacun des axes transversaux. Une seule équation est utilisée pour décrire le comportement contrainte-déformation. Le modèle permet un chargement cyclique et incluse (prend en compte) l'effet de la vitesse de déformation. L'influence des différents types de confinement est prise en compte en définissant une contrainte latérale effective de confinement, qui dépend de la configuration des armatures transversale et longitudinale. Une approche de bilan énergétique est utilisée pour prédire la déformation longitudinale de compression dans le béton correspondant à la première rupture de l'armature transversale en assimilant que la capacité d'énergie de déformation de l'armature transversale à l'énergie de déformation stockée dans le béton à la suite du confinement.

### **2.2 Objectif visé par cet article :**

Dans ce papier, un modèle à un système unifié de contrainte-déformation pour le béton confiné est développé pour les éprouvettes de sections circulaire ou rectangulaire, sous sollicitations statiques ou dynamiques, soit monotone ou cyclique appliquée. La section de béton peut en général contenir n'importe quel type de confinement soit avec des spirales ou des cerceaux circulaires, rectangulaires, avec ou sans traverses supplémentaires à confinement égal ou inégal, long de chacun des axes transversaux.

Le modèle inclut les effets du chargement cyclique et la vitesse de déformation. Tous les détails du modèle proposé sont discutés ailleurs (Mander *et al.* [4]). Dans un document d'accompagnement par Mander *et al.* [5], le modèle théorique présenté ici est comparé avec les résultats d'un programme expérimental de quelque 40 concentriques essais de compression axiale. Ce programme considère presque la taille normale (vraie grandeur) des colonnes circulaire, carrées, rectangulaires et colonnes en béton armé testés à des taux de déformations soit lent ou rapide (dynamique), avec ou sans chargement cyclique.

### **2.3 Investigations antérieures du comportement et de la modélisation du confinement du béton :**

Les chercheurs antérieurs ont montré que la résistance et la déformation longitudinale correspondante à la résistance du béton confinée par une pression d'un fluide hydrostatique active peuvent être représentées par les relations simples suivantes :

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (2.1)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (2.2)$$

Où :  $f'_{cc}$  et  $\varepsilon_{cc}$  sont respectivement la contrainte maximale du béton et la déformation correspondante, sous la pression latérale du fluide  $f_l$ ;  $f'_{co}$  et  $\varepsilon_{co}$  sont respectivement la résistance du béton non confiné et la déformation correspondante; et  $k_1$  et  $k_2$  coefficients qui sont des fonctions du mélange du béton et de la pression latérale.

#### 2.4 Equations de base pour un chargement de compression monotone :

Mander *et al.* [4] ont proposé une approche unifiée de contrainte-déformation pour le béton confiné applicable au renforcement transversal de forme circulaire et rectangulaire. Le modèle de contrainte- déformation est illustré dans la **Figure 2.1** et qui est basé sur une équation suggérée par Popovics [6]. Pour un chargement de déformation lent (quasi-statique) et un chargement monotone, la contrainte longitudinale du béton en compression  $f_c$ ; est donnée par :

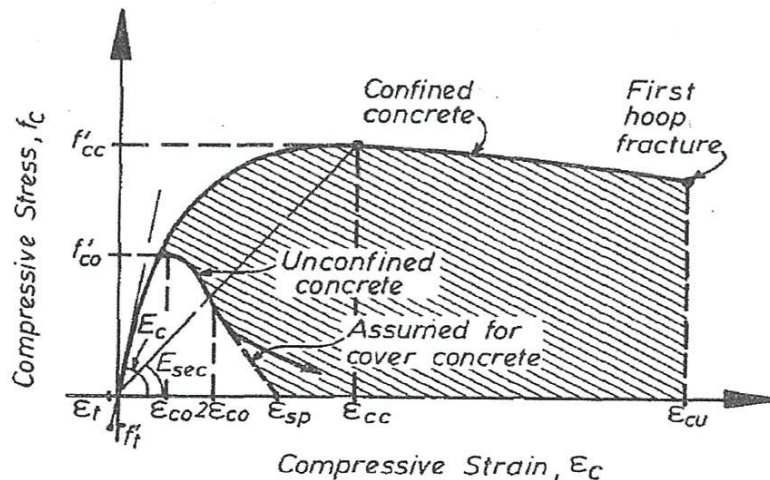
$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (2.3)$$

Où  $f'_{cc}$  : Résistance à la pression du béton confiné (défini plus tard).

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.4)$$

Où,  $\varepsilon_c$ : Déformation longitudinale du béton en compression.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.5)$$



**Figure 2.1.** Modèle Contrainte-déformation proposé pour le chargement monotone du béton confinés et non confinés.

Comme l'a suggéré Richart et *al.* [7], où  $f'_{co}$  et  $\varepsilon_{co}$  = respectivement la résistance (force) pour les éprouvettes en béton non confinés et la déformation correspondante, (généralement  $\varepsilon_{co} = 0,002$  peut être assumé).

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.6)$$

$$E_c = 5,000\sqrt{f'_{co}} \text{ MPa} \quad (2.7)$$

$E_c$  est le module tangent d'élasticité du béton (1 MPa = 145 psi), et

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.8)$$

Pour définir le comportement contrainte-déformation du béton confiné, la partie de la branche tombante dans la région où  $\varepsilon_c > 2 \varepsilon_{co}$  est supposé être une ligne droite qui atteint la valeur zéro de la contrainte de délitescence  $\varepsilon_{sp}$ .

## 2.5 Pression de confinement latérale effective et coefficient d'efficacité de confinement :

Une approche similaire à celle utilisée par cheikh et Uzumeri [8] est adoptée pour déterminer l'efficacité de pression latérale de confinement dans la section du béton. La pression maximale transversale provenant de l'acier de confinement ne peut être exercée de manière efficace que sur cette partie du noyau du béton où la contrainte de confinement est pleinement développée en raison de l'action voûte. montrent que l'action primordiale qui est supposée se produire entre les niveaux transversaux circulaires et rectangulaires de renforcement. Mi-chemin entre les niveaux de l'armature transversale, la zone de béton inefficace limite sera la plus grand et la surface effective de confinement du béton  $A_e$  sera la plus petite.

Lorsque la relation contrainte-déformation est utilisé (l'équation (2.3)), pour le calcul de la résistance et la ductilité des colonnes il est supposé par commodité que la zone du béton confiné ayant le centrale la ligne du périmètre périphérique du béton est le secteur du béton dans les lignes centrales de la spirale ou du cercle de périmètre  $A_{cc}$ . Dans le cas où  $A_e < A_{cc}$ , il est considéré que la pression latérale efficace de confinement est :

$$f'_l = f_l k_e \quad (2.9)$$

Où  $f_l$  : La pression latérale du renfort transversal, supposé être uniformément réparti sur la surface du noyau en béton;

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (2.10)$$

$k_e$  : Coefficient d'efficacité de confinement ;  $A_e$  = zone du noyau en béton effectivement confinés;

$$A_{cc} = A_e(1 - \rho_{cc}) \quad (2.11)$$

$\rho_{cc}$ : Le rapport du secteur (zone) du renfort longitudinal au secteur du noyau de la section. Et  $A_c$ : Secteur du noyau de la section inclus par les lignes centrales de la spirale ou du cercle de périmètre.

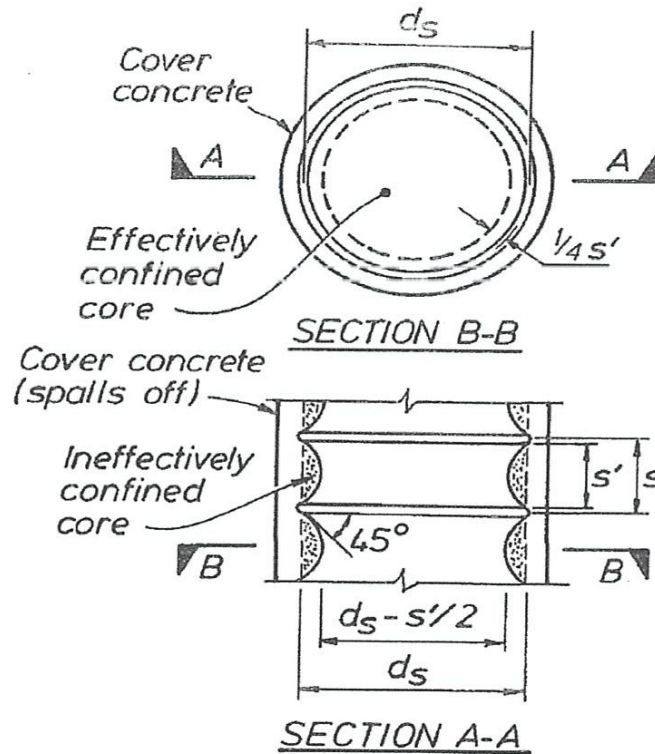


Figure 2.2. Noyau effectivement confiné pour le renfort circulaire (type cercle).

## 2.6 Efficacité effective de confinement pour des sections confinées en Spirales ou en cercles :

Si dans la *Figure 2.2*. on assume que l'action de courbement se produit sous forme de parabole de deuxième degré avec une première pente de tangente de  $45^\circ$ , la zone d'un noyau en béton effectivement confiné à l'allée centrale entre les niveaux du renfort transversal est :

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{s'}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4} d_s^2 \left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2 \quad (2.12)$$

Où  $s'$ : espacement vertical entre la spirale ou les barres de cercle, et  $d_s$ : le diamètre du spirale entre les centres de barre. Aussi le secteur du noyau du béton est :

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc}) \quad (2.13)$$

Par conséquent, de l'équation 2.10, le coefficient d'efficacité de confinement est pour les formes en cercle circulaires

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (2.14)$$

De la même manière il peut être démontré que pour des spirales circulaires

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (2.15)$$

La pression latérale de confinement peut être trouvée en considérant demi du corps confiné par un cercle en spirale ou circulaire. Si la tension du cerceau uniforme développée par l'acier transversal au rendement exerce une contrainte latérale uniforme sur le noyau de béton, puis l'équilibre des forces exige cela :

$$2f_{yh}A_{sp} = f_l s d_s \quad (2.16)$$

Où  $f_{yh}$  : Limite conventionnelle d'élasticité du renfort transversal;  $A_{sp}$ : Secteur de barre transversale de renfort ;  $f_l$  =la pression de confinement latérale sur le béton. Et  $s$  est le centre pour centrer l'espacement ou le lancement du cercle en spirale ou circulaire.

Maintenant si  $\rho_s$  est le rapport du volume d'acier de confinement transversal au volume du noyau du béton confiné, alors:

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \pi d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2 s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s} \quad (2.17)$$

Substitution l'équation 2.17 dans l'équation 2.16 et leur réarrangement donne :

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad (2.18)$$

Par conséquent de l'équation 2.9, la contrainte latérale effective de confinement sur le béton est :

$$f_l' = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \quad (2.19)$$

Où  $k_e$  : est donné par les équations 2.14 ou 2.15.



### **Article 3 : G. Wu a, Z.T. Lu" a, Z.S. Wu b**

**"Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites"**

*Construction and Building Materials* 20 (2006) 134–148

**"Résistance et ductilité des cylindres en béton confinés par des composites en FRP"**

*Construction and Building Materials* 20 (2006) 134–148.

#### **3.1 Résumé :**

Basé sur des résultats de plus de 300 éprouvettes des cylindres en béton recouverte en polymère renforcé de fibres (PRF), l'effet de confinement et de mécanismes de la rupture sont analysés. Une particulière attention est donnée pour prévoir si le cylindre du béton confiné par PRF a une réponse contrainte-durcissement ou contrainte-ramollissement. Dans le cas du cylindre du béton confiné par PRF avec une réponse contrainte-durcissement, on le constate que le coefficient du Poisson ultime du béton confiné tend vers une valeur asymptotique. Par le calcul du coefficient du Poisson ultime, et selon la compatibilité de contrainte, la contrainte ultime du béton confiné par PRF peut être prévue. D'ailleurs, en rivalisant avec beaucoup de données expérimentales existantes, les modèles proposés sont tout à fait simples et encore assez précis, qui peuvent être appliqués aux cylindres en béton confinés avec de divers types de composite par PRF. En outre, pour la caisse de cylindre en béton confiné par PRF avec une réponse contrainte-ramollissement, des équations pour prévoir la force maximum, la contrainte maximale, la résistance ultime et la contrainte ultime sont suggérées en cet article.

Mots-clés : FRP ; Emprisonnement ; en béton ; Cylindres ; Force ; Ductilité

#### **3.2 Objectif visé par cet article :**

Cet article est basé sur trois concepts originaux : (1) les courbes de contrainte-déformation des cylindres en béton confinés par PRF incluent un composant contrainte-durcissant ou un composant contrainte-ramollissant, qui dépend de l'efficacité de confinement par PRF. Une valeur est indiquée pour différencier entre la contrainte de ramollissement et écrouissage ; (2) pour les cylindres en béton confinés par PRF avec des réponses contrainte-durcissant, des méthodes pour prédire la résistance ultime et la déformation ultime sont présentées ; et (3) pour les cylindres en béton confinés par PRF avec des réponses contrainte-ramollissant, les méthodes pour prédire la résistance maximale, le pic de déformation, la résistance ultime et la déformation ultime sont proposées.

#### **3.3 Force et ductilité des cylindres confinés FRP avec des réponses contrainte-durcissement :**

##### **3.3.1 Base de données expérimentale :**

Pour l'évaluation des modèles précédents et pour le développement et le calibrage du nouveau modèle, des résultats expérimentaux de plus de 300 cylindres en béton

confinés par PRF existants dans les références ont été rassemblés. Les résultats expérimentaux disponibles ont couvert des paramètres d'éventail.

- (1) la résistance du béton entre 23.0 et 75.4 MPa ont été testés.
- (2) les diamètres des cylindres ont variés entre 75 et 500 millimètres, la hauteur varie entre 150 et 1824 millimètres, considérant que la plupart des cylindres ont eu des dimensions de 100 x 200 millimètres ou de 150 x 300 millimètres.
- (3) les types de FRP inclus le CPRF, GPRF et l'APRF. Le CPRF a inclus le module commun de CPRF ( $E_F \leq 250$  GPa) et le haut module de CPRF ( $E_F > 250$  GPa). Le PRF a été appliqué sous les formes de filament, de feuille ou de tube.
- (4) la résistance à la traction de PRF varié entre 330 et 4433 MPa, le module d'élasticité de PRF varié entre 19.1 et 640 GPa, et l'épaisseur de PRF varié entre 0.11 et 3.0 millimètres.
- (5) pour éliminer l'influence du renfort en acier, seulement les cylindres en béton sans renfort de l'acier ont été considérés dans cet article.

**Tableau 3.1.** Coefficient k dans différents modèles de résistance avec une forme de L'équ (1).

Fardis et al [5]	Samaan et al [40]	Toutanji [47]	Karabinis et al [11]	Mizau-chi et al [28]	Lam et al [15]	Saafi et al [39]	Miyau-chi et al [29]
$3.7(f_t/f'_{co})^{-0.14}$	$6.0f_t^{-0.3}$	$3.5(f_t/f'_{co})^{-0.15}$	$2.1(f_t/f'_{co})^{-0.13}$	3.5	2.0	$2.2(f_t/f'_{co})^{-0.16}$	2.98

### 3.3.2 Résistance ultime du béton confiné par PRF :

#### 3.3.2.1 Modèles existants :

Beaucoup de chercheurs ont suggéré différentes méthodes pour prévoir la force des cylindres en béton confinés par PRF concernant l'équation bien connue proposée par Richart *et al* [7] montrés dans Les équations. (3.1) mais le coefficient k d'efficacité a été ajusté selon la caractéristique du béton confinés par FRP (*tableau 3.1*).

$$f'_{cc} = f'_{co} + kf_t \quad (3.1)$$

Où  $f'_{co}$  et  $f'_{cc}$  sont la résistance de compression des cylindres en béton non confinées et confinées par PRF, respectivement.

#### 3.3.2.2. Nouveau modèle :

**Résistance à la traction de PRF déterminée par l'essai.** Quand la résistance ultime de PRF est déterminée à partir de l'essai de traction des coupons, la résistance ultime des cylindres en béton confinés par PRF peut être déterminée par L'équation. (3.2) – (3.13) selon le type de PRF (*Figure 3.1*).

**Module commun de béton confiné par feuille de PRF.** Pour le module commun des cylindres en béton confiné par feuille de PRF, les équations suivantes sont suggérées pour prévoir la résistance ultime (*Figure 3.1. (a)*) :

Module commun de la feuille de PRF :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0,745 + 3,357 \frac{f_1}{f'_{co}} - 1,053 \left( \frac{f_1}{f'_{co}} \right)^2 \quad (R^2 = 0,94) \quad (3.2)$$

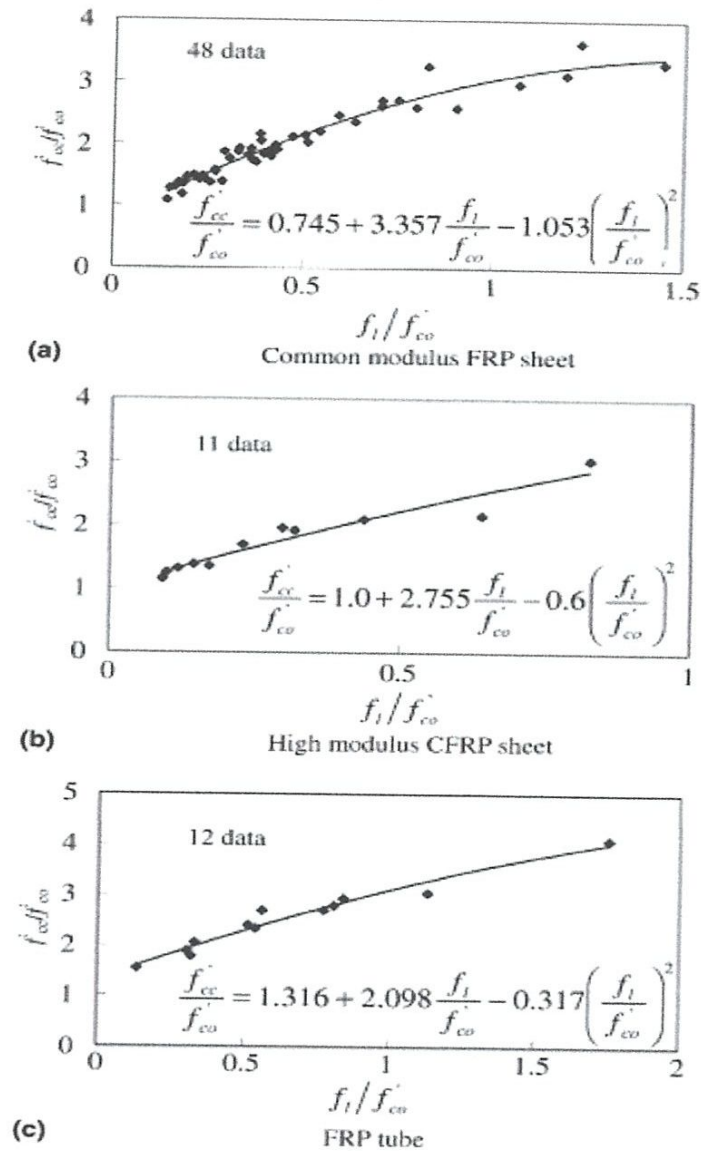


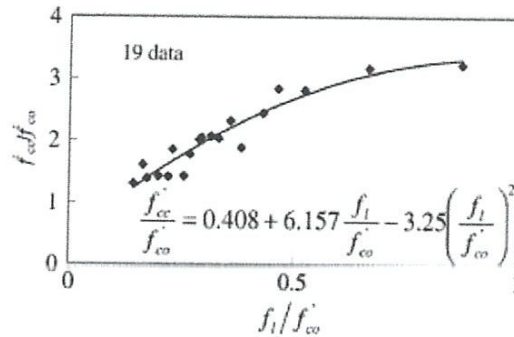
Figure 3.1. Régression de la résistance ultime de béton confiné par PRF quand la force de PRF déterminée par l'essai.

Et peut-être simplifié comme suit:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2,0 \frac{f_1}{f'_{co}} + 1 \quad (R^2 = 0.89) \quad (3.3)$$

Où  $R^2$  est le coefficient de corrélation.

**Haut module du béton confiné par feuille de CPRF.** Pour le haut module de béton confiné par feuille de CFRP, les équations suivantes sont suggérées pour prévoir la résistance ultime (*Figure 3.1. (b)*). Il devrait noter que les équations sont obtenues ont basé sur des éprouvettes confinées de CPRF avec le module d'élasticité sont étendues de 378 à 640 GPa.



**Figure 3.2.** Régression de la résistance ultime du béton confinés par PRF quand la résistance à la traction de PRF fourni par le fabricant.

Haut module de feuille de CPRF :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,0 + 2,755 \frac{f_1}{f'_{co}} - 0,6 \left( \frac{f_1}{f'_{co}} \right)^2 \quad (R^2 = 0,93) \quad (3.4)$$

Et peut-être simplifié comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2,4 \frac{f_1}{f'_{co}} + 1 \quad (R^2 = 0,91) \quad (3.5)$$

**Béton confiné par tube de PRF.** Pour le béton confiné par tube de PRF, les éprouvettes ont exécuté par Saafi et al [9], Mirmiran et Shahawy [10] et Tegola et Manni [11] ont été analysés. Les propriétés mécaniques du tube de PRF employées par Saafi et autres [9] ont été fournis par les fabricants, mais il a prouvé que la force du tube de PRF était près de la valeur expérimentale par les résultats rapportés en cet article, ainsi ils ont été mis ainsi que les spécimens de Mirmiran et Shahawy [12], Tegola et Manni [11] à régresser (*Figure 3.1. (c)*).

Tube de PRF :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,316 + 2,098 \frac{f_1}{f'_{co}} - 0,317 \left( \frac{f_1}{f'_{co}} \right)^2 \quad (R^2 = 0,96) \quad (3.6)$$

Et peut-être simplifié comme suit:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2,5 \frac{f_1}{f'_{co}} + 1 \quad (R^2 = 0,84) \quad (3.7)$$

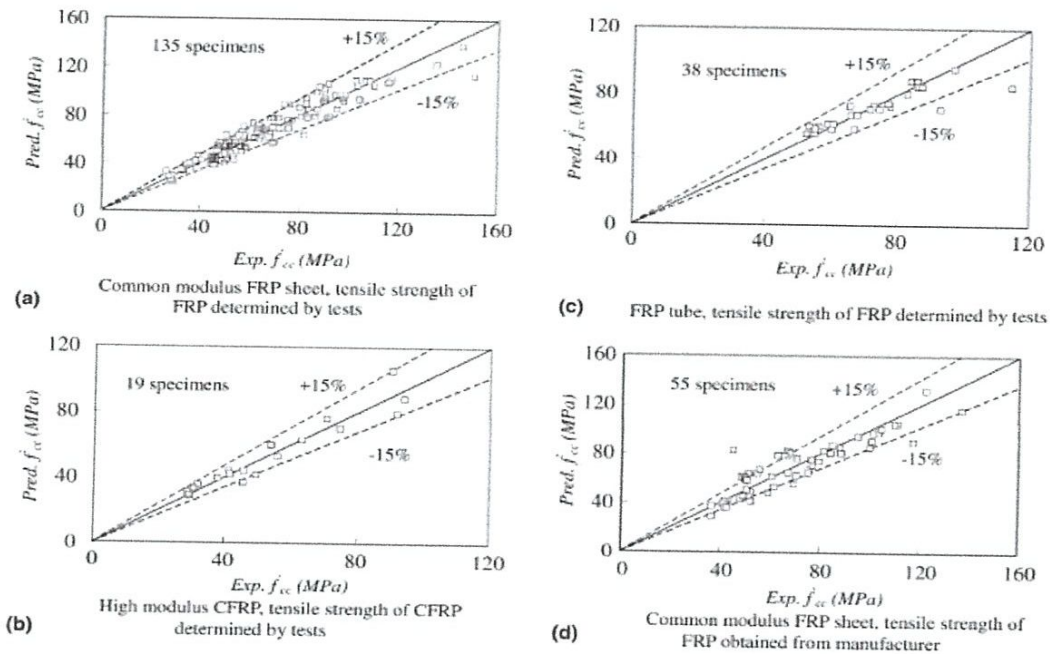
**Résistance à la traction de PRF fourni par les fabricants.** Quand la résistance de PRF est fournie des fabricants, la résistance ultime du béton confiné par feuille PRF peut être déterminée à partir de L'équation. (3.8) ou L'équation. (3.9) montré dans la **Figure. 3.2.**

Module commun du Feuille de PRF :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0,408 + 6,157 \frac{f_1}{f'_{co}} - 3,25 \left( \frac{f_1}{f'_{co}} \right)^2 \quad (R^2 = 0,91) \quad (3.8)$$

Et peut-être simplifié comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 3,0 \frac{f_1}{f'_{co}} + 1 \quad (R^2 = 0,86) \quad (3.9)$$



**Figure. 3.3.** Comparaison entre les présentent valeurs de la résistance ultime et expérimentales.

### 3. 4. Déformation ultime des cylindres en béton confinés par PRF :

#### 3. 4. 1. Modèles existants :

Ces dernières années, on a proposé quelques méthodes pour prédire la déformation ultime des cylindres en béton confinés par PRF. Des modèles existants peuvent être classifiés dans sept types comme suit :

1. Basé sur le modèle de confinement par acier, Saadatmanesh et *al.* [13]:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3.10)$$

Où  $\varepsilon_{co}$  est la déformation au pic de la contrainte du béton non confiné et  $\varepsilon'_{cc}$  est la déformation ultime du béton confiné par PRF.

2. Régressions selon  $f_l = f'_{co}$  où  $E_L = f'_{co}$ , Lam et Teng [14]:

$$\text{CPRF Feuille: } \frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 15 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3.11)$$

$$\text{GPRF tube: } \frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 27 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.7} \quad (3.12)$$

3. La déformation ultime des cylindres en béton confinés par PRF est liée à la résistance à la traction de PRF et au rapport de la résistance ultime du béton confiné par PRF  $f'_{cc}$  à cela du béton non confiné  $f'_{co}$ , Toutanji [15]:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (310,57\varepsilon_r + 1,90) \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3.13)$$

Où  $\varepsilon_r$  est la déformation latérale du béton confiné par PRF

4. La déformation ultime des cylindres en béton confinés par PRF est déterminée à partir de la géométrie de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF, Samaan et al. [16]:

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{f'_{cc} - f_0}{E_2} \quad (3.14)$$

Où  $E_2$  est la deuxième pente de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF et  $f_0$  est la contrainte d'intersection à l'axe vertical.

5. Xiao et Wu [17] ont suggéré une expression empirique pour la déformation axiale et la contrainte latérale des cylindres en béton confinées par PRF. La déformation ultime à la rupture de PRF a été conventionnellement suggérée pour être 50% de la déformation à la rupture mesurée pour des éprouvettes en coupon de PRF testé en traction plat :

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_{r0} - v' \varepsilon_c \quad (3.15)$$

Où :  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_c$  sont les déformations latérale et axiale du béton confiné par PRF, respectivement ;  $\varepsilon'_{r0}$  est l'intersection de la ligne linéaire entre la contrainte axial et déformation latérale à la déformation axiale nulle et  $v'$  est la pente de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF.

6. Basé sur le développement d'une régression empirique selon des paramètres comme  $\varepsilon_f$ ,  $f_f$ ,  $E_c$ ,  $f_1/f'_{co}$ ,  $f'_{co}$ , Spoeolstra et Monti [18] :

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 2 + 1,25 \frac{E_c}{f'_{co}} \varepsilon_f \right) \sqrt{f_1/f'_{co}}. \quad (3.16)$$

7. Récemment, quelques modèles pour prédire la contrainte et la déformation axiaux du béton confiné par PRF ont été suggérés ont basé sur l'analyse numérique de méthode ou de plasticité, tandis que ces modèles ne sont souvent pas appropriés pour l'usage direct dans la conception.

### 3.4.2. Modèle proposé :

La déformation ultime du béton confiné par PRF est liée non seulement à la valeur  $E_1/f'_{co}$ , ou à  $f_1/f'_{co}$ , mais également à la déformation ultime à la rupture de PRF, la forme de PRF et le module d'élasticité de PRF. Ces paramètres n'étaient pas tous considérés dans les modèles existants, ainsi ils n'étaient pas toujours disponibles ou satisfaisants.

Un groupe des éprouvettes en béton confiné par PRF ont été testés pour étudier la relation entre le coefficient de Poisson ultime du béton confiné par PRF et le rapport de confinement et le type de PRF, les caractéristiques des éprouvettes en béton et les propriétés de PRF sont montrées dans le **tableau 3.2**. Quatre types de PRF comprenant le haut de module CPRF, le module commun de CPRF, le GPRF et l'APRF ont été employés. **Figure. 3.4** montre la relation de la contrainte axiale et le coefficient de Poissons des cylindres en béton confiné par PRF. L'axe horizontal est la contrainte axial du béton, et l'axe vertical est le coefficient de Poissons du béton confiné par PRF, qui est le rapport de la déformation latérale à la déformation axiale mesurée par les jauges de contrainte collées sur la surface de PRF à l'a mi-hauteur des cylindres.

**Tableau 3.2.** Caractéristiques des éprouvettes et propriétés de PRF

Specimen	Type of PRF	$f_f$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$t$ (mm)	$f_l$ (MPa)	$f_l/f'_{co}$
Sa-1	No PRF	-	-	-	-	-
Sa-2	High modulus CPRF	2544	540	0.286	9.7	0.42
Sa-3	Common modulus CPRF	4234	230	0.167	9.4	0.41
Sa-4	GPRF	1794	73	0.354	8.5	0.37
Sa-5	APRF	2324	120	0.286	8.9	0.39

**Nota :**  $t$  est l'épaisseur total du PRF ; la résistance de compression du béton non confiné est 23,1 MPa.

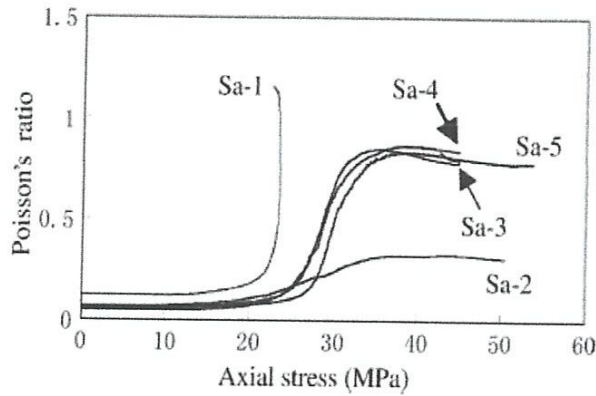


Figure 3.4. Relation entre la contrainte axiale et le coefficient de Poisson du béton confiné par PRF.

Basé sur l'analyse des résultats expérimentaux ci-dessus et d'autre recherche existante, il peut être conclure que le coefficient de Poissons ultime des cylindres en béton confinés par PRF tendra à une valeur asymptotique si le module commun du PRF de confinement est significatif, et il dépend principalement de la valeur de  $f_1/f'_{co}$ . Pour découvrir la relation du coefficient de Poissons ultime par le module commun du cylindre en béton confinés par PRF et la valeur de  $f_1/f'_{co}$ , 160 éprouvettes étaient rassemblées pour étudier le coefficient de Poissons ultime des éprouvettes en béton confinés par PRF. Les données de 149 éprouvettes confinées avec le module commun de PRF ont été récapitulées dans 61 points montrés dans la Figure 3.5 (a) après que les données avec des valeurs de  $f_1/f'_{co}$  moins de 8% ont été ramenées à une moyenne. Dans la Figure 3.5 (a), l'axe horizontal est  $f_1/f'_{co}$ , et l'axe vertical représente le coefficient de Poissons ultime expérimental ( $v_u$ ) du béton confiné par PRF, qui est égal au rapport de la déformation ultime à la rupture  $\epsilon_{fu}$  de PRF sur la déformation axiale ultime  $\epsilon'_{cc}$  des cylindres en béton confinés par PRF.

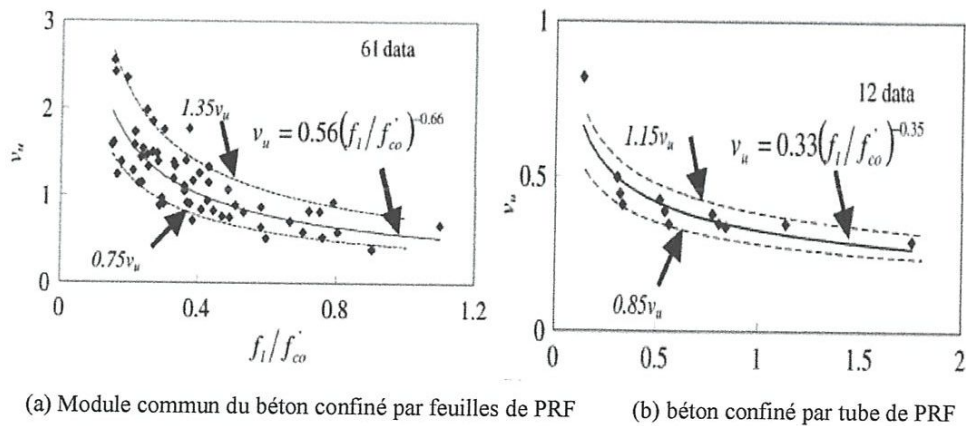


Figure 3.5. Equations de dégradation pour le coefficient de poisson ultime du béton confiné par PRF.



Le coefficient de Poisson ultime des cylindres en béton confinés avec de module commun des feuilles de CPRF, les feuilles de GPRF et APRF peut être rapproché par l'équation (3.17), et la plupart des données être dans la gamme de  $0.75 v_u$  à  $1.35 v_u$  comme montré dans la **Figure 3.5 (a)**.

$$v_u = 0,56(f_l/f'_{co})^{-0,66} \quad (3.17)$$

Les résultats expérimentaux dans la **Figure. 3.4** ont prouvé que le coefficient de Poisson ultime des cylindres en béton confinés avec haut module de CPRF est non seulement lié à la valeur du  $f_l/f'_{co}$ , mais aussi relié au module de PRF. Basé sur l'analyse de 11 cylindres en béton confinés avec le haut module de CPRF entre 378 et 640 GPa, l'équation (3.18) est suggérée de prédire le coefficient de Poisson ultime des cylindres en béton confinées par PRF de haut module :

$$v_u = 0,56k_1(f_l/f'_{co})^{-0,66} \quad (3.18)$$

Où :  $k_1$  est le coefficient d'influence du module de PRF, qui est suggéré à être 1.0 quand  $E_f$  est inférieur ou égal à 250 GPa et dans ce cas L'équation (3.18) est la même que L'équation (3.23), et  $\sqrt{250/E_f}$  (unité GPa) si  $E_f$  est plus grand que 250 GPa.

De plus, le coefficient de Poissons ultime du béton confiné par PRF est lié à la forme de PRF : pour le cylindre en béton confiné par tube de PRF, le tube de PRF est employé souvent pendant que le coffrage et le béton est moulé dans le tube, tellement le tube PRF et le béton sont en contact compact ; pour le béton confiné par feuille de PRF, le PRF est enroulé autour de cylindre en béton, et il peut y avoir quelques vides entre la feuille de PRF et la surface en béton. Donc, le coefficient de Poissons ultime des cylindres en béton confinés par PRF est plus grand que celui du béton confiné par tube PRF au même niveau de  $f_l/f'_{co}$ , qui a été vérifié en comparant les résultats du béton confiné par feuille de PRF et du béton confiné par tube de PRF. L'équation (3.19) est suggérée de prédire le coefficient de Poissons ultime des cylindres en béton confinées avec des tubes de GPRF ou de CPRF basés sur l'analyse des résultats d'essai existants. La plupart des données expérimentales est dans la gamme de  $0.85 v_u$  à  $1.15 v_u$  comme montré dans la **Figure 3.5 (b)** :

$$v_u = 0,33(f_l/f'_{co})^{-0,35} \quad (3.19)$$

Pour le cylindre en béton confiné par PRF, le statut ultime est le point où PRF se rompent, ainsi après que le coefficient de Poissons ultime des cylindres en béton confinés est déterminé, la déformation axiale ultime du béton confiné par PRF peut être calculée à partir de L'équation. (3.20) selon la compatibilité de déformation :

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{\varepsilon_{fu}}{v_u} \quad (3.20)$$

## **Article 4 : Mirmiran, A. et Shahawy, M**

**"Behavior of concrete columns confined by fiber composites"** *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (1997) Vol. 123, No 5, pp. 583-590.

**" Comportement des colonnes en béton confinées par des composites en fibre"** *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (1997) Vol. 123, No 5, pp. 583-590.

### **4.1 Résumé :**

Le confinement externe du béton au moyen des fibres composites à haute résistance peuvent améliorer considérablement sa résistance et ductilité ainsi par conséquent dans les grandes capacités d'absorption d'énergie. Le mécanisme de confinement peut comprendre des fibres de confinement des colonnes existantes comme une mesure mise en conformité ou enrobage du béton dans un tube plastique renforcé de fibre (PRF) pour la nouvelle construction. Une bonne conception de ces colonnes hybrides, cependant, exige une estimation précise de l'amélioration performance. Les méthodes de conception courantes emploient la prolongation simple des modèles développés pour les colonnes en béton renforcées conventionnelles. Les résultats d'une série d'essais de compression uniaxial sur des tubes de FRP remplis du béton sont comparés aux modèles de confinement disponibles dans la littérature. La présente étude indique que ces modèles ont généralement en surestimant la résistance et la conception dangereuse. L'étude montre aussi une caractéristique unique de confinement avec des composites à fibre dans cela, ressemble pas de l'acier, PRF raccourcit la tendance de dilatation du béton, en tant qu'elle renverse la direction des déformations volumétriques. Le papier fournit un cadre pour une meilleure compréhension du comportement des fibres enveloppés ou de PRF encastrées les colonnes en béton.

### **4.2 Objectif visé par cet article :**

Cependant, PRF n'ont pas encore été utilisé dans la construction nouvelle de colonnes en béton. Mirmiran et *al* (1995; U.S. Patent 5, 599,599) [19] ont proposé l'utilisation des tubes en PRF remplis de béton comme moule à la place des colonnes préfabriquées. Le tube agit comme le coffrage, enveloppe protecteur, de confinement, et renfort de cisaillement et de flexion. Il peut aussi être utilisé pour compléter ou remplacer les armatures d'acier conventionnel de la colonne. Le tube peut être un stratifié à nappes croisées ou de l'angle plis avec des composantes axiales et frette pour des orientations de fibres (Mirmiran et *al* 1996) [20].

Puisque l'utilisation des composites à fibre pour le confinement du béton est relativement nouvelle, le travail théorique dans ce secteur est limité à des modèles qui ont été à l'origine développés pour le renfort en acier transversal. Le présent papier montre, cependant, que le béton se comporte très différemment lorsqu'il est confiné par un matériau élastoplastique tel que l'acier par rapport aux matériaux linéairement élastiques tels que les PRF. En appliquant les mêmes modèles au béton confiné par PRF ou en fibre enveloppé peut entraîner une surestimation de la résistance et la conception dangereuse. Dans l'absence des modèles fiables, l'industrie de la construction ne peut être contrainte soit pour éviter l'utilisation de matériaux

composites avancés ou incorporer élevés "facteurs de sécurité," rendant ainsi la construction composite moins économique.

### 4.3. Propriétés de dilatation :

Pour dépeindre mieux le comportement unique du béton confiné par PRF, sa réponse volumétrique doit être examinée. Dans un état de contrainte triaxiale, la déformation volumétrique  $\varepsilon_v$  (ou dilatation) est définie comme le changement de volume par unité volume (Chen [21]).

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_r \quad (4.1)$$

Où  $\varepsilon_1$  est la déformation axiale; et  $\varepsilon_r$  est la déformation latérale. Il est connu que le béton plane éprouver un volume jusqu'à  $0.90 f'_c$ , après quoi la direction de changement de volume est inversée, résultant en une expansion du volume inélastique ou dilatance à proximité ou dilatance à proximité ou au  $f'_c$ , et une expansion instable au-delà de pic de la résistance (Chen [21]). Remembrement de données d'essai sous forme de Ahmad et Shah [22] ce confirme que la dilatance instable se produit aussi pour le béton enveloppé par l'acier lorsque l'acier céder. La **Figure. 4.1** représente une parcelle de la contrainte axiale par rapport à la déformation volumétrique pour les éprouvettes de batch C. Chaque courbe est une moyenne de deux éprouvettes avec les mêmes propriétés. Bien que non représenté, une tendance similaire a été observée pour tous les autres éprouvettes dans la matrice d'essai. Comme représenté sur la figure, malgré une certaine expansion de volume au-delà de contrainte critique du béton confiné, la contrainte circonférentielle linéairement croissante de PRF restreint éventuellement l'expansion du volume et renverse sa direction. Il est clair qu'avec une quantité suffisante de fibre composite extérieure, l'expansion latérale du béton peut-être réduite efficacement cette caractéristique unique du béton confiné par PRF peut être mieux expliquée par l'évaluation du taux de variation de la déformation volumétrique. Prenant la dérivée première de (1) au respect la déformation axiale, on peut écrire :

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} = 1 + 2 \frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_1} = 1 + 2\mu \quad (4.2)$$

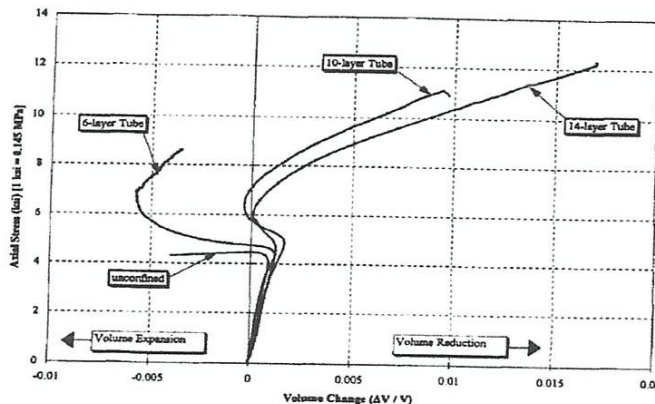
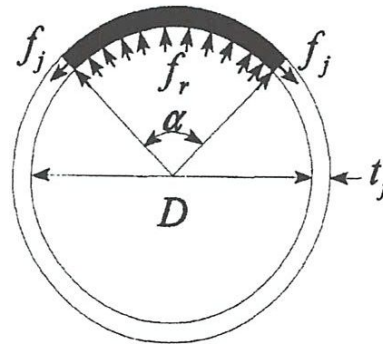


Figure. 4.1. Courbes de la déformation volumétrique des éprouvettes du groupe C.

#### 4.4 Mécanisme de confinement :

Le confinement fourni par le renfort transversal ou l'enveloppe extérieure est de type passif, du fait de la pression de confinement est développée seulement après que le membre environnant subit l'élongation circonférentiel (L'effet de coefficient de Poisson dans le béton). Les mécanismes de confinement est donc dépend de deux facteurs, de la tendance du béton à se dilater et la raideur radiale de membre de confinement à retenir la dilatation. En conséquence, deux condition doivent toujours être satisfait: (1) compatibilité géométrique (déformation) entre le noyau et l'enveloppe; et (2) équilibre des forces dans le diagramme de libre- corps pour tout secteur de la section confinée (voir *Figure. 4.2*). La deuxième condition conduit à la relation suivante entre la pression de confinement  $f_r$ , et de la contrainte périphérique  $f_j$ :

$$f_r = \frac{2f_j t_j}{D} \quad (4.5)$$



*Figure. 4.2.* Action de confinement pour la douille continue.

#### 4.5. Efficacité confinement :

L'efficacité de confinement est défini comme  $f'_{cc}/f'_{co}$ , où  $f'_{cc}$  est la résistance du béton confiné. Rachaet et *al.* [23] suggéré la relation linéaire suivante entre l'efficacité de confinement et le rapport de confinement ( $f'_r/f'_{co}$ ) :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f'_r}{f'_{co}} \quad (4.6)$$

Où  $k_1= 4,1$  est le coefficient d'efficacité. Newman et Newman [24] a suggéré la relation non-linéaire suivante, puisque le coefficient n'est pas aussi efficace à des niveaux élevés de la pression latérale:

$$k_1 = 3,7 \left( \frac{f'_r}{f'_{co}} \right)^{-0,14} \quad (4.7)$$

Plus récemment, Saatcioglu et Razvi [25] pensé que le coefficient suivant est basé sur les données d'essai de Richart et *al.* [7]:

$$k_1 = 6,7f_r^{-0.17} \quad (4.8)$$

Le modèle de MPP suggère une relation non-linéaire basée sur la résistance ultime de surface développée par Elwi et Murray [26], qui réduit à la forme suivante pour les sections circulaires:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \left( 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_r}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_r}{f'_{co}} - 1,254 \right) \quad (4.9)$$

Le modèle de A&S utilise un critère de résistance basé sur la théorie de rupture octaédrique, les trois invariants de contrainte, et les données d'essais des éprouvettes en béton renforcées. Résoudre les équations octaédriques pour la résistance de confinement du béton, le modèle peut-être simplifié aux équations bilinéaires suivantes:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4,2556 \frac{f_r}{f'_{co}} \left( \text{if } \frac{f_r}{f'_{co}} < 0,68 \right) \quad (4.10a)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1,7757 + 3,1171 \frac{f_r}{f'_{co}} \left( \text{if } \frac{f_r}{f'_{co}} < 0,68 \right) \quad (4.10b)$$

Le modèle de K&K, il ne rassemble pas avec les deux autres modèles, ne calcule pas le pic de résistance au début d'analyse. En fait, dans ce modèle, l'efficacité de confinement n'est pas seulement en fonction de la pression de confinement, mais dépend aussi de la rigidité de l'enveloppe. montre une parcelle de l'efficacité de confinement par rapport au rapport de confinement pour les modèles l'A&S et MPP aussi bien que des résultats d'essai de la présente étude. La relation suivante a été établie pour le béton confiné par PRF avec un facteur de corrélation de près de 90% (Mirmiran [20]):

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4,269f_r^{0.587} \quad (4.11)$$

#### NOTATION :

Les symboles suivants sont utilisés dans l'article 4:

$D$ = diamètre de corps;	$\varepsilon_{cu}$ = déformation de compression ultime du béton
$E_j$ = module d'élasticité de l'enveloppe circonferentiel	$\varepsilon_r$ = déformation latérales;
$f'_c, f'_{co}$ = résistance du béton non confiné;	$\varepsilon_v$ = déformation volumétriques;
$f'_{cc}$ = résistance de béton confiné;	$\varepsilon_l$ = déformation axiales;
$f_l$ = contrainte circonferentiel de l'enveloppe;	$\mu$ = taux de dilatation;
$f_r$ = pression de confinement;	$\mu_{exp}$ = taux de dilatation expérimentale;
$k_1$ = coefficient d'efficacité de confinement	$\mu_o$ = taux de dilatation initial;
$t_j$ = épaisseur de tube;	$\mu_{max}, \mu_u$ = taux dilatation maximal et ultime;
	$\nu$ = Coefficient de Poisson du béton

## **Article 5 : Samaan, M., Mirmiran, A., et Shahawy, M**

**"Model of confined concrete by fiber composites"** *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (1998) VOL.124, No.9, pp.1025-31

**"Modèle de béton confiné par des composites en fibre"** *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (1998) VOL.124, No.9, pp.1025-31

### **5.1 Résumé :**

Le confinement ou l'enveloppement par fibre du béton dans les enveloppes en plastique renforcé de fibre (PRF) améliore la résistance et la ductilité des colonnes en béton d'une manière significative. Cependant, la conception de tels systèmes hybrides exige une estimation précise d'amélioration de la performance due au mécanisme de confinement. Les procédures de conception courantes sont d'extensions simples des modèles développés pour les colonnes en béton renforcé conventionnellement. Les études précédentes ont démontré que tels modèles ne peuvent pas être valables pour le béton confiné par PRF. Un modèle simple est présenté pour prédire la réponse contrainte-déformation bilinéaire complète du béton confiné par PRF dans les directions axiales et latérales. Le modèle est basé sur la corrélation entre le taux de dilatation (expansion) du béton et la rigidité circonférentiel de l'élément à retenue. Les paramètres des modèles sont directement liés aux propriétés matérielles de l'enveloppe PRF et du noyau du béton. Les courbes contrainte-déformation prédire comparer favorablement avec les résultats de la présente étude, comme examine par d'autres sur les colonnes en béton enveloppées par fibre et confinées par PRF.

### **5.2 Objectif visé par cet article :**

Dans ce papier, un modèle simple précis déjà pour le béton confiné par PRF est proposé. Le modèle est basé sur les propriétés de dilatation uniques du béton confiné par PRF (Mirmiran et Shahawy [27]).

### **5.3. Modèle de confinement proposé :**

Pour représenter la réponse bilinéaire du béton confiné par PRF, la relation à quatre paramètres de Richard et Abbott [28] a été utilisée et calibrés comme suit:

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\varepsilon_c \quad (5.1)$$

Où  $\varepsilon_c$  et  $f_c$  est déformation et contrainte de béton, respectivement;  $E_1$  et  $E_2$  est première et deuxième pentes, respectivement;  $f_o$  est la contrainte plastique de référence à l'intersection de la deuxième pente avec l'axe de contrainte;

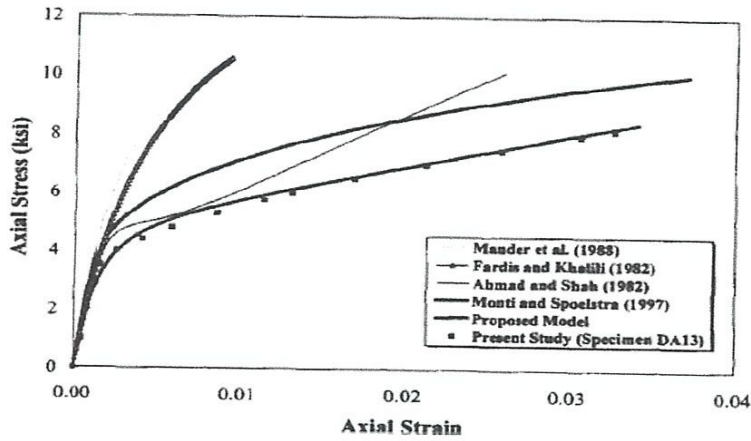


Figure. 5.1. Comparaison des modèles de confinement pour le béton confiné par PRF.

Et  $n = a$  courbe de forme de paramètre qui contrôle principalement la courbure dans la zone de transition. La Figure. 5.1 montre les paramètres de base de cette expression. Il convient de noter que l'équation ci-dessus est très polyvalente et il a déjà été utilisé pour générer la totalité des courbes contrainte-déformation de la résistance normale, de haute résistance et du béton léger (Almusallam et Alsayeed [29])

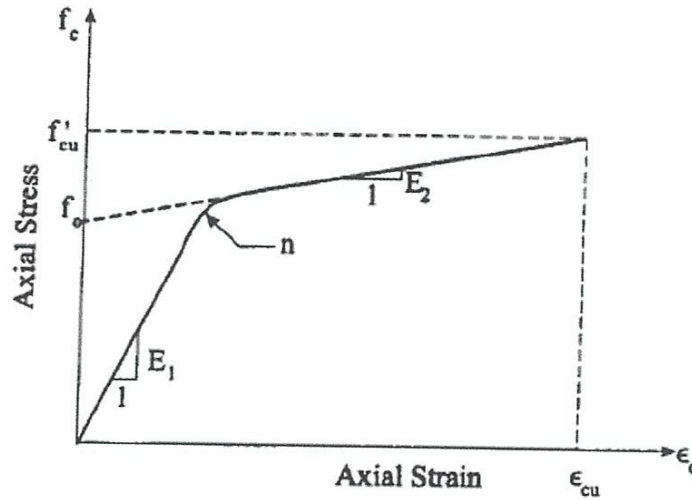


Figure. 5.2. Paramètres de modèle de confinement bilinéaire.

L'efficacité de confinement est mesurée par combien de résistance restreint du béton  $f'_{cu}$  est augmenté au-dessus de la valeur de non confiné  $f'_c$ . D'une manière générale la résistance confinée du béton est liée à la pression de confinement.

$$f'_{cu} = f'_c + k_1 f_r \tag{5.2}$$

Pour les résultats d'essai de la présente étude,  $K_1$  a été lié à la pression de confinement par le rapport suivant :

$$k_1 = 6,0f_r^{-0.3}[MPa] = 3,38f_r^{-0.3}[Ksi] \quad (5.3)$$

Une fois que cette relation est substituée en (5), la résistance du béton confiné ( $f'_c$ ) peut être liée à la pression de confinement par :

$$f'_{cu} = f'_c + 6,0f_r^{0.7}[MPa] = f'_c + 3,38f_r^{0.7}[Ksi] \quad (5.4)$$

À cause de sa nature passive, l'effet de confinement de l'enveloppe FRP est principalement activé à un niveau d'expansion latérale est habituellement à proximité du pic de résistance du béton non confiné ( $f'_c$ ); donc, la première pente dépend seulement du béton. Une conclusion similaire a été faite par Ahmad [30] pour le confinement par les étriers en acier. Pour évaluer la première pente ( $E_1$ ), la formule suivante pour le module sécant est proposé par Ahmad et Shah [22] a été adopté parce que l'équation de ACI prouvé à surestimer le module élastique :

$$E_1 = 3,950\sqrt{f'_c}[MPa] = 47,586\sqrt{1,000f'_c}[Ksi] \quad (5.5)$$

Comme le noyau en béton approche son résistance non confiné, les microfissures se développer dans la mesure où le coefficient de Poisson ne peut plus décrire la relation entre les déformations latérales et axiales, et l'enveloppe devient le seul dispositif de retenir contre la rupture catastrophique. Par conséquent, la deuxième pente ( $E_2$ ) est une fonction de la rigidité du tube de confinement, à un degré moins, la résistance non confinée du noyau de béton, est comme suit:

$$E_1 = 245,61f'_c{}^{0.2} + 1,3456\frac{E_j t_j}{D}[MPa] \quad (5.6a)$$

$$E_2 = 52,411f'_c{}^{0.2} + 1,3456\frac{E_j t_j}{D}[Ksi] \quad (5.6b)$$

Où  $E_j$  est le module d'élasticité effective du tube dans la direction circonférentiel. La résistance d'intersection  $f_o$  est une fonction de la résistance de béton non confiné et la pression de confinement fournie par le tube et estimée comme suit :

$$f_o = 0,872f'_c + 0,371f_r + 6,258 [MPa] \quad (5.7a)$$

$$f_o = 0,872f'_c + 0,371f_r + 0,908 [Ksi] \quad (5.7b)$$

La déformation ultime  $\varepsilon_{cu}$ , le point auquel la réponse est terminée, est déterminé à partir de la géométrie de la courbe bilinéaire comme suit :

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cu} - f_o}{E_2} \quad (5.8)$$

Le modèle n'est pas très sensible au paramètre de courbe-forme  $n$ , et une valeur constante de 1,5 a été utilisée.



#### 5.4 Modélisation des déformations latérales :

Puisque la courbe contrainte axiale-déformation latérale est également bilinéaire, et la zone de transition se produit au même niveau que la contrainte axiale, le modèle peut être élargi à la direction latérale comme suit :

$$f_c = \frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_{cr}}{\left[1 + \left(\frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_{cr}}{f_{or}}\right)^n\right]^{1/nr}} + E_{2r}\varepsilon_{cr} \quad (5.9)$$

Où l'indice inférieur  $r$  dénote la direction latérale (radiale). Comme proposé par Ahmad [30], la première pente  $E_{1r}$  est simplement obtenu d'après :

$$E_{1r} = \frac{E_1}{\nu} \quad (5.10)$$

Où  $\nu$  : est le Coefficient de Poisson du béton, qui varie habituellement entre 0,15 et 0,22 (chen [21]). Les paramètres sont trouvés en utilisant le taux de dilatation  $\mu$  tel que défini dans (5.11). Par inspection, il a été trouvé que  $\mu_{max}$  et  $\mu_u$  étaient liés à la rigidité (raideur) du tube de confinement (Mirmiren et Shahawy [27]), par les fonctions suivantes:

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_c} \quad (5.11)$$

$$\mu_{max} = -0,977 \ln\left(\frac{2E_J t_J}{f'_c D}\right) + 3,938 \quad (5.12a)$$

$$\mu_u = -0,187 \ln\left(\frac{2E_J t_J}{f'_c D}\right) + 0,881 \quad (5.13b)$$

Où  $R^2 = 90\%$  et  $87\%$ , respectivement pour  $\mu_{max}$  et  $\mu_u$ . L'utilisation de ces relations,  $E_{2r}$  est calculé comme suit :

$$E_{2r} = \frac{E_2}{\mu_u} \quad (5.14)$$

Et le paramètre de la forme courbé par :

$$n_r = \frac{n_1}{\mu_u} \quad (5.15)$$

La contrainte plastique de référence  $f_{or}$ , est calibré sous une forme similaire à  $f_o$  comme :

$$f_o = 0,636f'_c + 0,233f_r + 4,561 \text{ [MPa]} \quad (5.16a)$$

$$f_o = 0,636f'_c + 0,233f_r + 0,661 \text{ [Ksi]} \quad (5.16b)$$

Finalement, la déformation radiale ultime est calculée comme :

$$\varepsilon_{ru} = \frac{f'_{cu} - f_{or}}{E_{2r}} \quad (5.17)$$

## Conclusion

Les travaux de réhabilitation ou de réparation des colonnes ont conduit à la recherche de nouvelles méthodes de renforcement à partir de méthodes connues, telles que l'installation des chemises en acier autour des colonnes en béton. L'intérêt pour des matériaux composites collés offre des avantages évidents. Entre autres, ils permettent une grande légèreté, facilité d'installation et une durabilité accrue comparativement à l'enveloppe d'acier conventionnelle.

Ce travail présente une étude bibliographique détaillée sur le développement de quelques modèles de résistance établis pour le béton confiné avec des matériaux composites. L'étude prend en compte et recense les différents paramètres utilisés dans l'établissement de chaque modèle. Ce chapitre permet de cerner d'avantage l'option de proposer un nouveau modèle de confinement.

## Références Bibliographiques

### Article 1:

- [1] Toutanji H. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. *ACI Mater J* 1999; 96(3):397-404.
- [2] Toutanji H, Deng Y. Stress-strain behavior of concrete columns confined with aramid fiber composite sheets. *Proceedings of the Ninth United States-Japan Conference on Composite Materials, Mishima, Shizuoka, July 2000*. p. 547-54.
- [3] Mander JB, Priestley JN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *ASCE Struct J* 1988; 114(8):1804-26.

### Article 2:

- [4] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1984). "Seismic design of bridge piers" *Research Report No. 84-2*, Univ. of Canterbury, New Zealand.
- [5] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988). «Observed stress-strain behavior of confined concrete ". *Struct. Engrg. ASCE*, 114(8), 1827-1849.
- [6] Popovics, S. (1973). "A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete." *Cement and Concr. Res.*, 3(5), 583-599.
- [7] Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses." *Bulletin 185*, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign, 111.
- [8] Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M. (1980). "Strength and ductility of tied concrete columns." *J. Struct. Div., A.S.C.E.*, 106(5), 1079-1102.

### Article 3:

- [9] Saafi M, Toutanji HA, Li Z. Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced Polymer tubes. *ACI Struct J* 1999; 96(4):500-9.
- [10] Mirmiran A, Shahawy M. Behavior of concrete columns confined by fiber composite. *J Struct Eng, ASCE* 1997; 123(5):583-90.
- [11] Tegola AL, Manni O. Experimental investigation on concrete confined by fiber reinforced polymer and comparison with theoretical model. In: *Dolan CW, Rizkalla SH, Nanni A, editors. Proceedings of the 4th international symposium on fiber reinforced polymer reinforced for reinforced concrete structures*, SP- 188. Michigan: ACI; 1999. p. 243-54.
- [12] Mirmiran A, Shahawy M. Behavior of concrete columns confined by fiber composite. *J Struct Eng, ASCE* 1997; 123 (5):583-90.
- [13] Saadatmanesh H, Ehasni MR, Li MW. Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Struct J* 1994; 91(4):434-47.
- [14] Lam L, Teng JG. A new stress-strain model for FRP-confined concrete. In: Teng JG, editor. *Proceedings of the international conference on FRP composites in Civil Engineering, Hong Kong, China; 2001*. p. 283-92.

- [15] Toutanji HA. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. *ACI Mater J* 1999; 96(3):397-404.
- [16] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. Model of concrete confined fiber composite. *J Struct Eng, ASCE* 1998; 124(9):1025-31.
- [17] Xiao Y, Wu H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *J Mater Civil Eng. ASCE* 2000; 12(2):139-46.
- [18] Spoelstra MR, Monti G. FRP-confined concrete model. *J Compos Constr, ASCE* 1999; 3(3):143-50.

#### **Article 4 :**

- [19] Mirmiran, A., and Shahawy, M. (1995). "A novel FRP- concrete composite construction for the infrastructure." *Proc. 13th Struct. Congress, ASCE, New, York, N. Y.*, 1663-1666.
- [20] Mirmiran, A., and Shahawy, M. (1996). "Analytical and experimental investigation of reinforced concrete columns encased in fiberglass tubular and use of fiber jacket for pile splicing." *Final Rep., Concrete No. B-9135, Florida Dept. of Transp., Tallahassee, Fla.*
- [21] Chen, Y.H. (1982). *Plasticity in reinforced concrete*. McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y.
- [22] Ahmad, S. H., and Shah, S. P. (1982). "Complete triaxial stress-strain curves for concrete" *J. Struct. Engrg. ASCE*, 108(4), 728-742.
- [23] Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses." *Engrg. Experimental Station Bull. No. 185, University of Illinois, Urbana, Ill.*
- [24] Newman, K., and Newman, J. B (1971). "Failure theories and design criteria for plain concrete" *Proc., Int. Civ. Engrg. Mat. Conf. on struct. Solid Mech. And Engrg. Des.* Wiley Interscience, New York, N. Y, 936-995.
- [25] Saatcioglu, M., and Razvi, S. R. (1992). "Strength and ductility of confined concrete" *J. Struct. Engrg. ASCE*, 118(6), 1590-1607
- [26] Elwi, A. A., and Murray, D. W. (1979). "A 3D hypoelastic concrete constitutive relationship" *J. Engrg. Mech., ASCE*, 105(4), 623-641.

#### **Article 5:**

- [27] Mirmiran, A., and Shahawy, M. (1997b). "Dilation characteristics of confined concrete" *Mech. Of Cohesive-Frictional Mat., Int. J.* 2(3). 237-249.
- [28] Richard, R. M., and Abbott, B. J. (1975). "Versatile elastic-plastic stress-strain formula" *J. Engrg. Mech., ASCE*, 101(4), 511-515.
- [29] Almusallam, T. H., and Alsayed, S.H. (1995). "Stress-strain relationship of normal, high-strength and lightweight concrete" *Mag. Of concrete Res.*, 47(170), 39-44.
- [30] Ahmad, S. H. (1981). "Properties of confined concrete under static and dynamic loads" PhD thesis, Univ, of Illinois at Chicago Circle, Chicago, Ill.

# **Chapitre II :**

## **Etude expérimentale**

## Chapitre 2

### Etude expérimentale

#### 1. Introduction

Depuis plusieurs années, la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton prennent de plus en plus de l'importance dans les constructions à cause de plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des aciers d'armature, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution des normes, des accidents (choc contre un élément de structure), l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc. Le renforcement par collage extérieur de matériaux composites PRF qui offrent des propriétés très intéressantes en termes de : force, légèreté, résistance chimique, et facilité d'application, constitue une bonne solution à la préoccupation du besoin de réhabilitation des structures. Ces techniques sont les plus attirantes pour leur exécution rapide et bas coûts de main-d'œuvre [1], d'où le rôle des matériaux composites dans le domaine du renforcement des structures est devenu incontestable. Le résultat du mécanisme de confinement développé permet une augmentation considérable de la capacité portante et de la ductilité du béton une fois chargé axialement [2-5].

Plusieurs études ont été déjà menées sur l'utilisation des PRF pour le confinement de colonnes, le renforcement en flexion de poutres ou de dalles, ou le renforcement de l'effort tranchant des poutres [6-8]. Des études expérimentales ont été réalisées spécifiquement pour évaluer la capacité du moment de raccordement de poutre-colonnes enveloppé avec un tissu en fibre de Kevlar, [9]. Hadi et al [10], ont étudiés le comportement des colonnes extérieurement enveloppées chargées excentriquement avec deux types de matériaux. Toutes les colonnes ont été horizontalement enveloppées avec trois couches de matériau PRFV (polymère renforcé en fibre de verre) ou PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone). Une colonne renforcée en acier a été également moulée et examinée pour servir de colonne de référence. Ils on conclut que le gain considérable dans la force et la ductilité sont obtenu en renforçant les colonnes avec le PRFC. Les mêmes constatations sont signalées par Tamuzs et al [11], dans le cas d'une étude de la stabilité des colonnes en bétons renforcés par confinement extérieur par PRFC.

Dans ce travail une étude expérimentale sur le renforcement par recouvrement extérieur des éprouvettes cylindrique (16 x 32 cm) en béton et en béton armé par collage des plies en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV). Au totale, deux types de béton sont utilisé chaque type est renforcé par 1, 2 et 3 plies de composite dans le but de maître en évidence leur efficacités sur l'augmentation de la capacité portante des éprouvettes et d'évaluer la rentabilité de chaque système individuel.

## 2. Préparation des éprouvettes et banc d'essai utilisé

### 2.1. Préparation, dimension des éprouvettes

Les éprouvettes sont des cylindres en béton de dimension standard: 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412. Deux types d'éprouvettes sont fabriquées par série de 44 échantillons ; le premier type est un béton seul alors que le deuxième est un béton armé avec une grille en armature (voir figure1). Elles sont soumises à l'essai de compression 28 jours après coulage, ensuite renforcées et réparer par recouvrement en polymère renforcé de fibre de verre\_E (PRF). Les essais sont effectués au sein du Laboratoire du Génie Civil et Hydraulique.

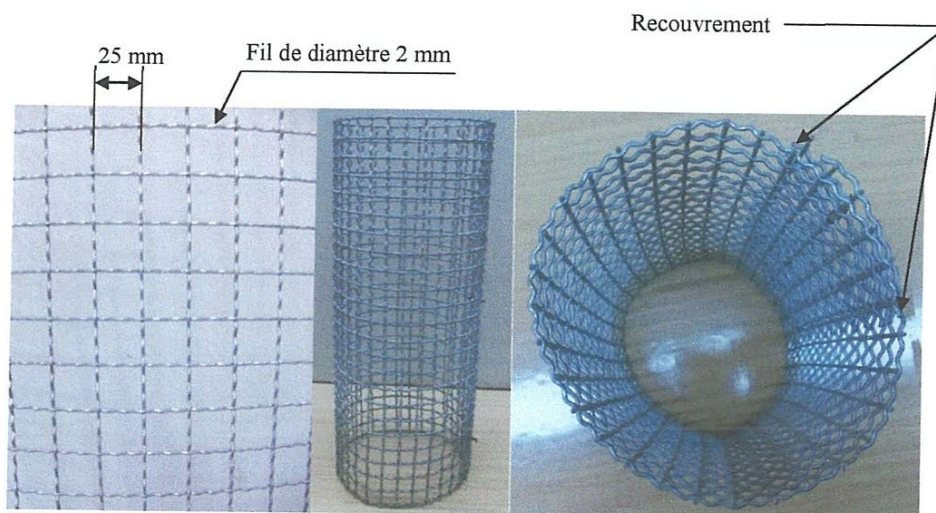


Figure 1. Grille utilisée dans le renforcement du béton.

### 2.2. Recouvrement des éprouvettes

La résines utilisés pour le renforcement; est une résine polyester employer pour les fibres de verre E d'un tissus bidirectionnels de densité surfacique est  $500 \text{ g/m}^2$ . La technique

utilisée pour envelopper les colonnes par PRF est le processus de ROCC (Renforcement d'Ouvrages par Composite Coller). Cette technique (également appelée stratification ou polymérisation directe in-situ) consiste à appliquer une couche de résine sur la surface latérale de la colonne en béton; les éprouvettes en béton ont été nettoyés et complètement sec avant l'application de la première couche de résine. Suivi par une couche d'un tissu bidirectionnel de fibre ayant une largeur et une longueur de 320 x 505 mm respectivement (pour une couche). Une longueur additionnelle de 125 mm est employée dans la direction du cercle pour fournir un recouvrement pour assurer un chevauchement d'environ 1/4 du périmètre de l'éprouvette et qui permet de développer une pleine résistance des fibres, sans glissement ni décollement de la couche composite [12, 13]. Avant d'étendre la première couche de fibre on utilise un pinceau, une couche mince de résine est appliquée pour fermer les trous et les micro fissures sur la surface des éprouvettes en béton, puis chaque couche composite est mouillée avec la résine puis roulée sur les éprouvettes en béton pour assurer le contact complet entre la couche et les colonnes. Ceci permet de réaliser une couche de l'enveloppe composite PRF et le processus est répété pour les couches suivantes. Avant d'être testés, les éprouvettes enveloppées ont été laissées à une température ambiante pour une durée de deux semaines au minimum pour permettre la polymérisation complète de la résine.

Dans notre travail les éprouvettes sont confinées par 1, 2 et 3 plis de composite/polyester pour chaque type du béton.

### 2. 3. Machine d'essai et instrumentation

La machine utilisée est une presse hydraulique 'CONTROLS\_ Model 50-C55G2/L' dont la capacité est de 3000 kN (figure 2). Les éprouvettes sont disposées entre deux plateaux; le plateau supérieur est mobile en rotation de telle sorte à épouser la forme de la surface de l'éprouvette. L'effort vertical est appliqué, par l'intermédiaire du plateau inférieur, progressivement avec une vitesse de chargement constante jusqu'à la rupture. L'arrêt de la machine n'est pas automatique. Lorsque la force maximale est atteinte, l'affichage s'arrête et la machine est stoppée. Les données sont transmises au système d'acquisition automatique par l'intermédiaire d'une interface. Le raccourcissement axial et l'expansion latérale des échantillons sont mesurés avec un collage des jauges d'extensométries installés au milieu de l'échantillon verticalement pour les mesures des déformations axiales et dans le sens circonférentiel pour les expansions radiales.





Figure 2. Machine de compression utilisée.

## 2. 4. Matériaux composites

Les matériaux composites utilisés dans cette étude sont composés d'un Tissu en Fibre de Verre (TFV – figure 3) avec une résine polyester. Le TFV est un tissu sec bidirectionnel de densité surfacique de  $500 \text{ g/m}^2$  sans sens privilégié de résistance c'est-à-dire 50 % de fibre dans chaque direction. Les éprouvettes sont confinées avec un ; deux et trois couches de tissu en verre (TFV). L'épaisseur nominale du composite (TFV + résine) est d'environ 0,83 mm.



Figure 3. Tissu en fibre de verre bidirectionnel.

## 3. Résultats et discussions

### 3. 1. Efficacité de confinement du béton non renforcé par matériau composite

#### 3. 1. 1. Comportement Charge/temps des éprouvettes non confinées

L'analyse des courbes charge/temps des deux types d'éprouvettes de béton non confiné révèle qu'il n'y a pas une différence notable dans la charge à la rupture, alors que le béton 02 contenant la grille métallique est plus ductile que le béton 00 (voir figure 4).

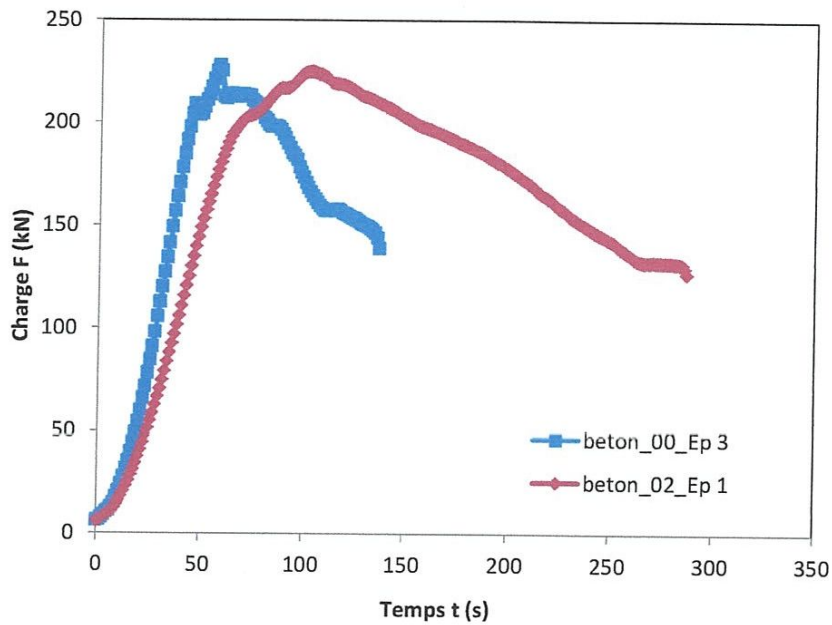


Figure 4. Comportement charge/temps des deux types de béton utilisé.

### 3. 1. 2. Modes d'endommagement et de rupture

Les modes de ruptures et d'endommagement des deux types de béton sont illustré dans la figure 5, la rupture se diffère d'un type à un autre ; par exemple dans le béton 00 l'éprouvette est endommagé par des fissures verticales importantes par contre dans le béton 02 seule la couche externe du béton autour de la grille qui décolle sous l'effet de flambement du gille sous le chargement en compression le béton du noyau est prison en quelques sorte.



Figure 5. Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes de béton témoin (béton\_00\_EP 3) et (béton\_02\_Ep 1).

### 3. 1. 3. Comportement charge/temps des cylindres en béton confinés par PRFV

#### Béton\_00

Les comportements globaux des colonnes présentées dans la figures 5 est comme suit :

- Colonne en béton\_00 témoin (sans grille) chargé jusqu'à rupture ;
- Colonnes en béton\_00 renforcées par collage de 1 à 3 plis d'un tissu bidirectionnel en fibre de verre\_E d'une densité surfacique de  $500 \text{ g/m}^2$  avec un angle d'orientation de  $(0/90)$ .

Le comportement charge/temps des colonnes se déroule en trois phases et dépend fortement de niveau de confinement. La première phase OA, non linéaire c'est la phase élastique qui peut être due au mauvais contact entre l'éprouvette et l'appui supérieur de la machine. Une seconde phase AB quasi linéaire, correspondant au comportement du béton et c'est dans cette phase qu'a lieu la formation des micros fissure dans le béton. La troisième phase BC ou on obtient un changement de rigidité avec un changement de pente plus faible correspondant au comportement de la chemise en composite. Les éprouvettes en béton confinées par 1 pli permettent une rigidification importante sans atteindre un état d'endommagement sérieux. Par contre le confinement par deux plis de PRFV est le meilleure cas la charge augmente jusqu'à 300 % de la valeur du béton, alors que le confinement par 3 plis augmente plus de 266 % de la charge portante du béton témoin.

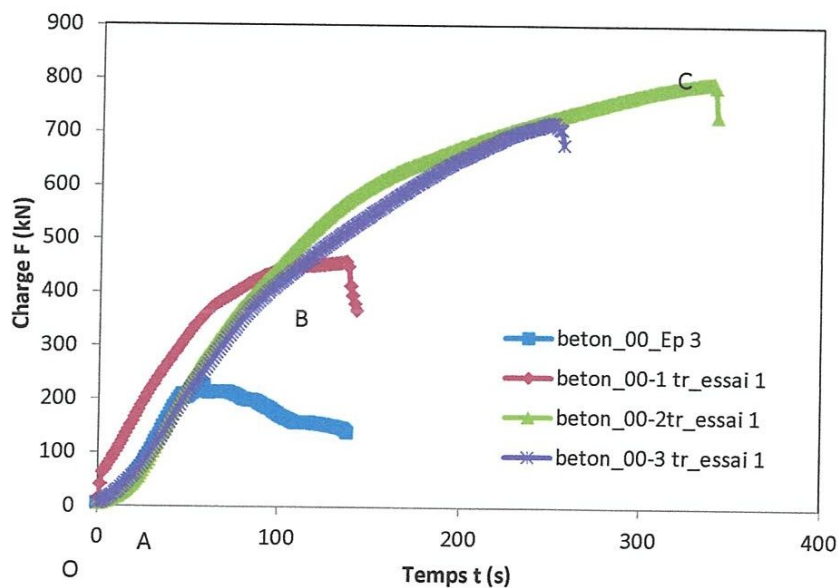
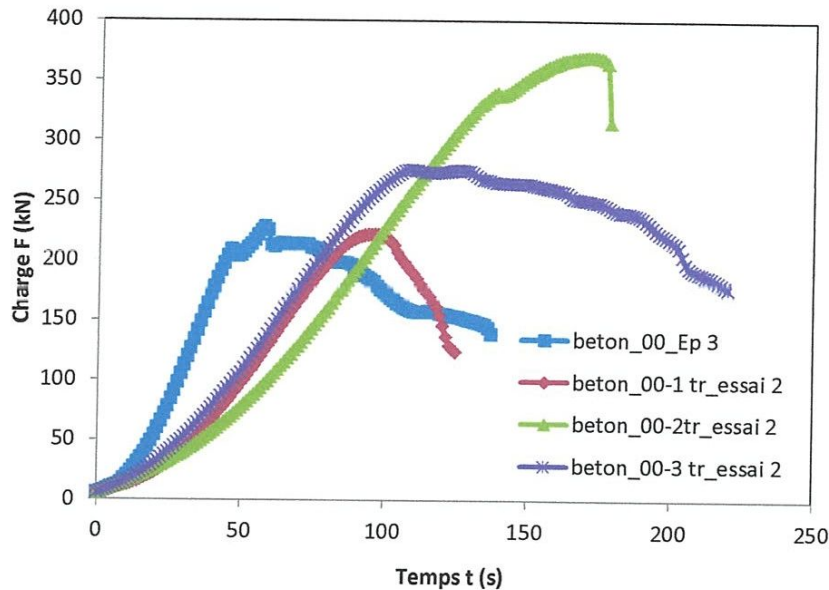


Figure 6. Courbes charge/temps des éprouvettes du béton 00 renforcées par plusieurs couches et comparées avec le béton témoin pour l'essai 1.

La figure 7 illustre les courbes de deuxième chargement sur les mêmes éprouvettes et montre des augmentations plus au moins acceptable de la charge à la rupture comparativement au béton témoin, avec un comportement charge/temps en trois phases similaire à celui déjà décrit pour le premier chargement (figure 6).

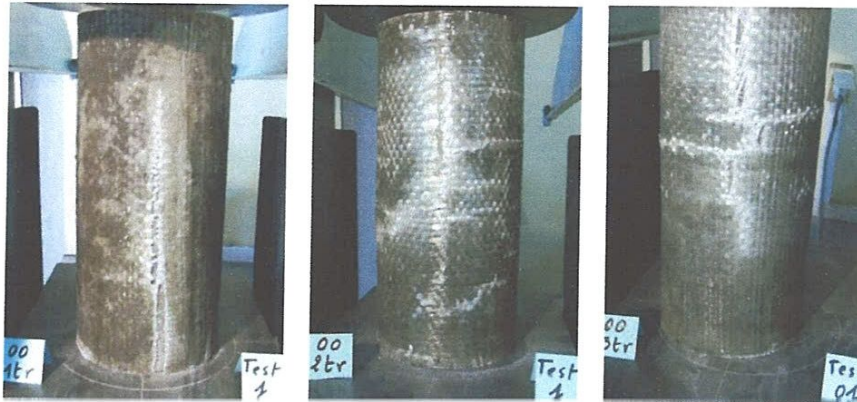


**Figure 7.** Courbes charge/temps des éprouvettes du béton 00 renforcées par plusieurs couches et comparées avec le béton témoin pour l'essai 2.

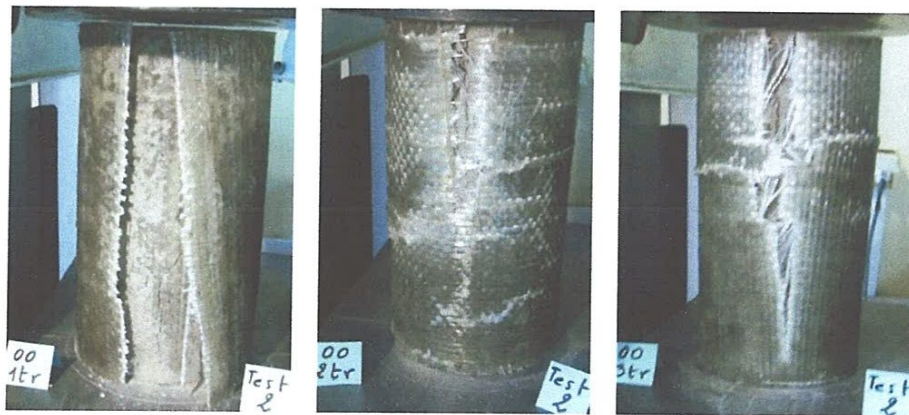
### 3. 1. 4. Modes d'endommagement et faciès de rupture

La figure 8 montre les différents modes de rupture des éprouvettes en béton renforcées par composite PRFV avec un nombre de plis variant de 1 à 3 plis. Dans l'ensemble des cylindres testés, la rupture du béton se produit avant que les composites n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes. La rupture des éprouvettes confinées par PRFV est initiée par des craquements entre les torons verticaux et horizontaux ce qui conduit à leur décollement, ceci est exprimé par des changements de couleur sur les photos des éprouvettes. L'augmentation du chargement provoque la fissuration des torons verticaux qui sont sollicités en compression provoquant ainsi leur flambement, suivie par une fissuration des torons horizontaux sous l'effet du gonflement du béton endommagé à l'intérieur de l'enveloppe composite figure 8(a) (1<sup>er</sup> chargement). Le deuxième chargement est gouverné par la conjugaison des phénomènes d'endommagement déjà cités ce qui mène à la formation d'une

fissure dominante dans la propagation est verticale conduisant à la rupture finale de l'enveloppe composite par déchirement figure 8(b) (2<sup>ème</sup> chargement).



(a) Premier chargement.

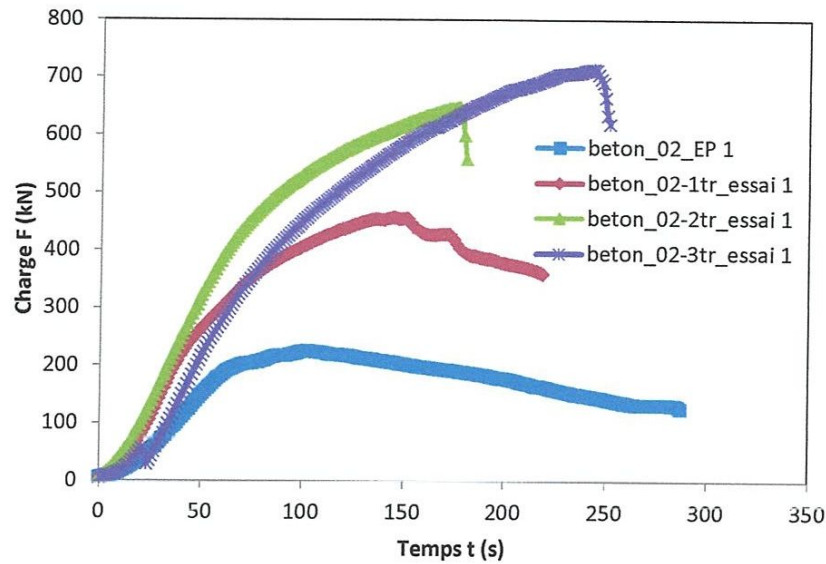


(b) Deuxième chargement

**Figure 8.** Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes en béton\_00 enveloppées par 1, 2 et 3 plis de PRFV respectivement.

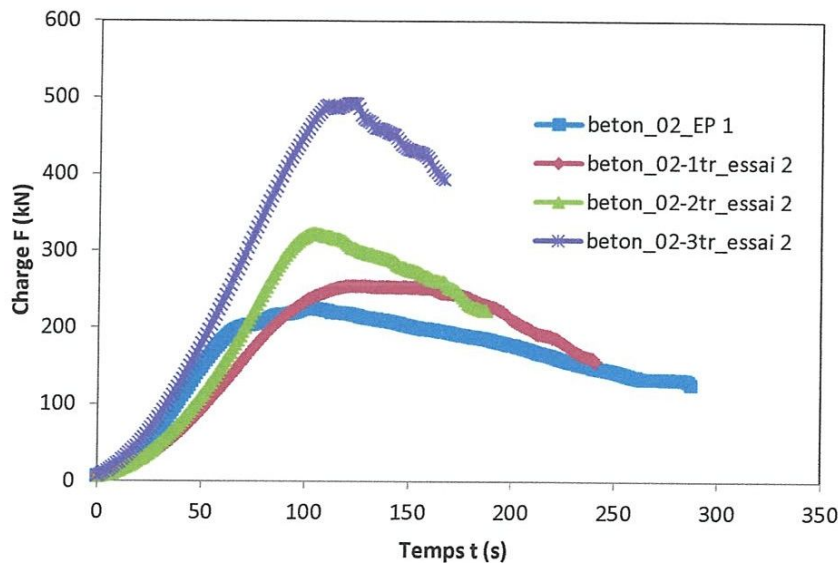
### **Béton\_02**

Les courbes présentées dans la figure 9 montrent le comportement charge/temps des éprouvettes en béton\_02 (renforcées par la grille métallique) confinées par matériau composite fibre de verre et comparé avec le béton témoin. D'après la figure les courbes présentent une rigidité notable et des augmentations de la charge portante importantes telle que 455 kN, 635 kN et 711 kN pour les éprouvettes confinées par 1, 2 et 3 plis du composite respectivement.



**Figure 9.** Courbes charge/temps des éprouvettes en béton armé par la grille 02 et renforcées par plusieurs couches de PRFV comparées avec le béton témoin pour l'essai 1.

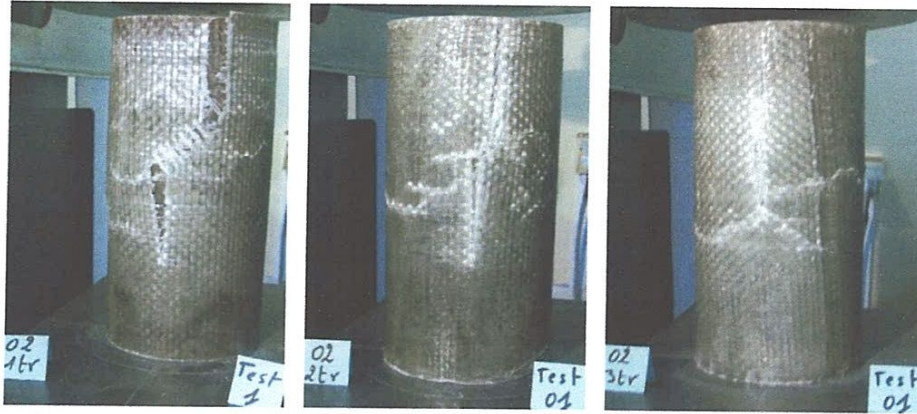
Les courbes charge/temps de deuxième chargement des éprouvettes du béton\_02 confinées par composite de 1 à 3 plis montré dans la figure 10 ne représente qu'une légère augmentation de la charge à la rupture par rapport aux courbes de premier chargement, mais ils restent toujours supérieur par rapport au béton témoin.



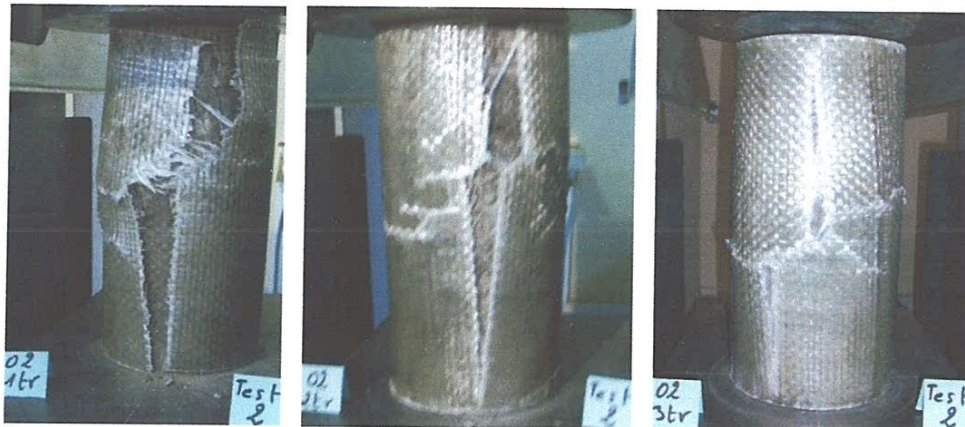
**Figure 10.** Courbes charge/temps des éprouvettes du béton 02 renforcées par plusieurs couches et comparées avec le béton témoin pour l'essai 2.

### 3. 1. 5. Modes d'endommagement et de rupture

Les modes de rupture et d'endommagement des cylindres en béton renforcés par la grille métallique ; et confinées par le matériau composite sont similaires à celles de béton seul. Sauf que la forme de la déchirure de la chemise composite prenne la forme de la lettre Z, alors que pour les cylindres en béton seul la rupture finale est fissure verticale droite. Ce phénomène est causé par le flambement du gille métallique à l'intérieur du béton.



(a) Première chargement.



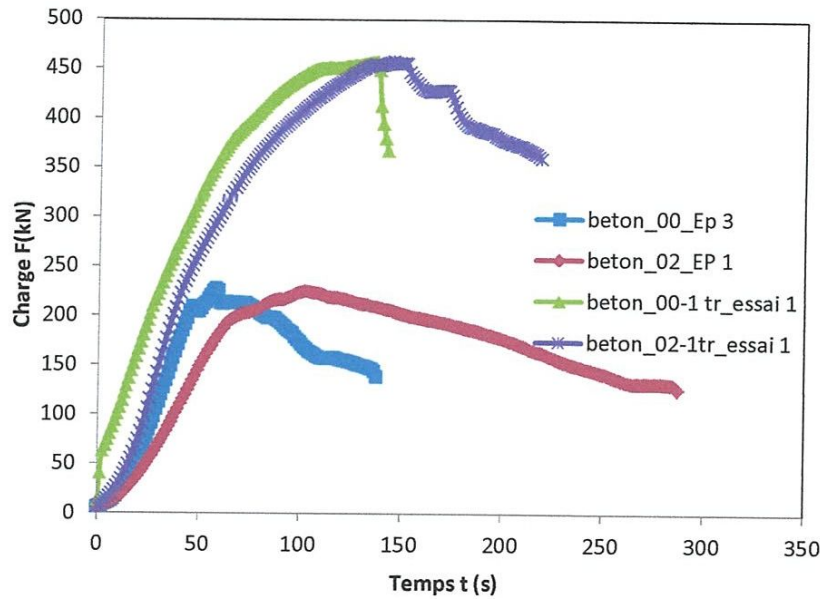
(b) Deuxième chargement.

**Figure 11.** Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes en béton\_02 enveloppées par 1; 2 et 3 plis de PRFV respectivement.

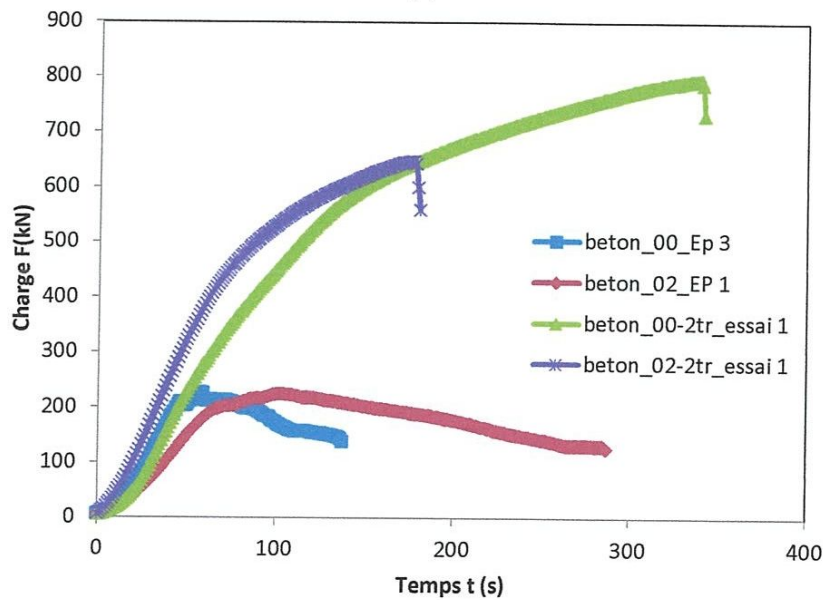
## 4. Comparaison entre les types du béton utilisé

Une comparaison en été faite entre les deux types de béton (béton\_00 et béton\_02) est présentée dans la figure 12. D'après les courbes charge /temps des cylindres confinées par 1 plis de PRFV ; les deux types du béton donne une augmentation de la charge portante presque

égale 453 kN et 458 kN pour le béton\_00 et 02 respectivement (figure 12 (a)). Par contre pour les cylindres confinés par 2 plis de PRFV le béton\_00 est le meilleur comportement, il donne un gain de 321% de la charge à la rupture alors que le béton\_02 ne donne qu'un gain de 260% de la charge portante (figure 12 (b)). Cependant, les courbes des cylindres confinées par 3 plis donnent un comportement presque identique, ainsi la charge est la même 709 kN pour le béton\_02 et 714 kN pour le béton\_00 (voir figure 12 (c)).

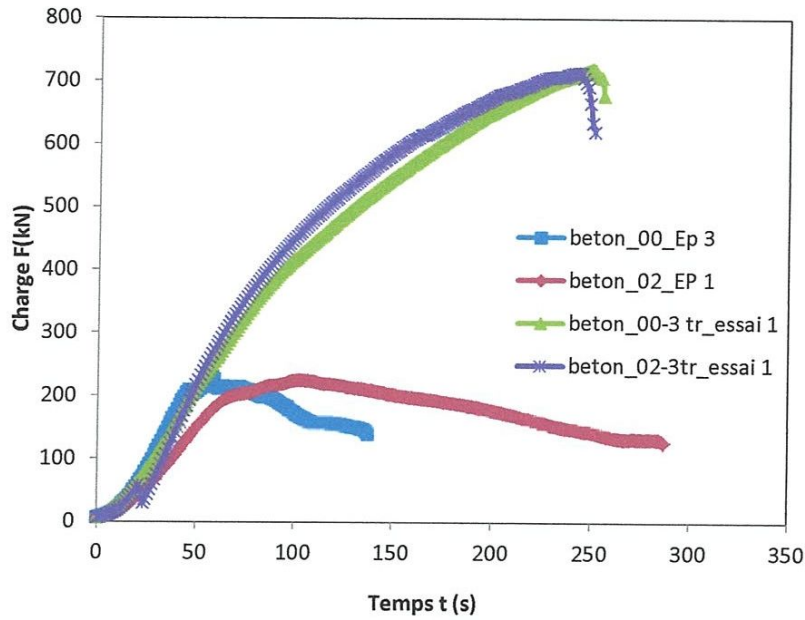


(a)



(b)





(c)

**Figure 12.** Comparaison charge/temps des éprouvettes de béton\_00 et 02 confinées par 1, 2 et 3 plis de PRFV.

## 5. Deuxième série d'essai avec jauges

L'analyse des courbes charge/temps de deuxième types d'éprouvettes de béton non confiné avec et sans grille métallique, sont similaire à celles de la figure 4 sauf que les valeurs de la charges à la rupture sont plus important que celles présidents pour les deux types du béton (voir figure 13).

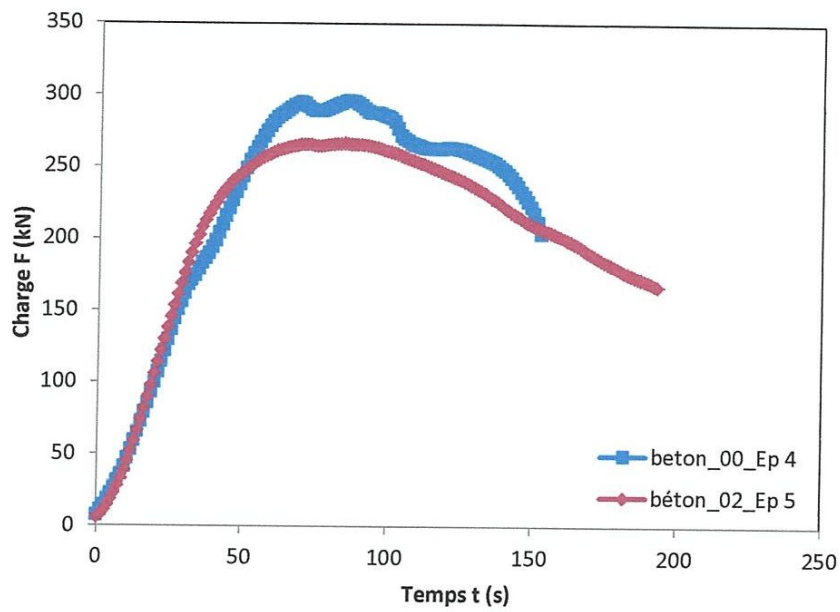


Figure 13. Comportement charge/temps des deux types de béton utilisés.

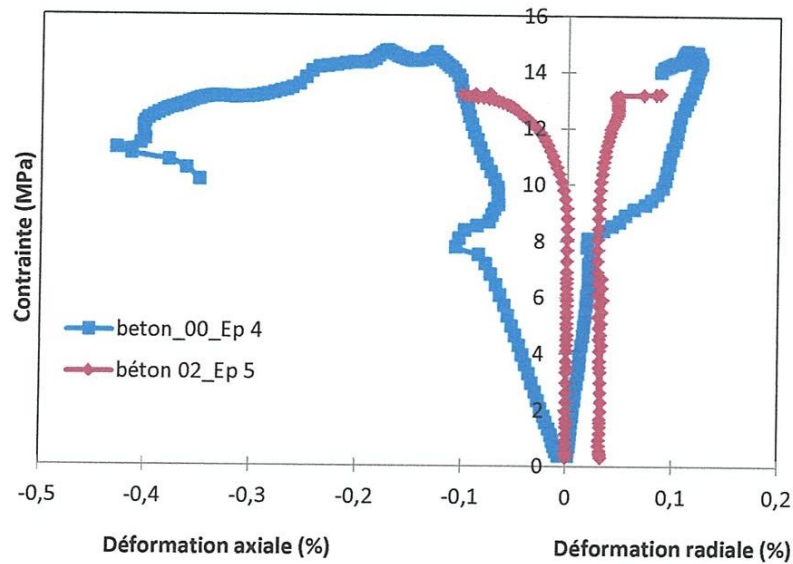


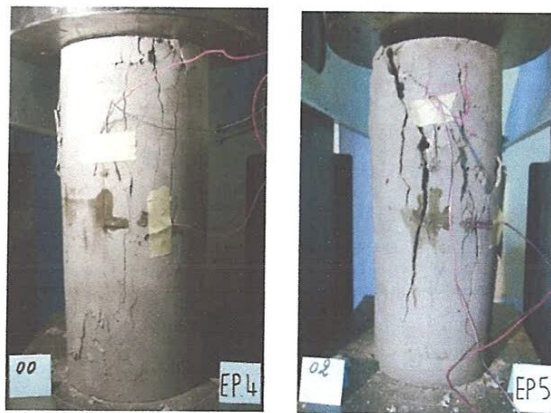
Figure 14. Comportement contrainte/déformation des éprouvettes en béton avec et sans grille.

Le comportement contrainte/déformation obtenu par les jauges d'extensométrie et enregistré à l'aide d'un pond de Weston pour le béton 00 et 02 sont présentés dans la figure 14. Les contraintes et les déformations axiale et radiale du béton seul (béton 00) sont plus grandes

que ceux du béton avec grille (béton 02), ceci et en bonne concordance avec les courbes charge/déplacement (figure 13).

### 5. 1. Modes d'endommagement et de rupture.

Les modes de ruptures et d'endommagement des deux types de béton sont illustrés dans la figure 15, elles sont similaires à celles de la figure 5. D'après les photos présentées les modes d'endommagement se diffèrent d'un type de béton à un autre ; en vois bien le béton 00 s'endommage par des fissures plus au moins importantes à travers tous le corps du béton. Mais dans le cas du béton 02 la rupture s'effectuer par un décollement et un arrachement du béton autour de la grille.



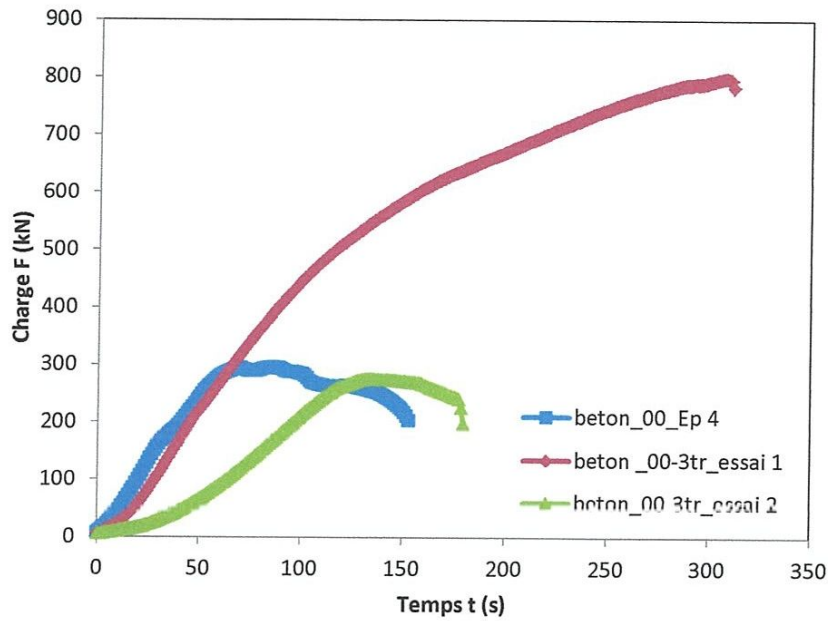
**Figure 15.** Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes de béton non confiné (béton\_00\_EP 4) et (béton\_02\_Ep 5) avec jauges.

## 5. 2. Efficacité du renforcement du béton par matériaux composites

### 5. 2. 1. Comportement charge/temps des cylindres en béton confinés

#### *Béton\_00*

Les courbes présentées dans la figure 16 montrent le comportement charge/temps pour le premier et le deuxième chargement des éprouvettes en béton\_00 confinées par un composite stratifié contenant 3 plis de fibre de verre/Polyester.

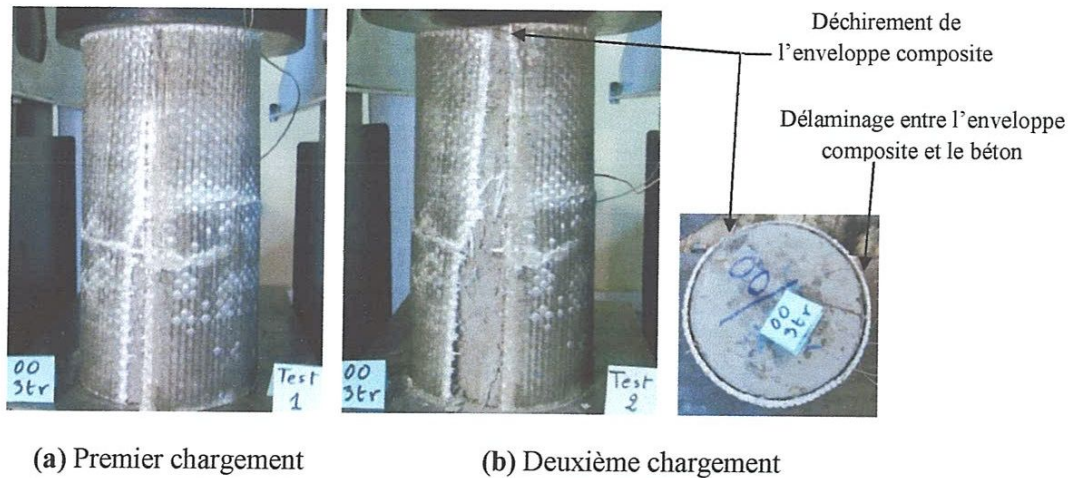


**Figure 16.** Comportement charge/temps de l'essai 1 et 2 des éprouvettes de béton témoin (béton\_00\_EP 4) et celles renforcées par 3 plis verre/polyester.

Le premier essai montre une augmentation considérable (environ 3 fois plus importante) de la charge et du temps à la rupture avec une rigidité équivalente au béton non confiné. Alors que le deuxième essai se caractérise par une charge à la rupture équivalente à celle du béton non confiné avec une ductilité plus importante.

### 5. 2. 2. Modes d'endommagement et faciès de rupture des éprouvettes

La figure 17 montre les différents modes de rupture des éprouvettes en béton 00 renforcées par 3 plis en composite PRFV. La rupture du béton se produit avant que le composite n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes et la rupture se caractérise par une fissure verticale créée du bas vers le haut. Le deuxième chargement conduit à la conjugaison des phénomènes d'endommagement déjà cités conduit à la formation d'une fissure dominante dans la propagation est verticale menant au déchirement complète de l'enveloppe composite (figure 17 (b)).



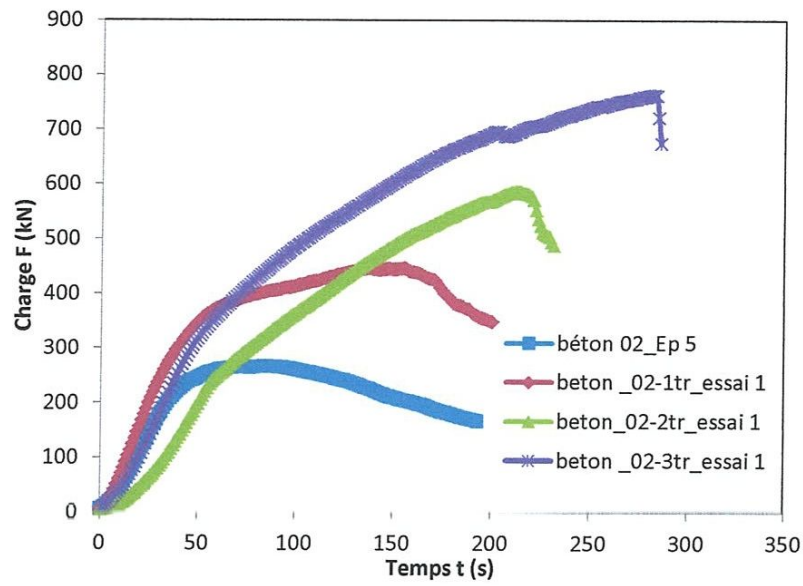
**Figure 17.** Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes en béton\_00 enveloppées par 3 plis de PRFV respectivement Avec jauges.

### 5. 3. Effet de la grille métallique sur le comportement des cylindres confinés

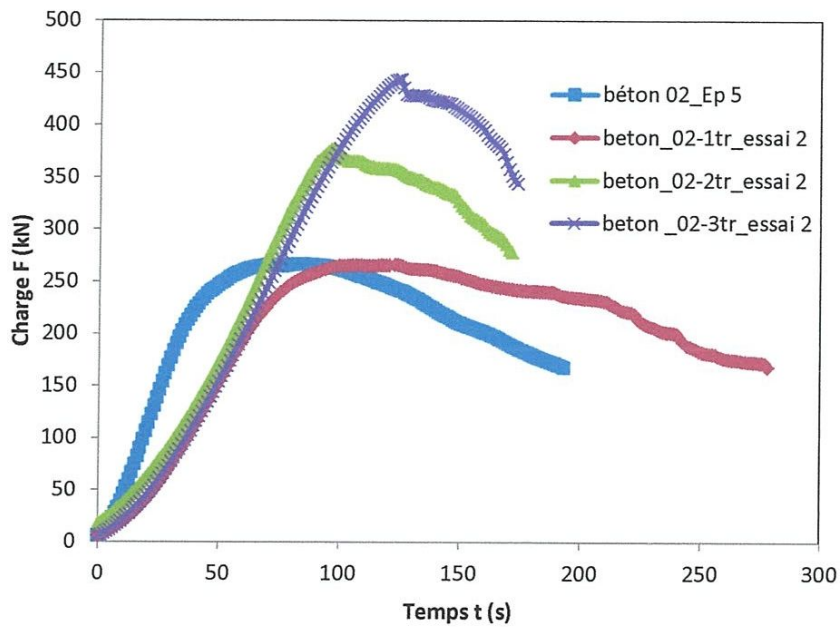
#### *Béton\_02*

Les courbes présentées dans la figure 18 montrent le comportement charge/temps des éprouvettes en béton\_02 (renforcées par la grille métallique) confinées par matériau composite en fibre de verre et comparé avec le béton témoin. D'après la figure les courbes présentent des augmentations de la charge portante notable telle que 482 kN, 586 kN et 760 kN pour les éprouvettes confinées par 1, 2 et 3 plis respectivement. La figure montre aussi qu'avec l'augmentation du nombre des plis la charge à la rupture augmente, avec une dispersion notée dans la zone 2 qui est due au béton et non pas au composite (figure 18 (a)).

Par le deuxième chargement des éprouvettes les courbes présentent une ductilité notable dans les trois niveaux de confinement avec une dégradation de charge portante sont enregistrés.



(a) Premier chargement

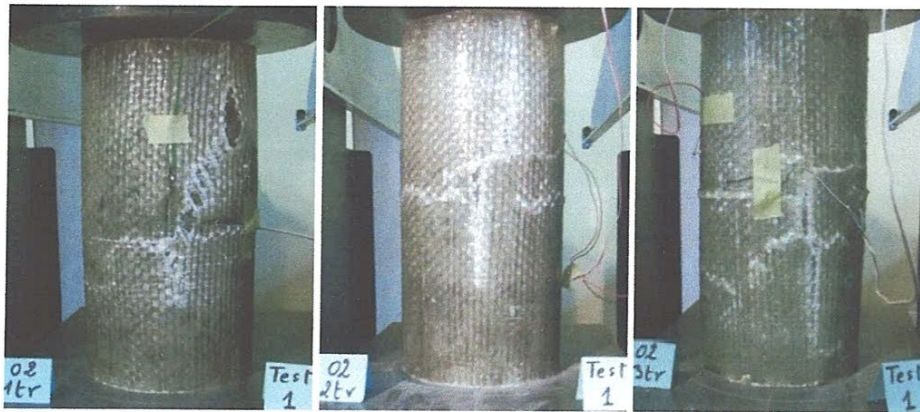


(b) Deuxième chargement

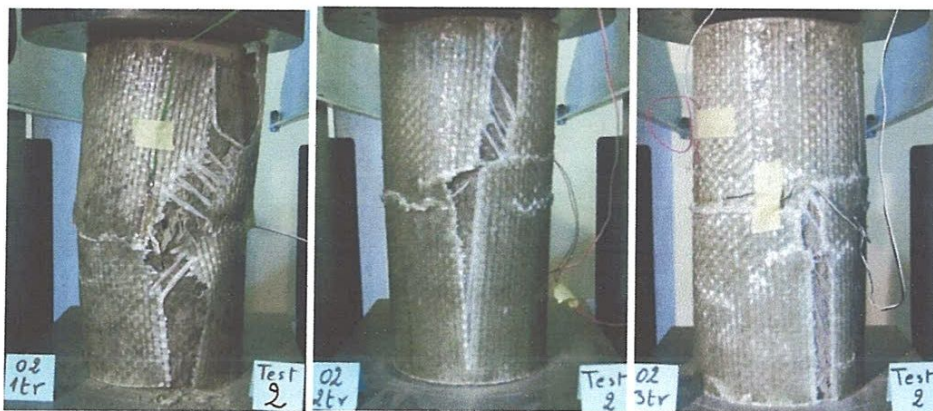
**Figure 19.** Courbes charge/temps des éprouvettes en béton 02 renforcées par plusieurs couches et comparées avec le béton témoin.

#### 5. 4. Modes d'endommagement et de rupture

Les modes de rupture et d'endommagement des cylindres en béton\_02 renforcées par la grille métallique; et confinées par PRFV sont similaires à celles de la figure 11.



(a) Premier chargement



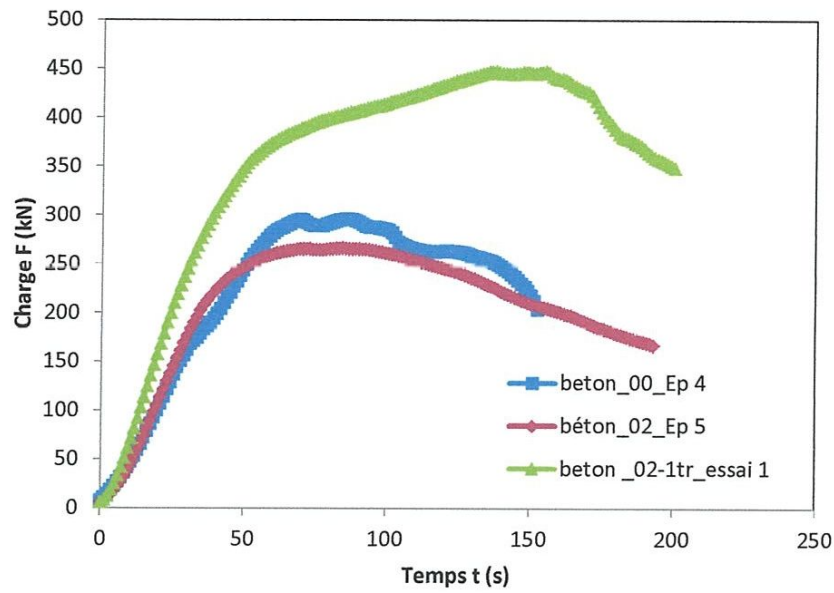
(b) Deuxième chargement

**Figure 20.** Modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes en béton\_02 enveloppées par 1; 2 et 3 plis de PRFV respectivement Avec jauges.

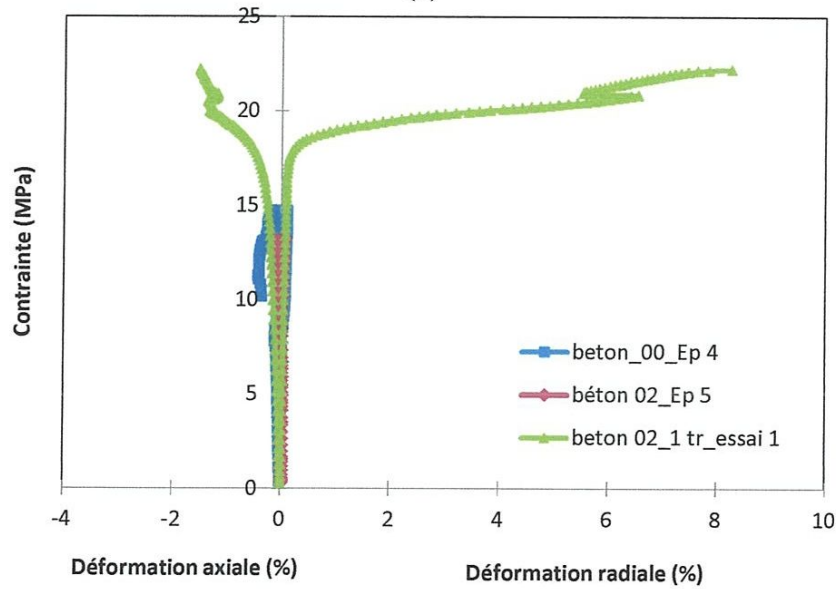
#### 6. Comparaison entre les types du béton

La figure 21 présenté une comparaison entre les deux types de béton (béton\_00 et béton\_02) pour les deux comportements charge/temps et contrainte/déformation. D'après les courbes charge /temps des cylindres confinées par 1 plis de PRFV. En remarque que le confinement par ce dernier donne plus de rigidité au l'éprouvette et des gains significative en

terme de la charge à la rupture (voir figure 21 (a)) ; ainsi en résistance et en déformation axiale et radiale (voir figure 21 (b)) soit les valeurs: plus de 169 % ; 1500 % et 10312 % respectivement pour le béton\_02.



(a)



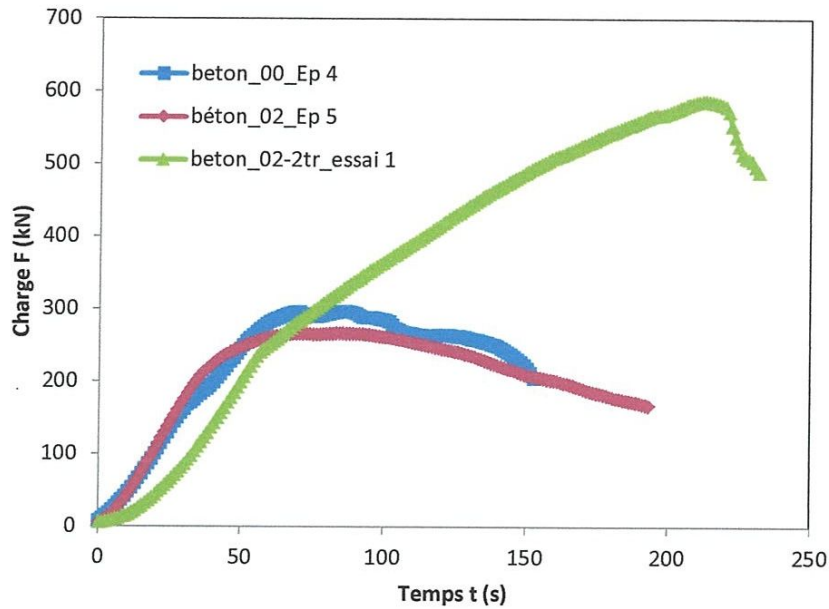
(b)

**Figure 21.** Comparaison des résultats en comportements charge/temps et contrainte/déformation des éprouvettes en béton\_00 et 02 confinées par 1 pli de PRFV.

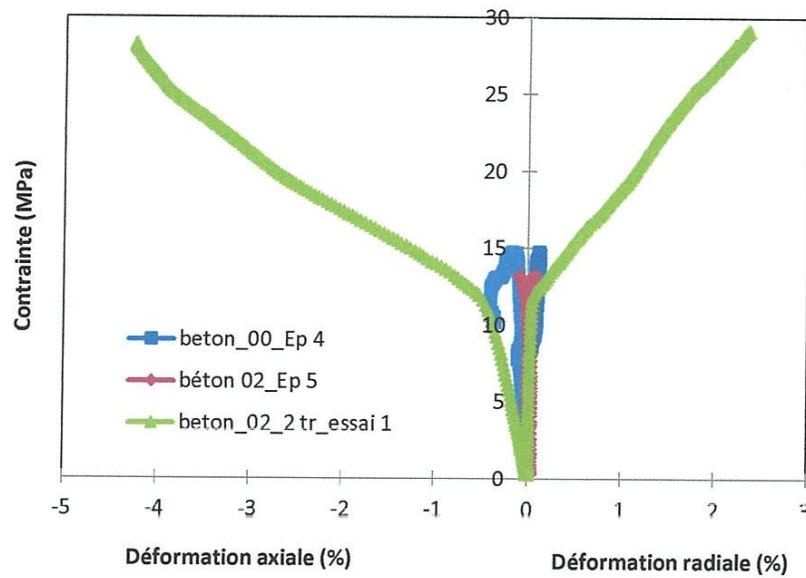


Le comportement contrainte/déformation se caractérise par trois zones ; la première correspond au comportement du corps du béton ; la deuxième est une zone de transition qui se forme après le pic du béton et la troisième zone correspond au comportement de l'enveloppe composite.

Les cylindres confinés par 2 plis de PRFV sont montrés dans la figure 22, le comportement reste toujours plus important mais avec une ductilité notable par rapport aux éprouvettes confinées par 1 pli. Avec une augmentation de la charge à la rupture de 220% de la charge du béton témoin\_02 (figure 22 (a)). Alors que la résistance et les déformations radiale et axiale sont augmenté d'une manière significative soit que: 233 %; 2937 % et 5312 % respectivement (figure 22 (b)).



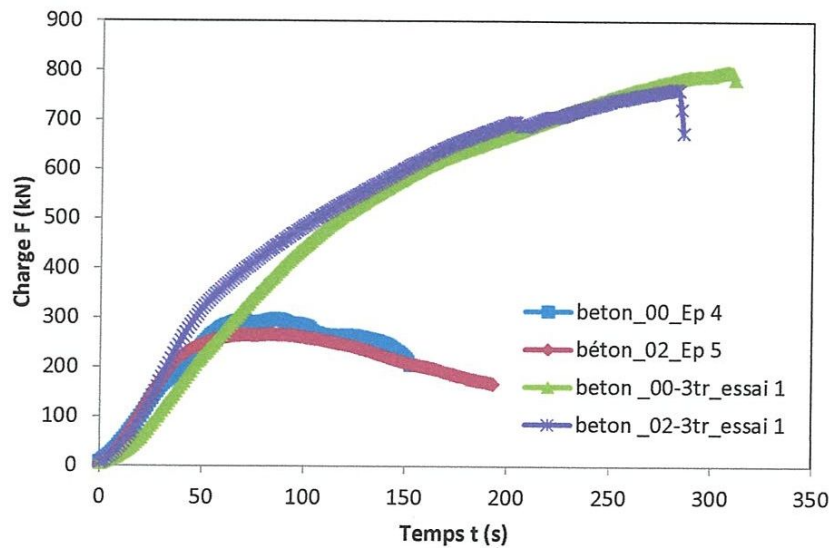
(a)



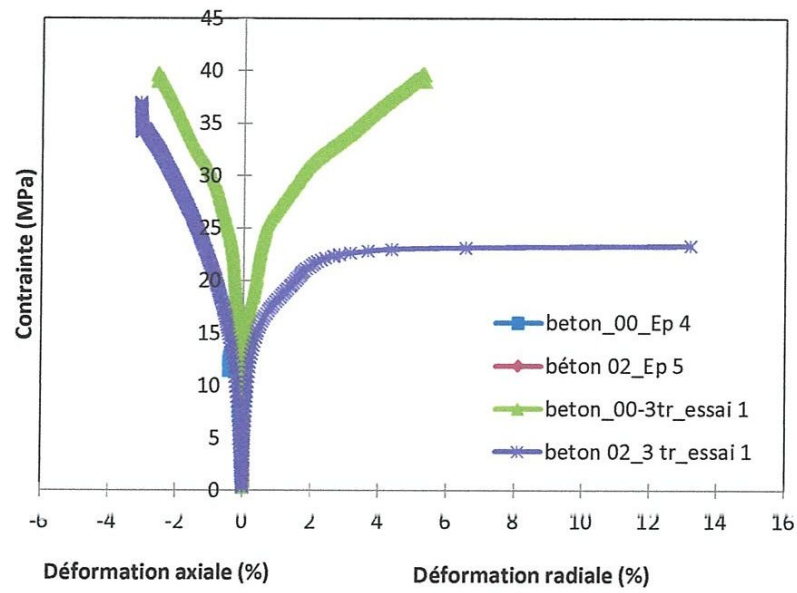
(b)

**Figure 22.** Comparaison des résultats en comportements charge/temps et contrainte /déformation des éprouvettes en béton\_00 et 02 confinées par 2 plis de PRFV.

Les comportements de la figure 23 présente une comparaison des résultats des cylindres en béton\_00 et 02 confinées par 3 plis du composite. Les courbes sont similaires à celui de la figure 21 sauf qu'un palier est caractérisé la troisième phase pour le béton\_02 confinées par 3 plis.



(a)



(b)

**Figure 23.** Comparaison des résultats en comportements charge/temps et contrainte /déformation des éprouvettes en béton\_00 et 02 confinées par 3 plis de PRFV.

## Conclusion

Le renforcement en PRF peut apporter des gains significatifs aux structures endommagées lors de la réparation. En effet, le composite peut:

- compenser la perte de rigidité des éprouvettes due à la fissuration du béton en compression ;
- augmenter la capacité portante des éprouvettes en exploitant la bonne résistance en compression du béton ;
- limiter l'ouverture excessive des fissures. Il rend la structure moins fragile et par conséquent le mode de ruine de la structure est éventuellement changé ;
- Après rupture du béton 02, l'endommagement des éprouvettes recouvertes par PRF est initié par un délaminage entre les torons verticaux et les torons horizontaux et ceci est dû au flambement des torons verticaux sous l'effet du chargement et de la grille métallique ce phénomène est causé par le flambement de cette dernière à l'intérieur du béton. Avec l'augmentation du chargement, les fissures se développent pour obtenir des ruptures horizontales au niveau des torons verticaux. Cependant, la ruine finale des éprouvettes est obtenue par la rupture des torons horizontaux et la formation d'une fissure verticale sous forme de Z ;
- L'utilisation du PRF donne une bonne 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 des cylindres ;
- L'augmentation du niveau de confinement a peu d'effet sur la pente de la portion initiale (zone élastique) des courbes contrainte/déformations, mais a un effet significatif sur la pente de la seconde portion (zone plastique).

## Références

- [1] Bakis, C. E.; Bank, L. C., ASCE;F., Brown, V. L., ASCE, M.; Cosenza, E.; Davalos, J. F., ASCE, A.M.; Lesko; J. J., Machida, A.; Rizkalla, S. H., ASCE, F.; and Triantafillou, T. C., ASCE, M. (2002), Fiber - Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review, *Journal of composites for construction*, **6** (2), 73-87.
- [2] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., Li, M. W., (1994), Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fibre composite straps, *Structural Journal ACI*, **91**(4), 434-47.
- [3] Mirmiran, A., Shahawy, M., (1990), Behaviour of concrete columns confined by fibre composites, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **123**(5), 583-90.
- [4] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M., (1998), Model of concrete confined by fibre composites, *Journal of Structural Engineering ASCE*; **124**(9), 1025-31.
- [5] Harries, K. A., Kestner, J., Pessiki, S., Sause, R., Ricles, J., (1998), Axial behaviour of reinforced concrete columns retrofit with FRPC jackets, In: *Second International Conference on Composites in Infrastructure*, Tucson, pp. 411-25.
- [6] Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., Li, M. W. (1994), Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fibre composite straps. *Structural Journal ACI*; **91**(4), 434-47.
- [7] Mirmiran, A., Shahawy, M. (1990), Behaviour of concrete columns confined by fibre composites, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **123**(5), 583-90.
- [8] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M. (1998), Model of concrete confined by fibre composites, *Journal of Structural Engineering ASCE*; **124**(9), 1025-31.
- [9] Granata, P. J., Parvin, A. (2001), An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connections. *Journal of Composite Structures*, **53**, 163-171.
- [10] Hadi, M. N. S. (2007), Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading, *journal of Composite Structures*, **77**, 92-96.
- [11] Tamuzs, V., Valdmans, V., Tefers, R., Gylltoft, K. (2008), Stability analysis of CFRP-wrapped concrete columns strengthened with external longitudinal CFRP sheets, *Journal of Mechanics of Composite Materials*, **44** N° 3, 199-208.

- [12] Benzaid, R., Chikh, N-E., Mesbah, H., 2009, Study of the compressive behavior of short concrete columns confined by fiber reinforced composite, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34, N°1B, pp.15-26.
- [13] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman, T., (2000), Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns, *Journal of Composites Part B*, 31, N°.6, pp.471-480.
- [14] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., Taerwe, L., (2005), Axial load behaviour of large-scale columns confined with fibre-reinforced polymer composites, *ACI Structural Journal* 102 N°.2, 258-267.

## **RESUME**

*Le confinement de colonne par recouvrement en utilisant la technique de collage d'un renfort en matériaux composites est une nouvelle technique employée dans le domaine de la réparation et de restauration de structures en béton. Dans ce travail est présentée une étude expérimentale menée sur une première série de colonnes en béton renforcé par PRFV à base de fibres de verre\_E et une résine polyester avec un nombre de plis varie de 1 à 3 plis puis sollicitée en compression uniaxiale. Les résultats obtenus montrent bien que les colonnes confinées permettent une augmentation plus de 200 % de la charge à la rupture par compression. D'autre part, une deuxième série de colonnes en béton renforcées par une grille métallique puis confinées par le même nombre de plis de PRFV que précédemment et sollicitée en compression uniaxiale. Par comparaison aux colonnes non renforcées (béton sans grille), les colonnes renforcées et confinées par les matériaux composites collés se caractérisent par une augmentation divergente de la rigidité, de l'effort de ruine sensiblement supérieur ainsi qu'une ductilité nettement accrue. Il est important de signaler que le nombre de plis elle est un grand influence sur le comportement des colonnes confinées et les mécanismes d'endommagement des colonnes dépendent fortement de type du béton (armé ou non).*

**MOTS-CLÉS :** *Colonne en béton, Compression, Renforcement des colonnes, Matériaux composites.*