



## Thèse de Doctorat

Présentée à l'Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : **Génie Mécanique**  
Spécialité : **Génie Mécanique**

Présenté par : **BOUCHELAGHEM Hafida**

---

### Etude du renforcement des colonnes en béton par des recouvrements en matériaux composites.

---

#### JURY

<b>Président :</b>	Pr. Mustafa LAHMAR	Université du 8 Mai 1945 Guelma
<b>Encadreur :</b>	Pr. Abderrezak BEZAZI	Université du 8 Mai 1945 Guelma
<b>Examineur :</b>	Pr. Bachir REDJEL	Université Badji Mokhtar Annaba
<b>Examineur :</b>	Pr. El Abbes ADDA BEDIA	Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès
<b>Examineur :</b>	Pr. Hamma ZEDIRA	Université Abbès Laghrour Khanchela

Mai 2013

---

## *Remerciement & Dédicace*

---





# Remerciement

---

*"Al hamdou lillah" : je remercie Dieu de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

Je tiens à remercier vivement mon directeur du thèse, Monsieur **BEZAZI Abdelrezak**, Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma pour ses conseils et sa disponibilité nécessaire à l'encadrement de cette thèse, pour son aide qu'il a apporté durant la réalisation des essais, pour son travail très consciencieux, son attention, sa patience, et son humanité et surtout son sens du bon travail a énormément contribué à l'aboutissement de mes travaux. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je souhaite remercier très sincèrement les membres du jury et je suis honorée qu'ils aient accepté de consacrer leur temps et leur expertise à ces travaux. Je remercie en particulier, le professeur **Mustafa LAHMAR** de l'université 8 Mai 1945 Guelma qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Je dois remercier, Messieurs **Bachir REDJEL** professeur à l'université Badji Mokhtar de Annaba, **El Abbès ADDA BEDIA** professeur à l'université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, **Hamma ZEDIRA** professeur à l'université Abbès Laghrour de Khanchela d'avoir accepté d'examiner mon travail et de se déplacer pour nous honorer de leur présence en participant au jury de ma thèse.

Mes sincères remerciements à Monsieur **Fabrizio SCARPA** Professeur à l'université de Bristol. Pour son aide et ses conseils précieux.

Je remercie Monsieur *Mohamed GUENFOUD* professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma et directeur du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH) de nous avoir facilité l'accès et l'utilisation de la machine d'essai.

Je remercie également la société algérienne **GESI-BAT** pour la préparation des séries de colonnes en béton.

Mes vifs remerciements s'adressent également au *Dr. Mouhamed Cherif DJAMAA*, chef du département de Génie Mécanique qui m'a permis de bénéficier des moyens du département.

Je remercie tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

Je remercie tout les personnels technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma en particulièrement *Mr: Mohamed AIB, Abed El-Aziz MADI, Guedouz Abdallah, etc.*

Un Merci éternel, à mes parents, mes frères et ma sœur qui me doivent beaucoup par leurs encouragements et leur assistance aussi bien matérielle que morale qui m'ont permis de réaliser cette thèse. Ce remerciement ne représente que le peu de ce que vous avez donné.

Merci à tous les personnes, qui m'ont aidé de pré ou de loin dans la réalisation de ces travaux de recherche.

# Dédicace

---



*A*

*Mes chers parents*

*Mes frères et ma sœur*

*Mon enfant.*

*Je ne vous remercierai jamais assez pour votre soutien et vos encouragements tout le long de mes études.*

---

# *Résumés*

---



# Résumé

---

Le renforcement des colonnes en béton par recouvrement en matériaux composites est une technique très efficace pour leur comportement structural. L'actuel travail est une étude expérimentale réalisée pour étudier le comportement mécanique, sous compression uniaxiale produit par l'effet du confinement des éprouvettes, sous forme de colonnes cylindrique courtes, confinées par matériaux composites à base de fibres de verre "PRFV" et de fibres de carbone "PRFC". Les fibres de verre utilisés sont des tissus bidirectionnels de densité surfacique de 500 et 300 g/m<sup>2</sup>, et un Mat à fibre courtes (300 g/m<sup>2</sup>), alors que les fibres de carbone sont sous forme d'une nappe unidirectionnelle (230 g/m<sup>2</sup>). Le but de cette étude est de mettre en évidence l'efficacité du renforcement en PRF par l'étude de l'influence du nombre de plis (l'épaisseur) du PRF, du type de renfort (verre, carbone et hybride), de l'orientation des fibres et de l'effet de la ruptures prématurée des éprouvettes sur leur comportement et endommagement en compression uni-axiale. Des jauges d'extensométrie sont collées sur les surfaces externes de l'enveloppe composite dans le but de mesurer les déformations axiales et radiales par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone. Les résultats obtenus montrent bien que les colonnes renforcées par des plis "PRFC" permettent une augmentation appréciable de la contrainte à la rupture en compression comparativement aux colonnes renforcées par des plis "PRFV". Les gains en résistances à la compression et en déformations axiales et radiales du béton confiné avec les différents PRF utilisés sont identifier et quantifier. Il est important de signaler aussi que les mécanismes d'endommagement des colonnes recouvertes par une enveloppe composite dépendent fortement du type de renfort (fibres). De plus, le confinement des éprouvettes préchargées, à des niveaux de 30, 45 et 90 %, par "PRFV" donne des gains significatifs en résistance et en déformations axiale et radiale comparativement aux éprouvettes non confinées indépendamment des niveaux de préchargement.

**Mots Clés :** PRF; colonnes en béton; renforcement; réhabilitation; compression uniaxiale; matériaux composites, orientations des fibres.

# Abstract

---

The reinforcement by covering the concrete columns with composite (Fibre Reinforced Polymer FRP) materials is an effective technique for their structural behaviour. The current work is an experimental study realized to investigate the mechanical behaviour under uniaxial loading produces by the effect of the confined of the specimens (short cylindrical columns) wrapped with glass fibres “GFRP” or carbon fibres “CFRP”. The glass fibres used are bidirectional fabrics of surface density of 500 and 300 g/m<sup>2</sup>, and a Mat with short fibres (300 g/m<sup>2</sup>), whereas the carbon fibres is an unidirectional (230 g/m<sup>2</sup>). The goal of this study is to highlight the efficiency of FRP reinforcement by the examination of the influence of the FRP layers number (thickness), reinforcement type (glass, carbon and hybrid), fibre orientations and the effect of the premature failure specimens on their behaviour and damage under uni-axial loading. Strain gages are stuck on external surfaces of the composite jacket with an aim of measuring the axial and radial strains using a Wheatstone bridge. The results obtained show well that the columns reinforced by CFRP layers allow an appreciable increase in the stress to failure compared to the ones reinforced by GFRP under compression loading. The benefits in compressive strengths and the axial and radial stains of the concrete confined with the various composite materials used are identified and quantified. It is also important to notice that the damage mechanisms of the columns wrapped by a composite jacket strongly depend on the reinforcement fibre types. Moreover, the specimen preloaded at 30, 45 and 90 % and wrapped by GFRP gives significant profits in strength and axial and radial strains compared to the not confined specimens independently of the preloading levels.

**Key words:** FRP, concrete columns, reinforcement, rehabilitation, uniaxial compression, composite materials, fibre orientations.

إن تقوية أعمدة الخرسانة بواسطة تغليفها بالمواد المركبة المعززة بالألياف المسماة PRF هي تقنية من أهم إيجابيات PRF هي النسبة العالية بين الكتلة و الم خصائصها الجيدة ضد الإجهاد صفاتها المضادة للصدأ و سهولة استعمالها. العمل المقدم هو دراسة تجريبية أديت من أجل دراسة السلوك الميكانيكي تحت الضغط المحوري الناتج عن تأثير تغليف العينات التي على شكل أعمدة قصيرة مغلفة بالمواد المركبة من ألياف الزجاج «PRFV» و ألياف الكربون «PRFC». ألياف الزجاج المستعملة هي عبارة عن أنسجة ثنائية المحاور ذات كثافة سطحية تساوي  $500 / 300^2 / \text{Mat}^2$  مكون من ألياف قصيرة ذات كثافة سطحية تساوي  $300 / 2^2$  بينما ألياف الكربون هي عبارة عن شريط  $230 / 2^2$ . الهدف من هذه الدراسة هو إيضاح فعالية التقوية ب PRF تأثير ( ) «PRF» نوع ألياف التقوية ( هجين) اتجاه الألياف و أثر التشققات المسبقة للعينات على السلوك البنائي. gauges d'extensometrie الخارجي للغلاف المركب من أجل قياس التشوه المحوري والقطري بواسطة جسر ويند "Wheatstone". هذه القياسات وجهت إلى جهاز كمبيوتر من خلال بطاقة اكتساب. النتائج المحصل عليها تبرهن جيدا أن الأعمدة المقواة بطبقات «PRFC» تمكن من زيادة معتبرة في مقاومة الاجهادات عند «PRFV». الزيادة في المقاومة عند الضغط و التشوهات المحورية و القطرية للخرسانة المغلفة ب مواد مركبة مختلفة قد وضحت و حددت. من المهم الإشارة إلى أن آلية الأضرار في الأعمدة المغلفة بغلاف مركب مرتبطة جيدا بنوع (الألياف). و أيضا أن حصر العينات المسبقة الشحن «PRF» يعطي أرباح معتبرة في المقاومة و التشوهات المحورية و القطرية مقارنة مع العينات الغير مغلفة بغض النظر عن مستوى الشحن المسبق.

اتجاهات الألياف.

تقوية ترميم

الكلمات المفتاح: PRF



---

# *Table des matières*

---





# Table des matières

---

Remerciement.....	02
Dédicace.....	04
Résumé.....	06
Table des matières.....	10
Introduction générale.....	17

## CHAPITRE I

### Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	19
I.2 Définition du Béton.....	20
I.3 Principales manifestations des dégradations du béton.....	21
I.3.1 Les agressions physiques.....	21
❖ <i>Les cycles de gel-dégel et gélivité</i> .....	21
❖ <i>Désagrégation</i> .....	22
❖ <i>Écaillage</i> .....	22
❖ <i>Faïençage et réseau de fissures</i> .....	22
I.3.2 Les agressions mécaniques.....	23
❖ <i>Délaminage</i> .....	23
❖ <i>Éclatement ou désintégration</i> .....	23
I.3.3 Les agressions chimiques sur le béton.....	24
❖ <i>La carbonatation</i> .....	24
❖ <i>Corrosion de l'armature</i> .....	24
❖ <i>Efflorescence</i> .....	25
❖ <i>L'attaque des chlorures</i> .....	26
❖ <i>L'attaque sulfurique</i> .....	26
❖ <i>L'alcali-réaction (ou cancer du béton)</i> .....	26
I.4 Emplacement & Description des différents types de fissures.....	27
I.5 Techniques de réparation des infrastructures dégradées.....	29

❖	<i>Protection</i> .....	29
❖	<i>Réparation</i> .....	29
❖	<i>Renforcement</i> .....	29
I.6	Application des FRP.....	30
I.7	Matériaux composites.....	32
I.7.1	Définition.....	32
I.7.2	Les renforts.....	33
I.7.2.1	Les fibres de verre.....	36
I.7.2.2.	Les fibres de carbone.....	38
I.7.3	Les matrices.....	38
I.7.3.1	Résines Thermodurcissables (TD).....	38
I.7.3.2	Résines Thermoplastiques (TP).....	38
I.7.4	Les charges et les additifs.....	39
I.7. 5	Fabrication des composites.....	39
I.8	Différences par rapport aux matériaux métalliques.....	42
I.9	Mise en œuvre des FRP.....	42
I.9. 1	Système de stratification in-situ.....	43
I.9. 2	Système d'enroulement filamenteux.....	44
I.9. 3	Système préfabriqué (plaque préfabriquée).....	45
I.10	Propriétés mécaniques du béton.....	46
I.10. 1	Résistance à la compression.....	46
I.10. 2	Comportement en traction.....	46
I.11	Comparaison des techniques de réparation.....	47
I.12	Etat d'art.....	47
I.12.1	Étude des systèmes de renforcement des colonnes en béton par composites en polymères.....	47
I.12.2	Comportement des colonnes en béton renforcées par PRF sous chargement excentrique en compression.....	49
I.12.3	Comportement des cylindres en béton confinés par PRFC avec un renforcement en acier à la compression.....	50
I.12.4	Renforcement des colonnes courtes en béton avec PRFC.....	53
I.13	Position du problème et technique adoptés.....	57

## Chapitre II

### Matériaux D'étude, Caractérisation et Techniques Expérimentales

II.1 Introduction.....	60
II.2 Présentation des matériaux de l'étude.....	60
II.3 Propriétés des constituants du composite.....	61
II.3.1 Résine polyester.....	61
II.3.2 Fibres de verre.....	62
II.3.3 Fibres de carbone.....	63
II.3.4 Résine époxyde.....	63
II.3.5 Les différents empilements.....	64
II.4 Caractérisation des matériaux de PRFV utilisés.....	65
II.4.1 Essai de traction.....	65
II.4.2 Préparation des plaques stratifiées en matériaux composites.....	65
II.4.3 Machine d'essai de traction.....	66
II.5 Résultats et discussion.....	66
II.5.1 Résultats des essais de traction.....	66
II.5.2 Modes de ruptures.....	71
II.6 Essai de compression.....	72
II.6.1 Fabrication et préparation des colonnes en béton.....	73
II.6.2 Confinement externe par matériaux composites «PRF».....	73
II.6.2.1 Préparation de la résine polyester.....	74
II.6.2.2 Préparation de la résine époxy Sikadur-330.....	75
II.6.2.3 Application du PRF.....	76
II.6.3 Instrumentations et machine d'essai.....	77
II.7 Conclusion.....	78

## Chapitre III

### Etudes Expérimentales

III.1 Introduction.....	81
III.2 Programme expérimentale.....	81
III.3 Résultats et discussions.....	82
III.3.1 Effet du nombre de plis de PRF sur l'efficacité du confinement.....	82
III.3.1.1 Renforcement par le tissu (T2).....	82

III.3.1.2 Modes de ruptures et d'endommagement.....	83
III.3.1.3 Renforcement par le Mat.....	85
III.3.1.4 Modes de ruptures et d'endommagement.....	86
III.3.1.5 Renforcement hybrides constitué de Mat et de tissu T2.....	87
III.3.1.6 Types de rupture des éprouvettes confinées par les PRF hybrides.....	88
III.4 Effet du type de renfort sur le confinement par PRF.....	89
III.4.1 Effet de type de renfort sur le comportement charge/temps.....	89
III.4.2 Effet de type de renfort sur les modes d'endommagement.....	90
III.5 Chargement répété en compression des éprouvettes confinés et leurs modes de rupture.....	83
III.5.1 Comportement des charges répétées.....	91
III.5.2 Modes de rupture.....	95
III.5.3 Comportement contrainte/déformation des éprouvettes renforcées par des composites hybrides.....	98
III.5.3.1 Composite hybrides constitué de Mat et des tissus T1 et T2.....	98
III.5.3.2 Modes de rupture et d'endommagement.....	102
III.6 Efficacité du renforcement et effet de l'épaisseur de l'enveloppe PRFV sur le comportement des éprouvettes confinées.....	104
III.7 Index de performance.....	105
III.8 Conclusion.....	107

## Chapitre IV

### Etude expérimentale des colonnes préchargées ou non puis confinées par PRFV et PRFC

IV.1 Introduction.....	100
IV.2 Résultats expérimentaux et discussions.....	110
IV.2. 1 Première partie.....	110
IV.2.2 Comportement des colonnes confinées.....	111
IV.2.3 Efficacité de confinement par PRF.....	105
IV.2.3.1 Renforcement par PRFV (Polymère Renforcé en Fibre de verre).....	114
IV.2.3.2 Renforcement par PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone).....	114
IV.2.3.3 Modes de rupture et d'endommagement.....	120
IV.2.4 Comparaison du comportement contrainte/déformation.....	123

<b>IV.3 Deuxième partie.....</b>	<b>128</b>
<b>IV.3.1 Efficacité de la réparation et/ou le renforcement du béton préchargée par PRFV.....</b>	<b>128</b>
<b>IV.3.1.1 Comportement charge/temps des colonnes préchargées.....</b>	<b>128</b>
<b>IV.3.1.2 Comportement contrainte/déformation des colonnes préchargées.....</b>	<b>132</b>
<b>IV.3.2 Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton préchargé puis renforcé par PRFV.....</b>	<b>134</b>
<b>IV.3.2.1 Comportement charge/temps.....</b>	<b>134</b>
<b>IV.3.2.2 Comportement contrainte/déformation.....</b>	<b>136</b>
<b>IV.3.3 Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton non préchargé et renforcé par PRFV.....</b>	<b>137</b>
<b>IV.3.3.1 Comportement charge/temps.....</b>	<b>137</b>
<b>IV.3.3.2 Comportement contrainte/déformation.....</b>	<b>139</b>
<b>IV.3.3.3 Modes d'endommagement et de rupture.....</b>	<b>142</b>
<b>IV.4 Conclusions.....</b>	<b>143</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>145</b>
<b>Références bibliographique .....</b>	<b>148</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>155</b>

---

# *Introduction générale*

---



# INTRODUCTION GENERALE

---

Depuis son invention, le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction des ouvrages de génie civil par excellence. La principale qualité du béton est son excellente résistance à la compression mais son principal défaut est sa faible résistance à la traction qui ne représente qu'environ 10% de sa résistance en compression. La plus grande partie des ouvrages de génie civil est conçue pour une durée de 100 ans en moyenne, mais le béton est un matériau relativement fragile, puisque environ de 30% des ouvrages nécessitent une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile.

Les matériaux modernes, béton et métal réagissent chimiquement selon leur environnement, et deviennent alors moins performants. Les conditions d'exploitation, l'évolution de l'utilisation des structures les rendent aussi plus sensibles. Mais la science évolue, et la réhabilitation s'appuie sur une technologie et une chimie de plus en plus performante. La recherche teste aujourd'hui les matériaux du futur tel que les matériaux composite qui ouvrent de nombreuses perspectives d'avenir. A l'heure actuelle, les matériaux composites sont déjà largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le nucléaire, le génie biomédical, les constructions civil, ... etc. Les raisons d'un tel succès sont dues principalement à leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées, notamment leur très bon rapport résistance/poids; ces matériaux offrent des propriétés très intéressantes en termes de: force, légèreté, résistance chimique, et facilité d'application.

Dans les deux dernières décennies une focalisation sur la réparation structurale et la réhabilitation des structures en béton, en raison du vieillissement des infrastructures, endommagement suite au tremblement de terre et du besoin de l'évolution pour répondre à des exigences plus rigoureuses de conception. Le renforcement par matériaux composites PRF (Polymère Renforcé de Fibre) collé extérieurement 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 d'où le rôle des matériaux composites dans le domaine du renforcement des structures est devenu incontestable. De nombreux travaux de recherches et de réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisé comme renforcement externe.

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, murs. 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.

Le travail de cette thèse est structuré en quatre chapitres:

➤ Le premier chapitre est une étude bibliographique consacré aux causes et aux raisons de dégradation du béton ainsi leur techniques de réparation traditionnelles et puis on focalise sur une technique innovante de réparation et des différents types de renforcement du béton endommagé par matériaux composites dans le domaine de génie civile.

➤ Le deuxième chapitre présente l'ensemble des matières premières utilisées, les techniques expérimentales de confinement par PRF des colonnes en béton ainsi que la caractérisation en traction statique des composites stratifiés.

➤ Le troisième chapitre concerne l'étude du comportement structural résultant de l'effet du confinement fourni par une enveloppe en matériau composite à base de fibre de verre\_E «PRFV» (tissus bidirectionnel et Mat avec différente densité surfacique) afin de mettre en évidence l'efficacité du renforcement. L'étude de l'influence du nombre de couches (l'épaisseur) de l'enveloppe PRF, du type de renfort (tissu, Mat ou hybrides) sur le comportement structural des éprouvettes en béton sollicité en compression uniaxiale est aussi effectuée. Les gains en résistance et en déformations axiales et radiales, du béton sous chargement en compression uniaxiale, sont évalués et analysés, avec identification des modes de rupture et d'endommagement des colonnes renforcées.

➤ Dans le quatrième chapitre et pour tous les essais réalisés, des jauges d'extensométrie sont collés sur les surfaces externes de l'enveloppe composite dans le but de mesurer les déformations axiales et radiales par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone. Ce chapitre est structuré en deux parties: la première traite les résultats expérimentaux menés sur des colonnes confinées par des plis unidirectionnels en fibre de carbone «PRFC» comparées avec celles confinées par des plis bidirectionnels en «PRFV» sollicitées en compression uni-axile. Par contre la deuxième partie concerne l'étude de l'influence de l'orientation des fibres de l'enveloppe composite sur le comportement des colonnes confinées. L'évaluation du comportement des colonnes préchargées à 30, 45 et 90 % de la charge portante du béton de contrôle puis confinées par deux couches de stratifiés orientés à (+30/-60) et (0/90) est aussi effectués avec un chargement répétitive pour toutes les colonnes confinées.



---

# *Chapitre I*

## *Etude bibliographique*

---



## Chapitre I

# Etude bibliographique

### I.1 Introduction

L'industrie de la construction a été historiquement dominée par quatre matériaux traditionnels : la pierre, le bois, le béton et l'acier. Il y a quelques centaines d'années, la pierre et le bois étaient les principaux matériaux utilisés pour la construction des structures. Durant les deux derniers siècles, l'acier et le béton armé sont devenus les principaux matériaux de construction et la plupart des paysages urbains modernes sont maintenant définis en grande partie par ces deux matériaux. Ils ont permis la construction des réseaux d'infrastructures mondiaux qui ont considérablement contribué à la santé et à la prospérité économiques du monde moderne. Cependant, l'acier et le béton souffrent tous les deux de diverses formes de dégradations et après plusieurs décennies de négligence et d'abus, les infrastructures vieillissantes se détériorent [BIS-07].

Le passage du temps laisse sa trace sur les structures de béton, ce vieillissement est consécutif à une dégradation des propriétés mécaniques, physiques et chimiques de ce matériau de construction. Ces dégradations ont des origines diverses (par exemple: le retrait excessif, gel-dégel, corrosion des armatures de renfort, réaction alcali-granulats, charges de service, etc.) éventuellement combinées et ont pour conséquences la fissuration et l'altération du béton.

La dégradation des structures est un problème international qui affecte tous les types d'ouvrages, superficiels ou souterrains. Face à ce problème, les choix économiques actuels des sociétés industrielles sont orientés vers la protection et la réparation des structures existantes plutôt que vers la démolition et la construction de nouvelles structures. Cette solution nécessite toutefois des coûts très élevés qui sont en progression constante [RHA-02].

Au cours des années 1980, le Japon et la Suisse ont proposé un autre usage intéressant des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) comme renforcement des ouvrages existants. Cela concernait l'usage de tissus souples (dans le cas du Japon) ou de plaques pultrudées (Suisse), conçus pour être appliqués sur la surface extérieure des éléments structurels en béton armé et/ou précontraint ou en brique. Un renforcement additionnel doit être envisagé pour une structure porteuse quand la portance de celle-ci et/ou sa fiabilité en service ne peuvent plus

être garantis. Il est aujourd'hui possible d'employer des renforcements externes fabriqués avec des stratifiés renforcés par des fibres de carbone à haute résistance [AIP-02].

Les colonnes en béton sont les composants structuraux fondamentaux en structures civiles. Ces dernières années, la réparation, l'adaptation ultérieure, et le renforcement des colonnes en béton endommagées à l'aide des matériaux composites PRF s'enveloppant ou par chemisage deviennent de plus en plus importants dans les infrastructures civiles dues au haut rapport résistance/rigidité par rapport au poids, de la résistance à la corrosion, et de la facilité de l'installation des PRF. En plus, la capacité structurale de PRF peut être travaillée et maximisée en alignant les fibres le long de l'orientation optimale. Pour une colonne idéale, c'est à dire, une colonne soumise à une charge compressive coaxiale, il est bien établi que des fibres devraient être alignées le long de la direction de cercle pour confiner la dilatation du noyau en béton [LI-06].

Le problème de la durabilité des bétons se situe à la frontière de la technologie actuelle des matériaux. Pour éviter des travaux d'entretien onéreux ou des dégâts provoqués par des événements exceptionnels (séismes, accident de véhicule roulant dans les ponts routier, etc.), un haut niveau de fiabilité est essentiel [AIP-02].

Ce chapitre est une étude bibliographique consacré aux causes et aux raisons de dégradation des infrastructures en béton ainsi leur techniques de réparation traditionnelles. Une focalisation est effectué sur une technique innovante de réparation des infrastructures endommagés par matériaux composites en polymère renforcé de fibres «PRF» par différents types de renforcement (fibre de verre, carbone, etc.) noyé dans une résine (polyester, époxyde, etc.).

## I.2 Définition du Béton

Matériau constitué principalement de pierre (ou pierre concassée ou granulats), de sable, d'eau et de ciment ; il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné et utilisé essentiellement pour la construction d'ouvrages de génie civil et d'architecture [CRO-06]. Sans armature, le béton est un matériau très résistant en compression mais très faible en traction. En béton armé, les armatures sont passives, c'est-à-dire qu'elles ne commencent à travailler que lorsque la structure se déforme sous les charges. En béton précontraint, les armatures sont pré-tensionnées, donc actives: en comprimant le béton, les armatures précontraintes peuvent retarder ou empêcher la traction sous l'effet des charges; ceci retarde ou empêche la fissuration.

Le béton, est le matériau de construction le plus répandu, est exposé à un certain nombre d'agressions environnementales et climatique. Sa microstructure poreuse est soumise

aux phénomènes complexes de perméabilité et de diffusion qui modifient l'état de ce matériau évolutif [GIR-96].

### I.3 Principales manifestations des dégradations du béton

Les principales dégradations du béton sont classées généralement par le type et l'origine des fissurations du béton, en distinctes trois types de dégradation et de fissuration : les fissures d'origine physique, chimique et mécanique. Quelques types sont découverts ci-après.

#### I.3.1 Les agressions physiques

##### ❖ *Les cycles de gel-dégel et gélivité*

Tous les bétons ne sont pas sensibles aux cycles de gel-dégel, seuls les bétons dits "gélifs" s'altèrent. Les dégradations se manifestent sous forme de fissurations internes ou d'écaillage et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses, etc.), susceptibles d'être saturées en eau et donc plus sensibles à l'action du gel. Ce phénomène est encore mal connu.

La gélivité d'un béton peut être occasionnée par une sensibilité au gel à la fois des granulats et de la pâte de ciment, les deux phénomènes ne s'additionnent pas. La porosité de la pâte de ciment, peut d'une façon très simplifiée être assimilée à une association de bulles et de tubes (capillaires), les bulles étant reliées entre elles par des capillaires (quand la porosité est connectée). Lorsque l'eau peut se déplacer à travers des capillaires jusqu'à une bulle encore "libre", la glace peut se former sans conséquence nuisible. Si au contraire elle se forme dans les capillaires, elle peut générer de telles contraintes qu'une fissuration peut se développer [[http://www.lrmh.fr/lrmh/w\\_publications/beton/gel\\_deg.htm](http://www.lrmh.fr/lrmh/w_publications/beton/gel_deg.htm)].

En effet, la transformation de l'eau en glace s'accompagne d'une augmentation de volume d'environ 9%. Cependant, cette expansion de volume n'est pas la seule de l'origine des fissures, elle induit également des mouvements d'eau au sein de la porosité. Les pressions occasionnées par ces mouvements d'eau, lorsqu'elles dépassent la résistance en traction du béton, peuvent provoquer l'apparition de fissures. L'expérience montre qu'un réseau de bulles d'air de diamètre et d'espacement (on parle de L barre) adaptés à l'ouvrage et aux conditions climatiques auxquelles il est soumis (assuré par l'ajout d'une catégorie d'adjuvants, les 'entraîneurs d'air') permet d'améliorer la résistance au gel du béton [[http://www.lrmh.fr/lrmh/w\\_publications/beton/gel\\_deg.htm](http://www.lrmh.fr/lrmh/w_publications/beton/gel_deg.htm)].

### ❖ Désagrégation

Détérioration physique du béton en petites particules, elle est précédée généralement par l'écaillage qui devient de la désagrégation lorsque la perte de mortier (pâte qui enrobe les granulats) en surface et de gros granulats dépasse les 20 à 25 mm de profondeur [CRO-07].

### ❖ Écaillage

Désintégration progressive du mortier de surface à la suite de l'effet des cycles de gel-dégel, défaut courant des bétons sans air entraîné (Fig. I.1) [CRO-07].



**Figure I.1.** Écaillage du béton [CRO-07].

### ❖ Faïençage et réseau de fissures

Le faïençage est une fissuration du béton selon un maillage plus ou moins anarchique. La fissuration peut être fine (microfissuration) ou importante (jusqu'à plusieurs millimètres). Elle peut concerner des zones plus ou moins étendues de la structure. La maille peut aller de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres selon l'origine, l'intensité et l'avancement de la pathologie. Lorsqu'elles atteignent quelques dizaines de centimètres, on parle de réseau de fissures et la figure I.2 illustre bien ces fissures [THA-11].



**Figure I.2.** Faïençage [THA-11].

### I.3.2 Les agressions mécaniques

Les bétons peuvent subir des agressions de type mécaniques [THA-11] qui peuvent à tout moment survenir à la suite de : abrasion, choc, déplacement (y compris les tassements), explosion, fatigue, surcharges, vibrations.

#### ❖ *Délaminage*

Fissuration interne du béton entre la couche de surface et la couche en profondeur, sans qu'il y ait détachement comme c'est indiqué dans la figure III.3. En apparence, la couche de surface peut sembler saine mais en frappant la surface avec un marteau on obtient une résonnance creuse. Le délaminage résulte généralement de la pression due au gonflement causé par la corrosion des armatures. Le délaminage peut aussi se produire quand des barres d'une nappe d'armature sont rapprochées et fortement sollicitées: sous l'action des crénelures des aciers, il peut alors se créer un plan de fissuration au niveau de la nappe d'armature, parallèlement à la surface du béton, sans que la corrosion de l'armature ne soit en cause [CRO-07].



*Figure I.3. Délaminage [CRO-07].*

#### ❖ *Éclatement ou désintégration*

Détachement de fragments de béton de la masse principale causé par l'action des éléments extérieurs, par la pression due à la corrosion de l'armature ou par la formation de glace dans les parties délaminées [CRO-07].



### I.3.3 Les agressions chimiques sur le béton

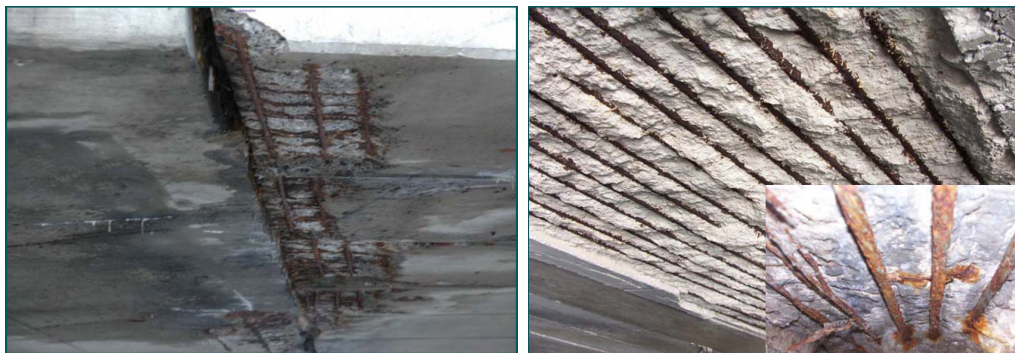
#### ❖ *La carbonatation*

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. La carbonatation atmosphérique est l'un des facteurs les plus importants pour la durabilité du béton armé. Elle correspond à la diffusion du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère dans les pores du béton et à la dissolution des hydrates, notamment la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , qui joue un rôle de tampon sur le pH. Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus accessible, le pH chute à une valeur inférieure à 9. Ceci peut conduire à la corrosion des aciers du béton armé qui ne sont passivés et protégés qu'en milieu fortement basique [HYV-09].

Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint. Elle se traduit la plupart du temps par l'apparition d'épaufrures laissant apparaître des armatures oxydées. La carbonatation est une source de dégradation des ouvrages en béton très lente (de l'ordre de 20 à 30 ans) et nuit à leur durabilité [GER-03].

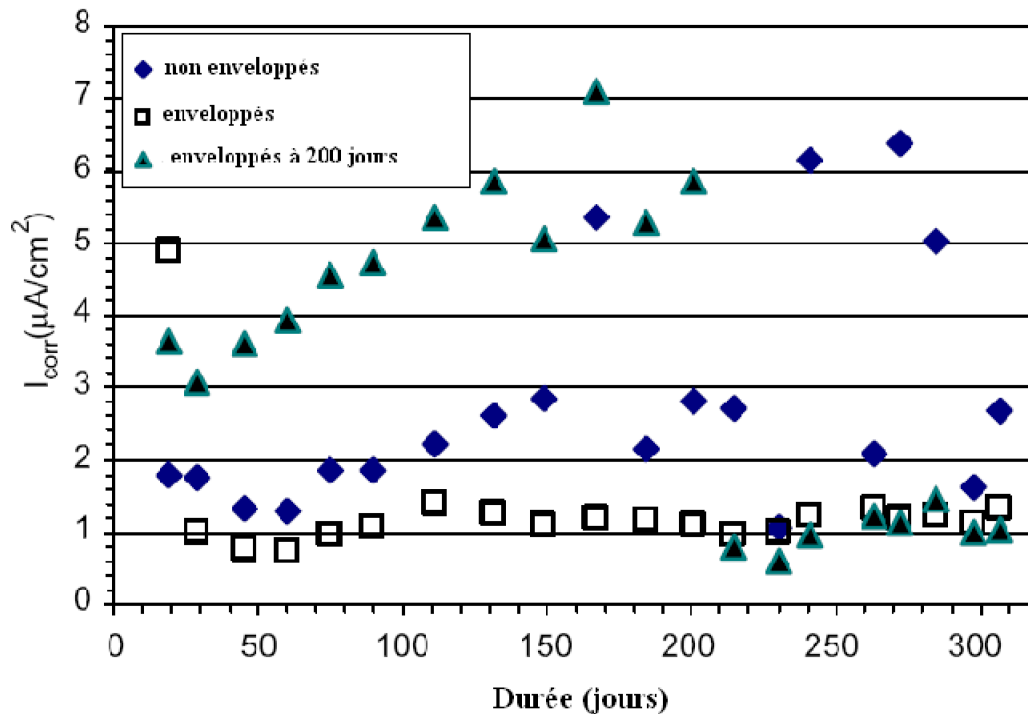
#### ❖ *Corrosion de l'armature*

La corrosion du béton est due à la pénétration de chlorures (provenant du milieu marin, de sels de déverglaçage, etc.) ou la carbonatation du béton. Ces deux phénomènes sont gouvernés par la porosité du béton.



**Figure I.4.** Corrosion d'armature [CRO-07].

La question est de savoir si le renforcement des éléments fragilisés par la corrosion va stopper ou non leur corrosion. Green et *al.* [GRE-06] soumettent différentes éprouvettes (enveloppées de PRF ou non enveloppées) à un environnement corrosif (solution saline à  $40^\circ\text{C}$ ). Ils mesurent au cours du temps le courant de corrosion résultant (Fig. I.5).



**Figure I.5.** Effet de la corrosion sur différents éléments réparés par PRF [GRE-06].

L'application de PRF, et ici même si elle survient après 200 jours de corrosion, permet de diminuer le courant de corrosion à une zone de valeurs pour lesquelles la vitesse de corrosion est très faible et non menaçante. L'action anticorrosive de l'enveloppe réside essentiellement en une barrière physico-chimique que constitue sa compacte couche de résine [LAC-08].

### ❖ Efflorescence

Les efflorescences sont des dépôts irréguliers de teinte claire blanchâtre (Fig. I.6), constituées essentiellement par des microcristaux de carbonate de calcium provenant de la dissolution des constituants du béton (ciment essentiellement). Elles apparaissent en général au niveau des fissures, des joints de construction et des reprises de bétonnage. Sur les parois verticales elles se présentent sous forme de coulures. En sous-face de dalle, ces microcristaux de carbonate de calcium peuvent se rencontrer sous forme de stalactites [THA-11].





**Figure I.6.** Efflorescence du béton [THA-11].

#### ❖ *L'attaque des chlorures*

Les chlorures peuvent apparaître dans le béton soit par ses constituants (granulats de mer non lavés, béton gâché à l'eau de mer, adjuvants contenant des chlorures, etc.), soit par l'environnement (proximité de la mer, sels de déverglaçage, etc.). Lorsque ces chlorures atteignent en quantité suffisante les armatures conduisent à leur dé-passivation et à une plus grande sensibilité à la corrosion. Dans le cas où le béton est déjà carbonaté et que la corrosion est amorcée, les chlorures jouent un rôle de catalyseur [<http://www.guichetdusavoir.org/viewtopic.php?f=2&t=47163>].

#### ❖ *L'attaque sulfurique*

L'attaque sulfurique, comme l'attaque par les chlorures ne se produit que lors d'un apport suffisant en sulfates. Ces sulfates, sous forme liquide ou gazeuse, proviennent souvent des pollutions industrielles ou urbaines. Ils peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire, également appelée sel de CANDLOT ou TRISULFOALUMINATE de calcium. Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout sont organisées en un réseau de mailles, on parle de faïençage. [<http://www.guichetdusavoir.org/viewtopic.php?f=2&t=47163>].

#### ❖ *L'alcali-réaction (ou cancer du béton)*

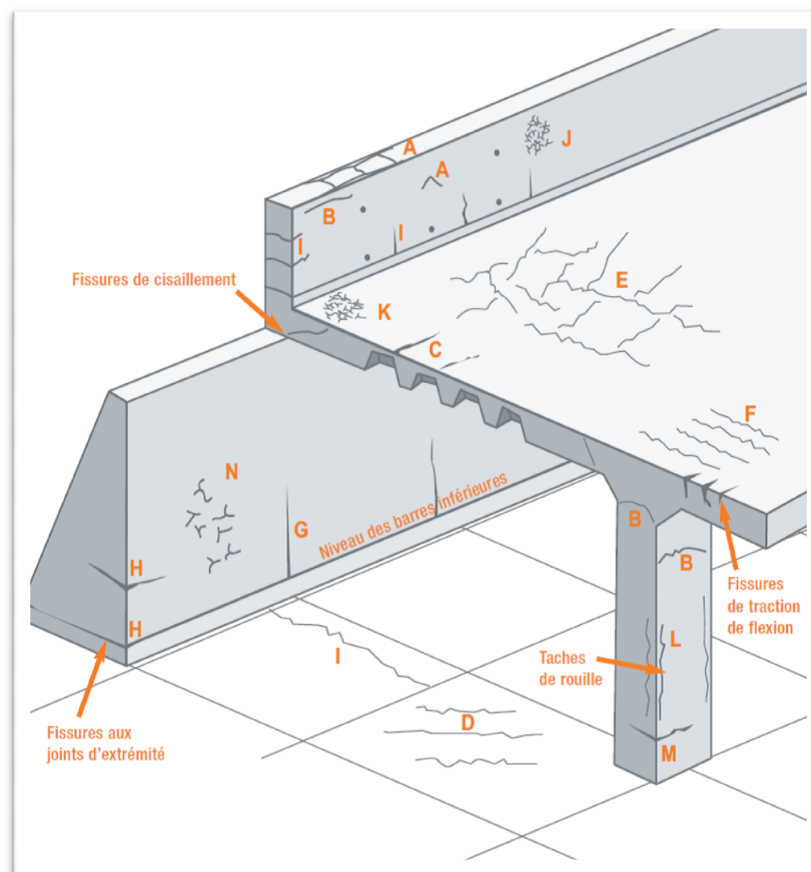
Sous ce terme se regroupent toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. Trois conditions doivent être

simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu : il faut que le granulat soit potentiellement réactif, que l'humidité relative excède 80 à 85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique. Il existe trois grands types d'alcali-réactions : les réactions alcali-carbonate, alcali-silice et alcali-silicate. La réaction la plus fréquente est la réaction alcali-silice.

Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années. Cependant, si les trois conditions précédemment citées sont remplies, avec notamment une forte réactivité des granulats et une forte teneur en alcalins, une alcali-réaction peut se développer en quelques années [[http://www.lrmh.fr/lrmh/w\\_publications/beton/alcali.htm](http://www.lrmh.fr/lrmh/w_publications/beton/alcali.htm)].

#### I.4 Emplacement & description des différents types de fissures

Un exemple d'identification de l'emplacement de différents types de fissures et de ruptures sur un ouvrage en béton est bien montré dans la figure I.6.



**Figure I.6.** Emplacement des différents types de fissures les plus fréquemment observées dans une structure [TEC-05].

Le tableau I.1 donne une description sommaire des différents types de fissures incluant les causes primaires et secondaires de formation, le temps d'apparition et la prévention.

**Tableau I.1.** Description des types de fissures [TEC-05].

Types de fissures	Identification	Lieu	Causes primaires	Causes secondaires	Temps d'apparition	Prévention
Tassement plastique	<b>A</b> (au dessus de l'armature)	Sections profondes	Ressuage excessif	Séchage rapide à jeune âge	10 minutes à 3 heures	Réduire le ressuage (air entraîné et vibration supplémentaire)
	<b>B</b> (en voûtes)	Sommet des colonnes				
	<b>C</b> (changement d'épaisseur)	Dalles ondulées ou gaufrées				
Retrait plastique	<b>D</b> (diagonal)	Pavages et dalles	Séchage rapide à jeune âge	Faible taux de ressuage	30 minutes à 6 heures	Améliorer la cure initiale
	<b>E</b> (aléatoire)	Dalles de béton armées				
	<b>F</b> (excès d'armatures)	Dalles de béton armées	Séchage rapide à jeune âge et armature près de la surface			
Retrait thermique à jeune âge	<b>G</b> (retraits externes)	Murs épais	Chaleur d'hydratation élevée	Refroidissement rapide	1 à 2 jours ou 3 semaines	Réduire la température du béton ou isoler le coffrage
	<b>H</b> (retraits internes)	Dalles épaisses	Gradients excessifs de température			
Retrait de séchage à long terme	<b>I</b>	Murs et dalles minces	Joints inefficaces	Retrait excessif ou cure insuffisante	Plusieurs semaines ou plusieurs mois	Réduire la teneur en eau et améliorer la cure
Faiénçage	<b>J</b> (au contact des surfaces coffrées)	Surfaces très lisses	Coffrages imperméables	Cure insuffisante	1 à 7 jours, parfois beaucoup plus tard	Améliorer la cure ou la finition
	<b>K</b> (surfaces finies)	Dalles	Talochage excessif			
Corrosion des armatures	<b>L</b> (conditions environnementales normales)	Poutres et colonnes	Enrobage insuffisant	Béton de faible qualité	Plus de 2 ans	Éliminer les causes
	<b>M</b> (infiltration de chlorure de calcium)	Béton armé	Excès de chlorure de calcium			
Réaction Alcalis granulats	<b>N</b>	Présence d'humidité	Granulats réactifs combinés à un ciment à haute teneur en alcalis		Plus de 5 ans	Éliminer les causes

## I.5 Techniques de réparation des infrastructures dégradées

Différentes techniques de réparation et de maintenance des ouvrages sont utilisées depuis de nombreuses années. Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre sont défini en fonction de la nature et de l'importance des dégradations constatés.

- ❖ **Protection** : Pour assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion.
- ❖ **Réparation** : Restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité/résistance).
- ❖ **Renforcement** : Améliorer les performances de la structure vis-à-vis des conditions d'exploitations modifiées ou augmenter la durée de vie de l'ouvrage.

Parmi les techniques de réparation du béton dégradé les plus connues et les plus utilisées, nous citant :

- l'adjonction d'armature complémentaire ;
- le béton projeté ;
- les tôles d'acier collées ;
- et la précontrainte additionnelle, etc.

Dans le cas du collage des plaques métalliques, le principal problème d'ordre technologique concerne le poids propre des tôles et leur rigidité qui rendent difficiles les conditions d'application in situ (Fig. I.7). Par ailleurs, la sensibilité de l'acier face à la corrosion demande une protection et un entretien soigné de la surface. Ces contraintes ont été éliminées grâce à une nouvelle technique de réparation apparue au Japon dès 1990 : le collage des matériaux composites en Polymères Renforcés de Fibres (PRF) remplaçant ainsi les tôles d'acier [BAC-05].

Pendant la dernière décennie, et particulièrement depuis les tremblements de terre de Northridge (1994), Kobe (1995) et de Taiwan (1999), le renforcement avec les matériaux composites est devenu plus commun [COL-07]. Dans de nombreux secteurs et domaines, ces matériaux ont su s'imposer définitivement en permettant de nouveaux sauts technologiques irréversibles et rendant caduques les anciens concepts [SAA-06].



**Figure I.7.** Difficulté de la mise en œuvre d'une plaque en acier [BEN-09].

## I.6 Application des PRF

Depuis plusieurs années, la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton prennent de plus en plus d'importance dans les constructions à cause de plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage. Parmi ces facteurs, la corrosion des armatures en aciers, 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 FRP 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 attractives pour leur exécution rapide et bas coûts de main-d'œuvre [BAK-02], 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 [SAA-94, MIR-90, SAM-98, HAR-98].

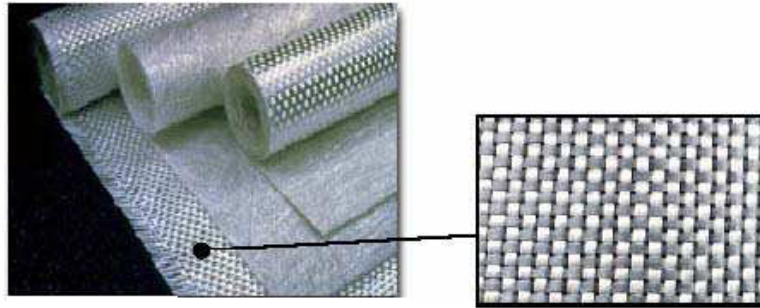
Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibres de verre, de carbone ou d'aramide (Fig. I.8). Les PRF utilisés pour le renforcement d'un objet en béton se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préfabriquées. Les comportements observés avec ce type de renforcement sont plus performants que ceux renforcées par des tôles en acier. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. Le matériau est fabriqué en même temps que la structure, les directions de renfort sont complètement paramétrables [CRO-06].



(a) Fibre de Carbone PRFC.



(b) Fibre d'Aramide PRFA.



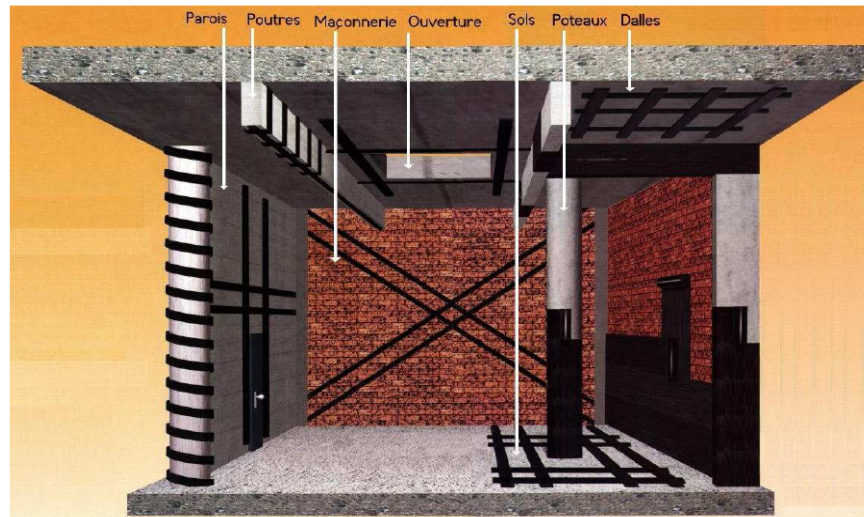
(c) Fibres de Verre PRFV.

**Figure I.8.** *Fibres de renforcements extérieurs les plus utilisées [RAS-08].***Tableau I.2.** *Propriétés de matériaux composites par secteur [CRO-06].*

	Aéronautique	Automobile	Ferroviaire	Bâtiment	Construction industrielle	Industrie nautique	Médical	Electricité	Sports & loisirs
<b>Durée de vie</b>									
Rigidité				X	X	X	X	X	X
Résistance mécanique				X		X	X		X
Tenue à la fatigue	X					X			
Résistance à la corrosion	X	X		X		X	X	X	
Etanchéité				X	X				
<b>Sécurité</b>									X
Tenue aux chocs		X				X	X		
Tenue au feu	X		X	X	X			X	
Isolation thermique				X	X			X	
Isolation électrique								X	
Amortissement, Vibrations					X				X
<b>Conception</b>									
Intégration de fonctions	X	X						X	
Formes complexes	X	X	X	X				X	X
Transparence ondes									
Electromagnétique									
Allègement de structures	X	X					X		X



Avec la technique de réparation des structures en béton par des PRF on peut réparer et renforcer presque tous les éléments d'une structure quel que soit leur forme. La figure ci-dessous récapitule et illustre ces possibilités.



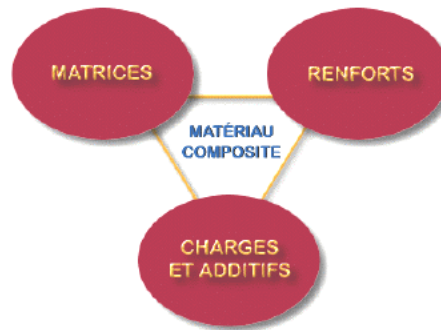
**Figure I.9.** Systèmes de renforcement [CRO-06].

## I.7 Matériaux composites

L'utilisation des matériaux composites dans la réalisation des structures offre aux concepteurs des possibilités nouvelles, car les composites structuraux ont de très bons rapports rigidité/densité et résistance/densité. Leur utilisation impose par contre, d'un côté la prise en compte de phénomènes et comportements nouveaux par rapport aux matériaux classiques et d'un autre côté la nécessité de concevoir le matériau par rapport à l'usage prévu [VAN-06].

### I.7.1 Définition

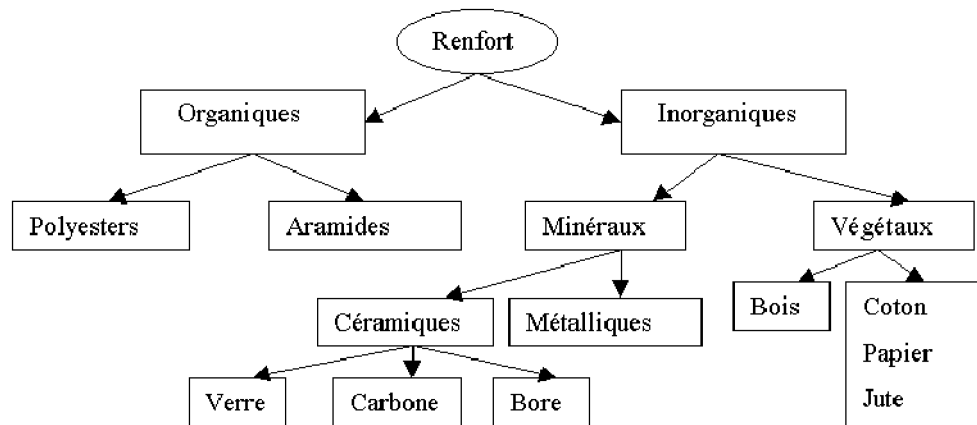
Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (Fig. I.10), le matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls ne possèdent pas. Il est constitué d'une : ossature appelée renfort, présentant diverses architectures, qui assure la tenue mécanique, et protection appelée matrice, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort [www.ryounes.net/cours/MC\_I.pdf].



**Figure I.10.** Les éléments constitutifs d'un composite [www.ryounes.net/cours/MC\_I.pdf].

### I.7.2 Les renforts

Les fibres de renfort permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du polymère qui sert de matrice au matériau composite. On peut les rencontrer sous forme de fibres tissées ou en mats (fibres orientées aléatoirement). Les trois grandes familles de fibres actuellement utilisées sont le carbone, l'aramide et le verre [BAC-05]. La figure I.11 résume les principaux matériaux de renfort.



**Figure I.11.** Principaux matériaux de renfort.

[<http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>].

Le tableau I.3 donne un ordre de grandeur des caractéristiques des fibres traditionnellement utilisées dans le domaine des composites.

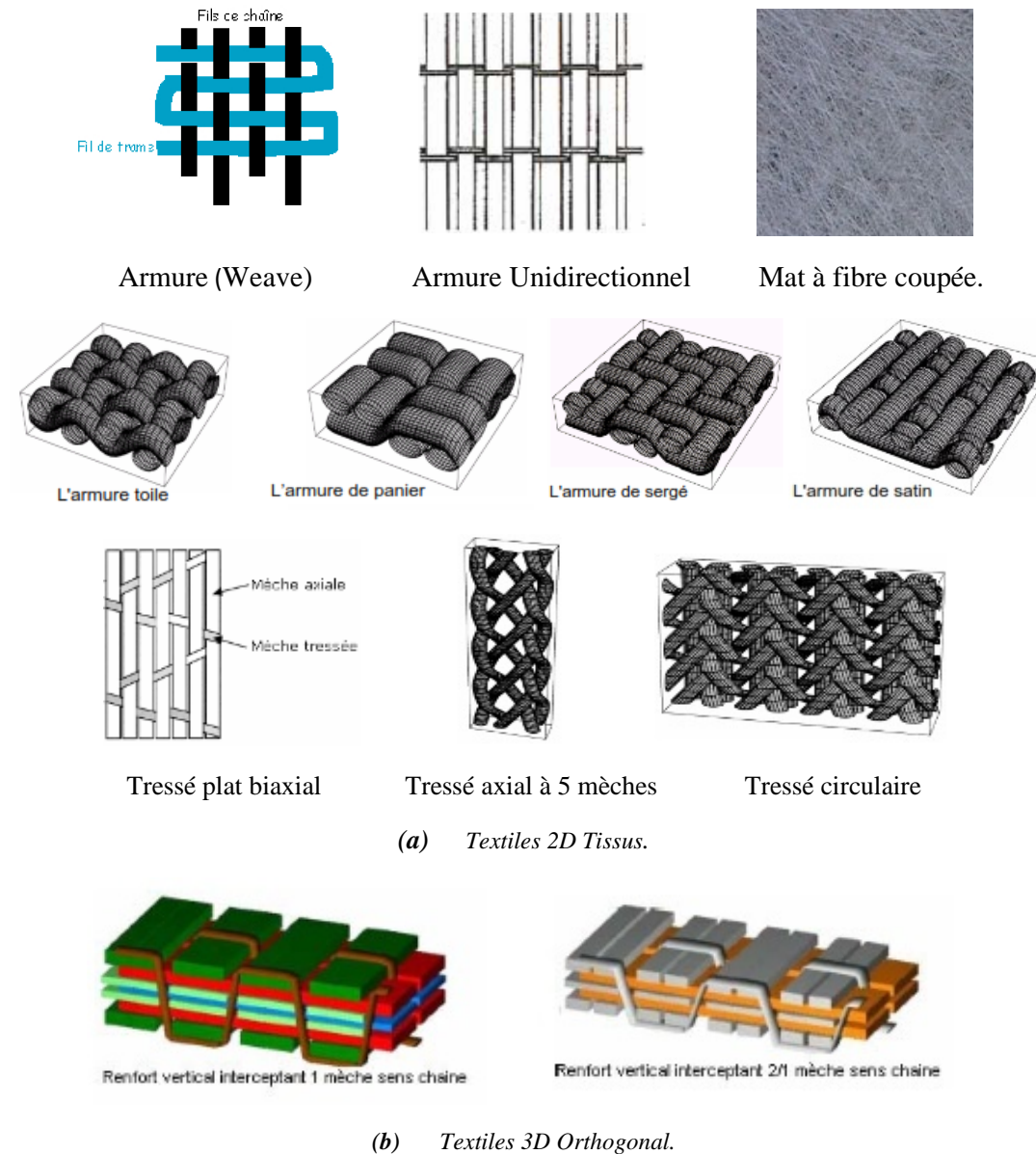


**Tableau I.3.** Propriétés des différentes fibres. [[www.ryounes.net/cours/MC\\_I.pdf](http://www.ryounes.net/cours/MC_I.pdf)].

Fibre	densité	Charge de rupture en traction MPa	Charge de rupture en compression MPa	Allong. A la rupture en %	Module d'élasticité long. MPa	Diamètre du filament élémentaire en $\mu\text{m}$
Verre E	2,54	3400	1200	4,8	73000	3-30
Verre R	2,48	4400	1300	5,4	86000	3-30
Aramide bas module	1,45	3100	500	2	70000	12
Aramide HM	1,45	3100	500	1	130000	12
Carbone HR	1,78	2800	1800	0,5	240000	8
Carbone HM	1,8	2200	1300	-	400000	8

Les fibres de renfort se présentent sous plusieurs architectures (Fig. I.12), si les fils de trame couvrent une file de chaîne avant de passer sous le suivant, il s'agit de toile ou taffetas, si plusieurs files de chaîne sont couvertes, il s'agit de satin. Une première approximation consiste à traiter le tissu comme deux couches d'unidirectionnel superposées, ayant les mêmes déplacements. Un tissu est équilibré s'il y a le même nombre de fils dans chaque direction, et qu'ils sont de même nature. Les mats sont des renforts bidirectionnels à fibres courtes (5 à 10 cm), ils sont isotropes dans leur plan. Il existe également des tissages tridimensionnels (3D), dans lesquels plusieurs couches de tissus bidimensionnels (2D) sont assemblées par des fibres selon la direction du troisième axe. Les tissages "4D" comportent quant à eux des fibres dirigées selon les directions de type (1, 1, 1) d'un cube. Un exemple typique est le carbone-carbone, qui résiste jusqu'à de très hautes températures, et qui, en raison de la géométrie adoptée, est insensible au délaminage, ou décollement des couches entre elles. [[http://mms2.ensmp.fr/mms\\_paris/plaque/polycop/f\\_plaque\\_poly.pdf](http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/plaque/polycop/f_plaque_poly.pdf)].

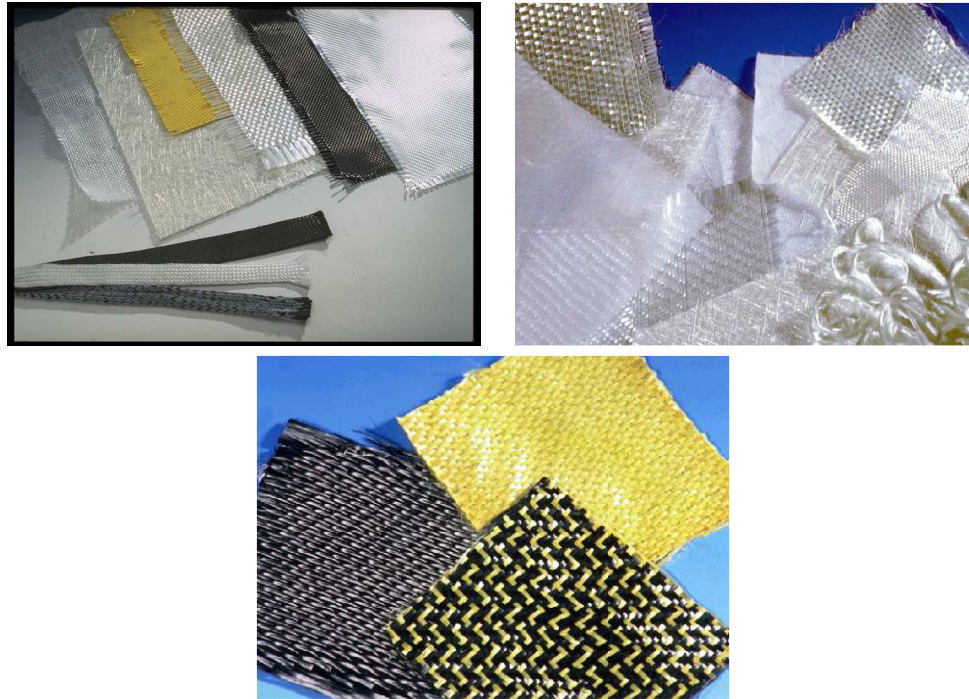
On trouve aussi sur le marché des tricots, des feutres aiguilletés, des tresses, des mats de verre à filaments continus, des voiles de surface [KNE-07].



**Figure I.12.** Exemples de tissage du renfort.

Un tissu comporte des fils de chaîne et des fils de trame. Il est caractérisé par les quatre éléments suivants :

- *l'armure* : mode d'entrecroisement des fils entre eux ;
- *le compte* : nombre de fils au cm en chaîne et en trame ;
- *la nature des fils* : **Carbone - Kevlar – Verre**, etc. ;
- *le poids/m<sup>2</sup>* : densité des fils avant/pendant tissage.



**Figure I.13.** Quelques produits de renforts [KNE-07].

**Tableau I.4.** Performances comparées des types d'architecture [KNE-07].

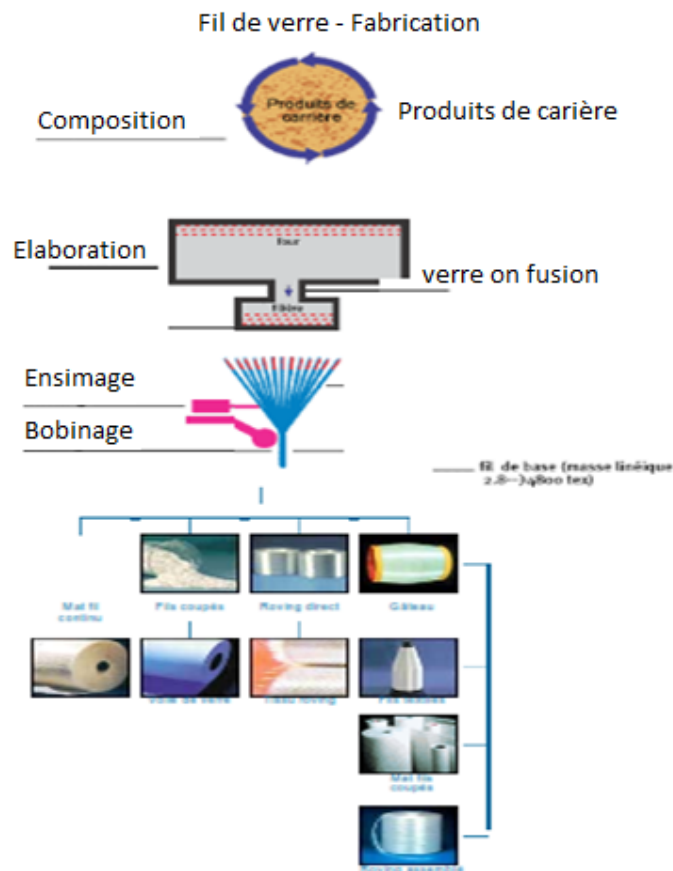
Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximale de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	Verre
Mat fibre coupées	Moyen	quelconque	30%	Verre ou Carbone
Mat fibre continues	Moyen	orientée	30%	Verre
Fibres continues	Intermédiaire	Unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	Bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (bidirectionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Dans ce travail nous avons intéressé aux fibres de verre et de carbone :

#### I.7.2.1 Les fibres de verre

C'est le type de fibre le plus ancien (1940) et le plus utilisé du fait de son faible coût et de ses qualités mécaniques satisfaisantes. Il existe sur le marché diverses fibres dont les

caractéristiques différent : le verre E (le plus couramment utilisé); les verres S et S-2; le verre ECR (un verre E qui résiste d'avantage aux attaques des composés acides). D'autres types de fibres sont classés comme AR et R [AIP-02], elles sont fabriquées par extrusion du verre au travers une filière percée de trous de 1 à 2 mm de diamètre, puis étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15  $\mu\text{m}$ , enduites et bobinées (Fig. I.13).



**Figure I.13.** Procédure de fabrication de la fibre de verre  
[[http://julien.caulier.free.fr/images/doc\\_tech/FdV\\_tech.pdf-12](http://julien.caulier.free.fr/images/doc_tech/FdV_tech.pdf-12)].

La fibre de verre est utilisée pour *le renforcement, l'isolation et l'optique*. Le renforcement est l'application la plus importante, dans 9 cas sur 10, les fibres de verre servent à renforcer les bétons ou les polymères (matériaux plastiques thermodurcissables comme le polyester ou l'époxy) en vue de fabriquer des matériaux composites capables de se substituer à l'acier. Les principales utilisations de ces matériaux composites sont, par ordre d'importance: les bâtiments et les infrastructures (29%) les transports (25%): avions, TGV l'électricité et l'électronique (16%) les sports et loisirs (14%): perches d'athlétisme, skis et planches de surf les équipements industriels (11%) [<http://www.gralon.net/articles/materiel-applications-3166.htm>].

### I.7.2.2. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent, leur prix décroît régulièrement. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple polyacrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes : oxydation (100 à 200 °C), puis pyrolyse (1500 à 2500 °C). Selon la température et le temps de cuisson, les fibres présentent une "haute résistance" (HR) ou un "haut module" (HM).

[[http://mms2.ensmp.fr/mms\\_paris/plaque/polycop/f\\_plaque\\_poly.pdf](http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/plaque/polycop/f_plaque_poly.pdf)].

### I.7.3 Les matrices

Les matrices sont des résines qui assurent la forme de la pièce, la tenue des fibres et la transmission des efforts. Il existe deux grandes familles de matrices : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

#### I.7.3.1 Résines Thermodurcissables (TD)

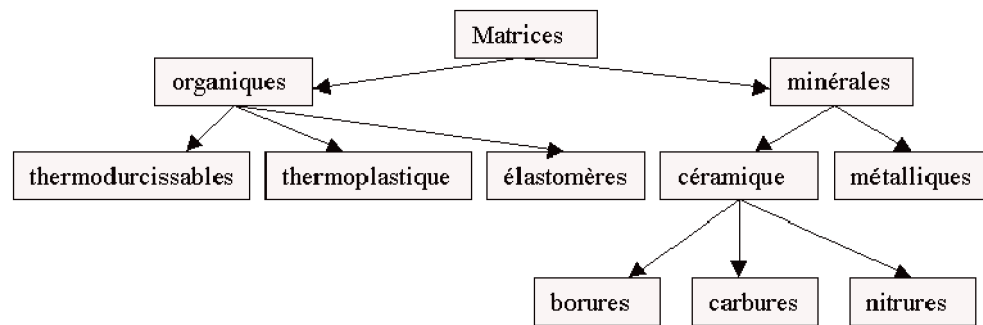
Ces résines sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée et la transformation est irréversible [KNE-07]. Parmi les familles de résine TD les plus utilisées on distingue :

- **résines polyesters** : les plus utilisées, sont généralement renforcées par des fibres de verre (pare-chocs, carrosserie, coques de bateaux, piscines, éléments de tramway ou de TGV, etc.).
- **résines époxydes** : aux caractéristiques mécaniques supérieures, sont généralement renforcés par des fibres de carbone ou de verre (longerons, dérives, nacelles, voilure, bateaux et automobiles de compétition, etc.) [[http://www.aquitaine-industrie.com/iso\\_album/01\\_materiaux\\_composites.pdf](http://www.aquitaine-industrie.com/iso_album/01_materiaux_composites.pdf)].

#### I.7.3.2 Résines Thermoplastiques (TP)

Ces résines sont renforcées avec des fibres courtes et, prochainement, avec des fibres longues se développe fortement [KNE-07]. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent) et la transformation est réversible.

Le schéma suivant récapitule les principales familles de matrices (Fig. I.14).



**Figure I.14.** Les différentes familles de matrices.

[<http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>].

#### I.7.4 Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :- quelques dizaines de % dans le cas *charges*,

- a quelques % et moins dans le cas d'*additifs*.

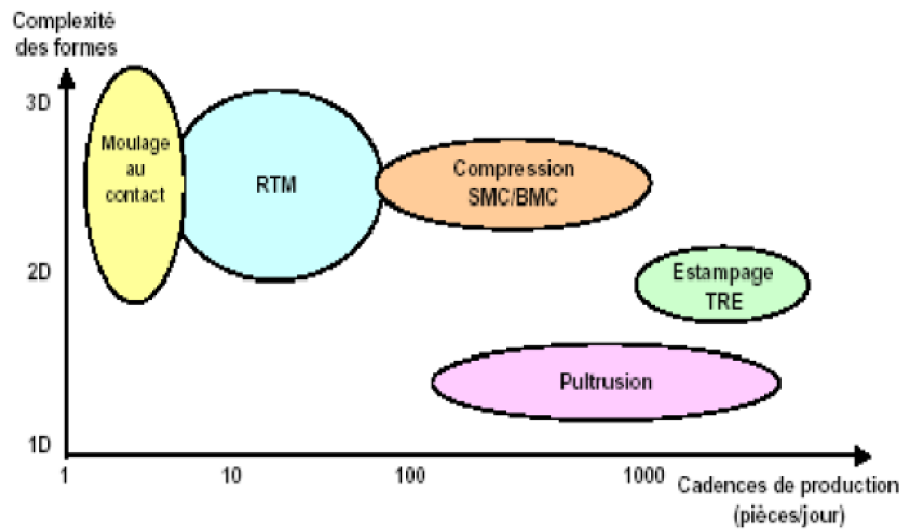
L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre [BER-10].

#### I.7.5 Fabrication des composites

Pour fabriquer des pièces en composites, une quinzaine de technologies de mise en œuvre sont aujourd'hui disponibles. De quoi répondre à toutes les exigences en termes de formes et de cadences (Fig. I.15). De nombreux procédés peuvent être utilisés : contact, projection, moulage sous vide, drapage autoclave, moulage à basse pression, etc. [www.matériaux composites.com].

Les industries de grandes séries ont contribué au développement de techniques plus rapides : compression de SMC, de BMC, injection de BMC et ZMC, moulage par injection avec réaction (RTM), stratification en continu, pultrusion. Un exemple des procédés de fabrication des composites par cette dernière est bien expliqué et mieux déterminé dans la figure I.16.





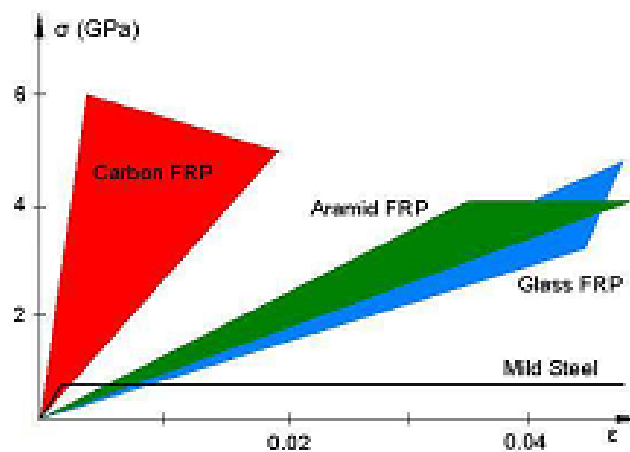
**Figure I.15.** Choix des procédés de fabrication en fonction des cadences et de la complexité [KNE-07].



**Figure I.16.** Technique de fabrication des composites par pultrusion et leur schématisation.  
[<http://old.fibrolux.com/fr/main/profiles-prv/pultrusion/>].

Pour les structures creuses, deux principales techniques sont utilisées : le moulage par centrifugation et l'enroulement filamentaire. On distingue deux grandes familles de composites : les composites de grande diffusion (GD), constitués principalement par le couple résine polyester/fibre de verre, et les composites à hautes performances (HP), constitués par les couples résine époxyde/fibre de verre, de carbone ou d'aramide.

Les fibres constituent le principal élément résistant du PRF et leur diamètre varie entre 5 et 25  $\mu\text{m}$ . Elles présentent une bonne résistance à la traction en même temps qu'un comportement élastique linéaire jusqu'à leur rupture (Fig. I.17). Au niveau de leur nature chimique, elles peuvent être de carbone (PRFC), de verre (PRFV), d'acier, de graphite ou encore d'aramide (PRFA) ou de basalte. Différentes type de fibres (longueur, composition) sont disponibles pour chaque nature chimique différente.



**Figure I.17.** Courbes contrainte-déformation pour certaines fibres disponibles [RAS-08].

Les fibres de carbone peuvent être obtenues à partir de brut de pétrole ou de charbon, ou bien de manière synthétique au moyen de polyacrylonitrile, ces dernières possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que les précédentes. Les fibres de verre présentent une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité, ce qui les rend attractives pour certaines utilisations. Le plus grand inconvénient des fibres de verre reste leur dégradation par des phases alcalines si elles ne sont pas correctement protégées. Les fibres d'aramide ont une structure anisotrope : leurs caractéristiques mécaniques se trouvent à un niveau intermédiaire entre les deux matériaux précédents (voir tableau I.3).

Les fibres de basalte n'étaient pas très répandues lors des premières recherches de développement des PRF, essentiellement car ce matériau présentait des difficultés d'élaboration. De nos jours, ce sont les principales fibres utilisées dans les renforcements de type TRM (*Textile Reinforced Mortar*).



La nature des fibres est importante car elle conditionne le comportement mécanique du composite et influence sa durabilité. Leur module d'élasticité et leur capacité à se déformer vont conférer au béton renforcé sa ductilité et par cela augmenter sa résistance à l'application à des charges extérieures [LAC-08].

La comparaison avec les tôles d'acier montre que les matériaux composites sont une solution plus attractive. En même temps la technique du renforcement a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, tenant compte du manque de données et de l'incertitude, concernant le comportement mécanique de la structure renforcée et du matériau composite.

## I.8 Différences par rapport aux matériaux métalliques

Il n'existe pas de matériau composite sur étagère, il est fabriqué en même temps que la pièce, les matériaux de base sont choisis et organisés en fonction de la nature et de l'intensité des efforts. L'objectif est, en général, d'obtenir une réduction de la masse. Les renforts se comportent bien en traction mais leurs performances sont moindres en compression et au cisaillement. Il convient donc de jouer sur leurs structures (fils, tissus 2D, tissus 3D, etc.).

En général, les composites résistent mieux au feu, mais les émissions toxiques sont dépendantes du choix de la résine. Les propriétés de la pièce en fonction de la liaison renfort/matrice sont fortement dépendantes du procédé de fabrication [[http://www.aquitaine-industrie.com/iso\\_album/01\\_materiaux\\_composites.pdf](http://www.aquitaine-industrie.com/iso_album/01_materiaux_composites.pdf)].

Avec un même couple matrice/renfort, on obtiendra des caractéristiques différentes selon le procédé de fabrication retenu. Dès la conception elle convient de valoriser les spécificités des composites par une approche fonctionnelle. La substitution d'une pièce métallique par une pièce composite est une démarche généralement à proscrire; les résultats espérés seront d'autant plus probants que l'on aura raisonné globalement par intégration de fonctions.

## I.9 Mise en œuvre des PRF

Actuellement, les fibres les plus utilisées en génie civil, y compris dans le béton armé, sont les suivantes : le verre, le carbone, l'aramide et l'acétate de polyvinyle. La forme la plus courante de fibre renforcée porte le nom de stratifié. Les stratifiés se composent de feuilles de fibres qui se chevauchent, en alternance avec la matrice, en nombre suffisant pour obtenir la largeur désirée. L'orientation des fibres doit être maîtrisée avec exactitude pour chaque plan afin de donner au stratifié les propriétés physiques et mécaniques requises. La qualité du composite dépend des matériaux utilisés pour sa préparation, de la manière dont la première charge dispose les éléments et de l'interaction entre les divers éléments. Les critères les plus

déterminants pour le comportement des fibres sont: l'orientation, la longueur, la forme et la composition des fibres, ainsi que les propriétés mécaniques de la résine employée pour la matrice et pour réaliser l'adhérence entre la matrice et les fibres [AIP-02]. Il existe trois procédés de fabrication du composite : le système avec une fabrication in-situ, le système d'enroulement filamentaire, et le système préfabriqué, des exemples sont présentés dans la figure I.18.



(a) bandes préfabriquées en carbone



(b) stratification directe en Kevlar



(c) Enchemisement avec PRF in-situ.



**Figure I.18.** Renforcement des colonnes par PRF.

### I.9.1 Système de stratification in-situ

Le processus peut être utilisé pour mettre en place un composite sur des surfaces en béton, le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture. Le procédé de mise en œuvre est bien montré dans la figure I.19.



Figure I.19. Procédure de la mise en œuvre des feuilles en composites [CRO-06].

### I.9.2 Système d'enroulement filamentaire

La fibre peut être pré-imprégné (la résine est déjà mélangée avec la fibre), puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton (Fig. I.20 et I.21).

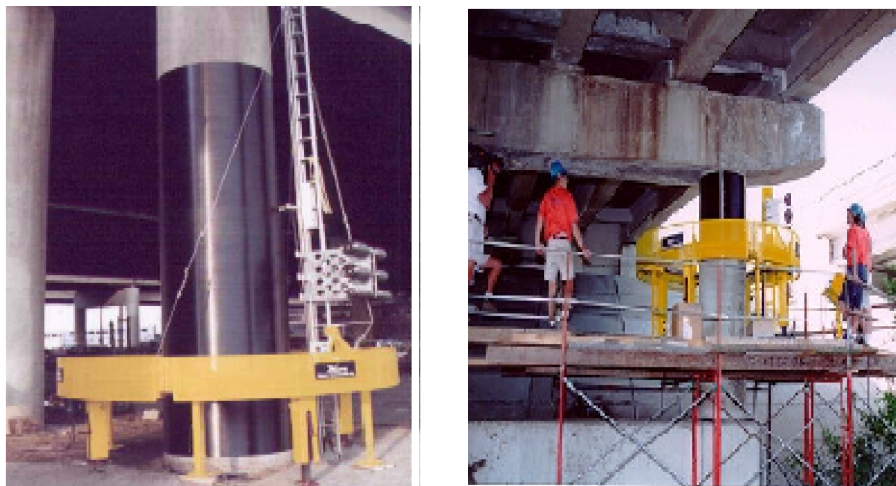
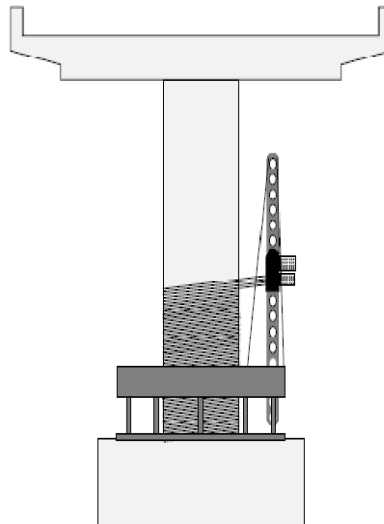


Figure I.20. Système de confinement par appareil d'enroulement filamentaire [GIO-03].



*Figure I.21. Schéma représentant l'appareil d'enroulement filamentaire.*

### I.9.3 Système préfabriqué (plaque préfabriquée)

Ce processus consiste à pré-fabriquer des plaques ou des lamelles qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant un adhésif [CRO-06]. Il faut suivre la même préparation de surface du béton que précédemment puis la plaque est collée sur le béton comme montre la figure I.22.



*Figure I.22. Enchemisement avec PRF préfabriqué [GIO-03].*

## I.10 Propriétés mécaniques du béton

### I.10.1 Résistance à la compression

Le comportement en compression simple est habituellement caractérisé par un essai de compression uniaxiale sur une éprouvette cylindrique afin de déterminer : la résistance en compression, le module d'Young, etc. La microfissuration qui se développe dans le béton avant sa mise en charge, conduit à une réponse non linéaire du matériau. On détermine la limite en compression  $f_c$  qui est utilisée dans la plupart des modèles. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa mais elle peut dépasser 100 MPa pour les bétons de hautes performances. Le module d'élasticité instantané  $E_i$  est défini selon les règles françaises par :  $E_i = 11000 f_c^{1/3}$  (MPa). Pour un béton courant cela correspond à un module de l'ordre de 38 GPa [BAC-05]. Toutefois, les résultats dépendent de la procédure de mise en œuvre et de la géométrie de l'éprouvette.

### I.10.2 Comportement en traction

Bien que le béton soit principalement utilisé pour résister à la compression, la réponse à des sollicitations de traction est aussi importante pour une description complète de son comportement, ce type d'essai est plus difficile à effectuer. Toutefois, la réponse est en général semblable à celle donnée par la figure I.23. Dans cette figure, on peut distinguer deux phases importantes du comportement du béton : dans une première phase, le comportement est quasiment linéaire avec une légère perte de raideur juste avant d'atteindre le pic. Une deuxième phase (phase adoucissante), après le pic, est caractérisée par une chute brutale de la contrainte pouvant être supportée par l'éprouvette. Cette chute se plonge ensuite d'une façon moins accentuée. Les cycles charge-décharge montrent qu'il existe des déformations inélastiques et des pertes de raideur du matériau [BAC-05].

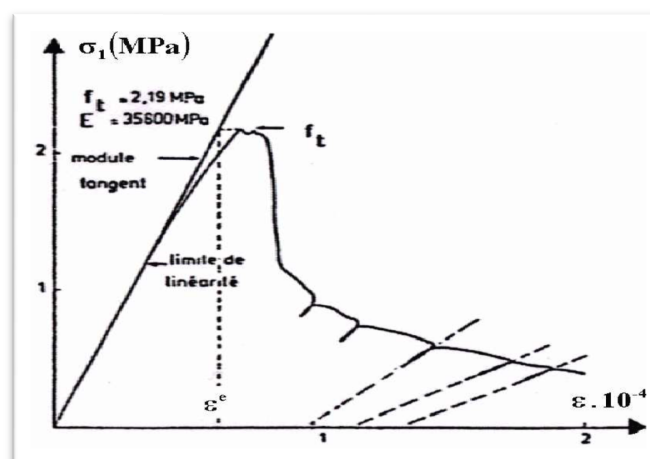
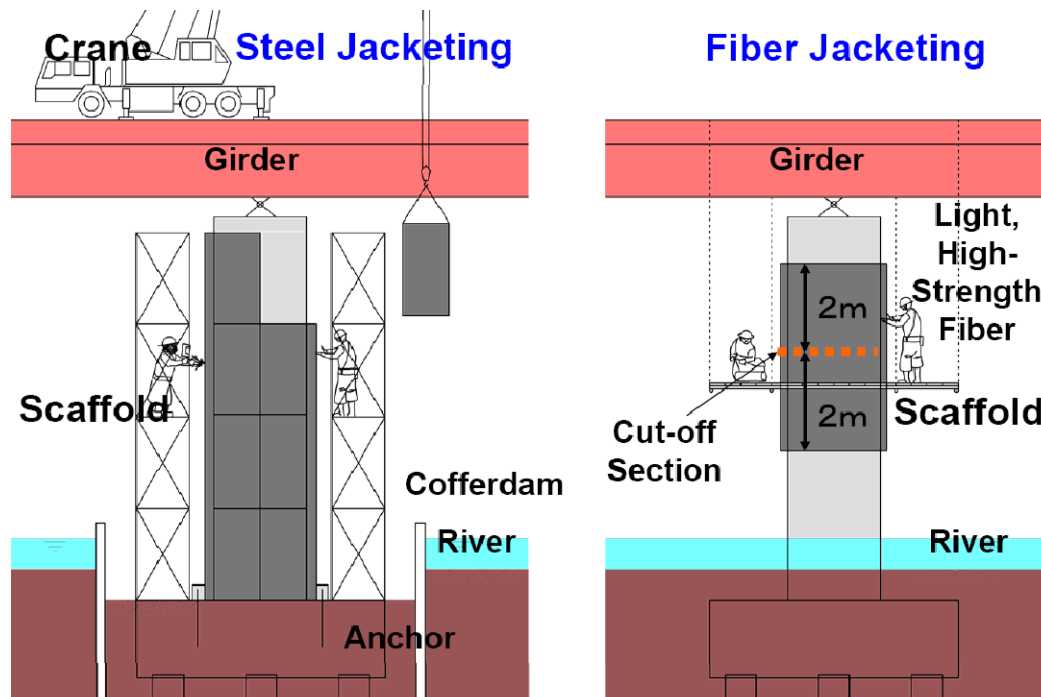


Figure I.23. Comportement du béton en traction directe [BAC-05].



## I.11 Comparaison des techniques de réparation

Une comparaison entre la réparation d'une colonne d'un pont par des tôles d'acier collés et par confinement en utilisant les PRF en été faite. D'après la figure I.24 la première technique consiste à employer des matériels lourds au chantier et exige d'envelopper la colonne entière par les plaques d'acier, alors que la deuxième technique ne demande pas de gros équipements à déplacer et la réparation se fait juste dans la zone endommagée ou fissurée.

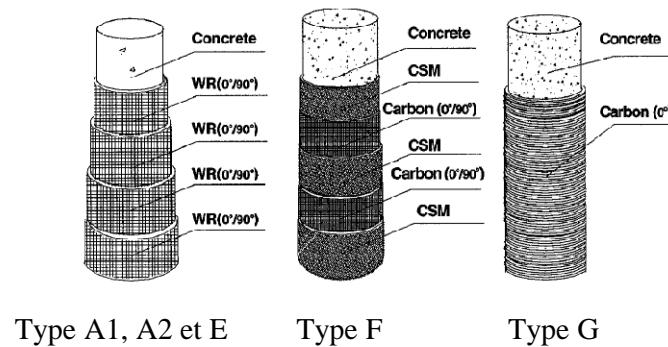


**Figure I.24.** Réparation d'une colonne par tôle d'acier et PRF  
[<http://cee.usc.edu/assets/013/60977.pdf>].

## I.12 Etat d'art

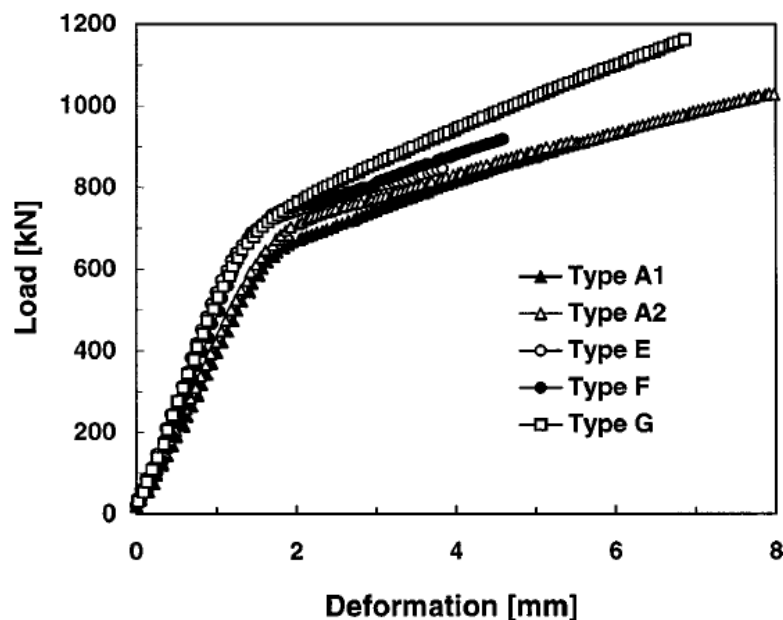
### I.12.1 Étude des systèmes de renforcement des colonnes en béton par composites en polymères

Zhang *et al* [ZHA-00] ont étudié expérimentalement les effets de différentes architectures de confinement en matériaux composites sur l'efficacité de renforcement des colonnes en béton enveloppées chargées en compression, et d'évaluer un index de coût d'efficacité de chaque système individuel. Ils ont examinés cinq différents types d'architectures composites (figure I.25) à base de fibres (verre\_E et carbone), et des résines (Vinyle-ester et époxyde).



**Figure I.25.** Architecture des différents systèmes de renforcement composite [ZHA-00].

Les comportements charge/déformation sous compression de chaque système de renforcement ont été étudiés et les auteurs ont trouvés les résultats suivants (Figure I.26) :



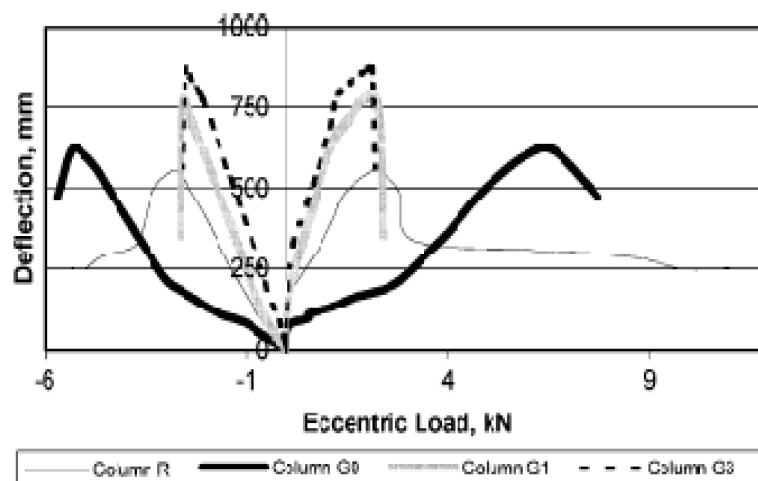
**Figure I.26.** Comparaison globales des comportements charge/déformation des colonnes en béton confinées par différents système de renforcement composite [ZHA-00].

- L'utilisation de fibres de verre\_E avec une résine de vinyle-ester pour renforcer les colonnes en béton extérieurement est efficace avec un faible coût des matières premières.
- Les systèmes basés sur une résine époxyde ne montrent pas beaucoup d'amélioration dans la capacité portante de la charge.

- Des Mats en fibres de verre ont été hybridés avec des couches de fibres de carbone pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques et une épaisseur accrue de l'enveloppe composite.
- L'efficacité de renforcement est également très dépendante de l'architecture de l'enveloppe composite.
- Les fibres de renforcement dans la direction circonférentielle donne une efficacité de confinement très élevé pour les colonnes en béton. Cependant, une certaine quantité de fibres dans la direction axiale sont encore nécessaires dans la conception des enveloppes composites, en particulier pour les colonnes élancées.

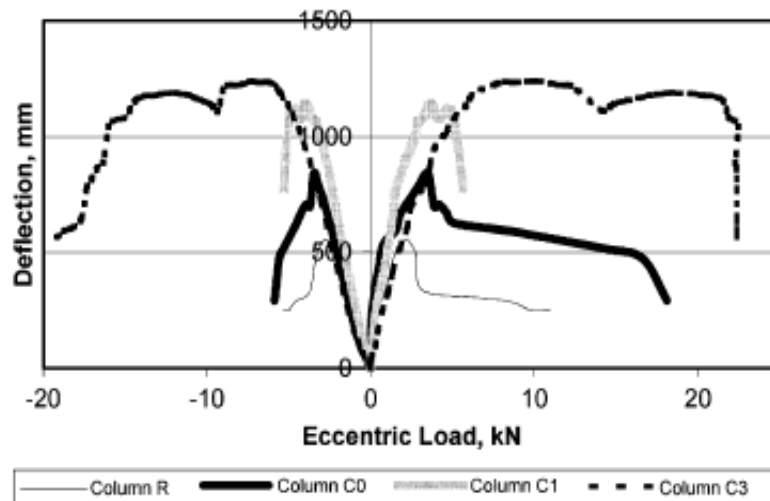
### I.12.2 Comportement des colonnes en béton renforcées par PRF sous chargement excentrique en compression

Hadi [HAD-07] a étudié le comportement des colonnes enveloppées extérieurement par deux types de matériaux composite et chargées excentriquement. Six colonnes cylindriques ( $205 \times 925$  mm) ont été moulées et examinées. La moitié des colonnes ont été confinées par des plis en PRFV et l'autre avec des plis en PRFC. Toutes les colonnes ont été horizontalement enveloppées avec trois couches de matériau composite (PRFV ou PRFC). Une colonne en béton armé a été également coulée et testée pour servir d'une colonne de référence. Il est conclu que le gain considérable en résistance et en ductilité sont obtenus dans le cas d'un renforcement par des couches PRFC (renforcées verticalement et horizontalement). Le béton utilisé dans son étude est un béton de haut résistance (résistance à la compression = 65 MPa). Les principaux résultats trouvés sont illustrés dans les figures I.27 et I.28 sous forme des courbes charge/déformation (axial et latéral).



**Figure I.3.** Courbes charge/déformation pour les colonnes : R, G0, G1 et G3 respectivement les colonnes en béton armé, non renforcée, renforcée par 1 couche et par 3 couches de fibre de verre [HAD-07].





**Figure I.4.** Courbes charge/déformation pour les colonnes : R, C0, C1 et C3 respectivement les colonnes en béton armé, non renforcée, renforcée par 1 couche et par 3 couches de fibre de carbone [HAD-07].

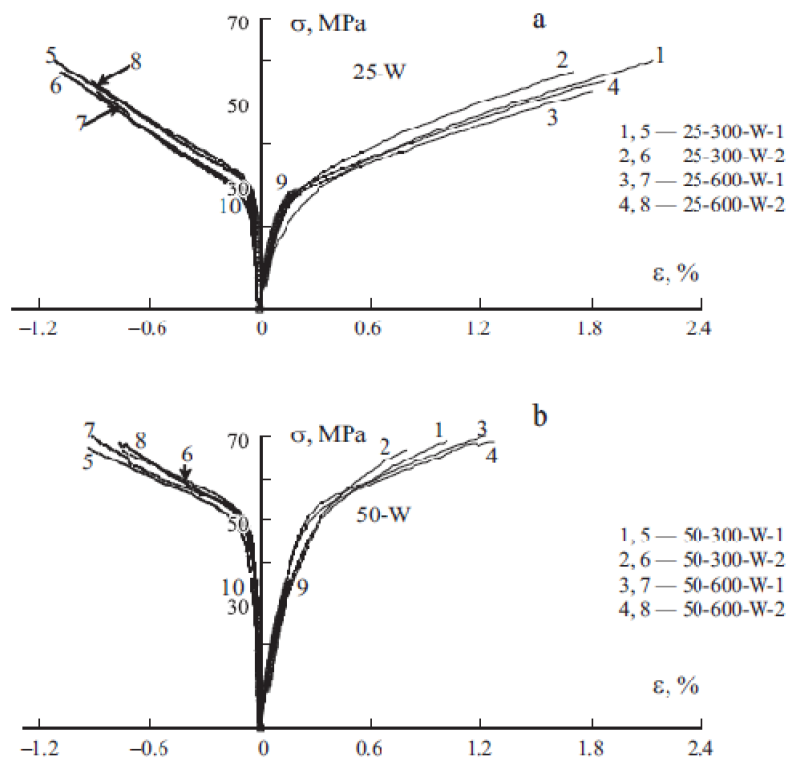
A la base du programme expérimentale réalisé par l'auteur, il a prouvé que :

Les colonnes en béton renforcées par PRFC se comportent mieux que la colonne en béton armé, par contre les colonnes enveloppées par PRFV étaient légèrement performant par rapport à celle en béton armé. Les meilleures performances sont trouvées en termes de force et de rigidité. Par l'examen de la charge excentrique, les colonnes confinées par PRFC sont plus performantes que celle confinées par PRFV et le béton armé.

### I.12.3 Comportement des cylindres en béton confinés par PRFC avec un renforcement en acier à la compression

Une étude expérimentale et analytique a été réalisée par Tamuzs et al [TAM-07] sur la déformabilité et le renforcement du béton par des bars d'acier, comparé avec les propriétés des éprouvettes en béton confiné extérieurement par matériaux composites. Ils ont réalisé des expériences afin d'estimer la participation entre le renforcement par des barres d'acier et des cylindres en béton confinés par un composite en carbone/époxy, pour cela deux mélanges de béton sont utilisés (béton de 25 MPa et 50 MPa), concernant l'augmentation de la résistance à la compression du béton due au confinement par composite.

D'après les auteurs, les caractéristiques mécaniques et leur comportement dans la compression uniaxiale sont illustrés dans la figure I.29 (Les déformations de compression sont supposées positives). Comme le montre la figure, les courbes de déformation peuvent être considérées comme linéaire morceau par morceau, avec  $E_1$  et  $E_2$  sont les modules élastiques de la première et la deuxième section, respectivement.



**Figure I.29.** Diagrammes de déformation des éprouvettes confinées coulées à partir de deux coulés de bétons 25MPa (a) et 50 MPa(b) dans les directions axiale (1-4) et transversale (5-8). A titre de comparaison, les diagrammes de déformation moyenne de l'éprouvette non confinées (9, 10) sont également représentées [TAM-07].

Une méthode de prédiction de la résistance et de la déformation des éprouvettes en béton, sans armature en acier, enveloppées par PRFC a été élaboré dans d'autres travaux. Pour la résistance du béton confiné  $f_{cc}$ , ils ont utilisés la formule I.1 :

$$f_{cc} = f_{co}(1 + 4 c_b k_s) \quad (I.1)$$

Où :

- $f_{co}$  est la résistance des éprouvettes cylindrique en béton standard,
- $k_s = \frac{\sigma_j h}{f_{co} R}$  est le coefficient d'efficacité de renforcement du composite de confinement, où  $\sigma_j$  est la contrainte ultime du composite mesuré dans l'essai de rupture de l'enveloppe composite,  $R$  rayon de l'éprouvette, et  $h$  est l'épaisseur du confinement composite (seule l'épaisseur des feuilles de carbone, sans la matrice, est prise en compte).

- Le facteur de réduction  $cb$  est introduit car la résistance à la rupture de l'éprouvette en béton confinée par une enveloppe composite est toujours inférieure à la résistance de l'enveloppe composite seule, d'après les auteurs  $c_b=0,93$ .

- Pour calculer  $f_{cc}$  par la formule (1),  $f_{co}$  des éprouvettes standards du béton ordinaire et la contrainte  $\sigma_j$  du l'enveloppe composite obtenu à partir de l'essai de rupture de l'enveloppe seule ont été utilisés.

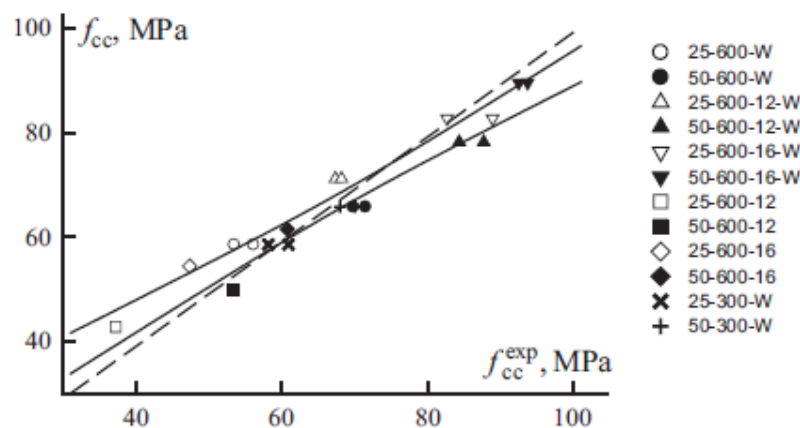
Le module d'élasticité ultime  $E_2$  est calculé par la formule I.2 :

$$E_2 = 23.6 E_{lat} \left( \frac{A_{c0}}{E_{lat}} \right)^{0.65} \quad (I.2)$$

Où :

$$E_{lat} = \frac{E_j h}{R}$$

Une comparaison entre les résistances ultimes calculées et expérimentales de tous les échantillons testés est indiqué sur la figure I.30. Un accord satisfaisant entre eux est enregistré pour les deux coulés de béton étudiés.



**Figure I.30.** Comparaison entre les données de la résistance expérimentales avec celles calculées effectués par les équations (1) (symboles ouverts) et (3) (symboles pleins). (—) - L'intervalle de confiance est 95%,  
(---) - Accord parfait [TAM-07].

Les auteurs ont trouvés que :

- Une barre d'acier de renfort augmente le niveau de la contrainte au quelle le module d'élasticité modifie sa valeur de  $E_1$  à  $E_2$ . Cette augmentation est proportionnelle à la surface de la section transversale de la barre multipliée par la limite d'élasticité.
- L'apparition de rendement du renforcement coïncide à peu près avec la résistance à la rupture du béton non confiné à une contrainte de compression de 0,20 à 0,25%, et par conséquent, il ne produit pas de changement dans le module d'élasticité de la relation contrainte-déformation au-dessus de la limite de la linéarité.
- Le module d'élasticité  $E_2$  des échantillons en béton confinés de la deuxième section de la relation contrainte-déformation est la même si ou non ils ont des renforcements par des barres d'acier.
- Le confinement PRFC empêche le rendement des barres de renforcement dans les échantillons par flambement après la rupture de l'enveloppe composite.
- Pour les deux mélanges de bétons considérés, l'accord entre la force ultime du spécimen prédite et les résultats expérimentaux est satisfaisant.

#### I.12.4 Renforcement des colonnes courtes en béton avec PRFC

Un programme expérimental comprenant des essais sur 54 colonnes courtes fut entrepris en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité de colonnes en béton continues sur le plan externe en les recouvrant de feuilles de PRFC sont réalisé par Shehata et *al* [SHE-02]. Les variables étudiées étaient la forme de la section transversale (circulaire, carrée et rectangulaire), et la quantité de renforcement, mesurée par le nombre de feuilles de PRFC appliquées aux modèles (une ou deux couches). En prenant comme base les résultats obtenus, des équations ont été proposées pour calculer la résistance du béton confiné et sa déformation spécifique ultime en fonction de la contrainte latérale de confinement, pour chaque forme de section transversale utilisée, circulaire, carrée et rectangulaire. Les estimations données par ces équations et celles données par des formules trouvées dans la littérature ont été comparées avec les résultats expérimentaux et des conclusions générales ont finalement été établies.

$$f_{cc} = f_{co} + k_l f_l \quad k_l=4 \quad (I.3)$$

$$f_{cc} = f_{co} + k_l k_e f_l \quad (I.4)$$

Où :

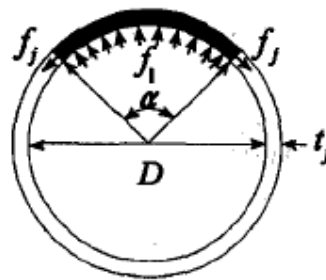
$f_{cc}$  est la contrainte de béton dans le cas triaxiale ;

$f_{co}$  est la contrainte sous compression uniaxiale ;

Le facteur  $k_l$  dans l'équation (I.3) à été défini par eux comme coefficient de confinement et à été obtenu empiriquement.

$k_e f_l$  est la pression de confinement latéral effective. Pour les colonnes circulaires, la valeur de  $k_e = 1$  pour les colonnes circulaires et  $k_e < 1,0$  pour celles carrées.

Dans le cas d'une colonne à section circulaire confinée avec une enveloppe composite en PRF (Fig. I.31), la contrainte de confinement  $f_l$  est utilisée dans l'équation (I.4) pour obtenir la résistance du béton confiné.

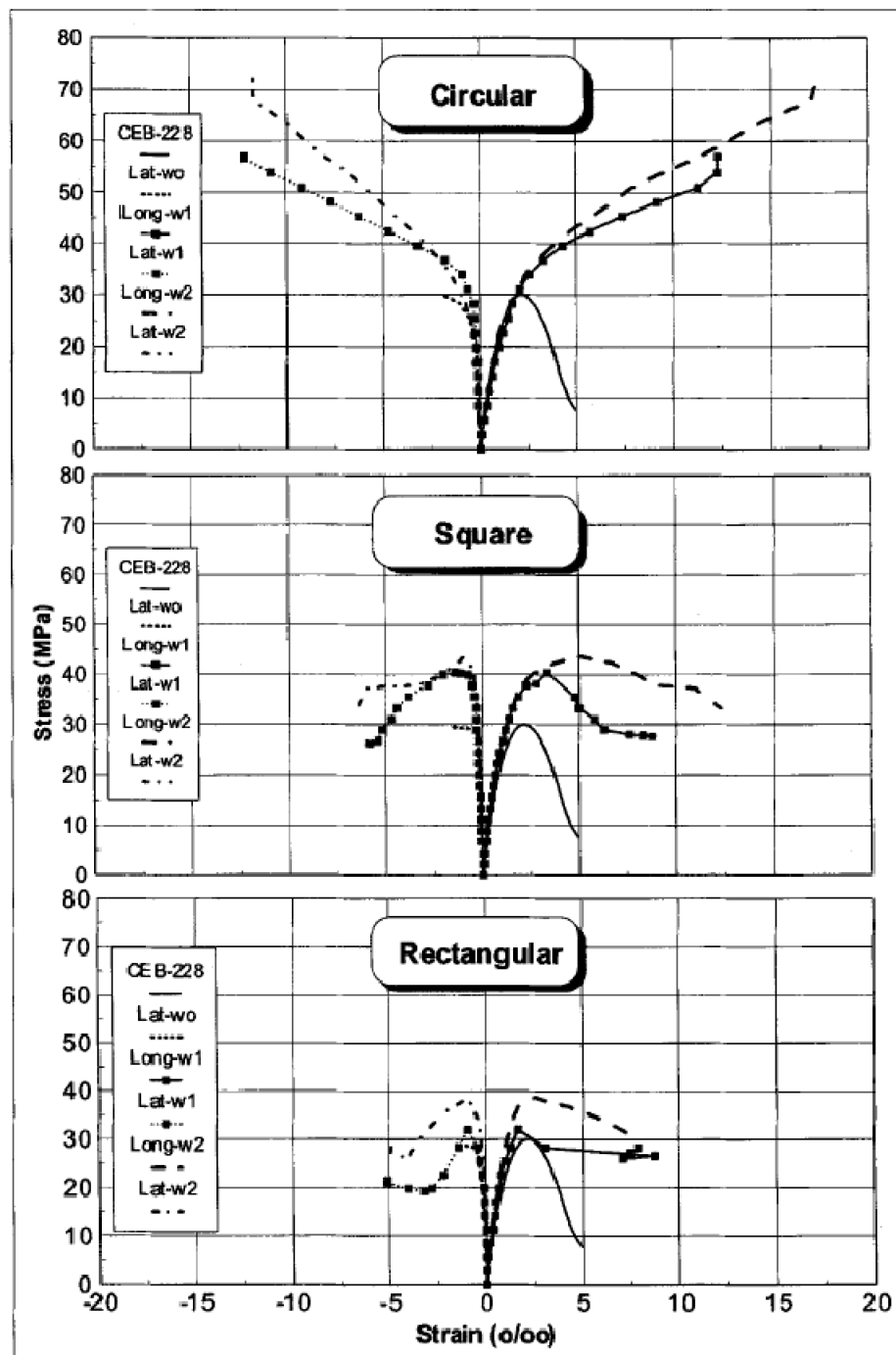


**Figure I.31.** Action de confinement extérieur dans une colonne fournie par le composite [SHE-02].

$$f_l = \frac{2f_f t_f}{D} \quad (I.5)$$

$f_f$  est la résistance à la traction du composite,  $t_f$  est l'épaisseur et  $D$  est le diamètre du béton confiné.

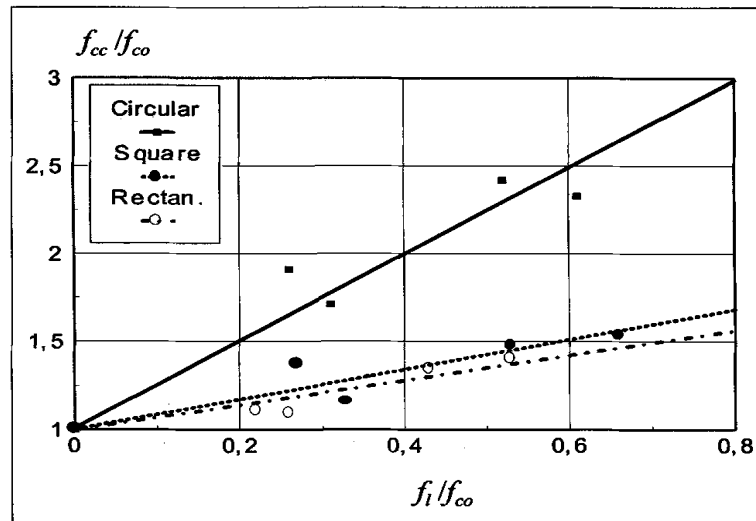
Pour les colonnes à différentes section de géométrie (Fig. I.31), le confinement effectif souhaiter par le même nombre de couches de PRFC est maximale pour les colonnes circulaire et minimale pour celles rectangulaire.



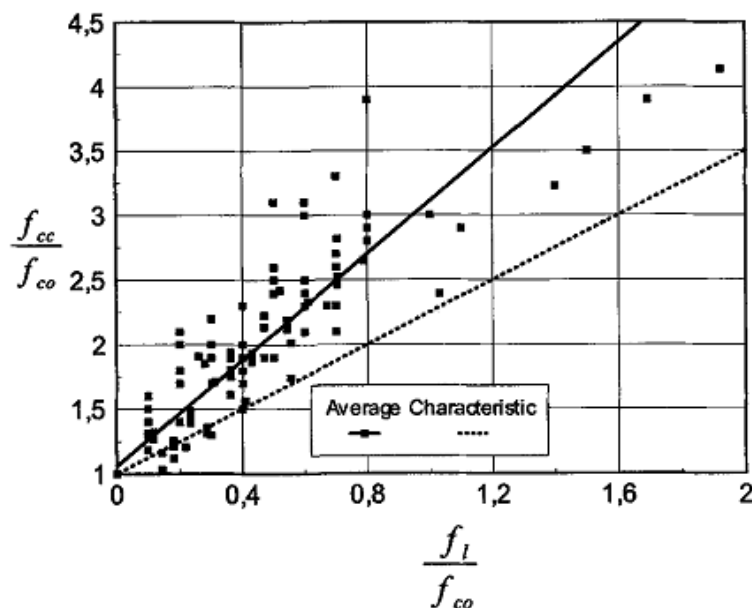
**Figure I.32.** Courbes contrainte-déformation obtenu pour les colonnes confinés circulaire, carrées et rectangulaires [SHE-02].

La figure I.33 représente la résistance compressive de confinement normalisé en fonction de la pression latérale de confinement normalisé pour les résultats des essais du travail de Shehata et al [SHE-02] sont présentés, avec leurs régressions linéaires, tandis que,

la figure. I.34 donne cette relation pour les éprouvettes circulaires du travail de Shehata et al et des autres confinées avec les fibres de verre ou de carbone. A partir de ces figures, on peut voir que la résistance compressive de confinement normalisée, approximativement, augmentent de façon linéaire avec l'augmentation de la pression latérale de confinement normalisée pour tous les types de géométrie de la section. Il ya aussi une grande différence entre la tendance des résultats obtenus pour les colonnes circulaires et ceux pour les carrés et rectangulaires.



**Figure I.33.** Résistance compressive de confinement normalisé ( $f_{cc}/f_{co}$ ) en fonction de la pression latérale de confinement normalisé ( $f_l/f_{co}$ ) pour les résultats des essais de différentes formes [SHE-02].



**Figure I.34.** Résistance compressive de confinement normalisé ( $f_{cc}/f_{co}$ ) en fonction de la pression latérale de confinement normalisé ( $f_l/f_{co}$ ) des colonnes circulaires [SHE-02].

Shehata *et al* [SHE-02] ont étudié le comportement des modèles des colonnes courtes confinées avec une section de géométrie différente et le degré de confinement. Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité du confinement est très sensible à la section de la géométrie de la colonne (circulaire, carrée ou rectangulaire) et de la contrainte de confinement exprimée en nombre des couches de feuilles de PRFC appliquées.

A la base des résultats obtenus, des équations ont été proposées, pour la résistance ultime et la déformation du béton confiné en fonction de la contrainte de confinement latéral, pour chaque section de géométrie utilisés: circulaire, carrée ou rectangulaire. Les estimations fournies par ces équations et des formules trouvées dans la littérature ont été comparés avec les valeurs expérimentales de leur travail et des autres. D'après les comparaisons faites par les auteurs, il est clair que les équations proposées pour estimer la résistance du béton confiné devraient être associée à la forme de section et leur validité est limitée à cette géométrie. La déformation ultime à la rupture est jugée dépendante du confinement latéral, la résistance du béton confiné et le module d'élasticité de PRF utilisé pour le confinement.

### I.13 Position du problème et techniques adoptés

Le renforcement par matériaux composites PRF (Polymère Renforcé de Fibre) collé extérieurement constitue une bonne solution à la préoccupation du besoin de réhabilitation des structures. Les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le nucléaire, le génie biomédical ; la construction civil, etc. Les raisons d'un tel succès sont à attribuer à leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées et des avantages incontestables par rapport aux aciers traditionnels; et notamment le rapport poids/résistance, une haute résistance à la traction, une excellente résistance à la corrosion, un poids volumique bas et un module d'élasticité faible, un coefficient de dilatation thermique que l'on peut estimer d'avance. En raison de leur très haute résistance à la corrosion, leur légèreté (qui facilite leur usage dans les processus de construction) et le fait qu'ils puissent être fabriqués sur mesure pour répondre aux besoins d'un ouvrage donné.

Pour cela nous avons fait :

- une étude expérimentale portée sur l'évaluation du comportement mécanique en compression uni-axiale des éprouvettes cylindriques en béton confinées par des enveloppes en matériaux composites (PRFC et PRFV) collées en surface. Des jauges d'extensométrie sont collées sur les surfaces externes de l'enveloppe composite dans le but de mesurer les déformations axiales et radiales par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone.
- Ainsi que l'étude de l'influence de l'orientation des fibres de l'enveloppe composite sur le comportement des colonnes confinées.



- L'évaluation du comportement des colonnes préchargées à 30, 45 et 90 % de la charge portante du béton de contrôle puis confinées par PRF est aussi effectuée avec un chargement répétitif pour toutes les colonnes confinées; cette technique constitue une nouveauté dans le domaine de renforcement des structures par matériaux composite, que se soit pour des éprouvettes prèes chargées ou non avant le renforcement par recouvrement; pour traité et analysé :

- ❖ l'efficacité du renforcement des colonnes par PRF ;
- ❖ l'influence du nombre de couches (l'épaisseur) de l'enveloppe PRF ;
- ❖ l'effet du type de renfort (tissu, Mat ou hybrides) sur le comportement structural des éprouvettes ;
- ❖ l'influence de l'orientation des fibres de l'enveloppe composite sur le comportement des colonnes confinées ;
- ❖ l'évaluation du comportement des colonnes préchargées à 30, 45 et 90 % de la charge portante du béton de contrôle puis confinées par PRF ;
- ❖ les gains en résistance et en déformations axiales et radiales, du béton sous chargement en compression uniaxiale ;
- ❖ l'exploration des modes de rupture et d'endommagement des colonnes renforcées.

---

# *Chapitre II*

## *Matériaux D'étude. Caractérisation et Techniques Expérimentales*

---



## Chapitre II

### Matériaux d'étude, caractérisation et techniques expérimentales

#### II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matériaux de cette étude ainsi que leurs caractéristiques mécaniques utilisés dans le renforcement par recouvrement des éprouvettes en béton.

Dans un premier temps, nous présenterons les différents matériaux de l'étude, en détaillant leur composition et les différents empilements adopter, puis nous passerons à la caractérisation du comportement mécanique des matériaux utilisés par des essais de traction axiale et de compression simple sur chaque constituant, cette dernière conduit à étudier les propriétés élastiques ainsi que les facies de la rupture de chaque matériau.

Les résultats obtenus, sur chaque constituant, ont permis de fournir des informations nécessaires pour comprendre le comportement mécanique et les modes de rupture des éléments étudiés.

#### II.2 Présentation des matériaux de l'étude

Le terme «plastiques renforcés par des fibres» (PRF) se rapporte à divers types de matériaux composés de fibres continues noyées dans une matrice en polymère. Ces matériaux, fabriqués à partir de millions de fibres continues organiques et inorganiques assemblées et collées à la résine ou à la pâte de ciment spéciale ont des avantages incontestables par rapport aux aciers traditionnels: par exemple, une haute résistance à la traction, une excellente résistance à la corrosion, un poids volumique bas et un module d'élasticité faible, d'excellentes performances sous tension et un coefficient de dilatation thermique que l'on peut estimer d'avance. En raison de leur très haute résistance à la corrosion, leur légèreté (qui facilite leur usage dans les processus de construction) et le fait qu'ils puissent être fabriqués sur mesure pour répondre aux besoins d'un ouvrage donné, ils ont déjà été employés dans

d'importants travaux au niveau international à titre d'exemple [LAM-03, KAR-09, KAR-04, MIR-97, SAA-94, MIR-90, SAM-98, HAR-98, GRA-01, HAD-07, TAM-08].

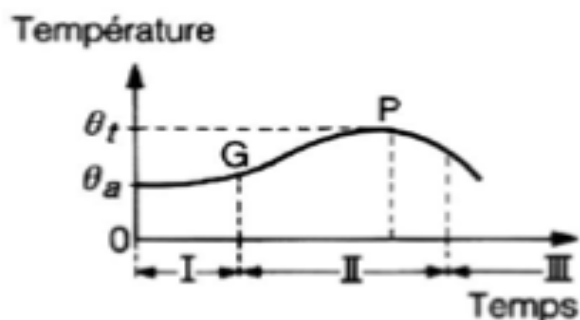
Les PRF utilisés dans cette étude sont des composites constitués d'une matrice polyester renforcée par des fibres de verre\_E (fibres continues : tissus bidirectionnels avec une masse surfacique de 500 g/m<sup>2</sup> et de 300 g/m<sup>2</sup>; fibres coupées : mat d'une masse surfacique de 500 g/m<sup>2</sup>) d'une part ; et d'autre part, d'une matrice époxyde renforcée par des fibres de carbone (nappe unidirectionnelle).

## II.3 Propriétés des constituants du composite

### II.3.1 Résine polyester

C'est une résine thermodurcissable la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante (Fig. II.1). Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.



**Figure II.1.** Comportement température/temps de la résine polyester [GLO-06].

Avec  $\theta_a$  : Température ambiante,  $\theta_t$  : Température du pic exothermique, G: Point de gel, et P: Pic exothermique.

Le comportement température/temps s'effectuent en trois phases: La première concernant la mise en œuvre et déballage, la deuxième c'est le moulage, et la troisième phase est le démoulage et post-cuisson. Il existe différents types de résines polyester:

- **Orthophtalique**: la plus courante;(utilisée dans l'actuel travail)
- **Isophtalique**: qui donne une meilleure tenue à l'humidité;
- **Chlorée**: apportant une auto extingüibilité;
- **Bisphénol**: possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques [GLO-06].

Le tableau suivant présent les majeurs avantages et inconvénients de la résine polyester.

**Tableau II.1.** Avantages et inconvénient de la résine polyester.

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibres de verre	Inflammabilité (sauf résines chlorées)
Translucidité	Tenue vapeur et eau bouillante
Bonne résistance chimique	Retrait important (6 à 15 %)
Mise en œuvre facile	Durée de conservation en pot limitée
Tenue en température (>150 °C)	Emission de styrène.
Prix réduit.	

### II.3.2 Fibres de verre

Le renfort se compose de fibres de verre de type E, qui constituent le quasi totalité de la fabrication de verre textile produit actuellement. Deux textures sont utilisés dans l'étude ; le tissu bidirectionnel avec deux densités surfaciques (DS de T1 est 500 g/m<sup>2</sup>, et la DS de T2 est 300 g/m<sup>2</sup>) ; ainsi le Mat a fibres coupées orientées aléatoirement d'une densité surfacique de 300 g/m<sup>2</sup>. Le tableau II.2 montre les propriétés mécaniques du tissu T1/polyester effectué dans les travaux de magister de [BOU-08]. Cependant les propriétés mécaniques du tissu T2/polyester et le Mat/polyester sont identifié dans les paragraphes suivants par des essais de traction.

**Tableau II.2.** Caractéristiques mécaniques du tissu T1/polyester.

Caractéristiques	T1/polyester
Module d'Young (GPa)	8,5
Densité surfacique de la fibre (g/m <sup>2</sup> )	500
Déformation transversale (%)	3,2
Déformation longitudinale (%)	6,4
Contrainte à la rupture (MPa)	171

### II.3.3 Fibres de carbone

Les fibres de carbone utilisées dans l'actuelle étude sont des fibres unidirectionnelles à haute résistance **SIKA WRAP HEX 230 C**, avec 97% de fils de chaîne pour assurer la résistance et 3% de fils de trame pour assurer la stabilité dimensionnelle. Les propriétés mécaniques fournies par le fabricant est résumé dans le tableau ci-après. Pour plus de détails sur ces fibres voir Annexe 1.

**Tableau II.3.** Caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone employé.

Caractéristiques mécaniques	Fibre de carbone
Epaisseur des fibres (mm)	0,13
Module d'Young en traction (GPa)	230
Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	225
Allongement à la rupture (%)	1,5
Résistance en traction des fibres	3500 MPa

### II.3.4 Résine époxyde

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5% du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [BER-10].

Les réseaux époxy appartiennent à la classe des thermodurcissables. Ces polymères sont des composés macromoléculaires formant un réseau tridimensionnel après réaction chimique. Ces réseaux époxy résultent de la réticulation d'un polymère ou résine de type époxy (prepolymère) et d'un durcisseur (agent de réticulation).

La résine employée est une résine époxyde sans solvant à deux composants **SIKADUR 330** ayant les caractéristiques mécaniques fournies par le fabricant résumé dans le tableau II.4 (Pour plus d'informations voir Annexe 2).

**Tableau II.4.** Caractéristiques mécaniques de la résine époxy SIKADUR 330.

Caractéristiques mécaniques	Matrice époxy SIKADUR 330
Module d'élasticité en traction (DIN 53455) (GPa)	4,5
Module d'élasticité en flexion (ISO 178) (GPa)	3,8
Allongement à la rupture (%)	0,9
Résistance à la traction (MPa)	30
Résistance à la compression (MPa)	55
Densité	1,3
Dureté shore D	> 70

Le tableau II.5 représente les propriétés mécanique de l'ensemble **Composite SIKAWRAP HEX 230 C/SIKADUR 330** donné par le fabricant.

**Tableau II.5.** Caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone/époxy.

Caractéristiques mécaniques	Composite SIKAWRAP HEX 230 C/SIKADUR 330
Résistance en traction (MPa)	750
Module d'élasticité en traction (GPa)	55
Allongement à la rupture (%).	1,15

### II.3.5 Les différents empilements

L'effet et l'efficacité de l'orientation des fibres sur le comportement des colonnes en béton confinées par des plis en PRFV (Polymère Renforcés en Fibres de Verre) ont été étudié et identifier précédemment dans les travaux [BOU-08] et [BOU-11a]. Alors d'après l'étude réalisée on a trouvé que les colonnes confinées par les deux orientations (0/90) et (+30/-60) de PRFV sont les éprouvettes qui donnent les meilleurs comportements mécaniques parmi les

orientations adoptées. A la base des résultats trouvés les deux orientations (empilements) sont choisies pour les utilisés dans le travail actuel.

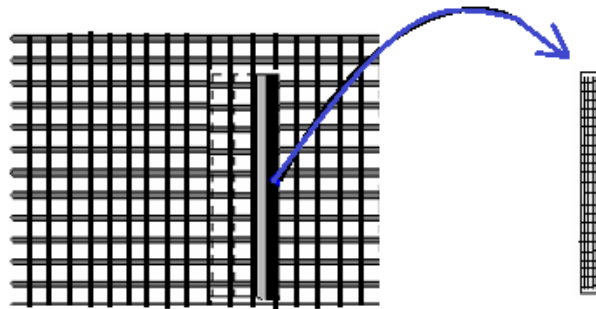
## II.4 Caractérisation des matériaux de PRFV utilisés

### II.4.1 Essai de traction

Le matériau composite en fibres de verre\_E est conçu comme un matériau anisotrope. Il est nécessaire de connaître les constants élastiques du matériau par des essais expérimentaux. L'objectif de l'essai de traction sur le matériau composite est d'identifier son comportement mécanique [ZHE-08].

### II.4.2 Préparation de plaques stratifiées en matériau composite

Deux plaques stratifiées constitués de deux plis ont été préparées, les deux plaques sont fabriquées par le même type de résine (résine polyester), avec des renforts en fibres de verre\_E de la même densité surfacique ( $300 \text{ g/m}^2$ ) mais de type de tissage différents (tissu T2 bidirectionnel et le Mat à fibres courtes coupées). Les éprouvettes de traction sont découpées à partir de ces plaques stratifiées, trois éprouvettes ont été effectuées de chaque plaque, Les dimensions des éprouvettes conformes à celle de l'éprouvette type droite avec des talons comme le montre la figure II.2 selon la norme **ASTM D3171** (Tableau II.6).



**Figure II.2.** Découpe des échantillons à partir d'une plaque en matériaux composites stratifié.

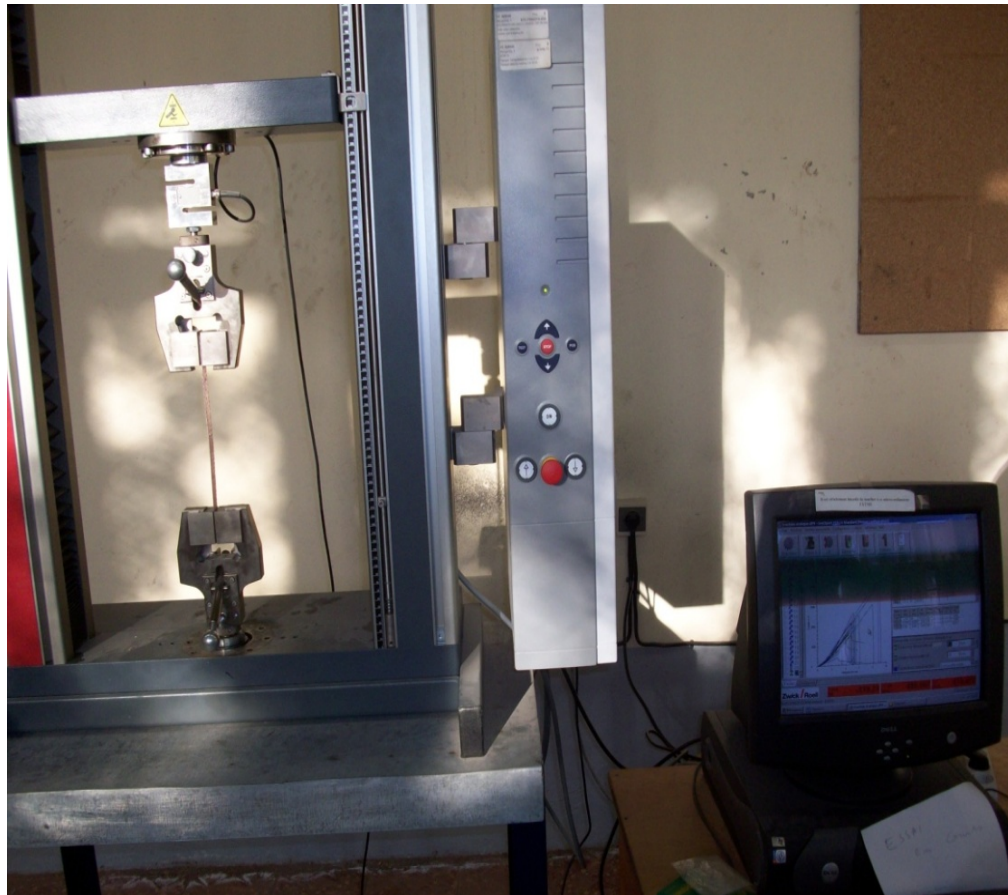
**Tableau II.6.** Dimension des éprouvettes.

	Longueur totale [mm]	Longueur entre les étalons [mm]	Longueur des étalons [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]
<b>Mat</b>	250	174	76	20	2
<b>Tissu (T2)</b>	250	174	76	20	1,2



### II.4.3 Bon d'essai

Les essais de tractions ont été réalisés sur une machine d'essai universelle de type ZWICK ROELLE Z005 (Fig. II.3), cette machine fait partie d'un système d'essai modulaire extensible à plusieurs fonctions, elle est constituée d'une cellule de charge de 5 kN. Le guidage de déplacement de la cellule est sans jeu, la machine est pilotée par un logiciel *Testexpert* qui permet d'enregistrer les résultats sur un procès verbal d'essais. Un traitement statistique des données est réalisé en fin de série afin d'obtenir les valeurs moyennes des éprouvettes testées.



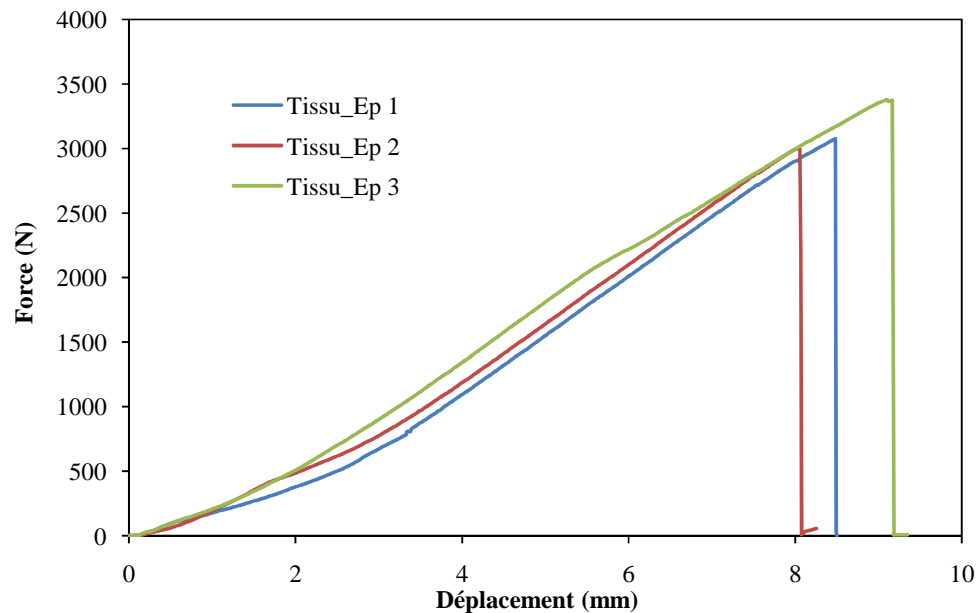
*Figure II.3. Machine d'essai de traction.*

## II.5 Résultats et discussion

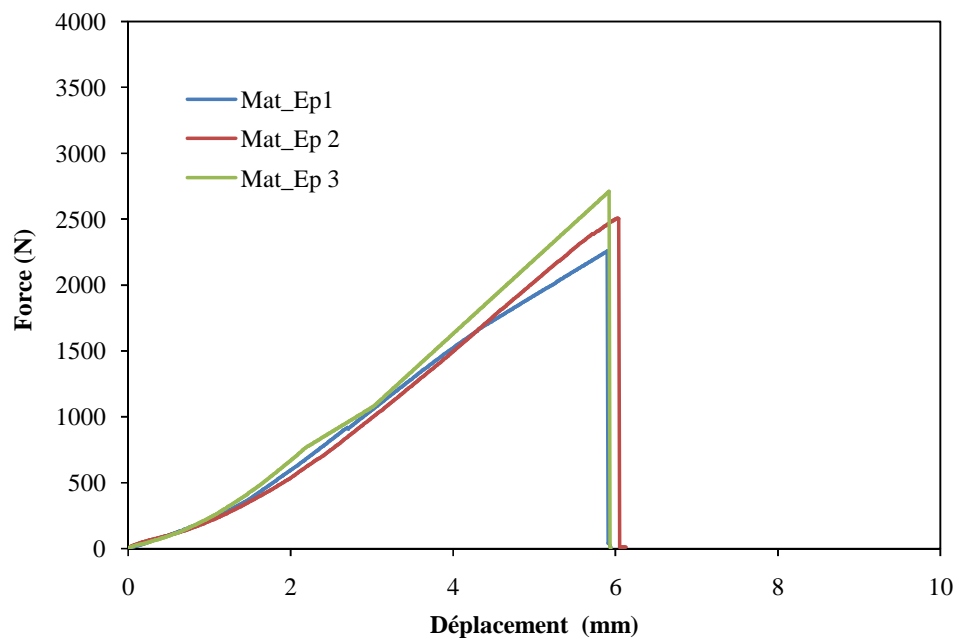
### II.5.1 Résultats des essais de traction

Les figures II.4a et 4b représentent le comportement mécanique Charge/déplacement des éprouvettes du composite stratifié en tissu bidirectionnel (T2) et en Mat à fibres coupées sollicitées en traction monotone (statique). Pour les deux stratifiés le comportement s'effectue

en trois phases : la première phase linéaire qui correspond au comportement élastique du stratifié, suivie par un comportement non linéaire dans la deuxième phase qui correspond à la phase de formation et de développement des fissures qui conduisent à la rupture de l'éprouvette dans la troisième phase qui est très courte où le matériau n'a plus de résistance et l'éprouvette se rompt très rapidement.



(a)

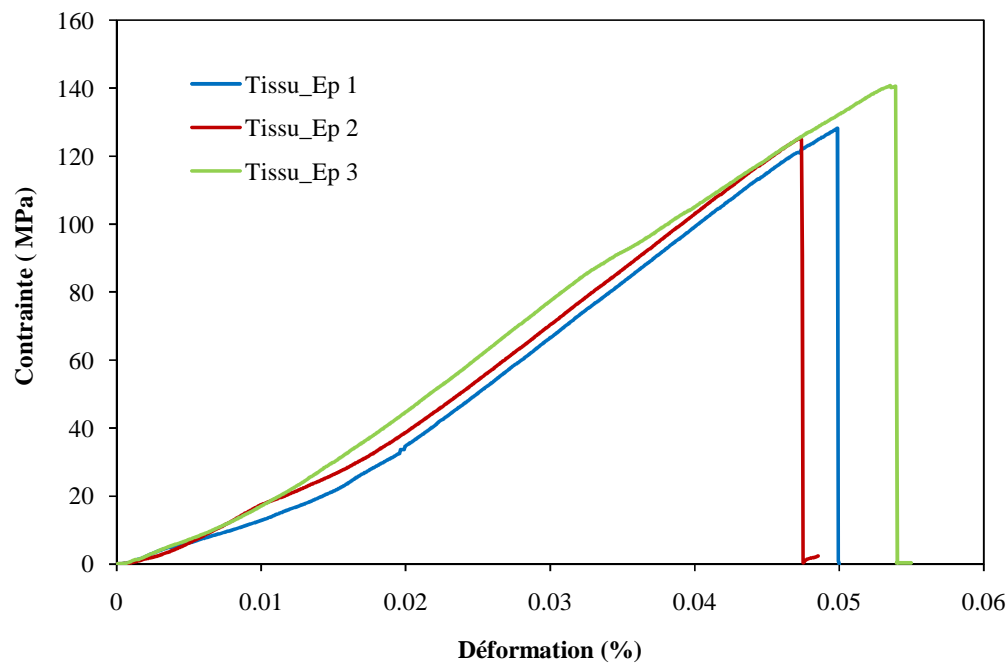


(b)

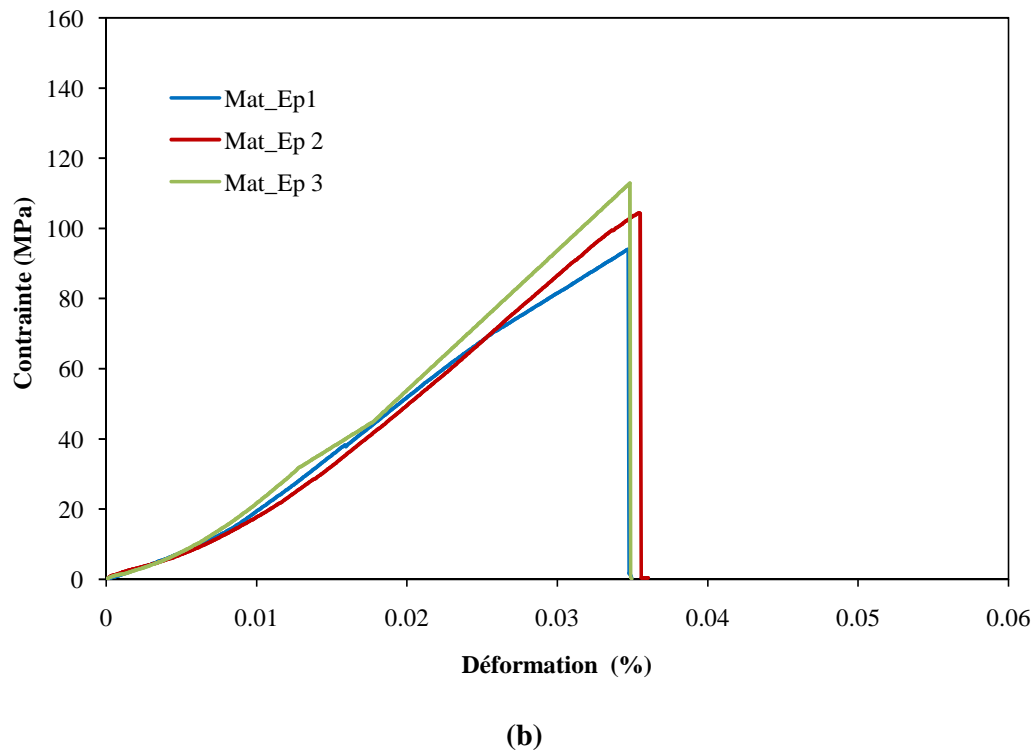
**Figure II.4.** Comportement mécanique Charge/déplacement des éprouvettes stratifiées (a) en tissu T2 et (b) en Mat.

Malgré que les éprouvettes soient prises d'une même plaque composite, une dispersion sons noté entre les courbes. Ces dispersions peuvent être dues d'une part au mode de fabrication des plaques qui se fait d'une manière artisanale qui ne permet pas de contrôler l'épaisseur de la résine, et d'autre part aux dispersions dans les dimensions obtenues lors de la coupe des échantillons.

Le comportement mécanique contrainte/déformation des éprouvettes sont présenté dans les figures II.5a et II.5b respectivement ; le comportement est similaire à celui déjà observé dans la figure II.4. D'après les résultats obtenus de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour les deux stratifiés, on constate que le stratifié en tissu T2 possède un comportement excellent surtout en contrainte a la rupture que celui en Mat.

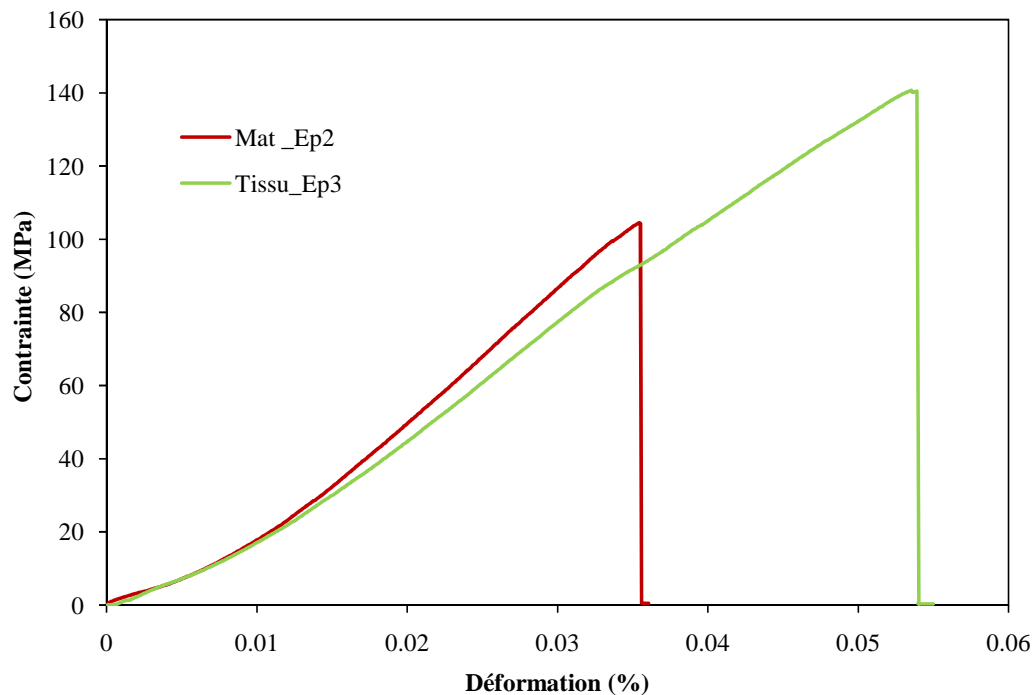


(a)



**Figure II.5.** Comportement mécanique Contrainte/déformation des éprouvettes stratifié (a) en tissu T2 et (b) en Mat.

En comparant les deux stratifiants (Fig. II.6), on remarque que les deux comportements sont identiques dans la première phase, alors que dans la deuxième phase le Mat représente un peu de rigidité par rapport au tissu, ce dernier qui présente une résistance très importante à la déformation, soit une augmentation de 36% de sa contrainte à la rupture est enregistré comparativement à celle du Mat.



**Figure II.6.** Comparaison entre les comportements contrainte/déformation des stratifiés en Mat (a) et en tissu (T2) (b).

Les tableaux II.5 et II.6 montrent les propriétés mécaniques de l'expérimentation des deux stratifiés testés. Le module d'élasticité est calculé d'après la norme ASTM à une pente entre [0,5 à 1] % de la déformation.

**Tableau II.5.** Résultats sur les éprouvettes stratifiées en tissu T2.

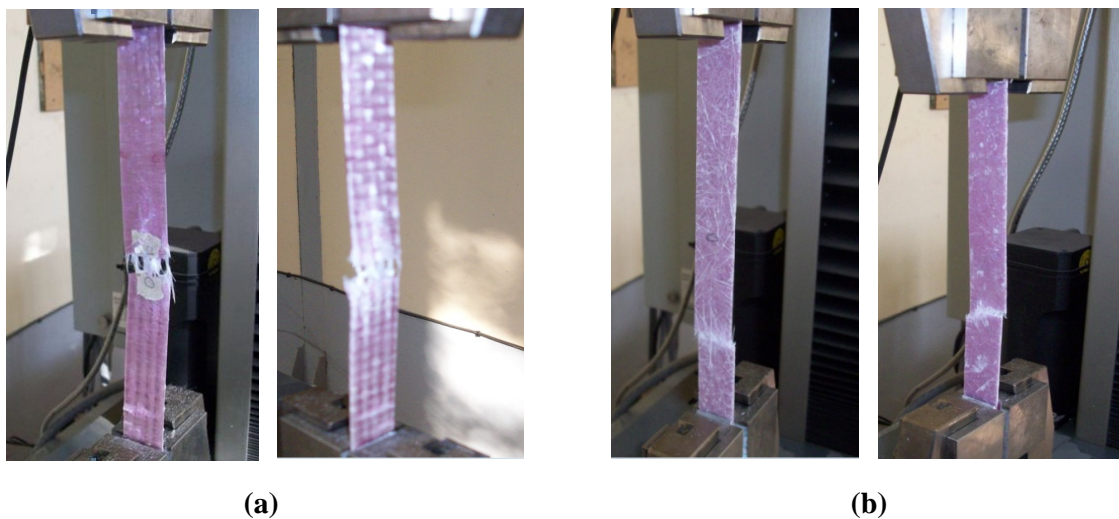
<i>Propriétés mécanique</i>	<i>Eprouvettes</i>		
	<b>Ep 1</b>	<b>Ep 2</b>	<b>Ep 3</b>
<i>Contrainte à la rupture [MPa]</i>	128,15	125,08	140,53
<i>Déformation [%]</i>	0,049	0,047	0,053
<i>Module d'élasticité longitudinale <math>E_L</math> [MPa]</i>	1308	2277	1985
<i>Contrainte moyenne à la rupture [MPa]</i>	<b>131,25 ± 8,179</b>		
<i>Déformation moyenne [%]</i>	<b>0,049 ± 0,003</b>		
<i>Module d'élasticité longitudinale moyenne <math>E_L</math> [MPa]</i>	<b>1856,66 ± 497,083</b>		

**Tableau II.7.** Résultats des éprouvettes stratifiées en Mat.

<i>Eprouvettes</i> <i>Propriétés mécanique</i>	Mat_Ep 1	Mat_Ep 2	Mat_Ep 3
Contrainte à la rupture [MPa]	94,06	104,25	112,92
Déformation [%]	0,034	0,035	0,034
Module d'élasticité longitudinale $E_L$ [MPa]	2304	2179	2783
Contrainte moyenne à la rupture [MPa]	<b>103,74 ± 9,440</b>		
Déformation moyenne [%]	<b>0,034 ± 0.0005</b>		
Module d'élasticité longitudinale moyenne $E_L$ [MPa]	<b>2422 ± 318.82</b>		

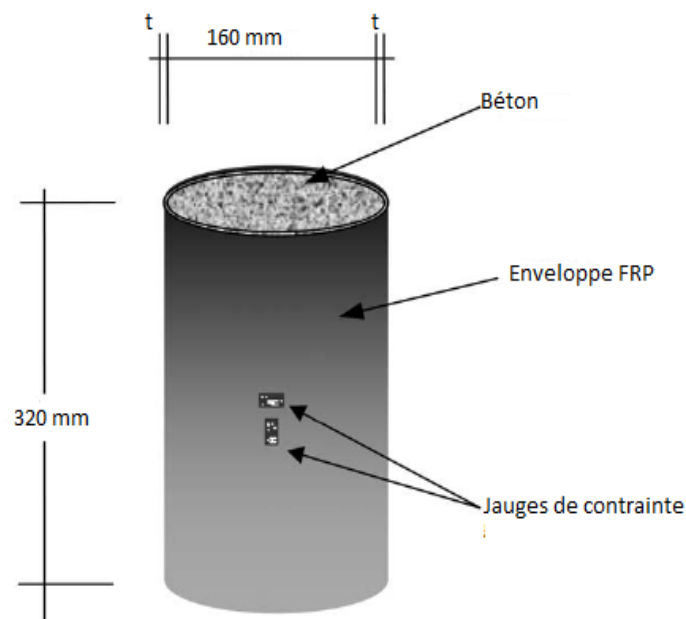
### II.5.2 Modes de ruptures

La figure II.7 illustre les modes de rupture des stratifiés testés; (a) en tissu T2 et (b) en Mat. L'endommagement est initié par des fissures dans la résine suivi par une rupture des fibres dans le sens de la longueur des éprouvettes dans le cas du stratifié en tissu T2 (Fig. II.7a). Par contre dans le cas du stratifié en Mat (Fig. II.7b), le mode de rupture apparaît comme une rupture par cisaillement avec un faible angle et parfois aléatoire.

**Figure II. 7.** Modes et faciès de rupture des stratifiés en (a)Tissu (T2) et en (b) Mat.

## II.6 Essai de compression

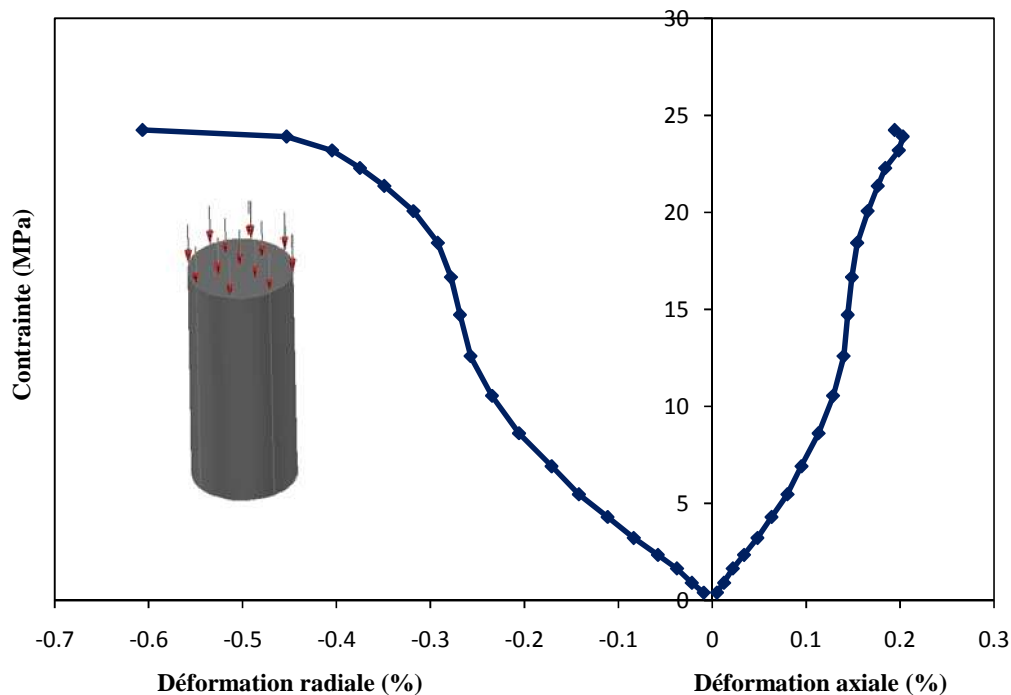
Le comportement du béton en compression est déterminé par des essais de compression uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques. Des jauges d'extensometries sont collées au centre de chaque éprouvette verticalement et horizontalement (Fig. II.8). Ces jauges permettent de mesurer les déformations axiales et radiales à l'aide d'un pont de Wheatstone. La mise sous contrainte doit être effectuée sans choc et d'une manière continue à une vitesse constante durant tout l'essai.



**Figure II.8.** Montage des jauges et détail sur l'éprouvette confinée.

A titre d'exemple un essai de compression réalisé dans la présente étude est illustré dans la figure II.9, cette figure montre le comportement contrainte/déformation d'une éprouvette cylindrique en béton de contrôle sollicitée en compression uniaxiale. La courbe donne une valeur maximale de la résistance en compression de 24,24 MPa et des valeurs maximales des déformations axiale et radiale de l'ordre de 0,19% et de 0,60% respectivement.





**Figure II.9.** Comportement mécanique du béton sollicité à la compression.

### II.6.1 Fabrication et préparation des colonnes en béton

Les éprouvettes sont des cylindres en béton de dimension standard ( $16 \times 32$  cm). Elles sont préparées par série de 50 échantillons par une société ayant une centrale à béton (GESI-BAT, Algérie) permettant ainsi l'obtention des éprouvettes plus ou moins uniformes. Après décoffrage les éprouvettes sont placées dans une chambre à température ambiante pour la cure du béton, ceci durant une période de 28 jours avant de les préparer pour renforcées par des couches en PRF. Par la suite les surfaces des cylindres en béton sont séchées et brossées, ceci à permis d'obtenir une surface de béton rugueuse et propre. La préparation de la surface du béton a pour objectif d'éliminer toute trace superficielle d'huile, de graisse, de produit de décoffrage et autres souillures afin d'atteindre une surface propre permettant de recevoir la résine. Les extrémités des surfaces cylindriques sont rectifiées à l'aide d'une pierre pour assuré la planéité des surfaces aux contacte et de leur perpendicularité aux génératrices.

### II.6.2 Confinement externe par matériaux composites «PRF»

La technique adoptée dans ce travail pour confinées les éprouvettes par des couches en PRF est la technique de stratification directe in-situ (présentée dans l'étude bibliographique). Deux types de résines sont utilisés pour deux renfort différents, la première est une résine polyester employer pour les deux types de tissus bidirectionnel (T1) et (T2) et le Mat en fibres

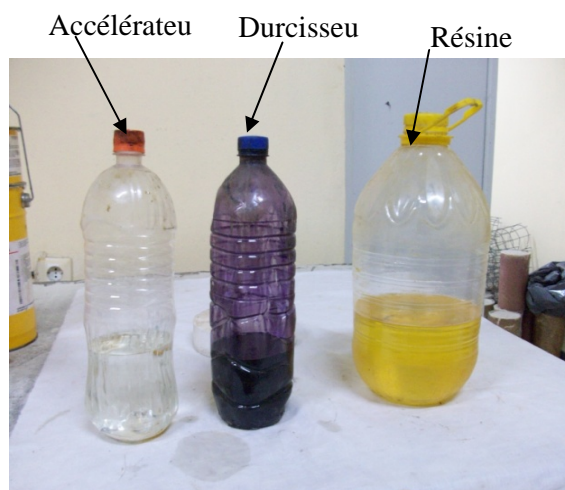
de verre\_E; par contre la deuxième est une résine époxyde SIKADUR 330 employer pour une nappe unidirectionnel en fibres de carbone SIKA WRAP HEX 230 C (Fig. II.10).



**Figure II.10.** Différents types de renforts utilisés: a) Tissu (T1) (densité surfacique de  $500 \text{ g/m}^2$ ) ; b) Mat (densité surfacique de  $300 \text{ g/m}^2$ ) ; c) Tissu (T2) (densité surfacique de  $300 \text{ g/m}^2$ ) et d) Nappe unidirectionnel en fibre de carbone.

### II.6.2.1 Préparation de la résine polyester

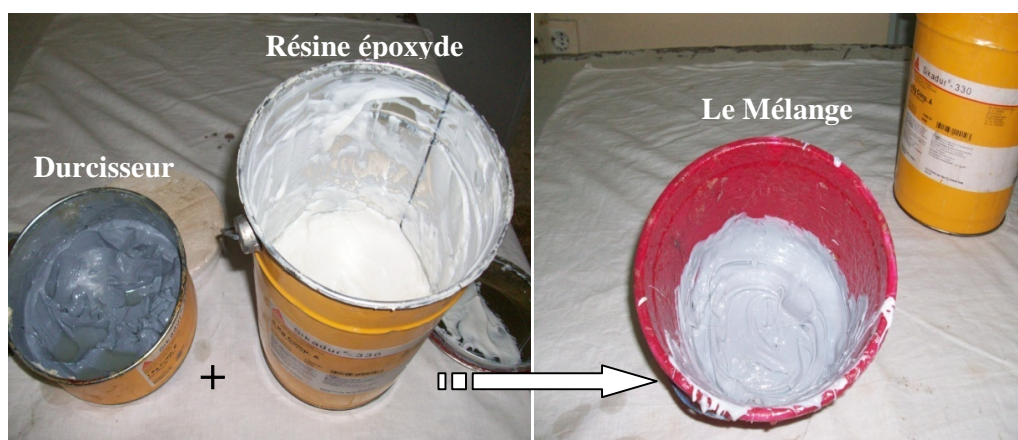
La résine polyester utilisé constituée de trois composants (la résine; le durcisseur et l'accélérateur). Leur préparation est facile, on verse une quantité suffisante de la résine dans une cuvette en plastique puis en rajoute un certain pourcentage (de 1 à 2%) de durcisseur. Le mélange résine/durcisseur est mixé jusqu'à l'obtention d'une couleur rose, et finalement en rajoute une autre fois certain pourcentage (de 1 à 2%) de l'accélérateur et on mixe de nouveau jusqu'au le mélange change leur couleur une deuxième fois (vert foncé).



**Figure II.11.** Constituants de la résine polyester utilisée.

### II.6.2.2 Préparation de la résine époxy Sikadur-330

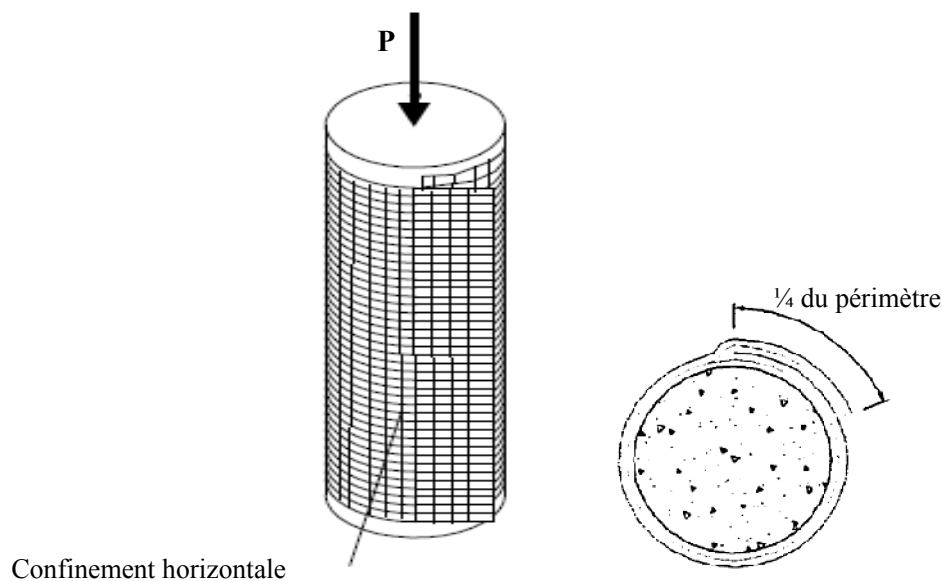
La résine à base d'époxyde est produite par deux composants, résine et durcisseur, doit être mélangée peu de temps avant l'application. La proportion en masse du durcisseur représente 25% de la masse de la résine ( $\text{durcisseur/résine} = 0,25$ ) conformément aux recommandations du fournisseur. Le malaxage a été réalisé pendant trois minutes environ jusqu'à la disparition complète des traînées de couleur et l'obtention d'un mélange homogène (Fig. II.12).



**Figure II.12.** Constituants de la résine époxyde utilisée.

### II.6.2.3 Application du PRF

Deux types de renfort sont utilisés, le PRFV (polymère renforcé à base de fibre de verre\_E) avec une résine polyester, et le PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone) SIKAWRAP HEX 230 c avec une résine époxyde SIKADUR 330. Les bandes de tissu de renforcement (fibres de verre ou de carbone) ont été mesurées et ensuite coupées à l'aide d'un couteau et d'une règle métallique. La longueur des bandes d'un pli de confinement, correspondait au périmètre (pour une couche) ou à  $n$  fois le périmètre du spécimen considérée (pour  $n$  couches). De plus, la couche extérieure est prolongée (recouvrement en direction longitudinale des fibres) pour assurer un chevauchement de  $\frac{1}{4}$  du périmètre (Fig. II.13) qui permet de développer la pleine résistance des fibres, sans glissement ni décollement de la couche composite [BEN-09, SHA-00].



**Figure II.13.** Longueur de chevauchement pour une colonne confinée par 1 pli de «PRF».

Une couche de résine (polyester ou époxy) est appliquée sur la surface latérale de la colonne en béton (Les éprouvettes ont été nettoyées et complètement sec avant l'application de la première couche de résine), suivi par une couche du renfort. Un pinceau est employé pour aider à envelopper le renfort, à l'extrémité une autre couche de résine a été appliquée au dessus de ce dernier. Ceci pour réaliser d'un pli de l'enveloppe composite en PRF, et le processus a été répété pour l'application des plusieurs plis. Avant d'être testés, les éprouvettes confinées ont été laissées dans une chambre à température ambiante pour une durée de deux semaines au minimum pour permettre la polymérisation complète de la résine (Fig. II.14). L'avantage principal du renfort par les tissus secs est la manipulation facile sur le chantier, avec une absence complète de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet en particulier un suivi parfait de la forme de la structure a renforcé.





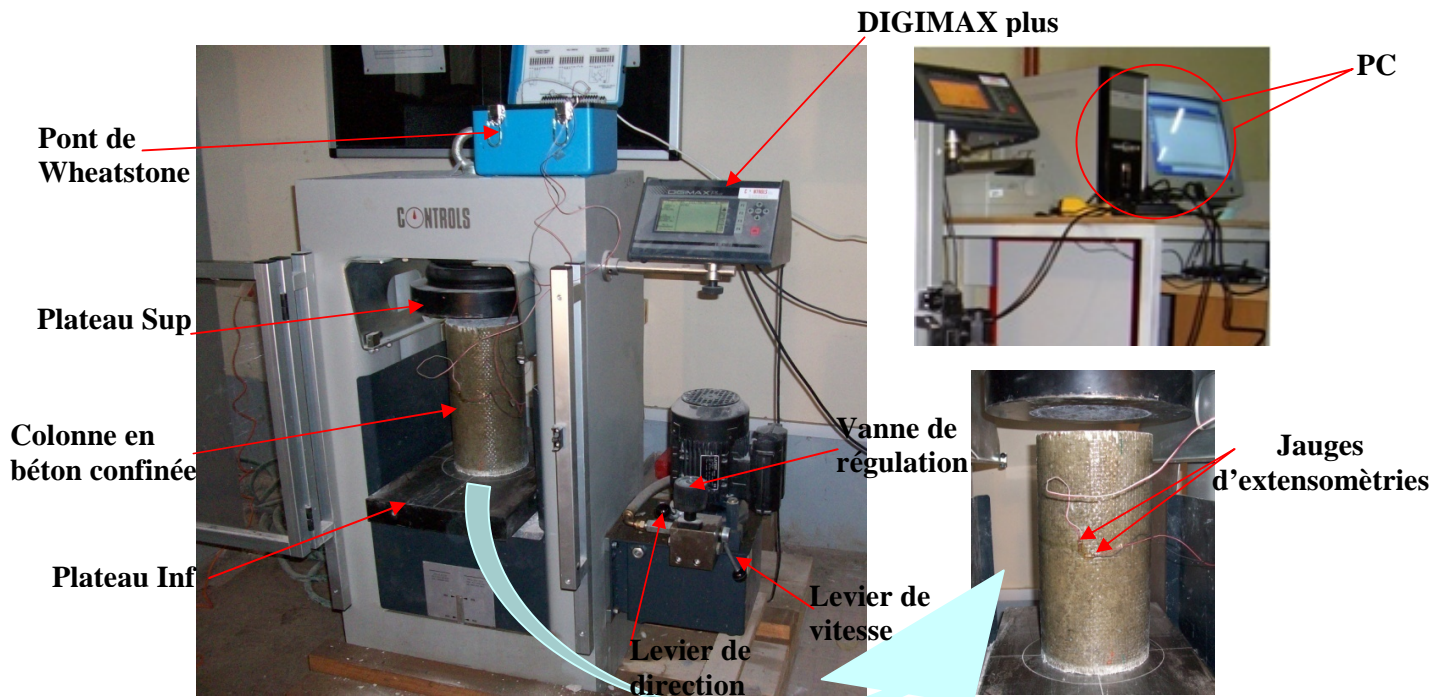
**Figure II.14.** Modèles des colonnes renforcées par les trois types de renfort: a) Mat, b) Tissu T1, c) Tissu T2 et d) Carbone unidirectionnel.

### II.6.3 Instrumentations et machine d'essai

Le chargement axial des éprouvettes a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique de type "CONTROLS\_ Model 50-C55G2/L" à affichage DIGIMAX PLUS dont la capacité est de 3000 kN. Les essais de compression simple ont été réalisés conformément à la norme ASTM C39/C39M- 9a. 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 éprouvettes sont mesurés avec un collage des jauges d'extensométries installés au milieu des éprouvettes verticalement pour les mesures des déformations axiales et dans le sens circonférentiel pour les expansions radiales.

Le système d'acquisition de données assemblé à un ordinateur peut directement enregistrer les fichiers et un traçage des courbes charge/temps apparaît sur le DIGIMAX PLUS. De ces courbes, la capacité de charge, le comportement avant les fissures du béton, le

comportement après les fissures du béton, et l'effet du renforcement par PRF peut être identifié. Les essais sont effectués au sein du Laboratoire du Génie Civil et Hydraulique (LGCH) de l'université 08 Mai 1945 de Guelma.



**Figure II.15.** Machine d'essai et montage des instruments de mesure des déformations.

## II.7 Conclusion

Ce chapitre est en deux volets, le premier **concerne** la présentation des matériaux de l'étude et les propriétés de chaque constituant, et aussi la préparation des éprouvettes en béton sous forme des colonnes courtes, ainsi leur méthode de confinement par couches en PRF on présentant les matières premières utilisées, en particulier la préparation des deux résines (polyester et époxyde) employées. Les machines d'essai et la réalisation d'un essai de compression sont identifiées.

Dans le deuxième volet, des essais expérimentaux en **traction** statique des différents composites stratifiés sont réalisés pour identifier leurs comportements et leurs propriétés mécaniques.

- L'analyse des résultats des essais de caractérisation obtenus pour les deux types de stratifiés permet de tirer les conclusions suivantes :
- Le stratifié du tissu T2/Polyester est caractérisé par une charge et un déplacement à la rupture beaucoup plus importante que le stratifié Mat/Polyester.

➤ D'après l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour les deux types de stratifiés, on constate que l'architecture tissu T2/Polyester possède un bon comportement que celle de l'architecture Mat/Polyester. Sa contrainte de la rupture est plus grande de 36% que celle du (Mat)<sub>2</sub>.

---

# *Chapitre III*

## *Etude expérimentale des colonnes confinées par PRFV*

---





## Chapitre III

### Etudes Expérimentales

#### III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement mécanique des éprouvettes cylindriques en béton renforcées par différents types de confinements en matériaux composite PRFV (T1; T2, Mat et hybrides) sollicitées en compression uniaxiale. Le but de cette étude est de mettre en évidence l'efficacité du renforcement en utilisant les matériaux composites par l'étude de l'influence du nombre de couches (l'épaisseur) de l'enveloppe PRFV et du type de renfort sur le comportement structural des éprouvettes confinées. Les renforts en fibres de verre précité ont été hybridés entre eux pour essayer d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques des enveloppes composites. L'analyse des résultats des essais de compression ainsi les modes d'endommagement et de rupture des éprouvettes testées sont identifiés. Ce chapitre a fait l'objet de la publication Bouchelaghem et *al* [BOU-11a]. La technique des chargements répétés en compression adopté dans le travail de ce chapitre a été appliquée sur toutes les éprouvettes pour voir à quel degré les matériaux composites peuvent améliorer le comportement de l'élément confiné pour chaque configuration.

#### III.2 Programme expérimentale

Le programme expérimental a été effectué sur des éprouvettes en béton ordinaire, confinées par des PRFV. Les paramètres considérés sont: le nombre de plis des «PRF», le type de renfort utilisé et l'architecture de confinement.

Une série d'éprouvettes est préparées et mise à l'essai. Les éprouvettes d'essai sont soit non confinées; confinées par un nombre de plis de PRFV qui varie de un à quatre plis pour le tissu T2 et le Mat, alors que pour les confinements hybrides les éprouvettes sont confinées à l'aide de deux ou quatre plis de PRFV. Les significations des nomenclatures des confinements sont résumées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Nomenclatures.

Béton de contrôle	Béton non confiné,
T1	Tissu bidirectionnel avec une densité surfacique de 500 g/m <sup>2</sup> ,
T2	Tissu bidirectionnel avec une densité surfacique de 300 g/m <sup>2</sup> ,
M	Mat à fibres courtes coupées avec une densité surfacique de 300 g/m <sup>2</sup> ,
H1	Hybride (T1-T2) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H2	Hybride (T2-T1) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H3	Hybride (T1-M) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H4	Hybride (M-T1) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H5	Hybride (T2-M) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H6	Hybride (T2-M) ; 4 couches (2 pli de chaque),
H7	Hybride (M-T2) ; 2 couches (1 pli de chaque),
H8	Hybride (M-T2) ; 4 couches (2 pli de chaque),

### III.3 Résultats et discussions

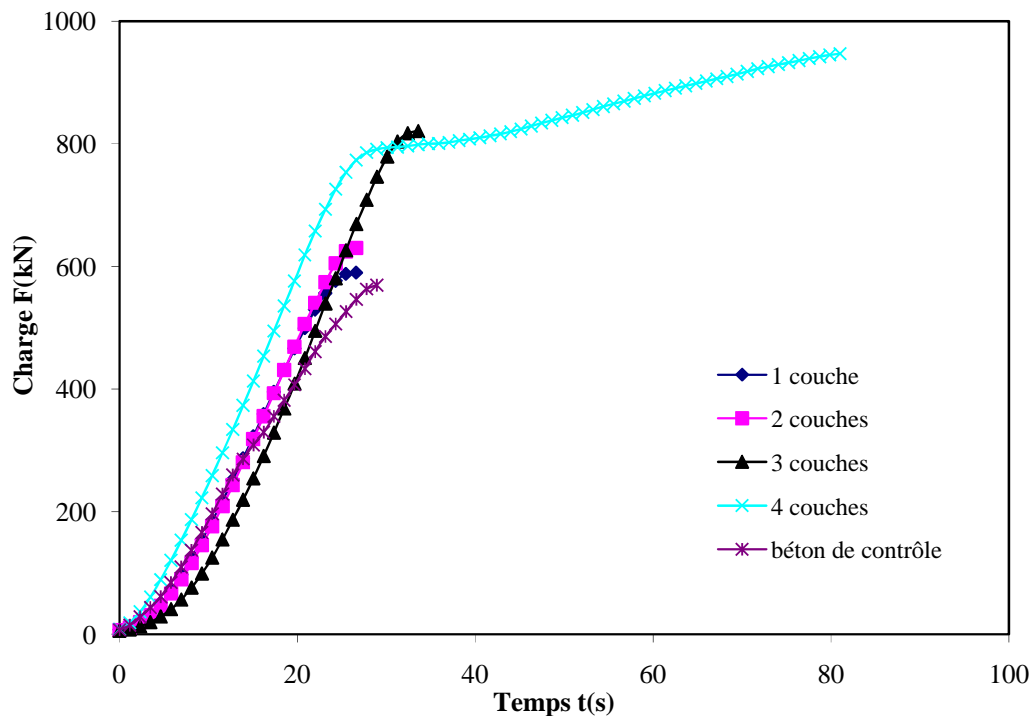
#### III.3.1 Effet du nombre de plis de PRFV sur l'efficacité du confinement

##### III.3.1.1 Renforcement par le tissu (T2)

Le comportement charge/temps représenté dans la figure III.1 montre l'influence du nombre de plis (couches de PRFV de tissu bidirectionnel T2) sur le comportement structural des éprouvettes confinées, comparé à celui du béton de contrôle sollicitées en compression jusqu'à la rupture. La résistance ultime ainsi que les mécanismes d'endommagement des colonnes confinées dépend du nombre des plis utilisés. Le comportement charge/temps des éprouvettes se déroule en trois phases comme l'indique la figure III.1.

- la première phase, non linéaire très courte qui peut être due au mauvais contact entre l'éprouvette et l'appui supérieur de la machine.
- une seconde phase quasi linéaire, correspondant au comportement du béton et c'est dans cette phase qu'a lieu la formation des micros fissures. Le renforcement des colonnes par PRFV améliore leur comportement en termes de rigidité et de résistance, les éprouvettes confinées par trois plis donnent un comportement légèrement moins rigide que les autres colonnes mais avec une charge ultime assez importante.
- la troisième phase où l'éprouvette en béton de contrôle et celle confinées par un, deux et trois couches de PRFV ne résiste plus (non existence de la troisième phase); ces

éprouvettes renforcées se caractérise par des augmentations dans les charges à la rupture proportionnellement au nombre de plis utilisés. Cette phase caractérise le confinement des éprouvettes par quatre couches. Le chargement augmente jusqu'à la rupture par déchirement de l'enveloppe composite à ses extrémités.



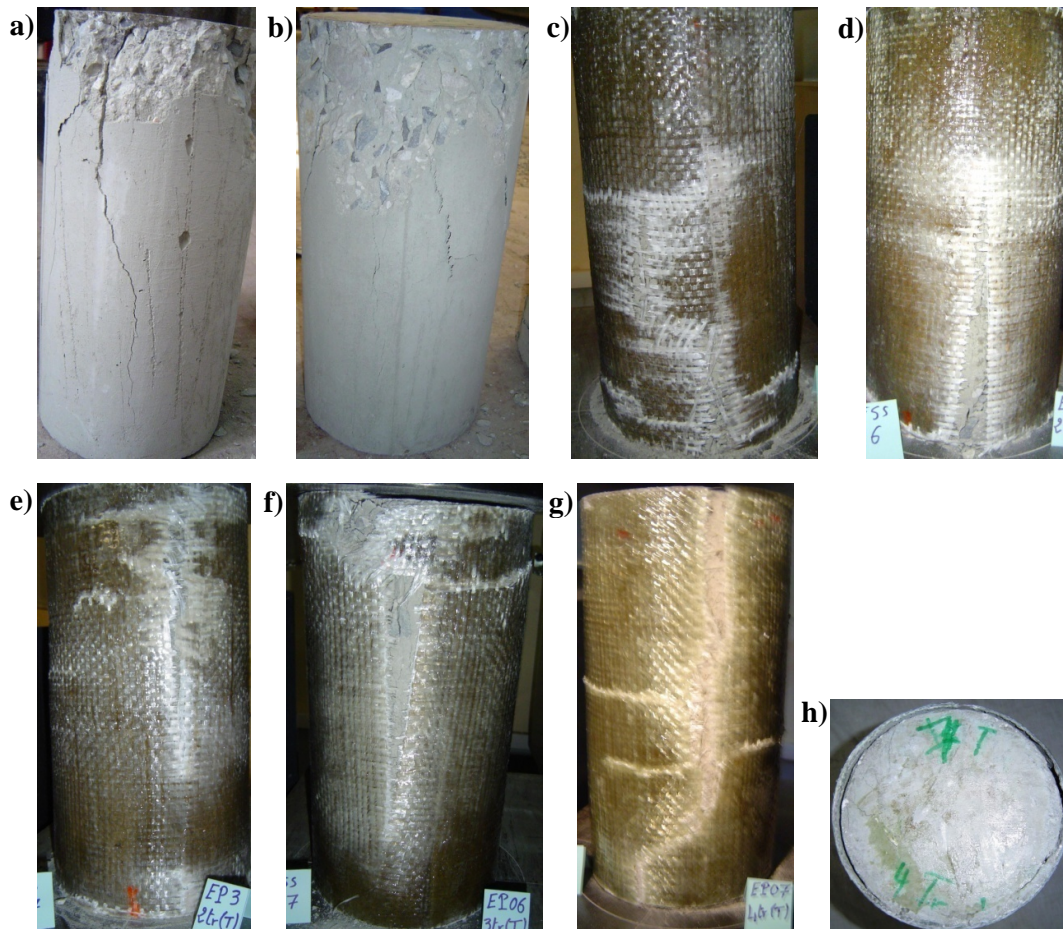
**Figure III.1.** Courbes charge/temps des éprouvettes confinées par le tissu T2 avec le nombre de plis variant de un à quatre.

L'Analyse des résultats obtenus montre que le taux d'amélioration de la résistance ultime des éprouvettes confinées par trois et quatre couches est nettement plus élevé que celui des éprouvettes renforcées par un et deux couches. La figure III.1 montre bien que le nombre de plis joue un rôle très important dans le renforcement et la réparation des éprouvettes.

### III.3.1.2 Modes de ruptures et d'endommagement

La figure III.2 représente les différents modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes en béton de contrôle et celles confinées par le tissu T2 avec un nombre de plis variant de un à quatre sollicitées en compression. La rupture du béton de contrôle est initiée par des craquements formés sous le plateau supérieur de la presse, avec l'augmentation du chargement, les fissures se développent jusqu'à la rupture par cisaillement (Fig. III.2a et III.2b). Pour les éprouvettes confinées, un délaminage est initié par un décollement entre les

torons des fibres verticaux et horizontaux de la chemise composite ; ceci est dû au flambement des torons verticaux sous l'effet du chargement. Le développement de ce délaminage, crée les fissures du pli externe de l'enveloppe composite, qui se propage par la suite et pénètre dans le pli interne de l'enveloppe PRFV jusqu'à la rupture des fibres verticales.



**Figure III.2.** Différents modes de rupture, a) et b) béton de contrôle, de c) à g) éprouvettes confinées par 1, 2, 3 et 4 plis de tissu T2 respectivement, h) délaminage entre l'enveloppe composite et le béton.

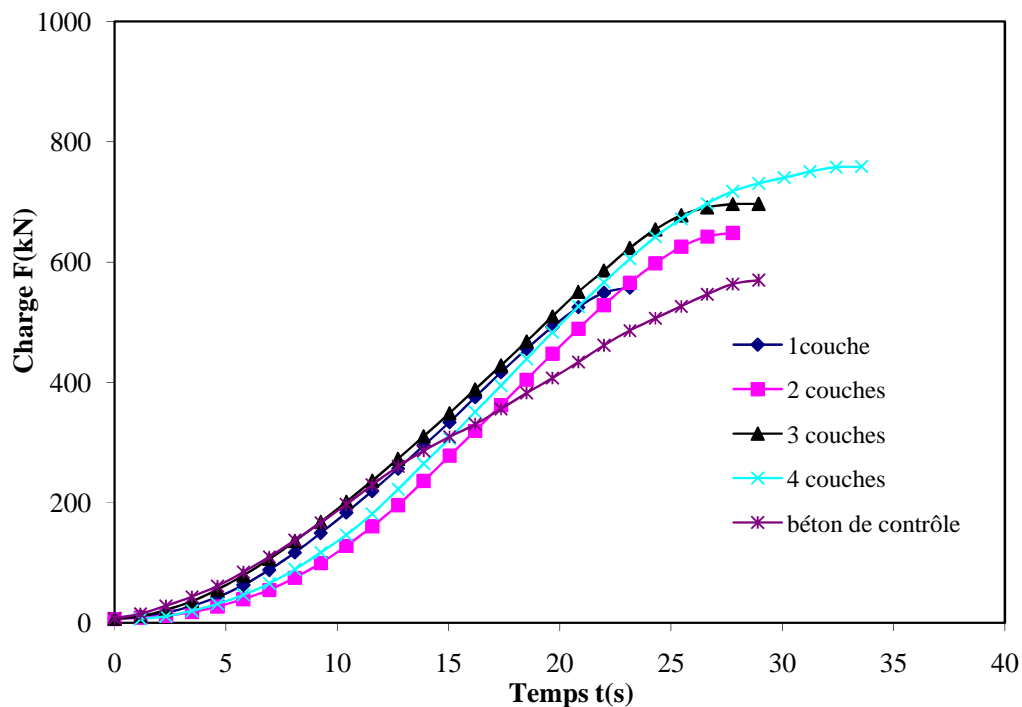
La rupture des éprouvettes confinées est marquée par une rupture des fibres du tissu dans le sens de la hauteur de l'éprouvette et parfois elle se prolonge le long de sa circonférence. Le mode de rupture constaté est de type ductile précédé par des craquements du composite. Aucun glissement au niveau des interfaces ou des zones de recouvrement du PRFV n'est pas enregistré.

Dans l'ensemble des éprouvettes testés, la rupture du béton se produit avant que les enveloppes en composites n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes. D'autre part,

au seuil de la rupture, des déformations non uniformes se développent suite à la fissuration interne du béton, ceci est en bonne concordance avec les travaux de [MAT-05]. Ces déformations non uniformes conjuguées avec une charge importante appliquée sur le béton fissuré, provoquent une concentration de contraintes sur l'enveloppe PRF, ce qui peut être la cause d'une rupture finale prématurée des éprouvettes. Le changement de couleur sur l'enveloppe PRF (Fig. III.2g) est dû aux déformations et décollement entre ce dernier et le corps en béton (Fig. III.2h).

### III.3.1.3 Renforcement par le Mat

Les courbes charge/temps des éprouvettes confinées par le Mat illustrées dans la figure III.3, avec des enveloppes composites constituées d'un, deux, trois et quatre plis sont similaire à celles représentées dans la figure III.1.



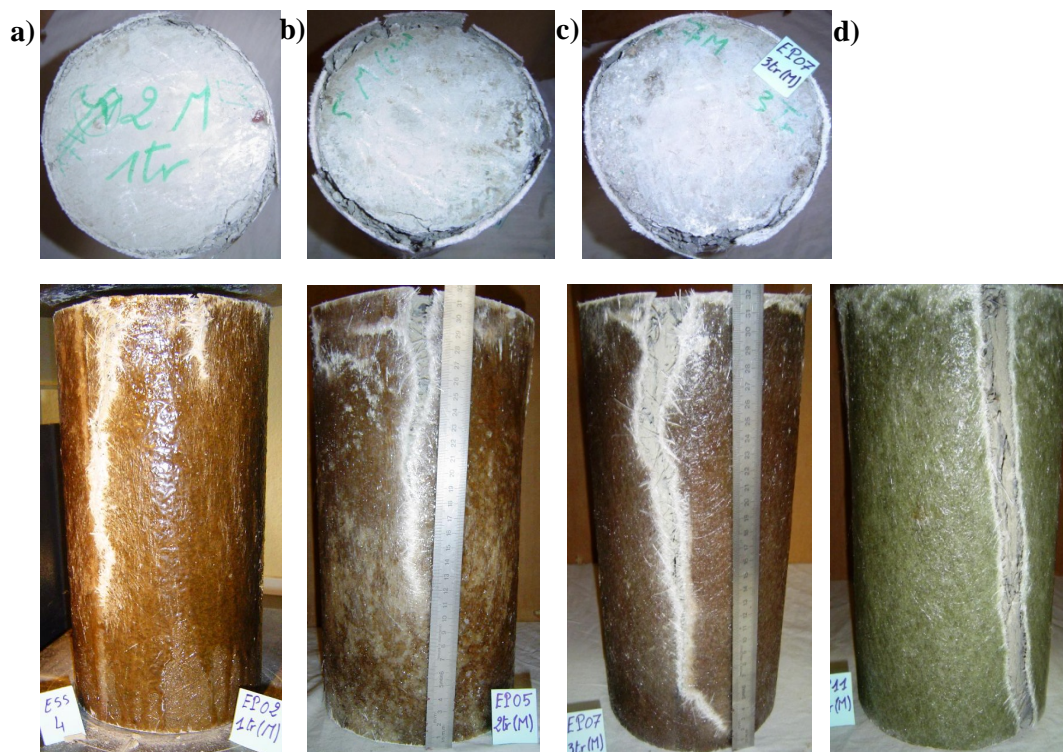
**Figure III.3.** Courbes charge/temps des éprouvettes confinées par le Mat avec un nombre de plis variable de un à quatre.

D'après les courbes on observe une amélioration particulière de la résistance globale pour les éprouvettes confinées par quatre couches. Cependant, cette amélioration de résistance est moins importante que celle obtenue dans le cas de confinement par un tissu de même densité T2 (Fig. III.1).



### III.3.1.4 Modes de ruptures et d'endommagement

La figure III.4 représente les modes de rupture des éprouvettes confinées par des enveloppes en PRF de Mat avec un nombre de couches compris entre un et quatre plis. Le type de rupture est semblable pour toutes les éprouvettes considérées; quoique, avec l'augmentation du nombre de couches les éprouvettes confinées deviennent plus rigides et donc plus fragiles. L'endommagement est initié par une ou plusieurs fissures préliminaires à l'intérieur du béton (Fig. III.4a) et avec l'augmentation de la charge on observe un délaminage entre l'enveloppe composite et le béton (Fig. III.4b). L'endommagement est initié par une ou plusieurs fissures préliminaires à l'intérieur du béton (Fig. III.4a) et avec l'augmentation de la charge on observe un délaminage entre l'enveloppe composite et le béton (Fig. III.4b).



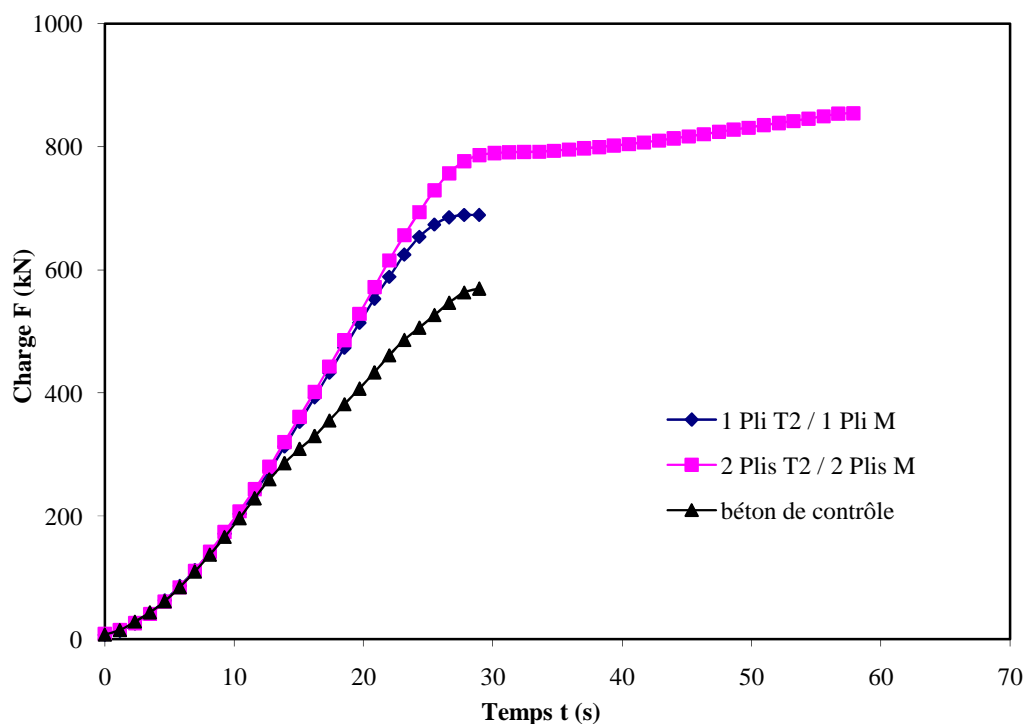
**Figure III.4.** Type d'endommagement des éprouvettes confinées par le Mat avec le nombre de couche variant de un (a) à quatre couches (d).

Comme le Mat est fabriqué par des fibres courtes coupées orientées aléatoirement, la fissure pénètre facilement entre les couches de l'enveloppe PRF et le développement du décollement mène à la rupture des fibres entre eux (Fig. III.4c). Finalement, une rupture verticale dans l'enveloppe composite est initialement créée par l'expansion du béton fissuré conduit à la rupture des fibres et par la suite à la rupture globale de la chemise composite (Fig. III.4d).

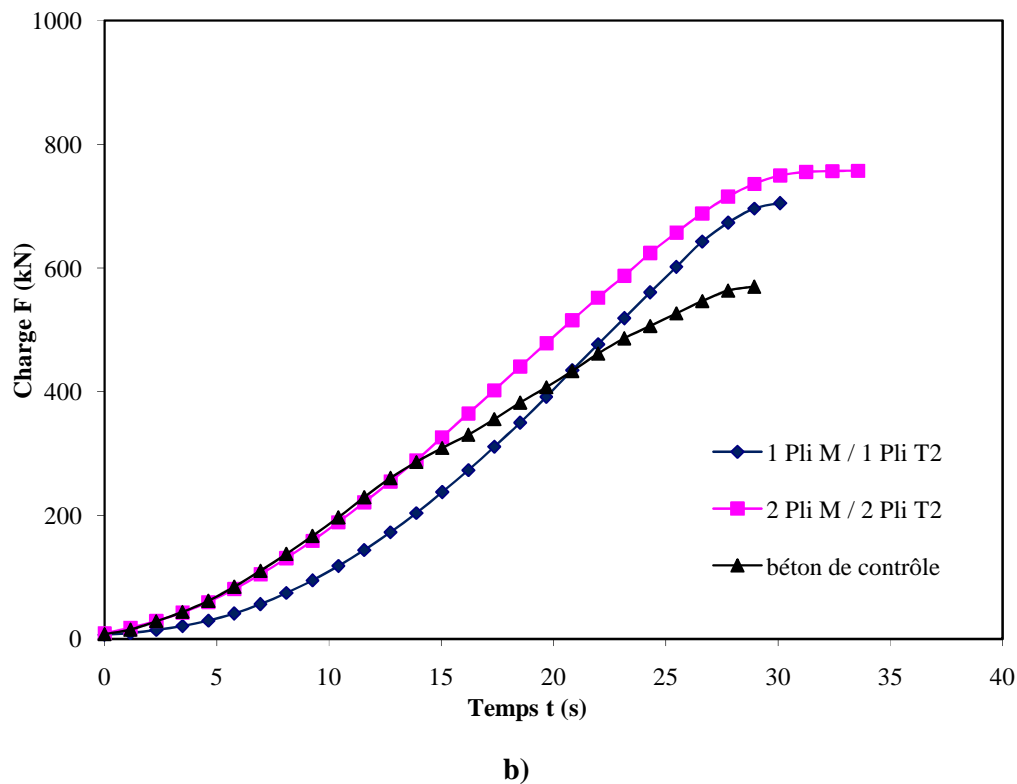
### III.3.1.5 Renforcement hybrides constitué de Mat et de tissu T2

La figure III.5 représente les courbes charge/temps des éprouvettes confinées par les hybrides H5 (T2/Mat) et H7 (Mat/T2) utilisant un pli de chaque type de renfort, et H6 (T2/Mat), et H8 (Mat/T2) employant deux plis de chaque type de renfort respectivement. Pour l'hybride H7 (Mat à l'intérieur) le comportement est très proche à celui des éprouvettes confinées par le Mat (Fig. III.3). Alors que l'hybride H5 (Tissu à l'intérieur) leur comportement est similaire à celui obtenu pour les éprouvettes confinées par le tissu T2 (Fig. III.1). En d'autres termes, le comportement dépend fortement de la première couche de l'enveloppe en composite qui est en contact direct avec le béton.

A partir de ces résultats il est évident de noter que, le meilleur comportement mécanique est obtenue pour l'hybride H7 (T2/Mat) avec une résistance à la rupture plus grande de 100 kN (Fig. III.5b) comparativement avec l'hybride H8 (Mat/T2).



a)

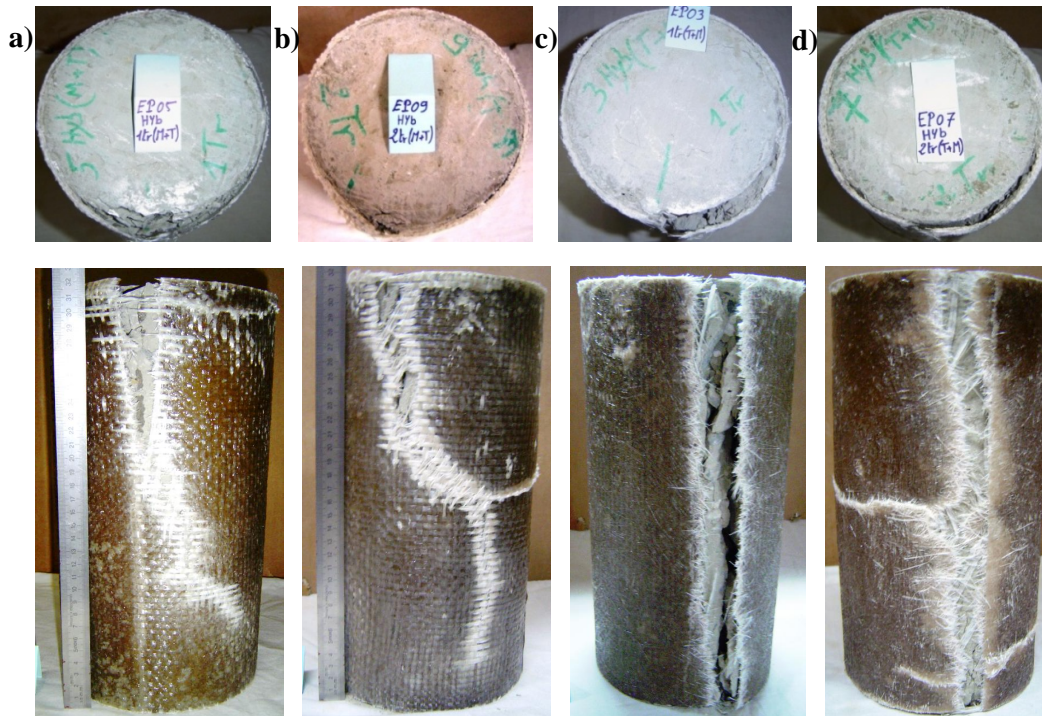


**Figure III.5.** Courbes charge/temps des colonnes renforcées par les hybrides : a) H5, H6, et b) H7, H8 ayant des nombres de plis de deux ou quatre.

### III.3.1.6 Types de rupture des éprouvettes confinées par des PRF hybrides

D'après la figure III.6, on peut noter que les modes d'endommagement suivent le comportement charge/temps, c.-à-d. les endommagements observés sur les éprouvettes confinées par les hybrides H7 et H8 (Mat/T2), ayant 1 et 2 plis de chaque type de renfort respectivement (Fig.s III.6a et III.6b), sont similaires à celui enregistré pour les éprouvettes confinées par le tissu T2 (Fig.s III.2e et III.2g). Toutefois, la déformation par cisaillement est plus claire dans la chemise hybride, notamment pour le cas des hybrides H6 et H8 (Fig.s III.6b et III.6d). D'autre part, les modes d'endommagements des éprouvettes confinées par les hybrides H5 et H6 (T2/Mat), ayant 1 et 2 plis de chaque type de renfort sont identiques à celui observé dans le cas des confinements par le Mat (Fig. III.4). En d'autres termes, l'endommagement suit cette fois-ci les couches externes de l'enveloppe composite.





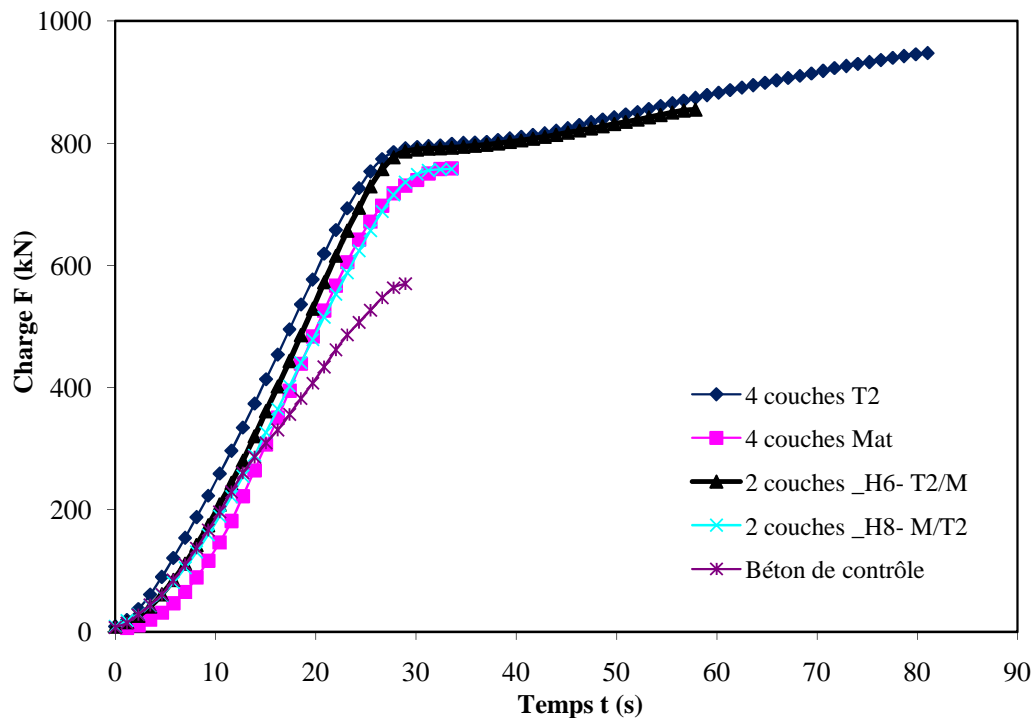
**Figure III.6.** Modes de rupture des éprouvettes confinées par des hybrides de PRF : (a) H7, (b) H8, (c) H5 et (d) H6.

### III.4 Effet du type de renfort sur le confinement par PRF

#### III.4.1 Effet de type de renfort sur le comportement charge/temps

Une comparaison globale, illustrées dans la figure III.7, a été faite entre le comportement charge/temps des éprouvettes ayant des taux de renforcement élevé confinées par quatre plis de composite avec différents type de renforts.

Les éprouvettes confinées par quatre plis de tissu T2 et par quatre plis de l'hybride H6 (T2/Mat, deux plis chacun), sont caractérisés par un comportement similaire en trois phases, les premières possèdent une résistance et un temps d'essai plus grands comparativement aux deuxièmes. Les résistances ultimes des éprouvettes recouvertes par T2 et H6 sont largement plus importantes que celles enveloppées par H8 (Mat/T2, deux plis de chacun) et quatre plis de Mat (Fig. III.7). Ce comportement particulier est dû au type de tissu utilisé (tissu bidirectionnel), où les fibres de la direction circonférentielle de l'éprouvette permettent une bonne résistance au gonflement du béton, tandis que les fibres verticales résistent au flambement. On observe aussi que le comportement des éprouvettes confinées par l'hybride H8 (Mat/T2, deux plis de chacun) est presque identique à celui des éprouvettes confinées par le Mat.



**Figure III.7.** Comparaison entre le comportement charge/temps des éprouvettes confinées par différents types de PRFV ayant quatre plis.

### III.4.2 Effet de type de renfort sur les modes d'endommagement

La rupture des colonnes confinées par quatre plis de PRFV se caractérise par des fissures dominantes sur toute la hauteur, à cause du taux de confinement important engendré par le nombre de plis de l'enveloppe composite. Les fissures sont initiées sous l'appui supérieur et par l'augmentation de la charge elles se propagent par la suite de haut vers le bas, après rupture des colonnes on observe que les ruptures des enveloppes composites par déchirement sont localisées sur les fissures de béton du noyau comme le montre la figure III.8. L'ouverture des fissures des colonnes confinées par le tissu T2 et l'hybride H8 (Mat/T2) est décroissante de haut vers le bas (Fig. III.8b et III.8e). Par contre, celle des colonnes confinées par le Mat et l'hybride H6 (T2/Mat) est presque constante sur toute la hauteur (Fig. III.8c et III.8d).



**Figure III.8.** Modes d'endommagement du béton de contrôle comparés avec les éprouvettes renforcées par différents types de renforts.

### III.5 Chargement répété en compression des éprouvettes confinés et leurs modes de rupture

#### III.5.1 Comportement des charges répétées

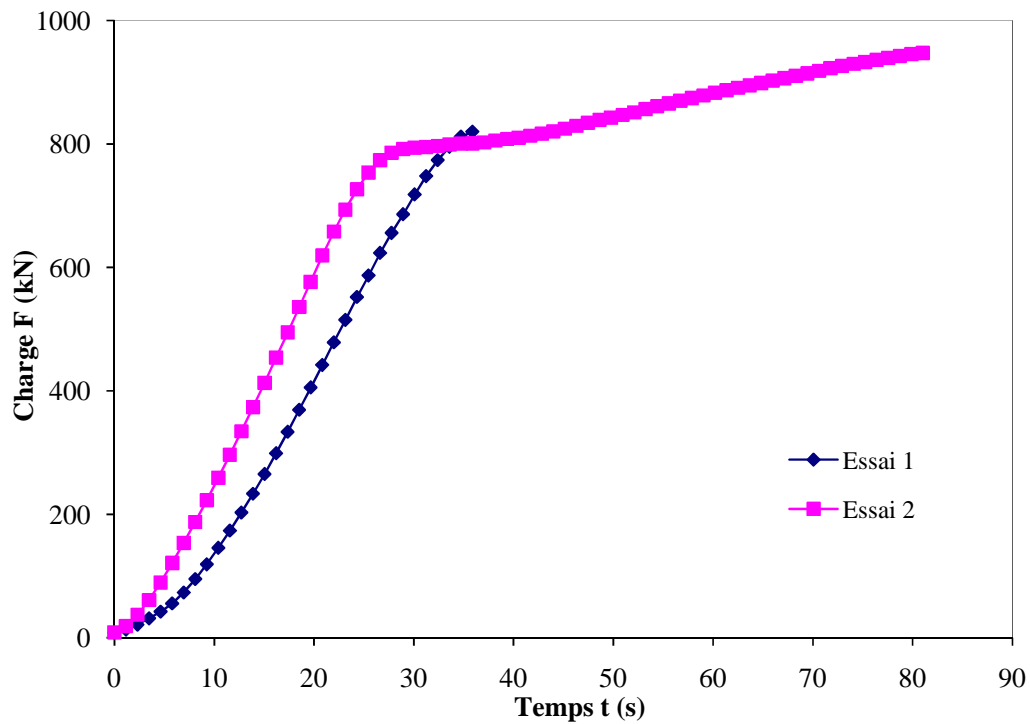
Des chargements répétés en compression uniaxiale réalisés suivant la nouvelle technique indiquée dans les travaux de Bouchelaghem et al [BOU-11a] dont le comportement charge/temps sont présentés dans les Figures III.9. Ces chargements ont été effectués sur des éprouvettes confinées par PRFV jusqu'à leur rupture totale c'est-à-dire jusqu'à l'obtention d'une charge à la rupture inférieur à celle du béton de contrôle. Après le premier chargement l'enveloppe PRFV reste presque saine, sauf des petits craquements observés entre les fibres

des torons verticaux et horizontaux de l'enveloppe PRFV, c'est ce qui nous a donnée l'idée de faire des chargements répétés dans la même installation et que le dernier chargement conduit à la rupture totale de l'enveloppe composite par déchirement. Ce type d'essai constitue une nouvelle idée dans les testes des éprouvettes confinées. Le comportement charge/temps s'effectue en trois phases similaires à celui déjà expliqué dans la figure III.1.

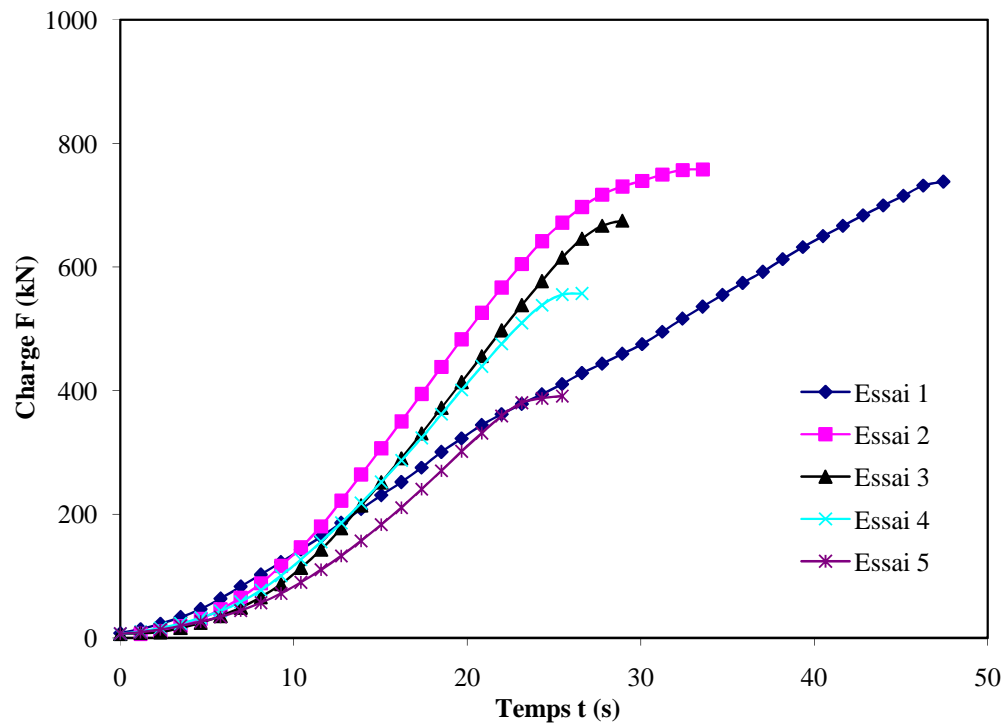
La figure III.9a représente le comportement charge/temps des éprouvettes confinées par quatre couches de tissu T2, l'éprouvette résiste seulement pour deux chargements répétés ceci est due au nombre de plis de confinement important qui conduit à la fragilisation de l'éprouvette. Le comportement des éprouvettes confinées par l'hybride H6 (T2/Mat, deux plis de chaque types) est illustré dans la figure III.9c, leur comportement est similaire à celle confinées par tissu T2 (Fig. III.9a). Cependant, le comportement charge/temps des éprouvettes confinées par quatre couches de Mat (Fig. III.9b) est similaire à celui des éprouvettes confinées par l'hybride H8 (Mat/T2) et la rupture finale des éprouvettes est obtenue après 5 et 7 chargements respectivement (Fig. III.9d).

On remarque que, pour toutes les éprouvettes, et après le premier chargement (c'est-à-dire le deuxième chargement) on obtient une augmentation de la rigidité qui est due à la rigidification du béton causé par le premier écrasement, avec une diminution de la charge ultime et ceci est valable indépendamment du nombre de couches de l'enveloppe composite. Avec l'augmentation du nombre de chargement (à partir du troisième essai) la rigidité et la charge ultime se dégradent avec une réduction du temps de l'essai jusqu'à l'effondrement de l'éprouvette.

A titre d'exemple, la figure III.10 montre l'évolution des endommagements enregistrés sur une éprouvette confinée par l'hybride H7 (Mat/T2), après chaque chargement de compression jusqu'à la rupture totale de l'enveloppe composite. À la fin de chaque chargement compressif, l'essai a été arrêté quand la presse affiche la valeur maximale de la charge en indiquant « Essai fini » (voir le graphe indiquer sur le DIGIMAX Plus à côté de chaque image de l'éprouvette).

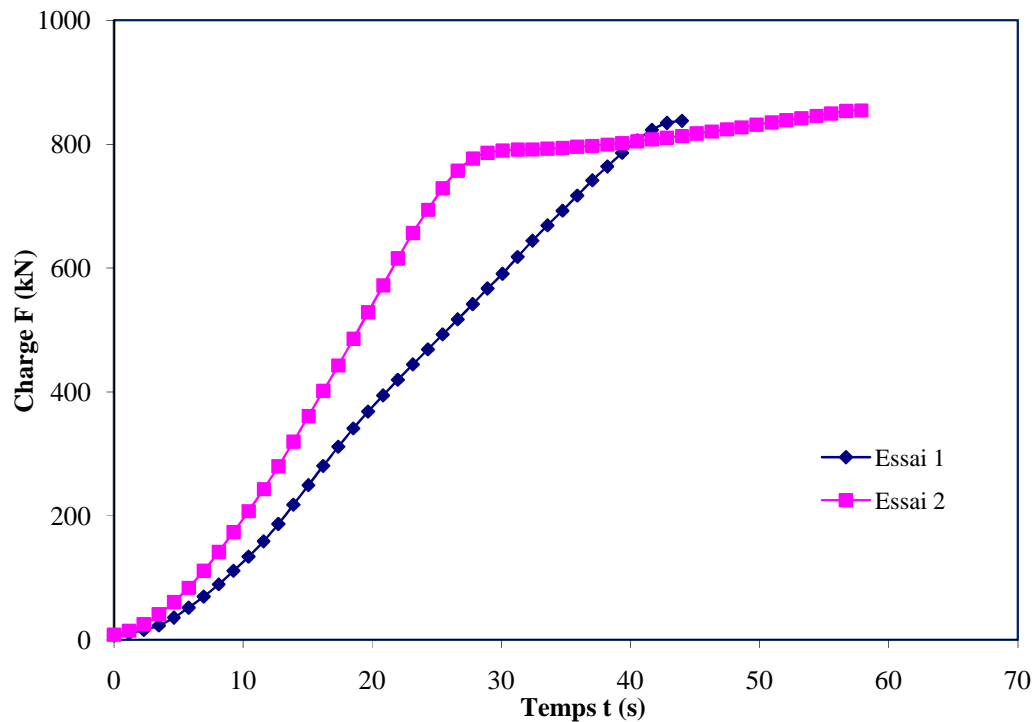


(a)

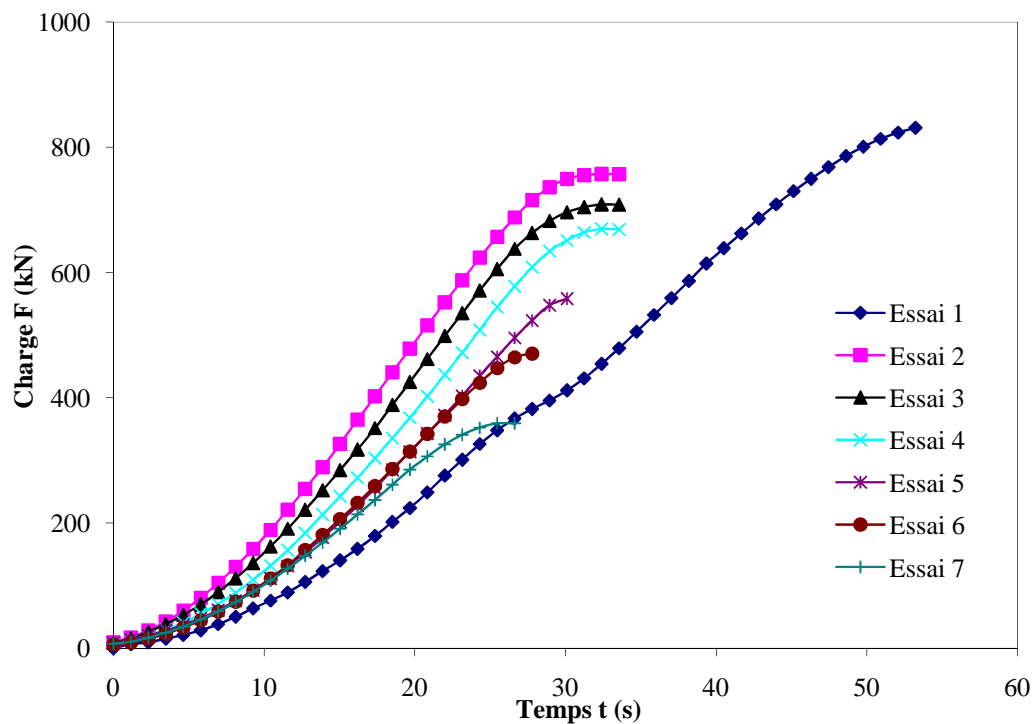


(b)



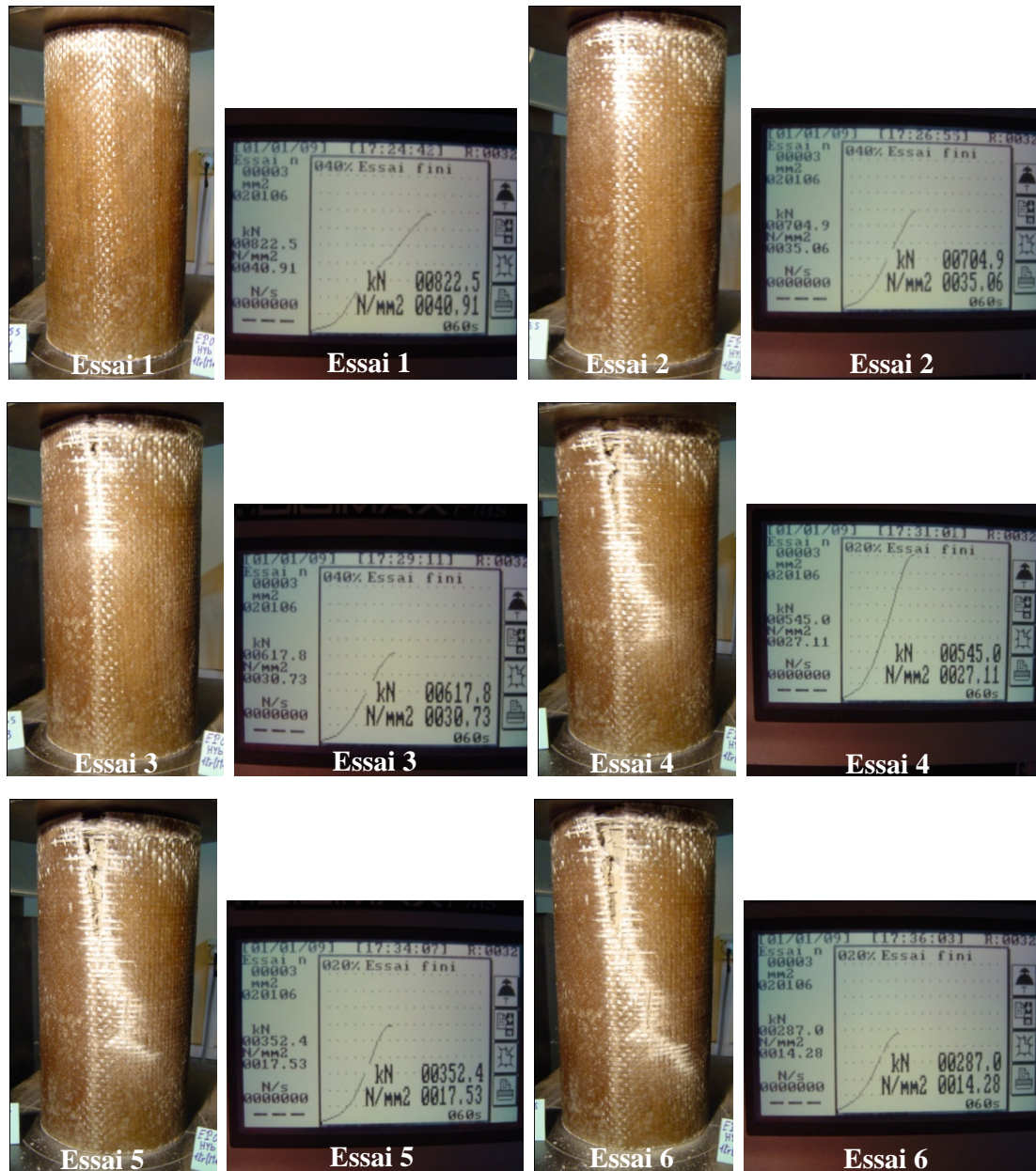


(c)



(d)

**Figure III.9.** Courbes charge/temps sous chargement de compression répété des éprouvettes confinées par quatre couches : (a) T2, (b) Mat, (c) H6 et (d) H8.



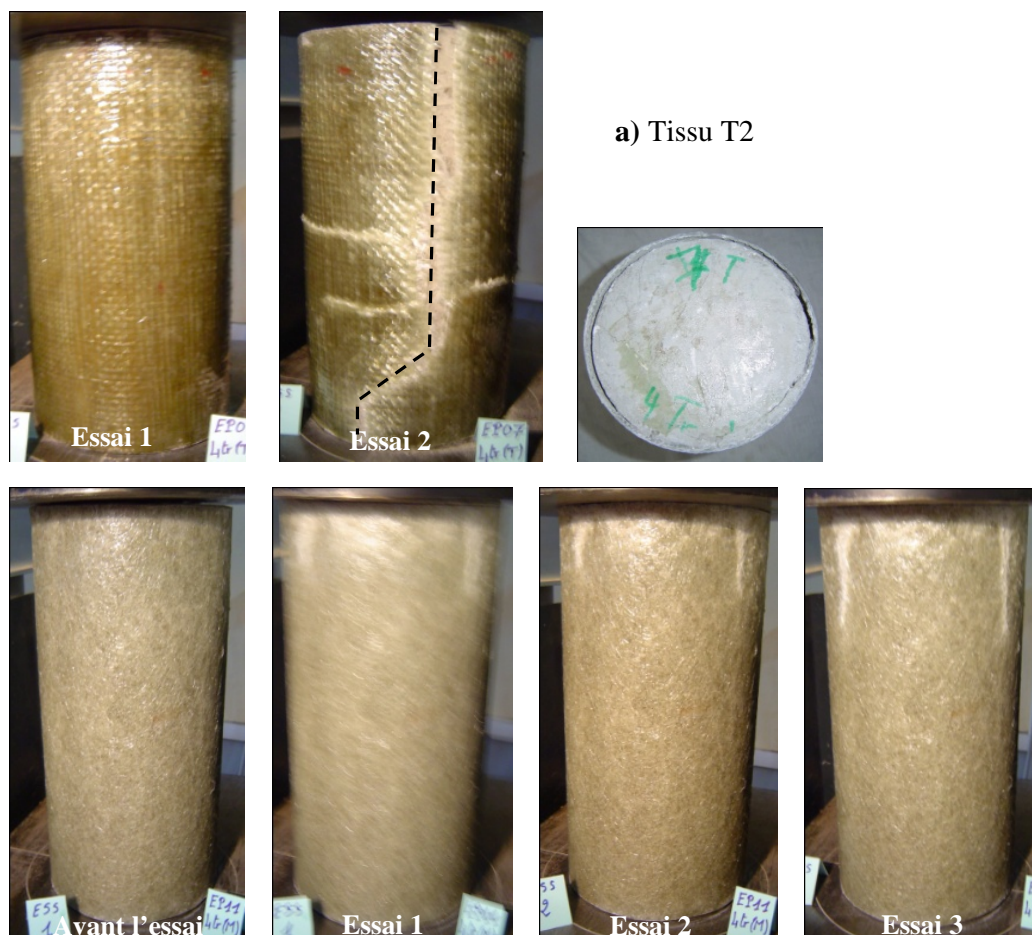
**Figure III.10.** Séquences de chargement répété exécuté sur éprouvette confinée par 1 pli de l'hybride H7 (Mat/T2).

### III.5.2 Modes de rupture

Les photos illustrées dans la figure III.11 représentent les modes de rupture et d'endommagement des éprouvettes confinées par quatre plis de PRFV (tissu T2, Mat, hybrides H6 et H8) ; ces éprouvettes sont sollicitées en compression sous chargement répétés jusqu'à la rupture complète de la chemise du PRFV. Les photos des faciès de rupture clarifient bien les successions des propagations des fissures d'un chargement à l'autre. Pour les éprouvettes confinées par le tissu T2, elles sont caractérisées par une rupture brutale

verticale sur toute la hauteur de la chemise composite, elles ne permettent de faire seulement deux chargements à cause de la grande rigidité produite par le nombre de plis important employé et aussi par la nature du renfort utilisé (tissu bidirectionnel) ce qui explique la création de petites fissures secondaires horizontales (Fig. III.11a). Alors que, pour les éprouvettes renforcées par le Mat (Fig. III.11b) elles résistent jusqu'à cinq chargements avant le déchirement complet de la chemise PRFV, ceci est due au fait que le Mat ayant des fibres courtes orienté aléatoirement est plus ductile que le tissu.

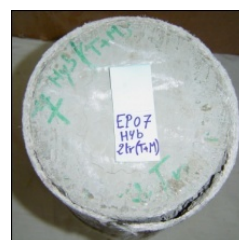
La rupture dans les enveloppes hybrides en PRFV (Fig. III.11c et III.11d) est fortement influencée par la position des plis dans l'enveloppe composite (pli interne en contact avec le béton ou externe). En effet, la rupture totale des éprouvettes confinées par l'hybride H6 (T2/Mat) est obtenue à la suite de deux chargements seulement, alors que la rupture n'est obtenue qu'après 7 chargements pour l'hybride H8 (Mat/T2). En d'autres termes, la rupture des enveloppes composites suit les premier plis qui sont directement en contact avec le béton : l'hybride H6 (T2/Mat) suit celui du tissu T2, et l'hybride H8 (Mat/T2) suit celui du Mat.





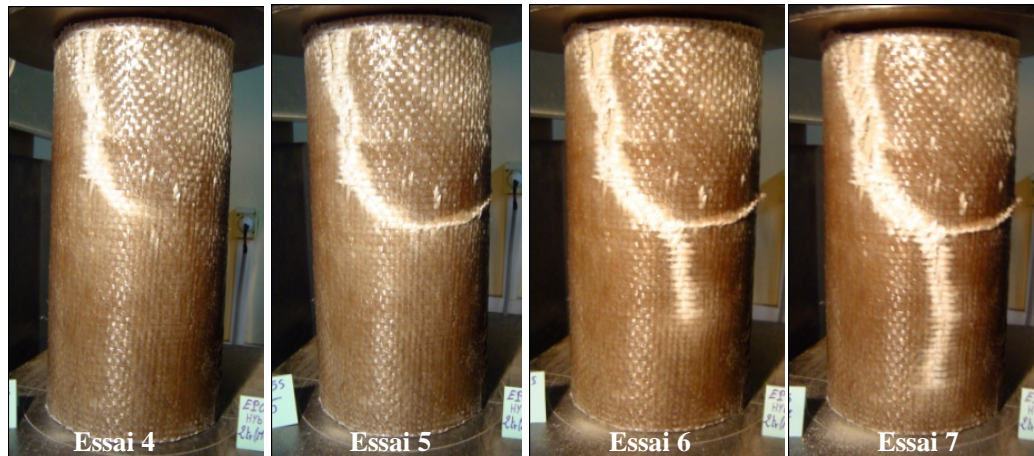


b) Mat



c) Hybride H6





d) Hybride H8.

**Figure III.11.** Modes de rupture des éprouvettes confinées par quatre plis sous chargement répété : a) tissu T2, b) Mat, c) et d) Hybrides H6 et H8 respectivement.

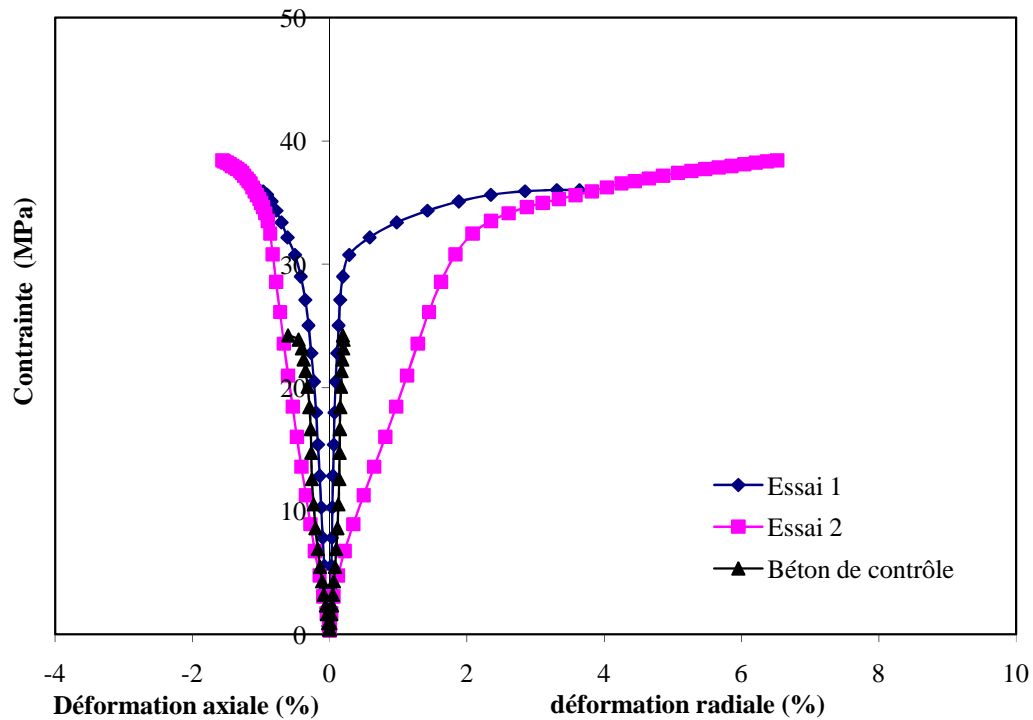
### III.5.3 Comportement contrainte/déformation des éprouvettes renforcées par des composites hybrides

#### III.5.3.1 Composite hybrides constitué de Mat et des tissus T1 et T2

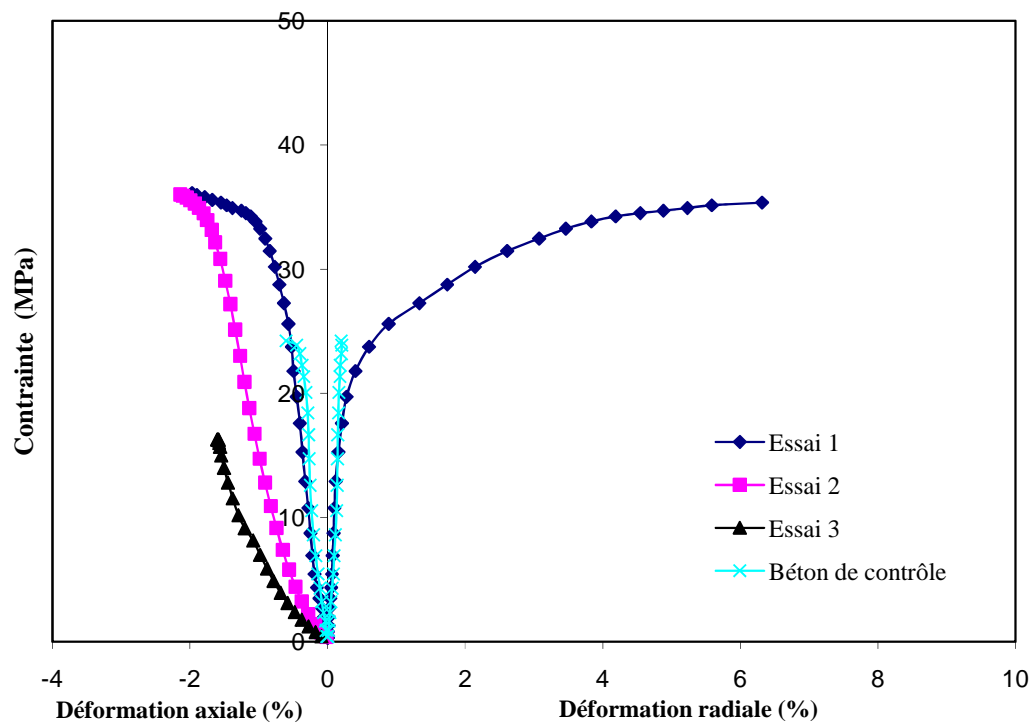
Le comportement contrainte/déformation du béton ordinaire confiné par PRFV possède un comportement bilinéaire avec une zone de transition qui se produit après le pic de la charge à la rupture du béton de contrôle (Fig. III.12). Les pentes de la première phase sont similaires pour les éprouvettes en béton de contrôle et ceux confinées, elles sont gouvernées presque entièrement par les propriétés du béton du noyau. Tandis que, la deuxième pente dans la zone plastique, beaucoup plus faible que la première, dépend du niveau de confinement qui est défini par la nature du renfort. Le comportement contrainte/déformation est bilinéaire pour les deux premiers chargements, pour les trois types composites hybrides H1, H3 et H4. Par contre, cette forme bilinéaire est obtenue seulement dans le premier chargement pour les éprouvettes confinées par l'hybride H2.

L'aspect quantitatif de l'effet du renforcement en composite sur la capacité portante, la contrainte et les déformations axiale et radiale des colonnes en béton sont synthétisées dans le tableau III.2.

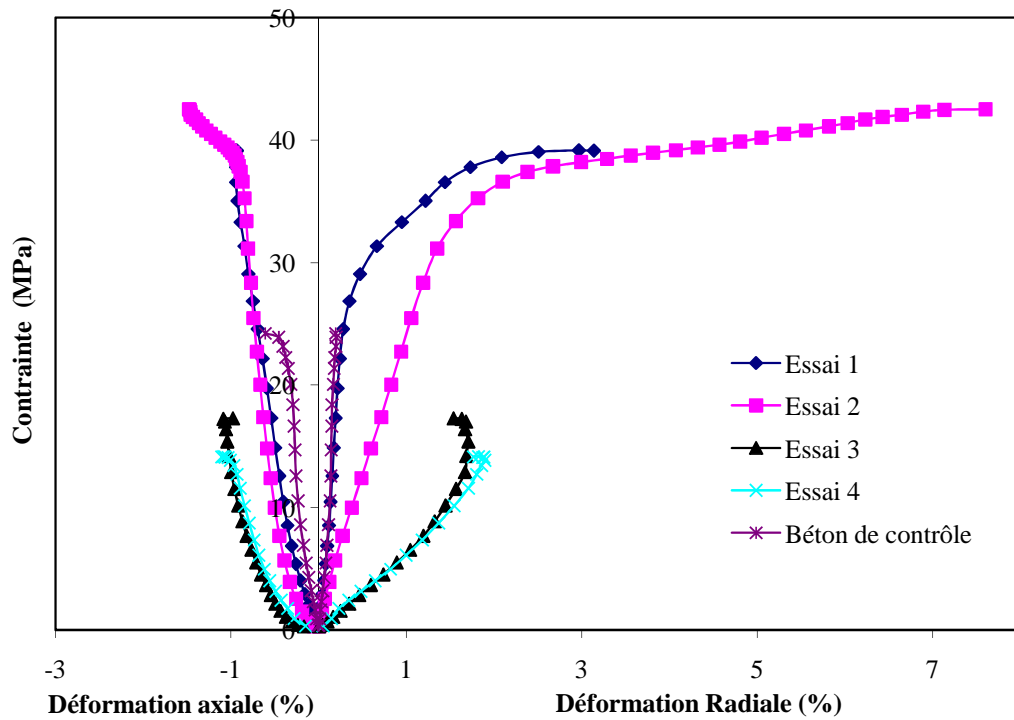
D'après les figures III.12 et III.13 l'hybride H2 est le confinement le plus performant parmi tous les hybrides adoptés dans ce travail, il donne des gains importants en résistance et en déformations axiale et radiale soit respectivement : 83%, 383% et 6894% comparativement aux hybrides H3, H4, et H1 qui ne donne que des gains en résistance de 61% pour l'hybride H3, et de 49% pour les autres.



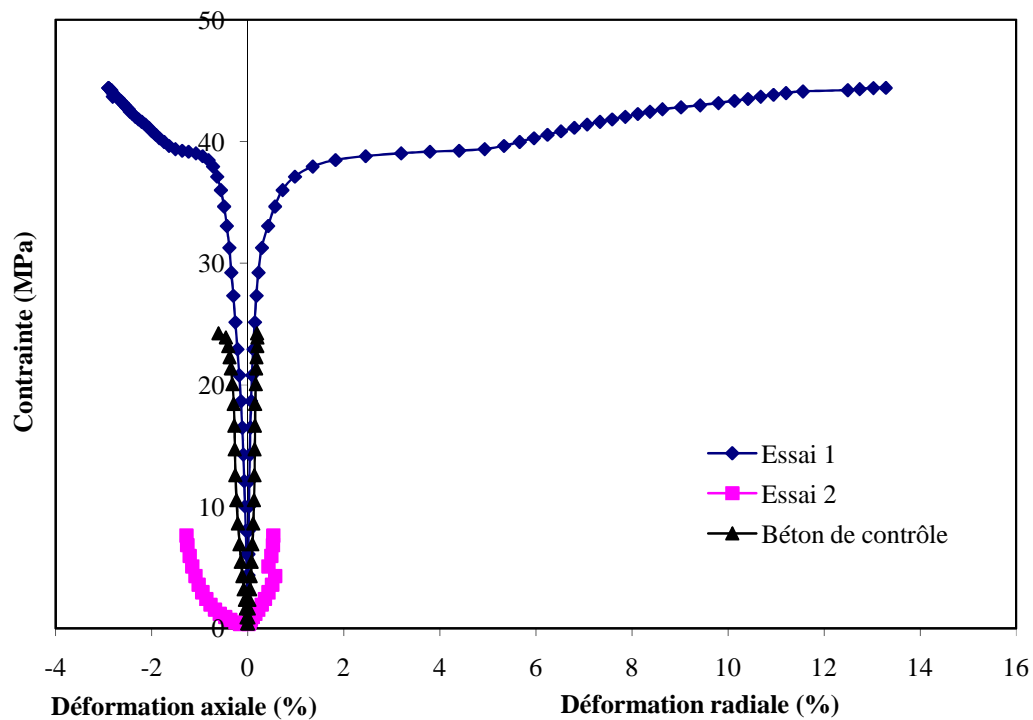
(a)



(b)



(c)

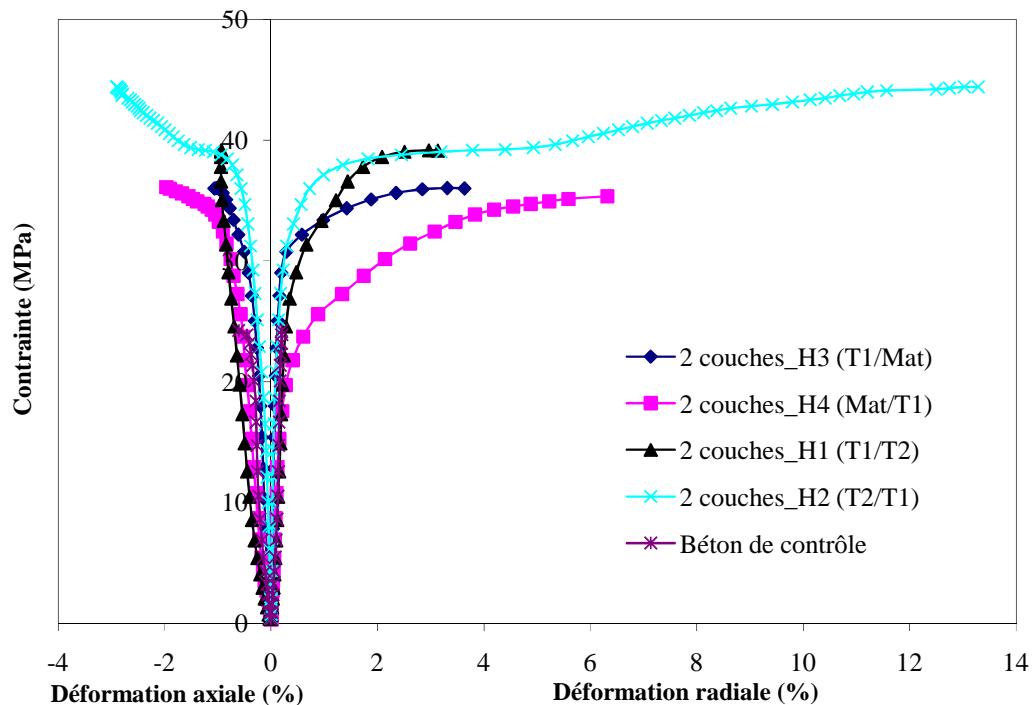


(d)

**Figure III.12.** Comportement contrainte/déformation des éprouvettes confinées comparé avec le béton de contrôle pour des chargements compressifs répétés :

a) H3, b) H4, c) H1 et d) H2.

Il est important de noter aussi que le confinement par les hybrides H4 et H1 résiste respectivement jusqu'à 3 et 4 chargements en compression uniaxiale, ce phénomène est causé par l'effet de la résistance résiduelle, par contre les hybrides H3 et H2 ne résiste qu'à deux chargements seulement.



**Figure III.13.** Comparaison entre le béton de contrôle et les configurations de confinements hybrides adoptés.

L'augmentation du nombre de chargements conduit à une dégradation importante en termes de : la valeur de la contrainte maximale, rigidité (pente plus faible) et déformations, en conséquence la deuxième phase (plastique) devient très courte et par fois les courbes contrainte/déformations n'atteignent que la première phase (élastique).

**Tableau III.2.** Valeurs moyennes des résultats d'essais des éprouvettes confinées.

Configuration									
De confinement		$F_{max}$ (kN)	$f'_c$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\epsilon_{cc}$ %	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{r,rupt}$ %	$\epsilon_{r,rupt}/\epsilon_{ro}$
Essai 1	Béton de contrôle	487,13		24,24	1,00	0,60	1,00	0,19	1,00
	H3 (T1/Mat)	724,12		36,00	1,49	1,06	1,77	3,64	19,14
	H4 (Mat/T1)	731,32		36,13	1,49	1,97	3,28	6,31	33,23
	H1 (T1/T2)	787,13		39,13	1,61	0,94	1,57	3,14	16,52
	H2 (T2/T1)	892,51	24,24	44,41	1,83	2,90	4,83	13,29	69,94
Essai 2	H3 (T1/Mat)	774,03		38,43	1,59	1,57	2,61	6,52	34,32
	H4 (Mat/T1)	723,64		36,01	1,49	2,15	3,58	—	—
	H1 (T1/T2)	854,46		42,52	1,75	1,48	2,46	7,60	40,01
	H2 (T2/T1)	153,31		7,63	0,31	1,28	2,13	0,53	2,78

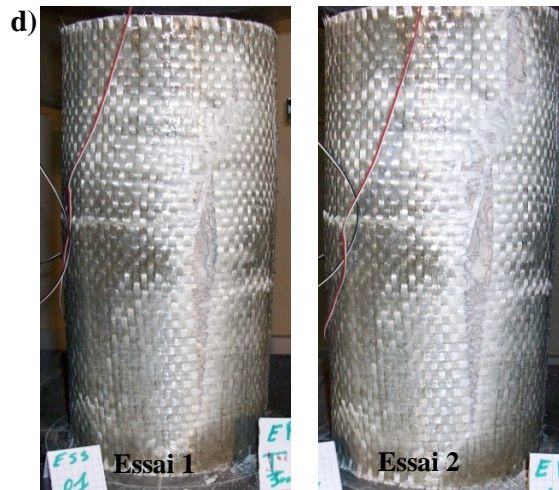
### III.5.3.2 Modes de rupture et d'endommagement

L'évolution de la rupture des éprouvettes confinées par des enveloppes composites hybrides H3, H4, H1 et H2 sous chargements répétés en compression est présentée dans la figure III.14. La rupture du béton se produit bien avant que les composites n'atteignent leurs capacités de déformation ultimes. La rupture des éprouvettes confinées par PRFV est initiée par des craquements provoqués par le flambement des torons des fibres verticales sollicités en compression ce qui conduit au décollement des torons des fibres horizontaux ; ceci se traduit par des changements de couleur sur les photos des éprouvettes (à titre d'exemple, figure III.14b essai 2). L'augmentation du chargement provoque la rupture des torons des fibres horizontaux sous l'effet du gonflement du béton fissuré à l'intérieur de l'enveloppe composite. La conjugaison des phénomènes d'endommagement précités conduit à la formation d'une fissure dominante dans la propagation est verticale menant à la rupture finale de l'enveloppe composite par déchirement.

Les modes de ruptures constatés sont de type ductile précédés par des craquements de l'enveloppe PRFV. Il est important de signaler aussi que les mécanismes d'endommagement et de rupture des éprouvettes dépendent fortement du type du renfort tissu ou Mat (Fig. III.9). Aucun glissement au niveau des interfaces ou des zones de recouvrement du PRFV n'est enregistré. Des exemples d'endommagement des chargements répétés effectués sur des éprouvettes confinées par deux plis des hybrides H1, H2, H3 et H4 sont montrés dans la figure III.14.





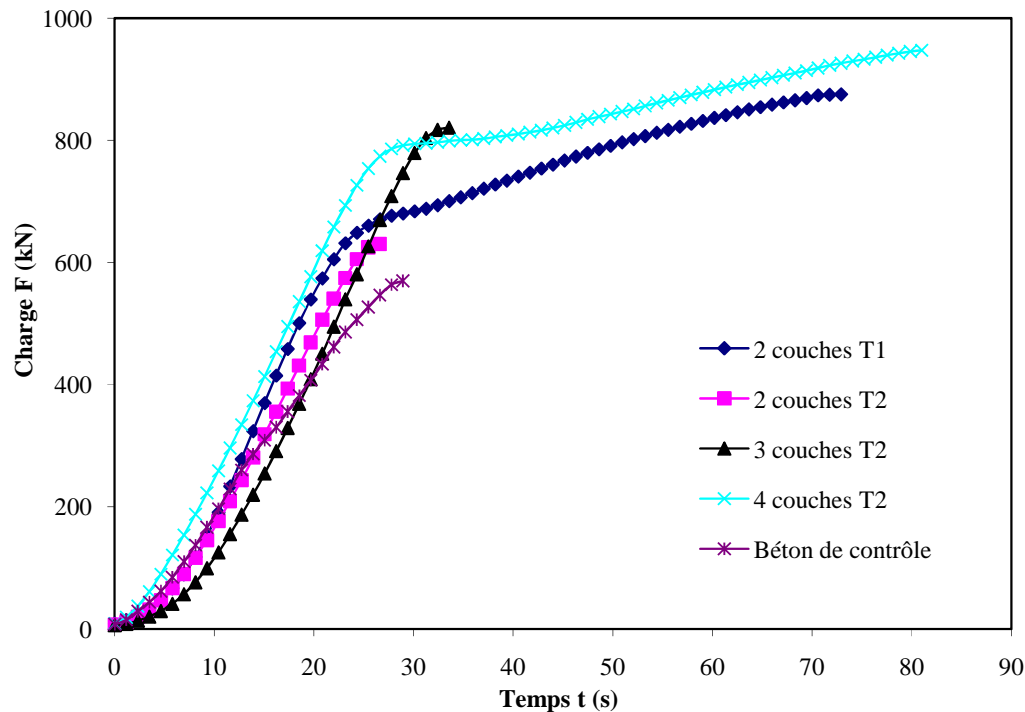


**Figure III.14.** Modes de rupture des éprouvettes confiées par 2 plis des hybrides : a) H3 (T1/Mat), b) H4 (Mat/T1), c) H1 (T1/T2), et d) H2 (T2/T1).

### III.6 Efficacité du renforcement et effet de l'épaisseur de l'enveloppe PRFV sur le comportement des éprouvettes confinées

La figure III.15 représente une comparaison globale des comportements charge/temps des éprouvettes confinées par les deux types de tissus adoptés (T1 et T2), avec un nombre de plis différent de l'enveloppe PRFV. Il est clair que les éprouvettes confinées par deux plis de tissu T2 ne sont pas suffisamment renforcées car l'augmentation de la charge ultime est faible ; ceci est due à leur faible masse surfacique qui est égale à 300 g/m<sup>2</sup>. Au contraire, les éprouvettes confinées par deux plis de tissu T1 fournissent un comportement mécanique plus performant (charge et temps élevés) comparé avec celles confinées par trois plis de tissu T2, malgré qu'on ait utilisé une masse équivalente du matériau composite. Le meilleur comportement charge/temps est obtenu pour les éprouvettes confinées par quatre plis de tissu T2 que ce soit en termes de rigidité ou de résistance ultime.





**Figure III.15.** Comparaison des courbes charge/temps des éprouvettes confinées par deux plis de T1 et de deux à quatre plis de T2.

### III.7 Index de performance

La figure III.16 montre une comparaison globale des efficacités de confinement, le coût de la matière et l'index de performance de quelques configurations de confinement considérées ; l'influence de l'index de performance défini par Zhang *et al* [ZHA-00] est comme suit :

$$C_I = (\text{Efficacité de renforcement moyenne} / \text{coût de la matière première}) \times 100 \quad (1)$$

L'histogramme fournit une vue globale sur l'efficacité économique de la technologie de renforcement et de confinement évaluées, avec l'emphase sur les coûts de la matière première utilisée pour le renforcement (masse des composites) et le comportement mécanique (efficacité de renforcement [ZHA-00]) des confinements examinés.

Le meilleur index de performance  $C_I$  est trouvé pour l'enveloppe composite PRFV en tissu T1 constitué de deux plis soit 4314%, leur coût de la matière première est de 1,6 €/m<sup>2</sup> avec une efficacité de renforcement égale à 54%. Ce confinement donne un index d'efficacité

de renforcement acceptable avec un coût très réduit par rapport à celui trouvé par Zhang et *al*, soit de 73% pour un enveloppe composite constitué de trois plis unidirectionnelle à base de fibre de carbone et une résine époxyde, avec un coût relatif de 172 \$/m<sup>2</sup> en 1999 [ZHA-00]. Un autre confinement intéressant aussi constitué de quatre plis de tissu T2, donne un index de performance C<sub>I</sub> de 2750%, et 66% d'efficacité de renforcement avec un prix de 2,40 €/m<sup>2</sup>. Ainsi que, le confinement fait par l'hybride H6 (T2/Mat) offre des améliorations en index de performance C<sub>I</sub> de 2050%, avec une efficacité de renforcement de 50% plus importantes comparativement à l'hybride H8 (Mat/T2) qui offre des améliorations faibles malgré qu'on à utilisé la même quantité du composite, seul l'ordre des couches constituant de l'enveloppe composite sont modifiés. Et ça justifie notre explication précitée ; de l'influence de l'ordre de couches sur le comportement mécanique des colonnes confinées par des composites hybrides ; donc ce dernier à un grand effet sur l'efficacité de confinement et l'index de performance. Les résultats sont récapitulés dans le tableau III.3 pour plus d'information.

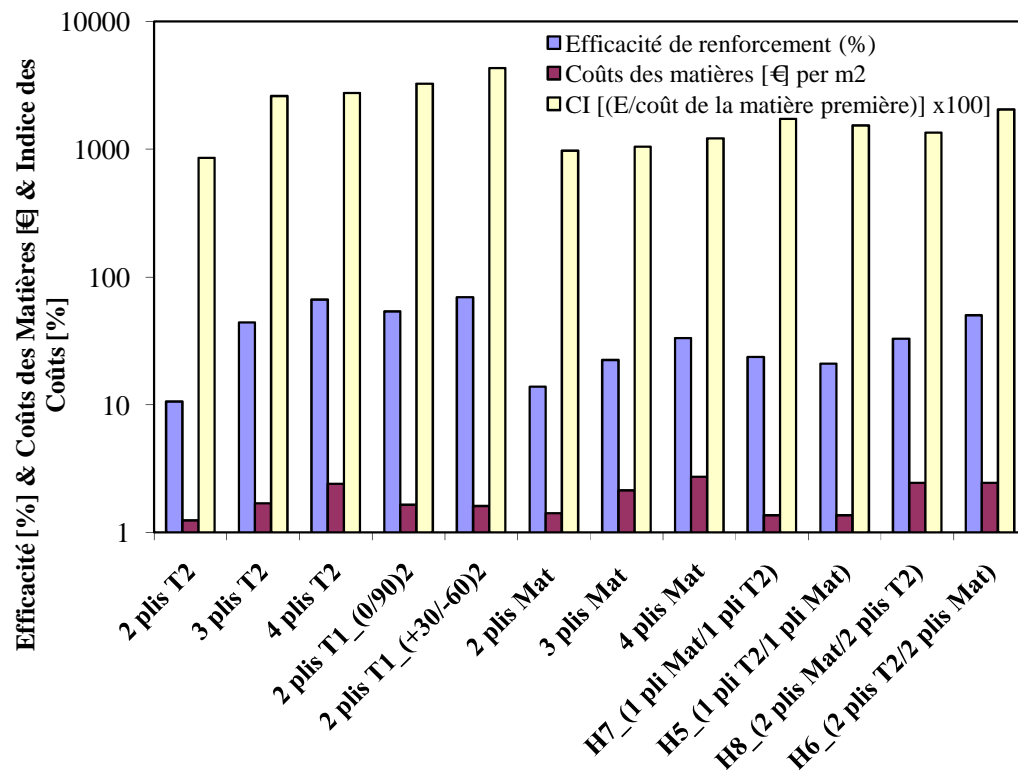


Figure III.16. Index de performance des éprouvettes confinées.

**Tableau III.3.** Comparaison entre les différents systèmes de confinement.

	Efficacité de renforcement (%)	Coûts des matières [€ per m <sup>2</sup>	CI [(E/coût de la matière première)] x100]
2 plis T2	10,61	1,23	856,33
3 plis T2	44,14	1,68	2616,47
4 plis T2	66,3	2,40	2753,32
2 plis T1 (0/90) <sub>2</sub>	53,7	1,64	3264,43
2 plis T1 (+30/-60) <sub>2</sub>	69,3	1,60	4313,72
2 plis Mat	13,82	1,41	974,95
3 plis Mat	22,37	2,13	1046,06
4 plis Mat	33,19	2,73	1215,75
H7 (1 pli Mat/1 pli T2)	23,60	1,36	1728,93
H5 (1 pli T2/1 pli Mat)	20,97	1,36	1536,26
H8 (2 plis Mat/2 plis T2)	32,94	2,44	1348,34
H6 (2 plis T2/2 plis Mat)	50,12	2,44	2051,57

### III.8 Conclusion

D'après l'étude faite sur le comportement structurale des colonnes confinées et les discussions des résultats trouvés, on peut conclure les points suivants :

- l'épaisseur de l'enveloppe PRFV a un effet considérable sur le comportement, la charge ultime, la ductilité, et le mode d'endommagement des colonnes en béton renforcées.
- Le composite verre\_E/polyester est la technique la plus rentable pour renforcer extérieurement les éprouvettes en béton. Des renforcements par le tissu bidirectionnel à base de fibres de verre\_E peuvent être hybridés avec des couches de Mat pour essayer d'améliorer les propriétés mécaniques notamment la ductilité de l'enveloppe composite.
- Après l'étude du comportement des colonnes confinées par les hybrides adopté en examine que leurs comportement suit les premiers plis c.-à-d. les couches en contact direct avec le béton. Et que leurs types d'endommagement suivent les modes de rupture des plis externes.
- En examinant le chargement répété, toutes les éprouvettes augmentent leurs rigidités après le premier chargement, indépendamment du type et du nombre de plis utilisé. Après le premier chargement, la résistance et le temps jusqu'à la rupture sont diminués, alors

qu'on observe un effet de renforcement. Il s'avère que l'augmentation du nombre de plis n'est pas nécessairement favorable à la résistance des éprouvettes pendant le chargement répété en compression.

➤ La connaissance des dispositions des endommagements rend possible la détermination des zones de concentration des contraintes (les plus probable à être endommagées), afin de renforcer efficacement la colonne.

➤ L'analyse de l'index de performance  $C_I$  prouve que le confinement par deux couches de tissu T1 donne un excellent index d'efficacité de renforcement et d'un coût optimal, indiquant donc que, pour les éprouvettes circulaires confinées en compression, la fibre de verre est extrêmement concurrentielle à la fibre de carbone utilisés précédemment dans d'autres travaux.

Ces constatations démontrent que ce système de renforcement est très efficace, tant au niveau de la performance que de la rapidité de mise en œuvre. D'un point de vue économique, il ne fait aucun doute qu'il sera concurrentiel face aux méthodes traditionnelles de renforcement qui demandent des interventions beaucoup plus longues et complexes.

---

*Chapitre IV*  
*Etude expérimentale des colonnes*  
*préchargées ou non puis confinées*  
*par PRFV et PRFC*

---

## Chapitre IV

# Etude expérimentale des colonnes préchargées ou non puis confinées par PRFV et PRFC

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre et pour tous les essais réalisés, des jauges d'extensométrie sont collés sur les surfaces externes de l'enveloppe composite PRF dans le but de mesurer les déformations axiales et radiales par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone. Ce chapitre est structuré en deux parties : la première traite les résultats expérimentaux menés sur des colonnes confinées par des plis bidirectionnels en fibre de verre «PRFV» comparées avec celles confinées par des plis unidirectionnels en fibre de carbone «PRFC» sollicitées en compression uniaxiale ; cette partie a été publiée par Bouchelaghem et *al* [BOU-11b]. Par contre, la deuxième partie est consacrée à l'étude de l'influence de l'orientation des fibres de l'enveloppe composite sur le comportement contrainte/déformation des colonnes confinées. L'évaluation du comportement des colonnes préchargées à 30, 45 et 90% de la charge portante du béton de contrôle, puis confinées par deux plis de composites stratifiés orientés à  $(+30/-60)_2$  et  $(0/90)_2$  est aussi effectués, avec un chargement répétitif pour toutes les colonnes confinées. Le but essentiel de ce chapitre est de mettre en évidence l'influence de l'efficacité du confinement sur l'augmentation de la capacité portante des éprouvettes préchargées ou non et d'évaluer la rentabilité de chaque système individuel.

### IV.2 Résultats expérimentaux et discussions

#### IV.2.1 Première partie

Les résultats des essais sont présentés graphiquement sous forme de courbes contrainte/déformations (Fig. IV.1 et IV.2). Les courbes des contraintes sont tracées en fonction des déformations axiale et radiale dans le même repère. Typiquement, ces courbes présentent une pente initiale qui suit celle du béton non confiné jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de grande déformation plastique. Le niveau de contrainte de la zone

plastique varie considérablement, selon l'efficacité du confinement d'un essai à l'autre en relation avec la nature et le type de l'enveloppe composite. Les différentes architectures employées sont illustrées dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1.** Détail des types de fibres et des différentes architectures des composites adoptés.

Code	Surface de fibre [m <sup>2</sup> ]	Masse de la résine [g]	Type de résine	Description des architectures d'enveloppe	Coût [€]
T1	0,41	263	Polyester	2 plis de tissu bidirectionnel de fibre de verre E (500 g/m <sup>2</sup> )	1,88
T2	0,41	263	Polyester	2 plis de tissu bidirectionnel de fibre de verre E (300 g/m <sup>2</sup> )	1,55
H1	0,41	263	Polyester	2 couches hybrides (1 pli de T1/1 pli de T2)	0,70
H2	0,41	263	Polyester	2 couches hybrides (1 pli de T2/1 pli de T1)	0,70
C	0,68	320	Epoxyde <b>SIKADUR 330</b>	4 plis en fibres de carbone unidirectionnel <b>SIKA WRAP HEX 230 C</b>	66,11

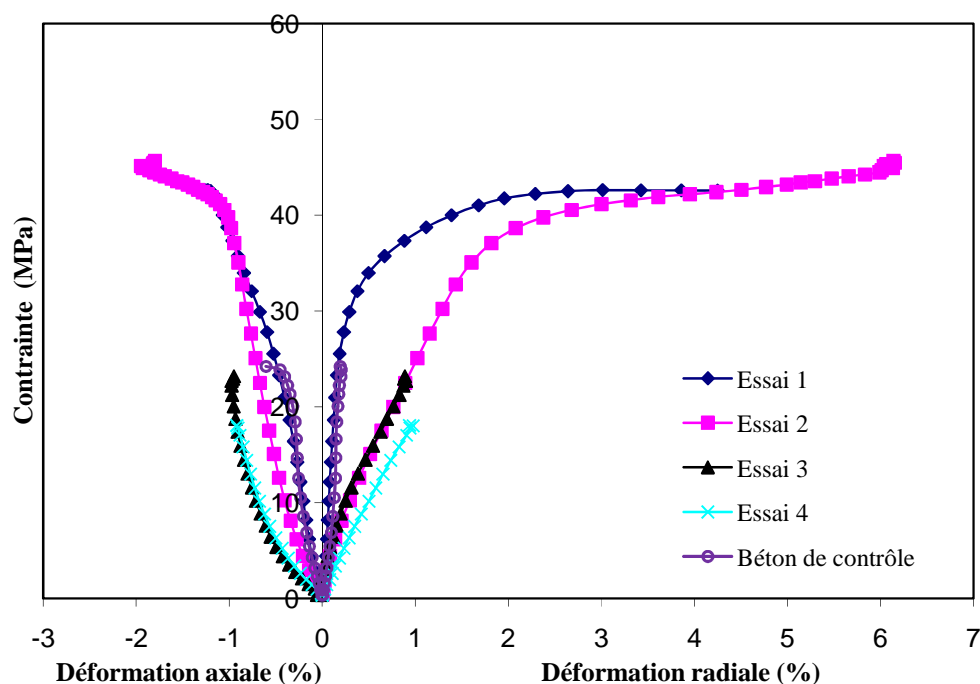
**N.B :** les prix donnés sont celle des fournisseurs de matériaux composite en Algérie et comme cette partie est publiée dans un journal international le prix est converti en Euro [BOU-11b].

#### IV.2.2 Comportement des colonnes confinées

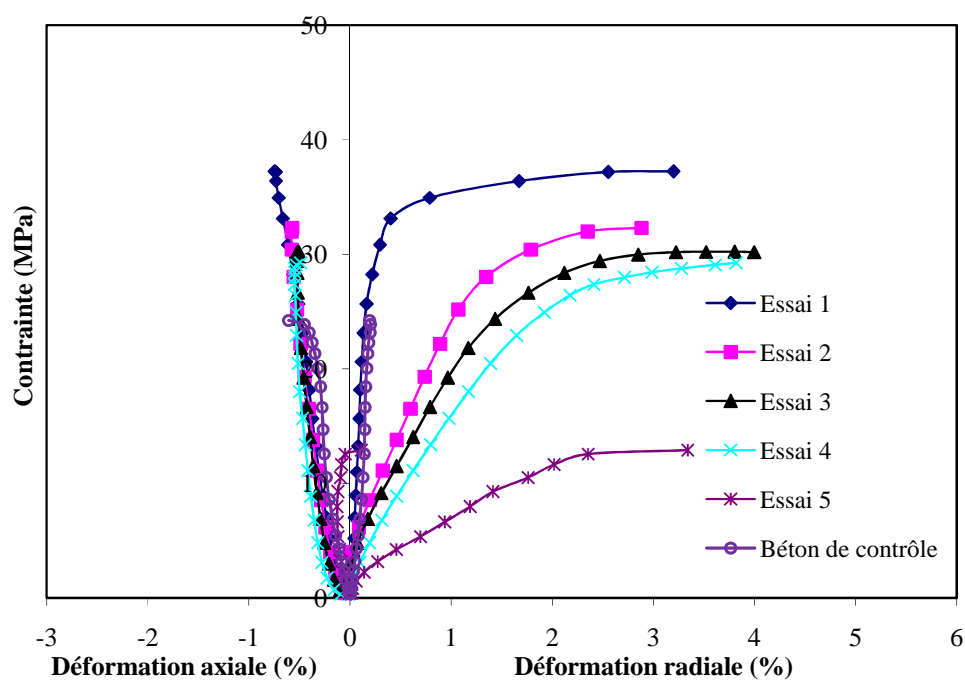
Les colonnes en béton ordinaire confinées par des plis en PRF sont caractérisées par un comportement contrainte/déformation bilinéaire. La première phase (zone élastique) correspond au comportement du béton de noyau, alors que le comportement du composite stratifié caractérise la deuxième phase (zone plastique), cette dernière dépend du taux de confinement qui est défini par le nombre de plis de l'enveloppe PRF (2 ou 4 plis) et par la nature du renfort (PRFC ou PRFV). Ces deux phases sont assemblées par une zone de transition non linéaire créée après la charge maximale du béton de contrôle.

Un comportement contrainte/déformations bilinéaire caractérise les éprouvettes confinées par deux plis de tissu T1 et de l'hybride H1 (Fig. IV.1a et IV.2a), pour les deux premiers chargements, et parfois restent bilinéaires jusqu'au troisième chargement et plus comme par exemple dans le cas d'un confinement par deux plis de tissu T2 (Fig. IV.1b et IV.2).





(a)

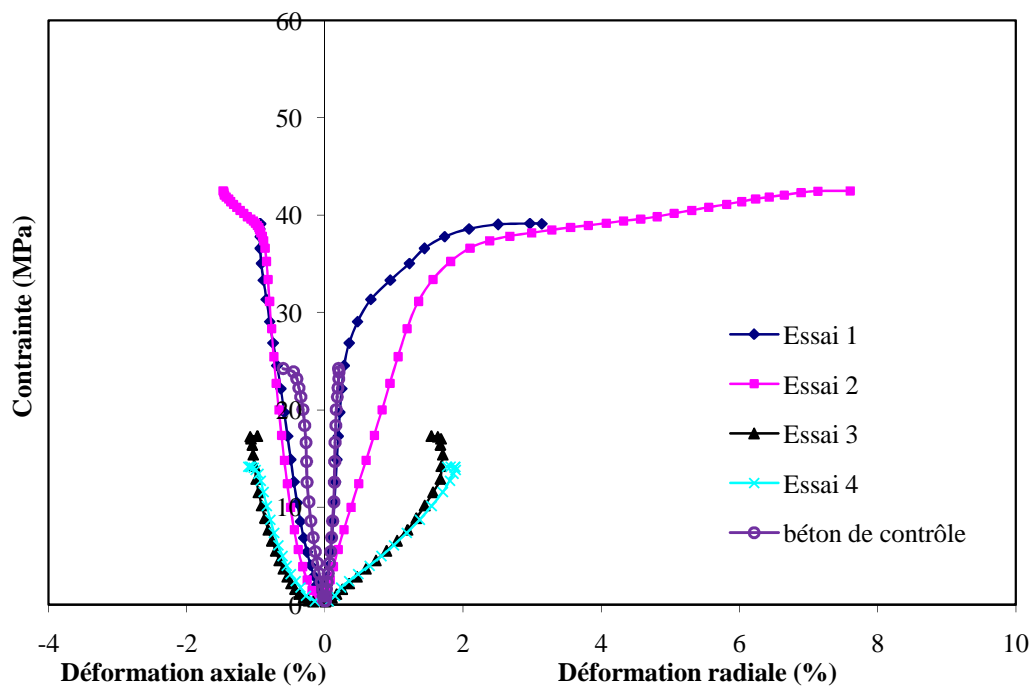


(b)

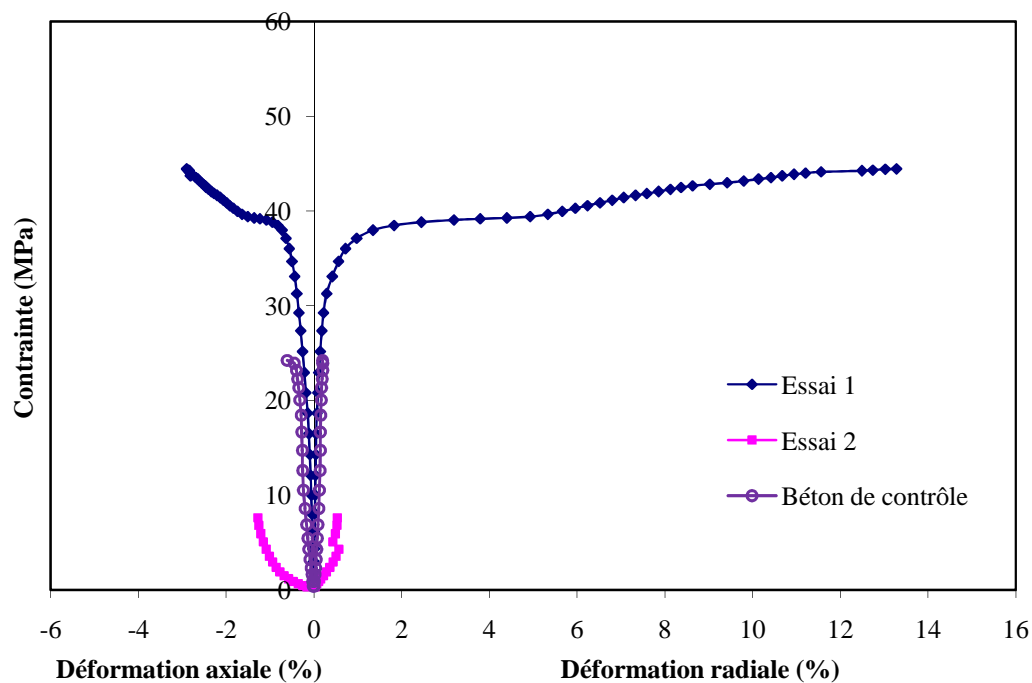
**Figure IV.1.** Comportement contrainte/déformation des éprouvettes confinées par 2 plis de PRFV : (a) T1 et (b) T2.

Par contre, pour les éprouvettes hautement confinées par quatre plis de PRFC seul l'essai du premier chargement prend une forme bilinéaire (Fig. IV.3). De plus, les éprouvettes

confinées par des plis en PRFC ne permettent pas de résister à plusieurs chargements est ceci est due à la grande rigidité des fibres de carbone.



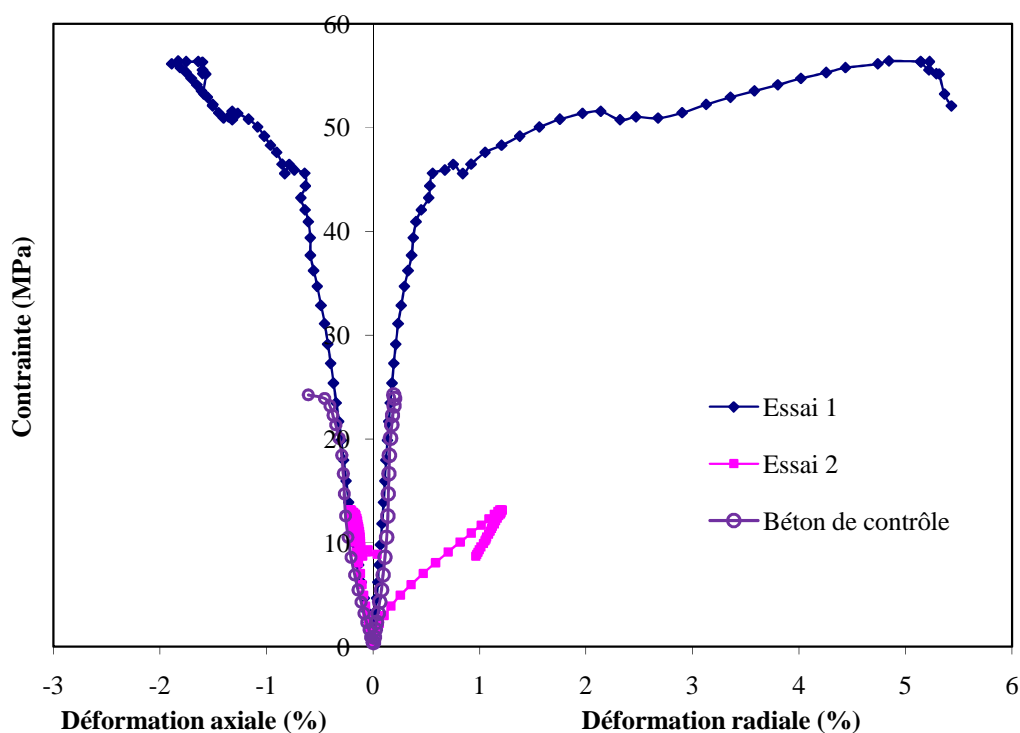
(a)



(b)

**Figure IV.2.** Courbes contrainte/déformation des éprouvettes en béton confinées par 2 plis de composite hybride PRFV : (a) H1 et (b) H2.

D'après la figure IV.2 le confinement par l'enveloppe hybride H2 donne des augmentations importantes en résistance et en déformation axiale respectivement, soit 71% et 378% comparativement à l'hybride H1, qui ne donne que des augmentations de 50% et de 55%. Il est important de noter que le confinement par les tissus T1, T2 et l'hybride H2 résiste jusqu'à 4 chargements en compression et même plus, ce phénomène est causé par l'effet de la résistance résiduelle, par contre l'hybride H1 ne résiste qu'à deux chargements seulement. L'augmentation du nombre de chargements conduit à une diminution notable de la contrainte maximale, de la rigidité (pente plus faible) et des déformations, en conséquence la deuxième phase (zone plastique) devient très courte, et par fois le comportement contrainte/déformation n'atteint que la première phase (zone élastique).



**Figure IV.3.** Comportement contrainte/déformation des colonnes renforcées par 4 plis de PRFC orienté à  $(90_2/0_2)$ .

### IV.2.3 Efficacité de confinement par des PRF

#### IV.2.3.1 Renforcement par PRFV (Polymère Renforcé en Fibre de verre)

Les éprouvettes confinées par 2 plis de PRFV en tissus T1 et T2 (Fig. IV.1), présentent des gains en résistance sous compression d'environ 64% et 44% et des augmentations en déformations axiales de 113% et de 23%, et des déformations radiales de 2086% et de 1546% respectivement (Tableau IV.2). Les éprouvettes confinées par des enveloppes composites

hybrides (Fig. IV.2) en PRFV H1 et H2 (2 plis de T1 et 2 plis de T2) permettent des gains en résistance ultime de 50% et 71% et en déformations axiales de 55% et 378% respectivement. De plus, l'analyse des résultats obtenus montre que les déformations radiales sont approximativement le double des déformations axiales et que les gains sont aussi influencés par le niveau de confinement en PRF. Il est important de noter aussi que le gain le plus important en résistance et en déformation radiale est obtenu pour les éprouvettes confinées par l'enveloppe hybride H2, soit une augmentation de 71% et 6652% respectivement.

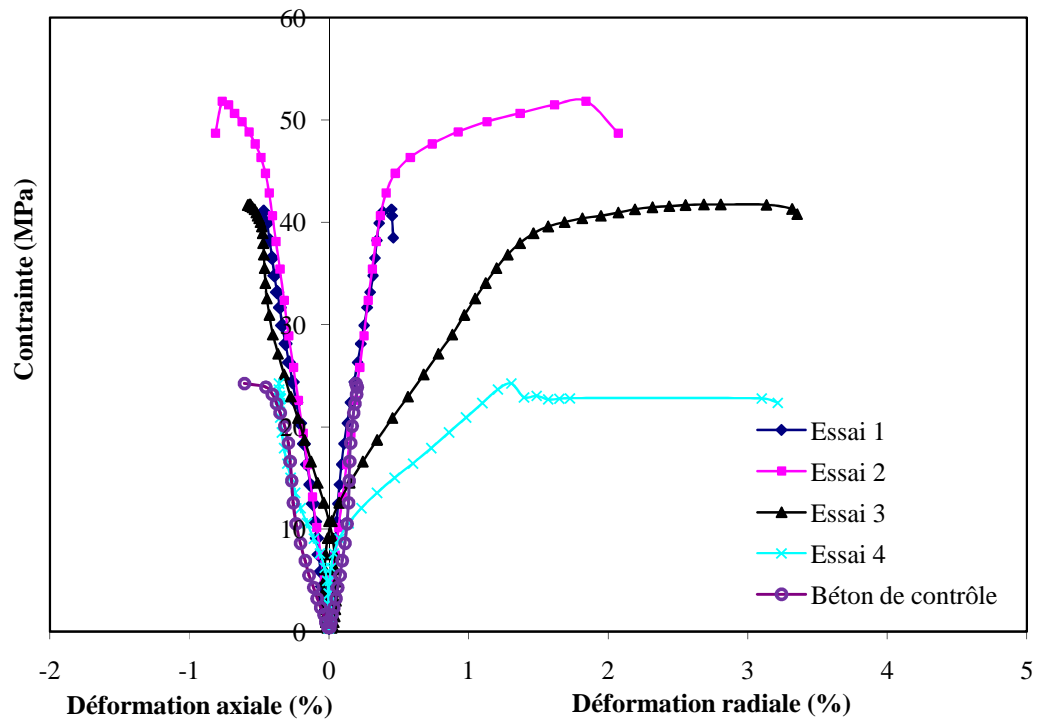
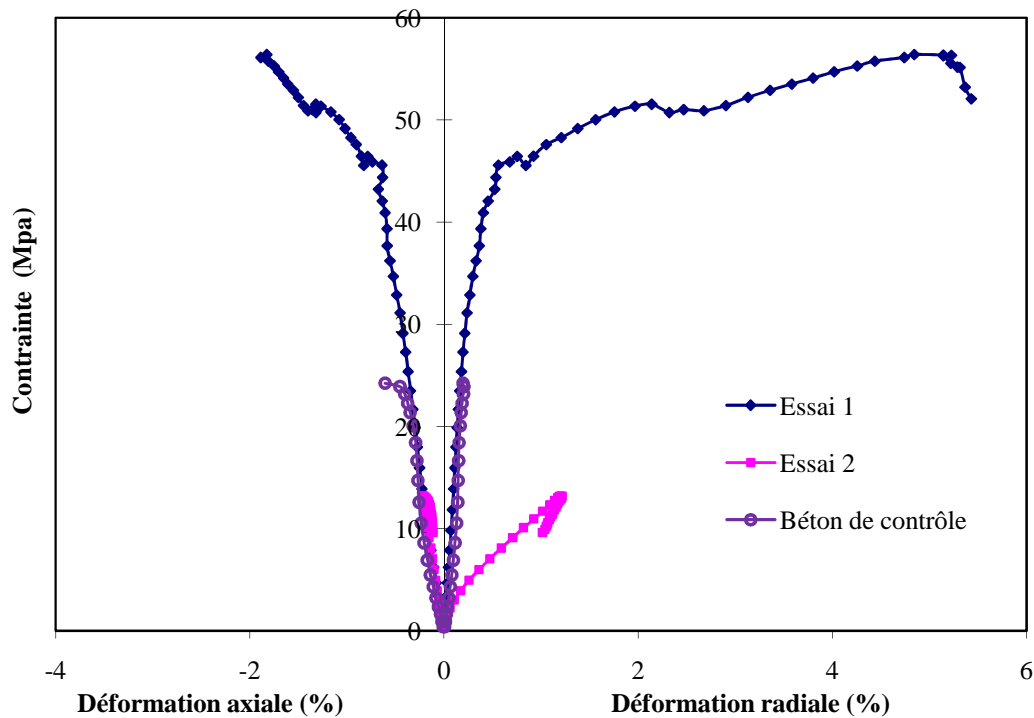
#### IV.2.3.2 Renforcement par PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone)

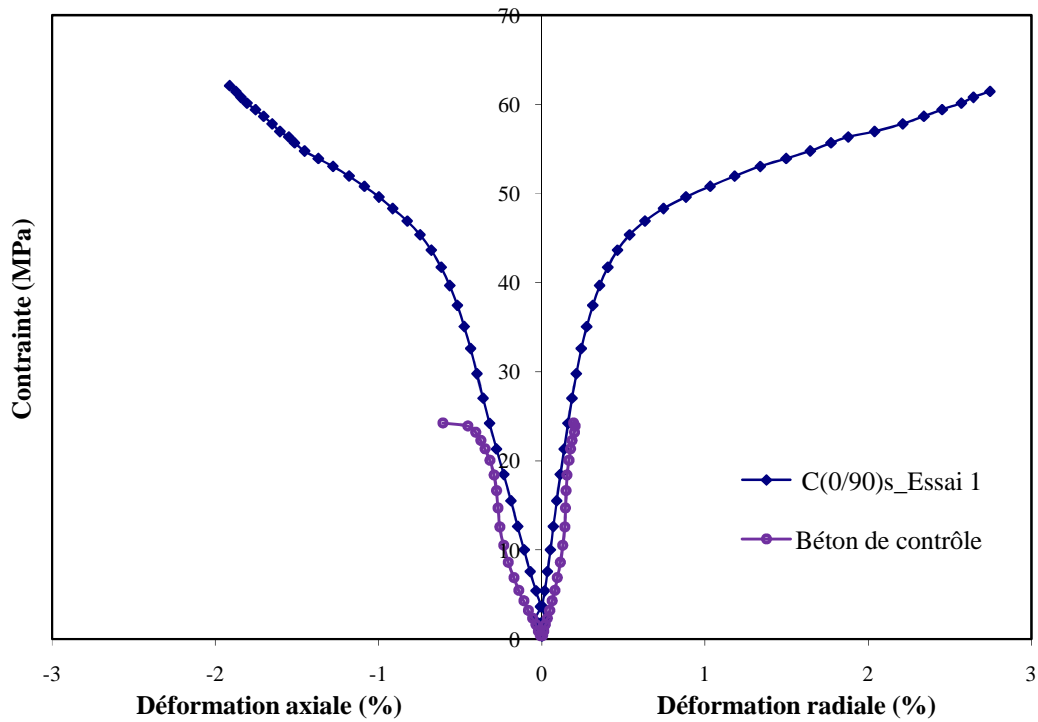
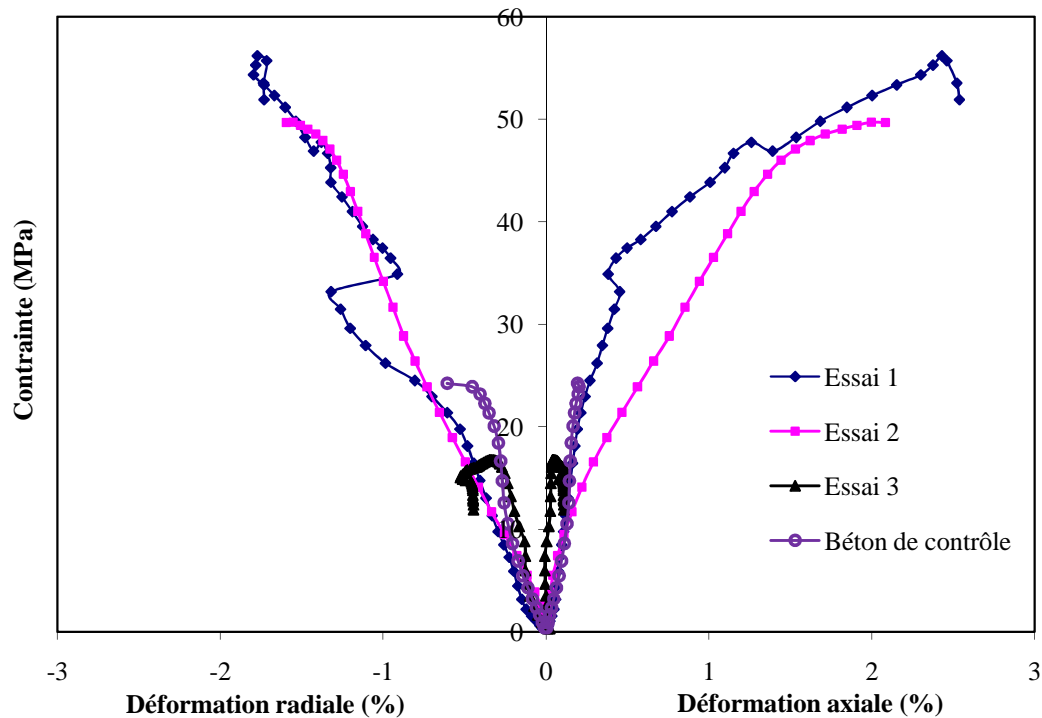
Les comportements mécaniques des colonnes confinées et renforcées par des enveloppes constituées de quatre plis de matériau composite en PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone), sont illustrés dans les figures IV.4a à IV.4d respectivement. Les plis sont orientés à quatre orientations distinctes : C1 ( $0_2/90_2$ ), C2 ( $90_2/0_2$ ), C3 ( $0/90$ )<sub>s</sub> et C4 ( $90/0$ )<sub>s</sub>. Ces colonnes sont sollicitées en compression uniaxiale sous des chargements répétitifs comme présenté déjà dans le chapitre III. Les courbes contrainte/déformation des colonnes confinées par les enveloppes C2 et C3 résiste uniquement pour un seul chargement avec une allure bilinéaire, mais ils donnent des gains en résistance, en déformations axiale et radiale très importantes soit : 132%, 186% et 2605% pour l'enveloppe C2 et des gains de 153%, 106%, et 1342% pour celle de C3 respectivement (Fig. IV.4b et IV.3c).

Tableau IV.2. Moyenne des résultats sur les cylindres en béton confiné.

Nomb. de Charg.	Code	$F_{\max}$ (kN)	$f'_c$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{cc}$ %	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{r,rup}$ %	$\varepsilon_{r,rup}/\varepsilon_{ro}$
1 <sup>er</sup> Chargement	béton	522		26	1	0,606	1	0,09	1
	T1	931,31		42,6	1,64	1,29	2,13	2,12	21,86
	T2	748,3	26	37,32	1,44	0,74	1,23	1,6	16,46
	H1	786,5		39,13	1,50	0,94	1,55	1,56	16,14
	H2	892,51		44,41	1,71	2,89	4,78	6,56	67,52
	C	1133,55		56,28	2,16	1,82	3,06	2,57	26,46
2 <sup>ème</sup> Chargement	T1	931,32		45,69	1,75	1,80	2,97	3,07	31,59
	T2	649,5		32,32	1,24	0,57	0,95	1,44	14,82
	H1	854,45	26	42,52	1,64	1,47	2,44	3,80	39,11
	H2	153,31		7,63	0,29	1,27	2,17	0,26	2,72
	C	264,72		13,17	0,51	0,20	0,34	0,60	6,25
3 <sup>ème</sup> Chargement	T1	466,56		23,22	0,89	0,95	1,57	0,44	4,57
	T2	607,45	26	30,20	1,16	0,50	0,83	1,99	20,57
	H1	347,63		17,30	0,66	0,97	1,61	0,77	7,92
	H2	–		–	–	–	–	–	–
4 <sup>ème</sup> Chargement	T1	364		18,12	0,70	0,92	1,52	0,47	4,83
	T2	588,4	26	29,28	1,13	0,48	0,80	1,91	19,65
	H1	285,22		14,17	0,54	1,10	1,83	0,88	9,09
	H2	–		–	–	–	–	–	–

$f'_{cc}$ : résistance en compression axiale du béton confiné ;  $\varepsilon_{cc}$ ,  $\varepsilon_{r,rup}$  : déformation axiale et radiale respectivement.

(a) C1 ( $0_2/90_2$ ).(b) C2 ( $90_2/0_2$ ).

(c) C3 (0/90)<sub>s</sub>.(d) C4 (90/0)<sub>s</sub>.

**Figure IV.4.** Comportement contrainte/déformation des chargements répétés pour des colonnes renforcées par quatre couches de PRFC orienté à : (a) C1 (0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>), (b) C2 (90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>), (c) C3 (0/90)<sub>s</sub> et (d) C4 (90/0)<sub>s</sub>.



D'autre part, les colonnes confinées par les enveloppes C1 et C4 permettent des rechargements de quatre et trois fois respectivement avec une charge portante supérieure à celle du béton de contrôle; mais les gains archivés sont inférieurs à celle obtenus par l'enveloppe C2 (90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>). Concernant le premier chargement les colonnes confinées par l'empilement C1 donnent les meilleures augmentations en résistance soit de 70%, mais il donne seulement un gain de 110% en déformation radiale alors que en déformation axiale est nul (Tableau IV.3). Par contre, après le deuxième chargement les gains enregistrés sont plus importants que ceux obtenus après le premier essai soit : 113%, 24% et 868% en termes de résistance, en déformations axiale et radiale respectivement. Les gains notés sont très acceptables et plus importants que ceux trouvées pour les colonnes confinées par des enveloppes en PRFV sauf l'empilement C1 ; qui ne donne seulement un gain de 70% en résistance pour le premier chargement, alors que dans le deuxième il présente un gain important en résistance soit 113% contrairement aux autres qui présentent des dégradations assez notables à tous les niveaux. Les confinements C2 (90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>) et C4 (90/0)<sub>s</sub> présentent des augmentations plus au moins très proches soit respectivement : 132% et 131% en résistance et 186%, 190% en déformation axiale. Le meilleur gain en déformation radiale est obtenu pour l'empilement C2 avec une augmentation de 2605%.

**Tableau IV.3.** Résultats des colonnes confinées et non confinées par PRFC.

Essai No	Désignations	F <sub>max</sub> (kN)	f' <sub>c</sub> (MPa)	f' <sub>cc</sub> (MPa)	f' <sub>cc</sub> /f' <sub>co</sub>	ε <sub>cc</sub> %	ε <sub>cc</sub> /ε <sub>co</sub>	ε <sub>r,rup</sub> %	ε <sub>r,rup</sub> /ε <sub>ro</sub>
1 <sup>er</sup> Chargement	Béton de contrôle	487,14	24,24	24,24	1	0,61	1	0,19	1
	C1 (0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> )	829,50		41,27	1,70	0,43	0,70	0,40	2,10
	C2 (90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> )	1133,55		56,28	2,32	1,82	2,99	2,57	13,53
	C3 (0/90) <sub>s</sub>	1315,51		61,45	2,53	1,87	3,06	2,74	14,42
	C4 (90/0) <sub>s</sub>	1128,47		56,15	2,31	1,77	2,90	2,42	12,73
2 <sup>eme</sup> Chargement	C1 (0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> )	1042,01		51,85	2,13	0,76	1,24	1,84	9,68
	C2 (90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> )	264,72		13,17	0,54	0,21	0,34	0,60	3,19
	C3 (0/90) <sub>s</sub>	/		/	/	/	/	/	/
	C4 (90/0) <sub>s</sub>	998,89		49,70	2,05	1,55	2,54	1,99	10,47

f'<sub>cc</sub>: résistance en compression axiale du béton confiné ; ε<sub>cc</sub>, ε<sub>r,rup</sub>: déformations axiale et radiale respectivement.

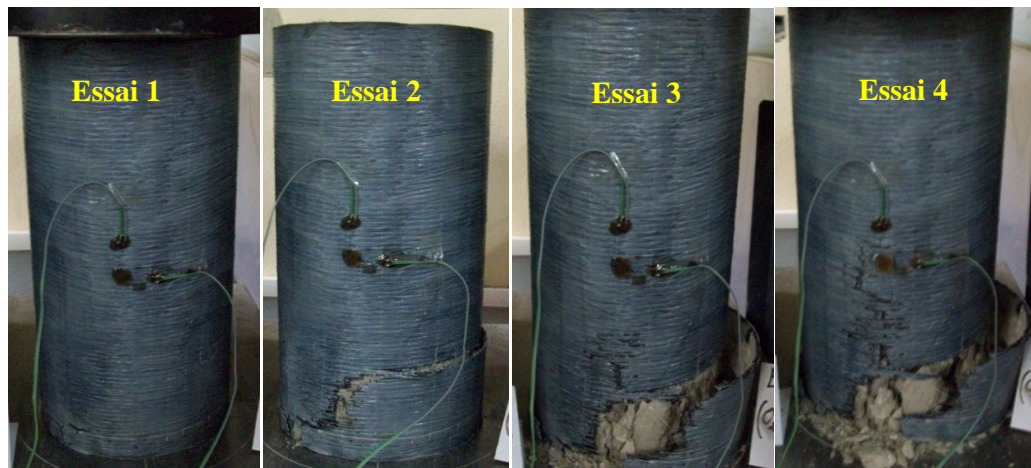
En comparant les résultats des confinements adoptés on trouve que, les empilements C1 ( $0_2/90_2$ ) et C2 ( $90_2/0_2$ ) composés de deux couches chacune constituée par deux plis, représentent un comportement différent ceci est dû principalement aux orientations des fibres. Sous l'effet de la compression des éprouvettes confinées avoir les plis orientés à 0 degrés travail à la flexion par flambement alors que ceux orientés à 90 degrés travail au gonflement. Lorsque les fibres orientés à 0 sont en contact avec le béton c'est le cas de C1 ( $0_2/90_2$ ) sont chargées en compression, ces fibres donnent plus de possibilités au gonflement du béton fissuré ou rompu et l'essai est stoppé après la rupture des plis internes. Les plis en contact avec le béton sont les premiers plis qui offrent l'effort de résistance au chargement et après le premier essai le béton fissuré occupe tout l'espace disponible possible. Dans le deuxième chargement les plis de la deuxième couche orientés à 90 degrés résistent à la charge de compression exercée du fait de leurs orientations dans le sens circonférentiel (bonne résistance au gonflement). En revanche, l'empilement C2 ( $90_2/0_2$ ) se comporte contrairement à C1 ( $0_2/90_2$ ) car les plis en contact avec le béton sont orientés à 90° ce qui offre un bon maintien du béton à l'intérieur de l'enveloppe composite et freine le gonflement ce qui conduit à un gain en résistance de 132% plus important par rapport à C1 dans le cas du premier chargement. Cependant, dans le deuxième chargement il ne représente pas un effort important car les plis de la première couche orientés à 90 degrés sont fissurés et les plis de la couche externe (orientés à 0°) ne résistent pas au gonflement du béton et le chargement conduit à un développement très rapide des fissures dans l'enveloppe composite. A la lumière des résultats présentés dans les figures IV.4 il s'avère que, l'orientation des fibres a un effet significative sur le comportement mécanique des colonnes confinées.

#### IV.2.3.3 Modes de rupture et d'endommagement

D'après les photos illustrées dans la figure IV.5 on observe que les colonnes confinées par les enveloppes PRFC avec les fibres du premier pli orientés à 0° (en contact direct avec le béton) les endommagements constatés sont focalisés dans les parties inférieures des colonnes. Par contre, les colonnes confinées par des fibres orientées à 90° (dans la direction de la circonférence) en contact avec le béton les endommagements sont concentrés dans les parties supérieures des éprouvettes.

Les modes de ruptures constatés pour les colonnes confinées par des enveloppes composites en PRFC sont de type fragile caractérisés par l'explosion des éprouvettes comme le cas d'un confinement par l'enveloppe C3 (Fig. IV.5c). Parfois, les éprouvettes se rompent par une rupture brutale comme le montre la figure IV.5b pour l'enveloppe C2 ; ces phénomènes sont causés par la haute résistance des fibres de carbone et le confinement rigide par un nombre de plis important (quatre plis), sans oublier le grand effet de l'orientation des

fibres. Alors que, les ruptures enregistrés pour les deux autres confinements C1 et C4 (Fig. IV.5a et IV.5d) est moins fragile, tous dépend des orientations des fibres et de leur position.

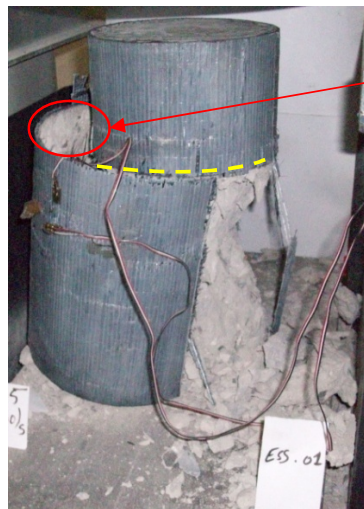


(a) Empilement C1 ( $0_2/90_2$ ).



(b) Empilement C2 ( $90_2/0_2$ ).





Arrachement du béton  
avec l'enveloppe PRFC

(c) Empilement C3 (0/90)<sub>s</sub>.

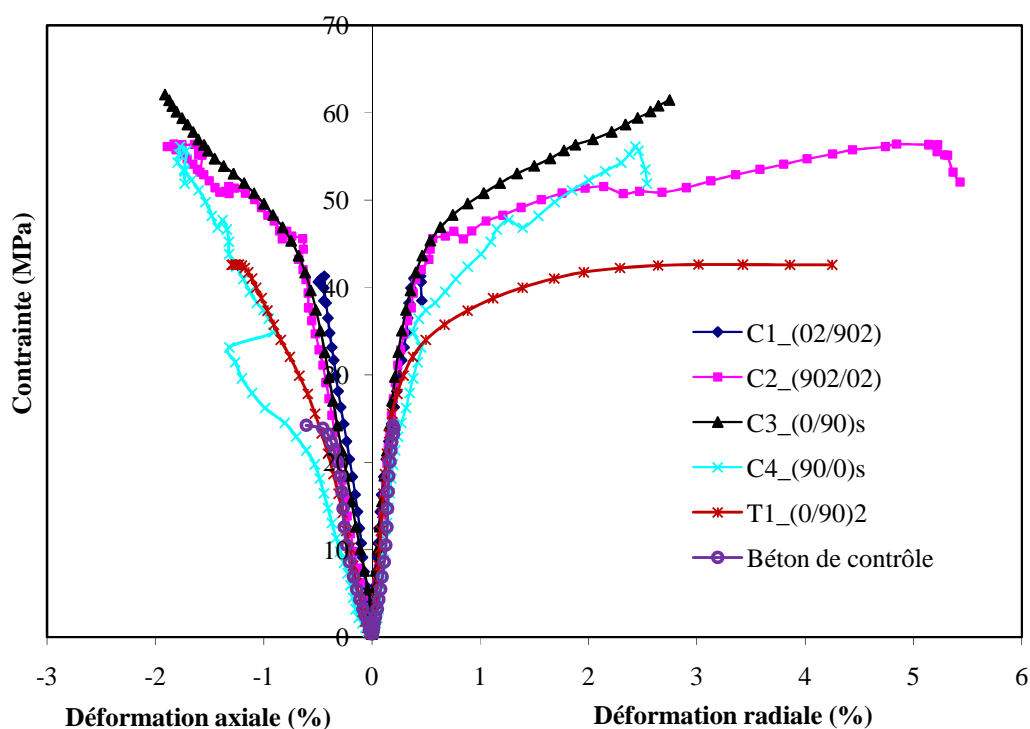


(c) Empilement C4 (90/0)<sub>s</sub>.

**Figure IV.5.** Modes d'endommagement et faciès de rupture des colonnes confinées par des enveloppes en PRFC orientées à : *a)* (0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>), *b)* (90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>), *c)* (0/90)<sub>s</sub> et *d)* (90/0)<sub>s</sub>.

#### IV.2.4 Comparaison du comportement contrainte/déformation

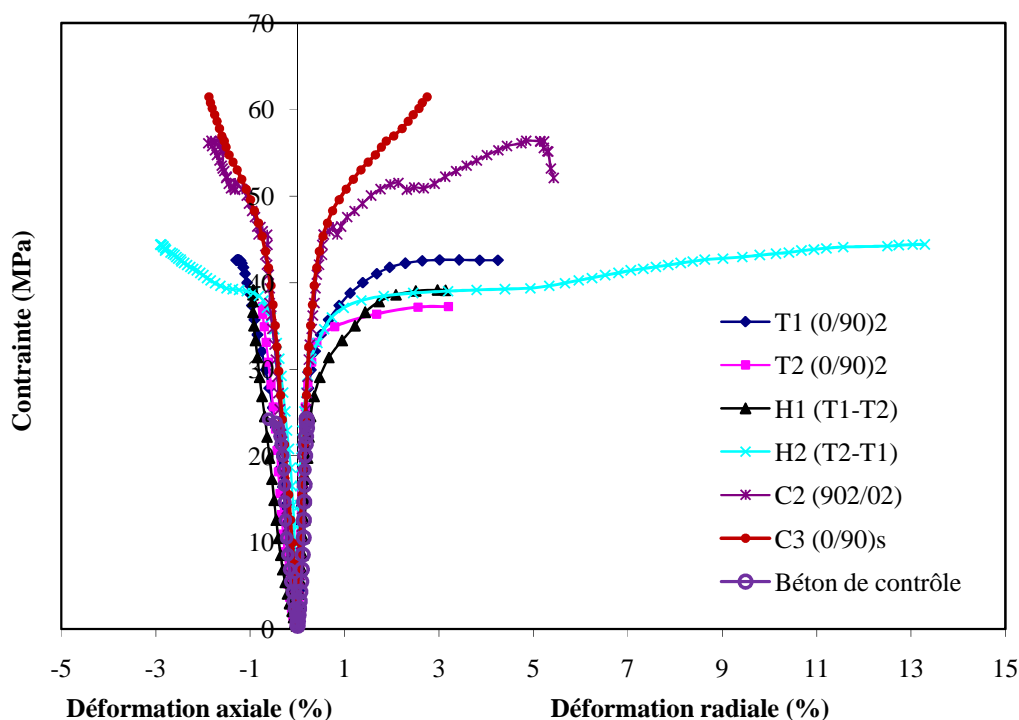
Pour mieux cerner l'influence et l'efficacité de la technique de réparation et de renforcement, sur le comportement mécanique, des éléments en béton par des matériaux composites en PRF, En comparant les quatre empilements en PRFC avec l'empilement en PRFV de tissu T1 et le béton de contrôle pour le cas du premier chargement (Fig. IV.6). On trouve que les pentes de la première phase élastique, du comportement contrainte/déformation des différentes colonnes confinées, sont presque similaires dans le cas des déformations radiales. Par contre, des dispersions sont enregistrées pour les déformations axiales notamment pour l'enveloppe C4. L'analyse des résultats obtenus montre que le confinement des colonnes par des composites à base de fibre de verre a un impact significatif sur le comportement de ces dernières mais reste toujours moins performant que les fibres de carbone qui augmentent la résistance des colonnes d'une manière notable et surtout pour les enveloppes C2, C3 et C4.



**Figure IV.6.** Comparaison globale du comportement des colonnes confinées pour le premier essai de chargement.

Une autre comparaison est faite entre les meilleurs comportements des colonnes confinées par des plis en PRFV avec celui en PRFC et le béton de contrôle est présenté dans la figure IV.7. Les comportements contrainte/déformation des colonnes considérées sont pratiquement identiques dans la partie élastique, cependant la différence est importante dans

la partie plastique ceci est dû au type, nombre de plis et à nature des enveloppes de PRF utilisés. L'analyse des résultats montre que le meilleur comportement en termes de contrainte maximale est celui du carbone C3, mais l'empilement C2 donne un gain en déformation radiale plus de 187% par rapport à l'augmentation offerte par celui de C3. Alors que, pour les confinements des PRFV c'est l'hybride H2 qui est beaucoup plus ductile et possède des meilleures augmentations sur tous les niveaux (Voir tableaux IV.2 et IV.3).



**Figure IV.7.** Comparaison entre les meilleurs comportements des différentes architectures composites effectuées.

L'efficacité des matériaux composites PRF dans la réparation et le renforcement des éléments de structure en béton (dans notre cas des colonnes) sollicité en compression, sur la résistance et les déformations axiale et radiale sont présentées respectivement dans les figures IV.8, 9 et 10 sous forme d'histogrammes. Ces courbes concernent les meilleurs systèmes de confinement adoptés concernant les PRFV et tous les confinements par PRFC, avec le nombre de chargement (essai) effectué pour chaque configuration. Les trois figures clarifient l'efficacité de cette technique et montre bien les gains et les augmentations obtenus.

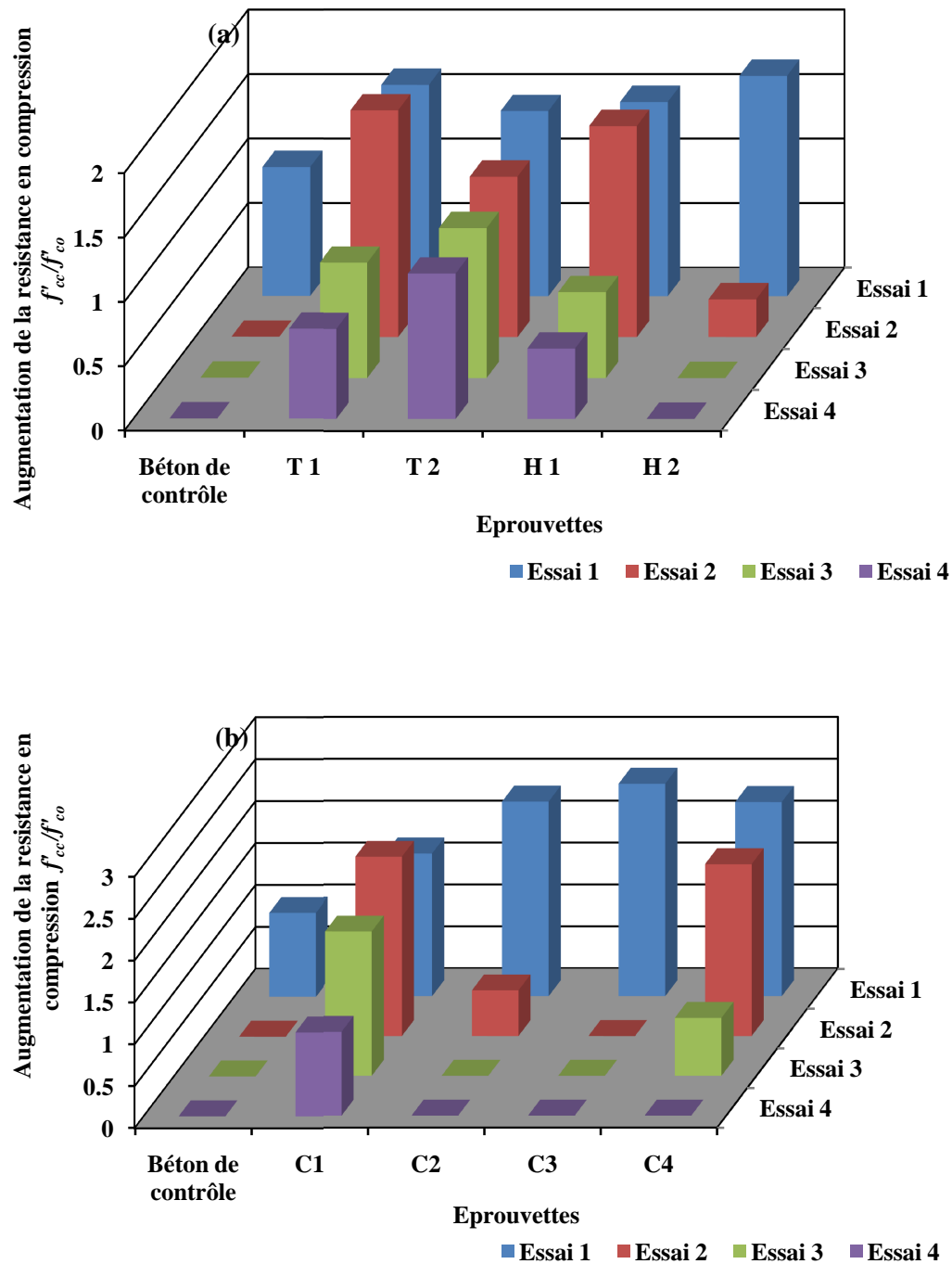
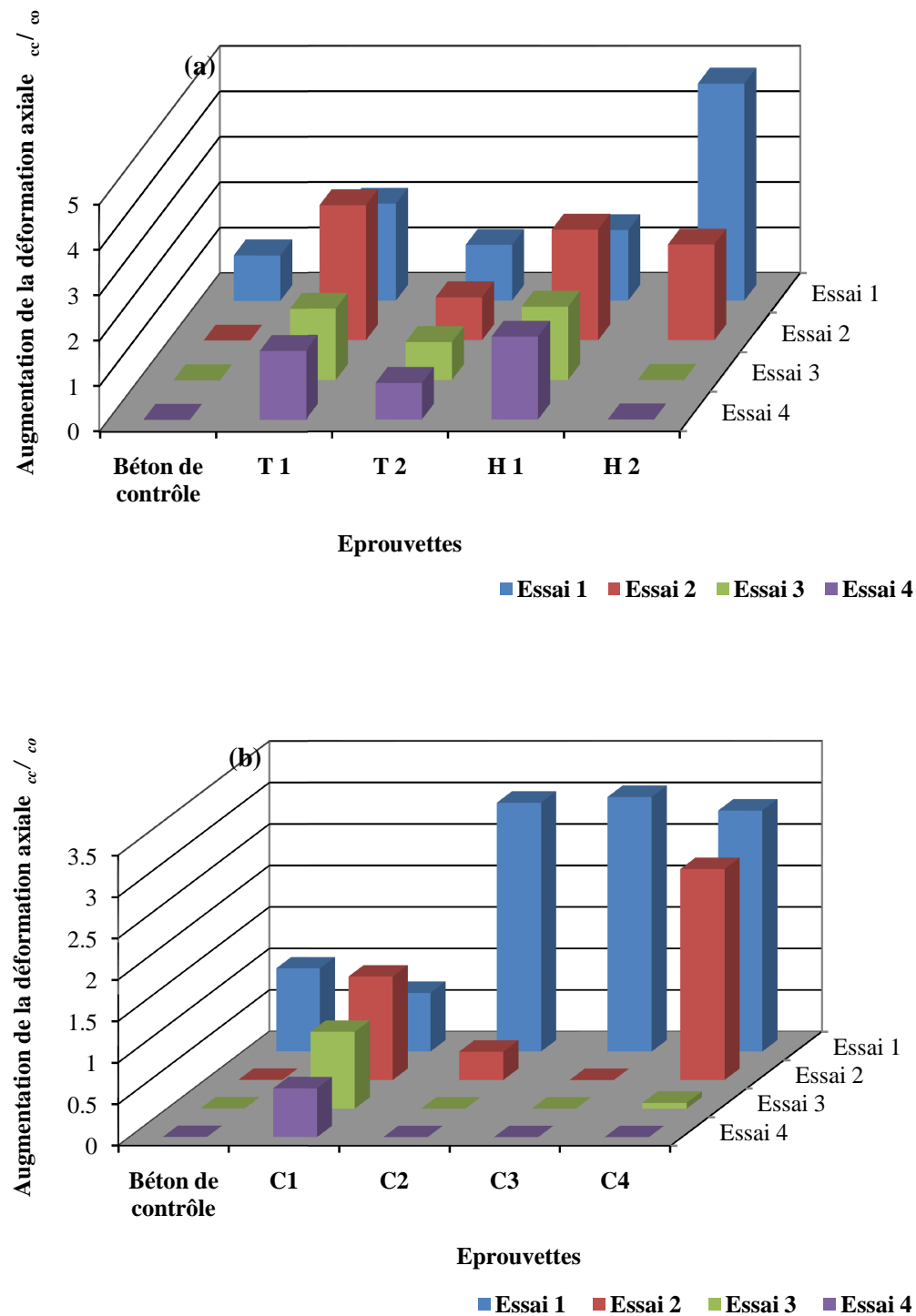
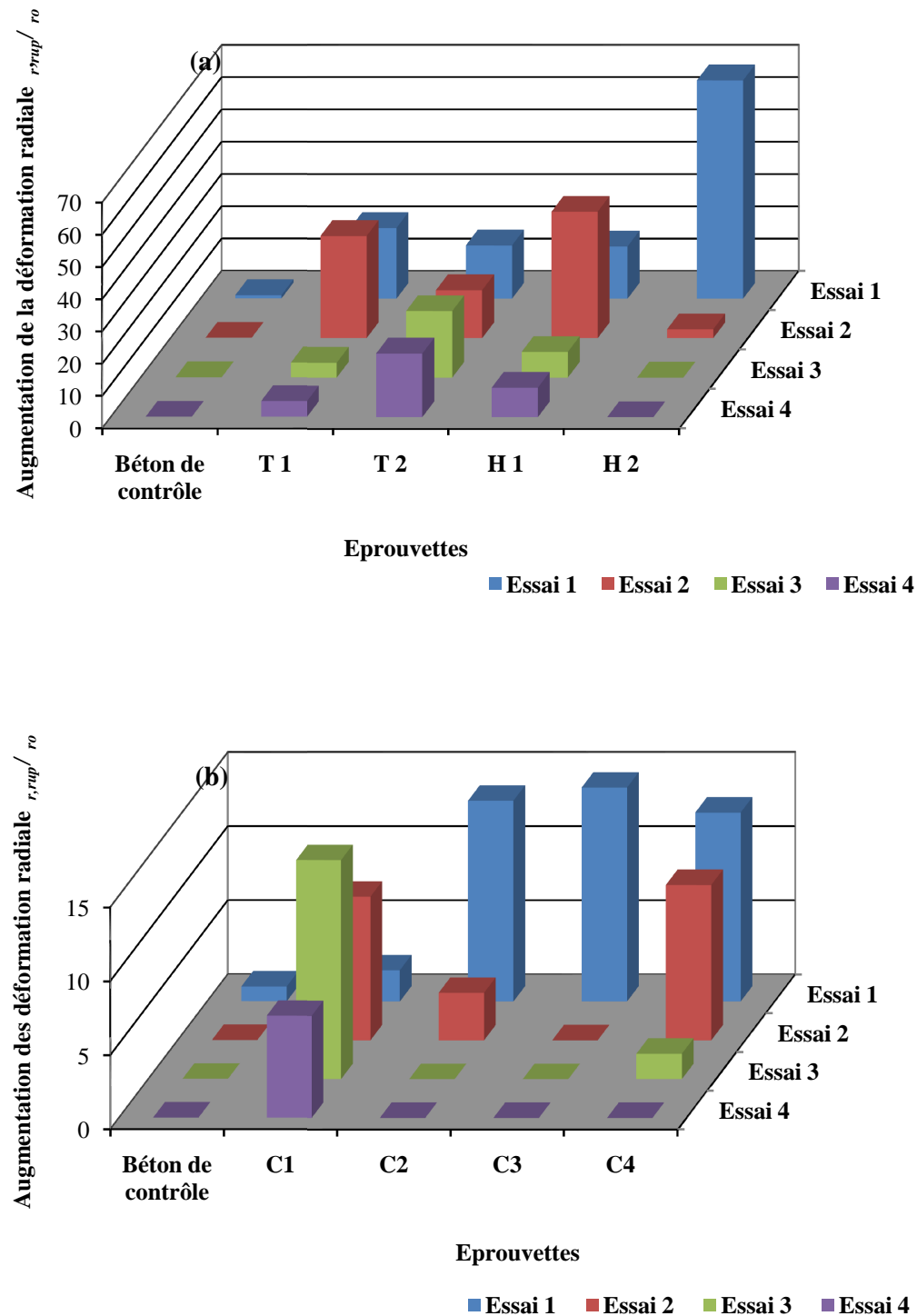


Figure IV.8. Efficacité du renforcement du béton par matériaux composites sur la résistance en compression : (a) PRFV et (b) PRFC.





**Figure IV.9.** Efficacité du renforcement du béton par matériaux composites sur la déformation axiale : (a) PRFV et (b) PRFC.



**Figure IV.10.** Efficacité du renforcement du béton par matériaux composites sur la déformation radiale : (a) PRFV et (b) PRFC.

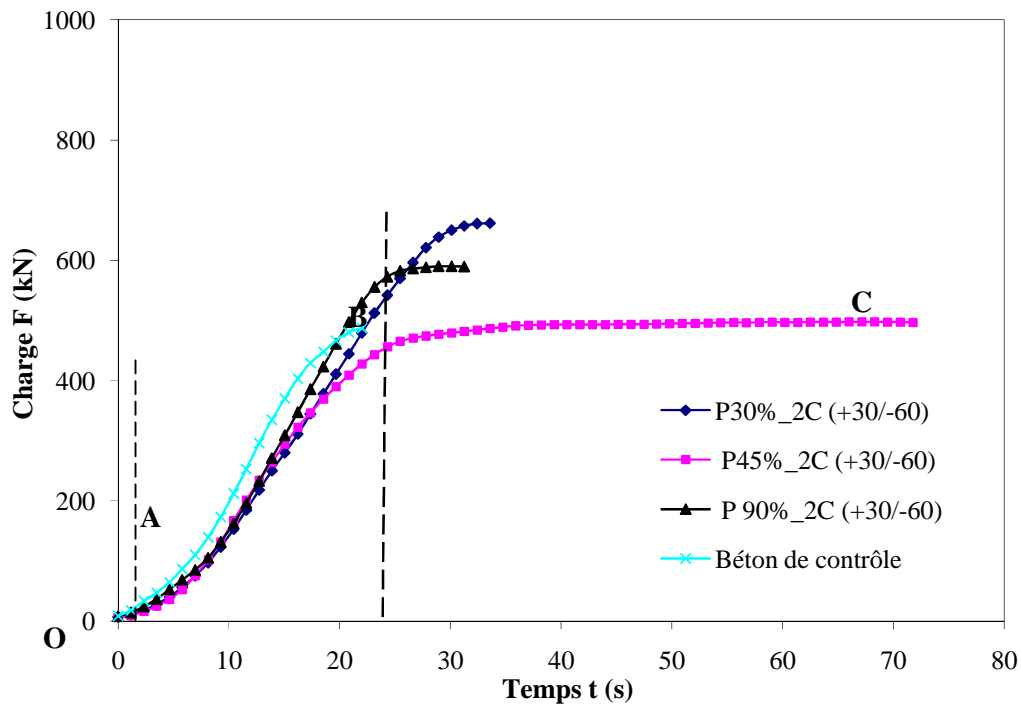
### IV.3 Deuxième partie

Cette partie est en deux volets, le premier est menée sur une série de colonnes consacrée pour étudier leurs comportement mécanique ainsi que l'influence de l'orientation des fibres ; ces colonnes sont renforcées et confinées par deux plis de tissu T1, en utilisant trois orientations différentes :  $(0/90)_2$ ,  $(\pm 45)_2$  et  $(+30/-60)_2$ . Le deuxième volet est mené sur une autre série d'éprouvettes initialement préchargées à 30, 45 et à 90% de la charge ultime du béton, puis réparées par le collage externe de deux couches de PRFV en employant les orientations  $(0/90)$  et  $(+30/-60)$ . Le but du préchargement est de créer des défauts (fissures) dans les éprouvettes, afin de quantifier l'efficacité du renforcement par PRFV des structures type colonnes en béton. De plus, les différents mécanismes d'endommagement et les types de rupture ont été identifiés.

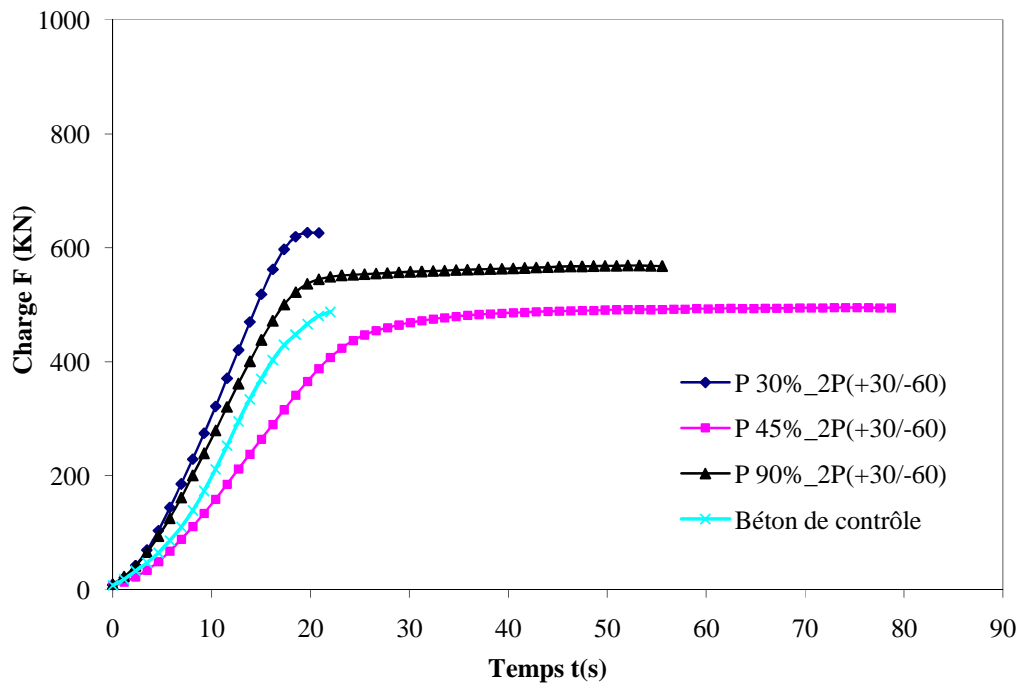
#### IV.3.1 Efficacité de la réparation et/ou le renforcement du béton préchargée par PRFV

##### IV.3.1.1 Comportement charge/temps des colonnes préchargées

Les comportements globaux des colonnes préchargées présentées dans la figure IV.11 sous forme de courbes charge/temps se déroulent en trois phases et dépend fortement du niveau de préchargement. La première phase OA, non linéaire qui peut être due au mauvais contact entre l'éprouvette et l'appui supérieur de la machine. Une seconde phase AB quasi linéaire élastique, correspondant au comportement du béton et c'est dans cette phase qu'a lieu la formation des micros fissures dans le béton. La troisième phase plastique BC ou on obtient un changement de rigidité avec un changement de pente plus faible (ou même la formation d'un plateau) correspondant au comportement de la chemise en composite. Le préchargement avec un niveau de 45% des éprouvettes en béton permet une rigidification importante sans atteindre un état d'endommagement sérieux. Par contre, dans les deux cas restants, le préchargement par un niveau de 30% est insuffisant pour complètement rigidifier le noyau en béton, alors que celui de 90% subit un endommagement presque total de l'éprouvette (formation de plusieurs fissures verticales).



(a)



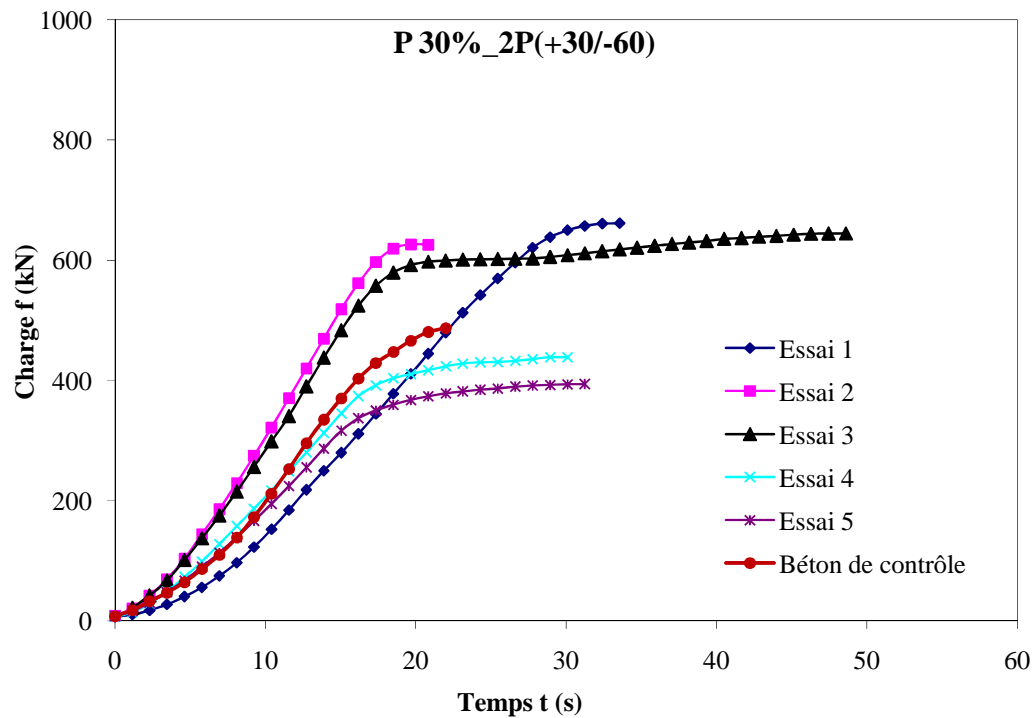
(b)

**Figure IV.11.** Comparaison des courbes charge/temps des colonnes préchargées à 30%, 45%, 90% puis renforcées par plis en PRFV orientés à  $(+30/-60)_2$  pour : (a) 1<sup>er</sup> chargement et (b) 2<sup>ème</sup> chargement.

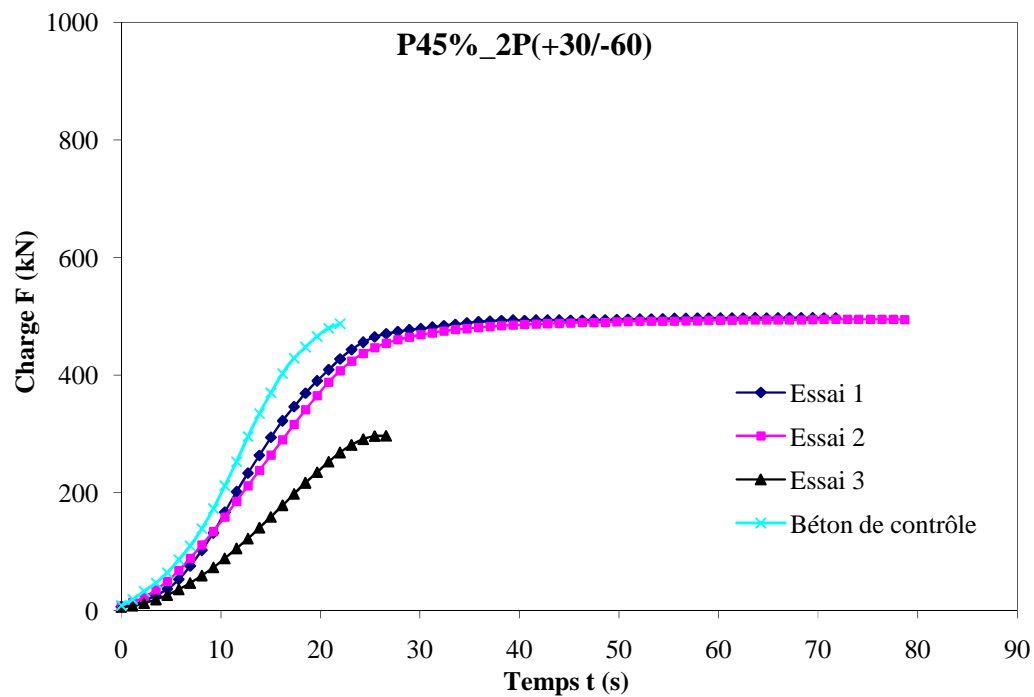
Les colonnes préchargées à faible niveau de 30% sont les plus performantes en résistance (contrainte la plus importante) par rapport au autres niveau de préchargement de 45 et 90%. Les éprouvettes préchargées à 90% de la charge portante du béton de contrôle s'endommagent presque totalement c.-à-d. avec la présence de fissures notables par rapport à celles préchargées à 45%. Donc, pendant leurs confinement la résine étalée sur leurs surfaces pénètre dans ces fissures et forme des racines qui sont bien adhérent avec les plis PRFV et comme ces dernier sont orienté à  $(+30/-60)$  donc ils travail au cisaillement qui rend la structure plus performante. Par contre, le préchargement à 45% fait des fissures superficielles, alors leur béton est moins rigide que celui préchargées à 90%, et le plateau qui caractérise la troisième phase est dû à la ductilité des fibres de verre et à leurs orientations.

Après le deuxième chargement, les colonnes préchargées à 30 et à 90% de la charge à la rupture deviennent plus rigide que dans le premier chargement, ce qui se traduit par une augmentation de la pente dans les courbes de la phase élastique (Fig. IV.11b), ainsi que la formation de la troisième phase plastique, mais le niveau restant (45%) conserve ses propriétés mécaniques du premier chargement. Une phase plastique définie par la formation d'un plateau avec une légère dégradation de 3,65% dans la valeur de leur charge portante et une augmentation de 77,7% de ductilité caractérise le comportement de la colonne préchargée à 90%.

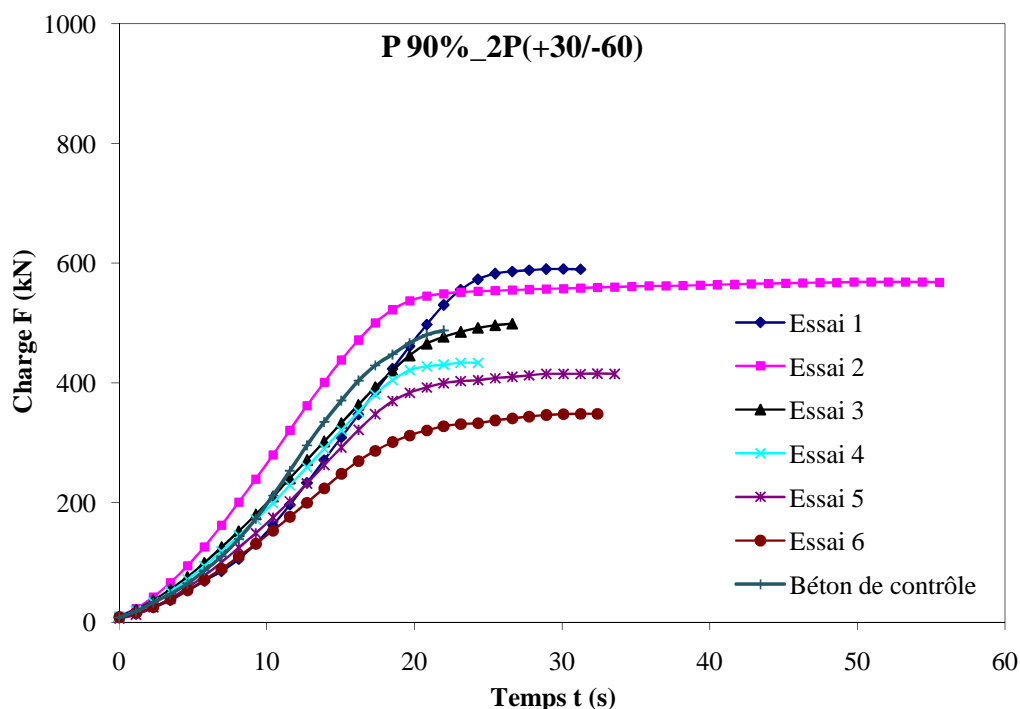
Les chargements répétés pour les colonnes préchargées à 30, 45 et 90% ; jusqu'à la rupture complète des enveloppes composites ; sont présentés dans les figures IV.12. Les colonnes des deux niveaux 30 et 90% représentent une ductilité importante, déterminé par le nombre de chargement résisté, ainsi ses trois premiers essais montrent une rigidité acceptée contrairement aux colonnes de niveau 45%.



(a)



(b)



(c)

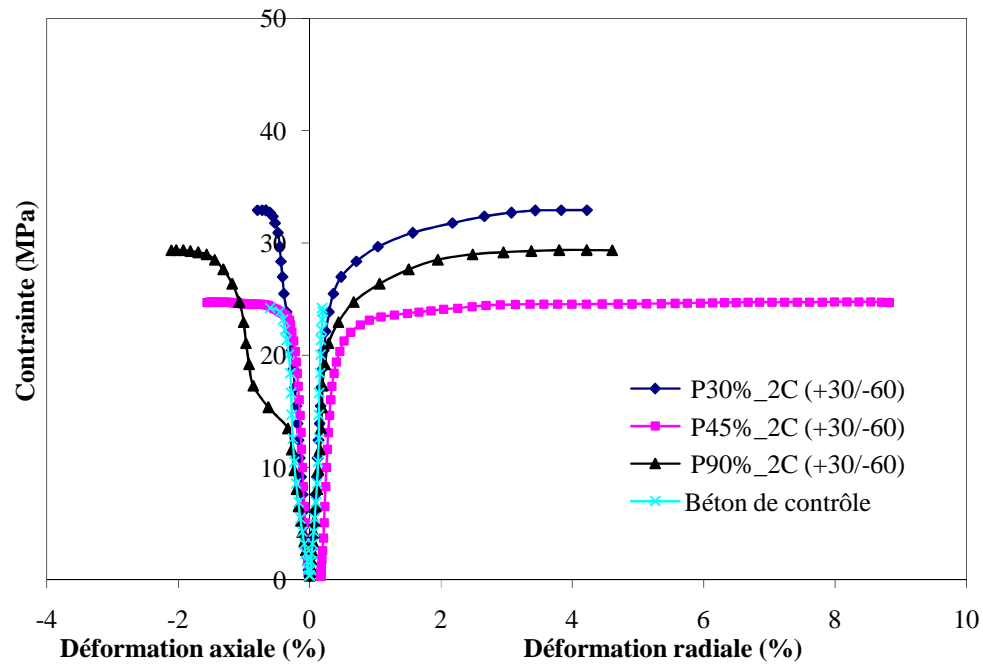
**Figure IV.12.** Courbes charge/temps des chargements répétés des éprouvettes préchargées à : (a) 30%, (b) 45% et (c) 90% puis confinées par deux plis de PRFV orienté à (+30/-60).

#### IV.3.1.2 Comportement contrainte/déformation des colonnes préchargées

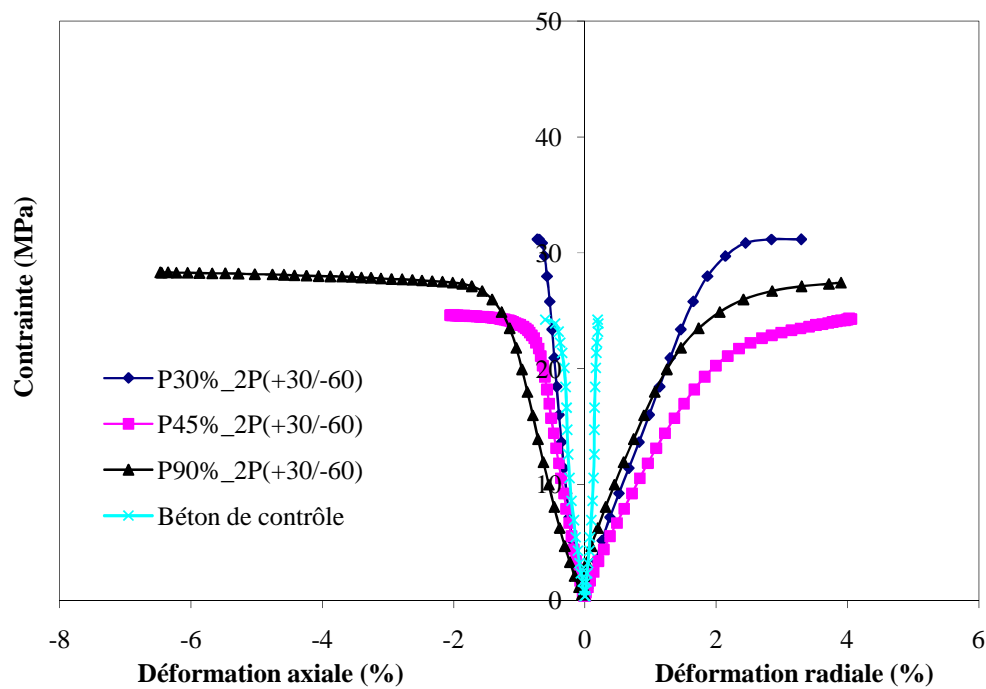
Le comportement contraintes/déformations des deux premiers chargements des éprouvettes préchargées et renforcées comporte les mêmes phases que ceux enregistrées pour les colonnes non préchargées et confinées (voir fig. IV.1).

Nous constatant que le comportement contrainte/déformation des colonnes préchargées puis confinées se déroule en deux phases figures IV.13a et IV.13b. La contrainte des colonnes préchargées à 30% est la plus importante avec des déformations radiale et axiale les plus faibles par rapport aux autres niveaux de préchargements 45 et 90%. Les résultats obtenus montrent que les colonnes préchargées à 90% sont plus performant en termes de capacité portante (contrainte) que celles préchargées à 45% malgré qu'elles soient confinées par le même PRFV (+30/-60)<sub>2</sub>. Ce phénomène est probablement due au faite que les fissures enregistré sont plus importante dans le cas de préchargement à 90% ce qui leur confèrent lors de la réparation des racines en résine plus grande, profonde et donc plus forte par rapport au préchargement à 45%.





(a)



(b)

**Figure IV.13.** Comportement contrainte/déformation des colonnes préchargées à 30, 45 et 90% puis renforcées par PRFV (+30/-60)<sub>2</sub> : (a) premier et (b) deuxième chargement.

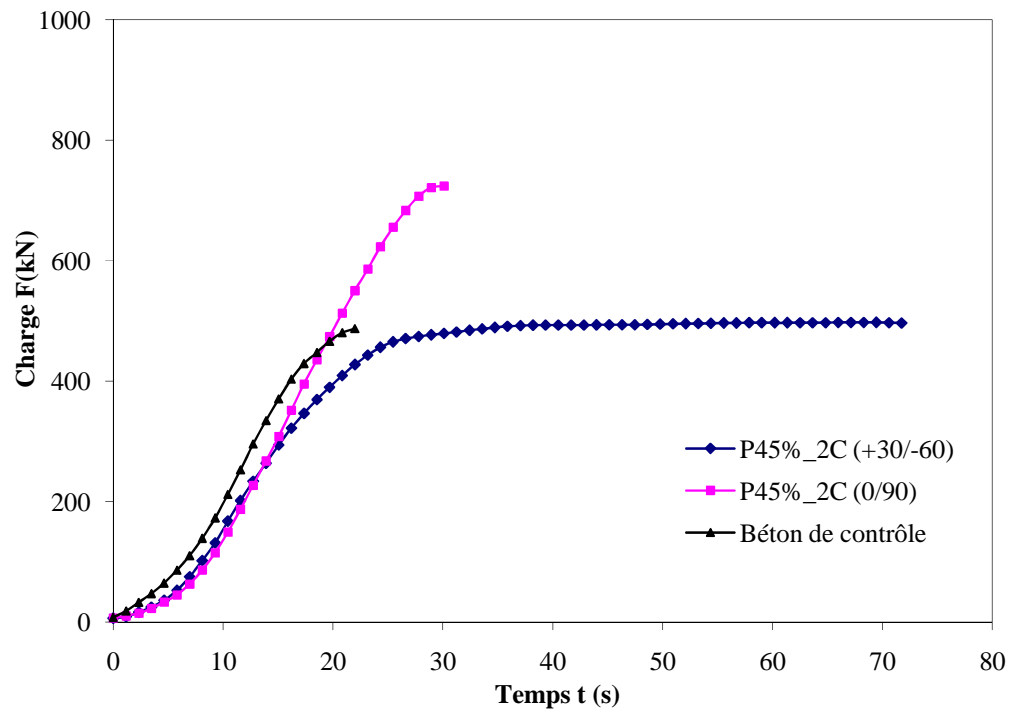
D'après la figure IV.13a le renforcement et/ou la réparation par l'utilisation d'un matériau composite collé donne des augmentations importantes en résistance et en déformations axiale et radiale, soit 35%, 30% et 2070% respectivement pour les éprouvettes préchargées à 30%. Alors que, les éprouvettes préchargées à 45% donne des gains de 2% en résistance, 158%, et 4440% en déformation axiale et radiale respectivement, ainsi que les gains obtenus pour les éprouvettes préchargées à 90% est de 21%, 247%, et 2270% respectivement (voir tableau IV.2). Il faut noter que le deuxième chargement montre une dégradation notable de la rigidité pour les trois niveaux de préchargement (Fig. IV.13b).

### IV.3.2 Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton préchargé puis renforcé par PRFV

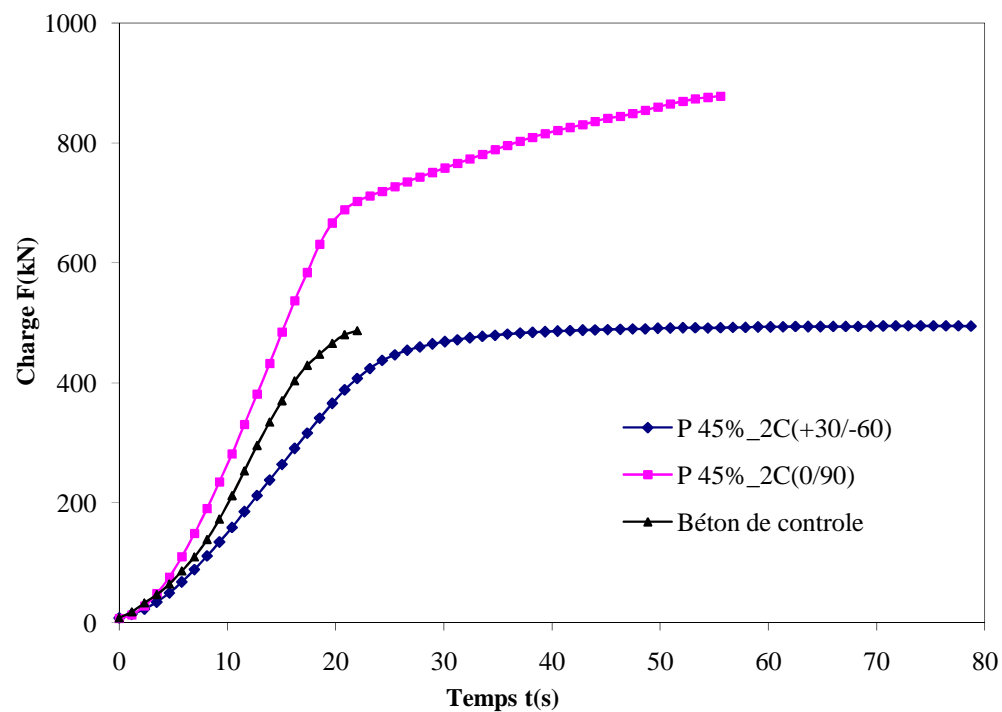
#### IV.3.2.1 Comportement charge/temps

La comparaison du comportement charge/temps entre les colonnes préchargées à 45% puis recouverte par les stratifiés orientés à  $(0/90)_2$  et  $(+30/-60)_2$  sont présentés dans la figure IV.14. Dans le premier chargement (Fig. IV.14a) la première et la deuxième phase sont pratiquement équivalente et même légèrement plus faible que celle du comportement du béton de contrôle. L'orientation de  $(0/90)_2$  permet une augmentation du temps de l'essai de 28,6% et d'avoir une charge maximale, comparativement au béton de contrôle et à l'orientation de  $(+30/-60)_2$ , soit un accroissement de 45,2% par rapport au béton de contrôle, alors que l'orientation  $(+30/-60)_2$  ne permet pratiquement aucune augmentation dans la charge et du temps de l'essai. La troisième phase du stratifié  $(0/90)_2$  est très courte (presque nulle) permettant d'avoir une force maximale de 724 kN bien supérieur à 496 kN obtenus dans le cas du stratifié  $(+30/-60)_2$  qui est caractérisée par un plateau et donc une ductilité plus importante, avec un temps d'essai plus grand de 138,5% par rapport à l'empilement  $(0/90)_2$ . Comme la troisième phase correspond au comportement des PRFV, donc l'orientation des fibres à un grand effet sur le comportement des colonnes confinées.

Le deuxième chargement (Fig. IV.14b) permet d'éclaircir l'influence et l'efficacité de l'orientation des fibres, sur le comportement des colonnes renforcées, par le grand écart enregistré entre les deux empilements employés. La pente de la phase élastique de la colonne confinée par l'empilement  $(0/90)_2$  devienne plus importante (augmentation de la rigidité), avec une dégradation respectivement de la charge maximale et du temps de l'essai de 8,29% et 6,76% comparativement au premier chargement. Cependant, leur phase plastique est caractérisée par un plateau d'une pente plus faible que celle de la phase élastique, avec une augmentation notable dans la charge à la rupture de 21,26%. Par contre, la colonne confinée par l'empilement  $(+30/-60)_2$  maintient les propriétés mécaniques de son comportement du premier chargement.



(a)

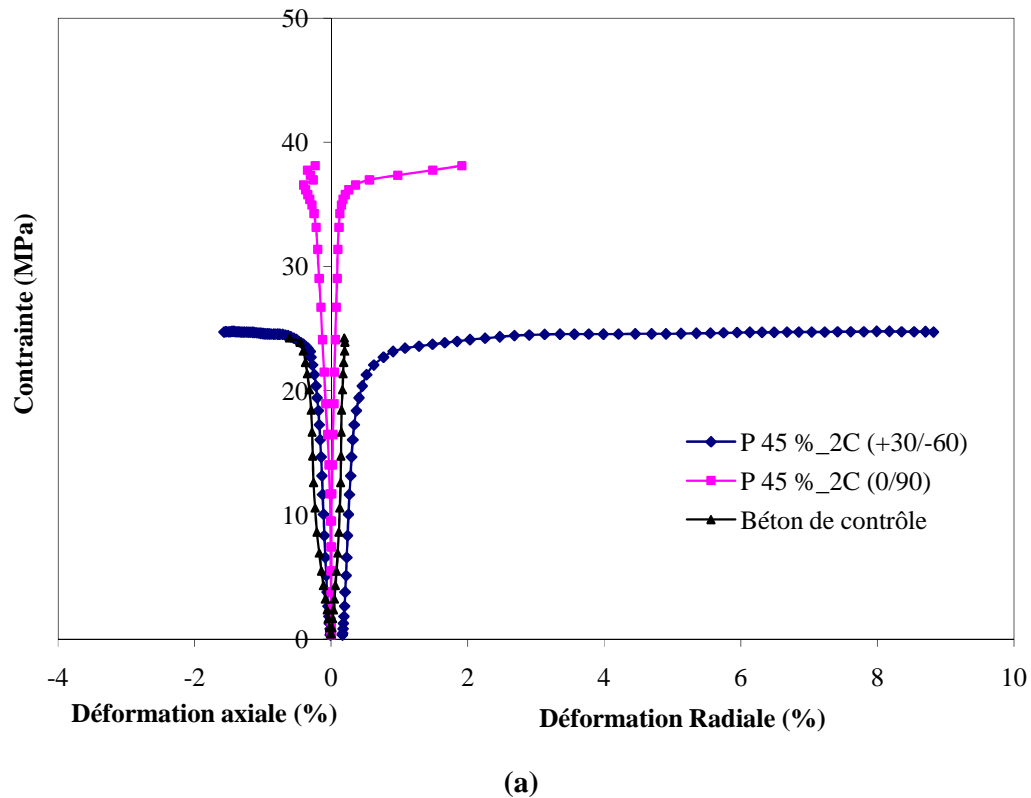


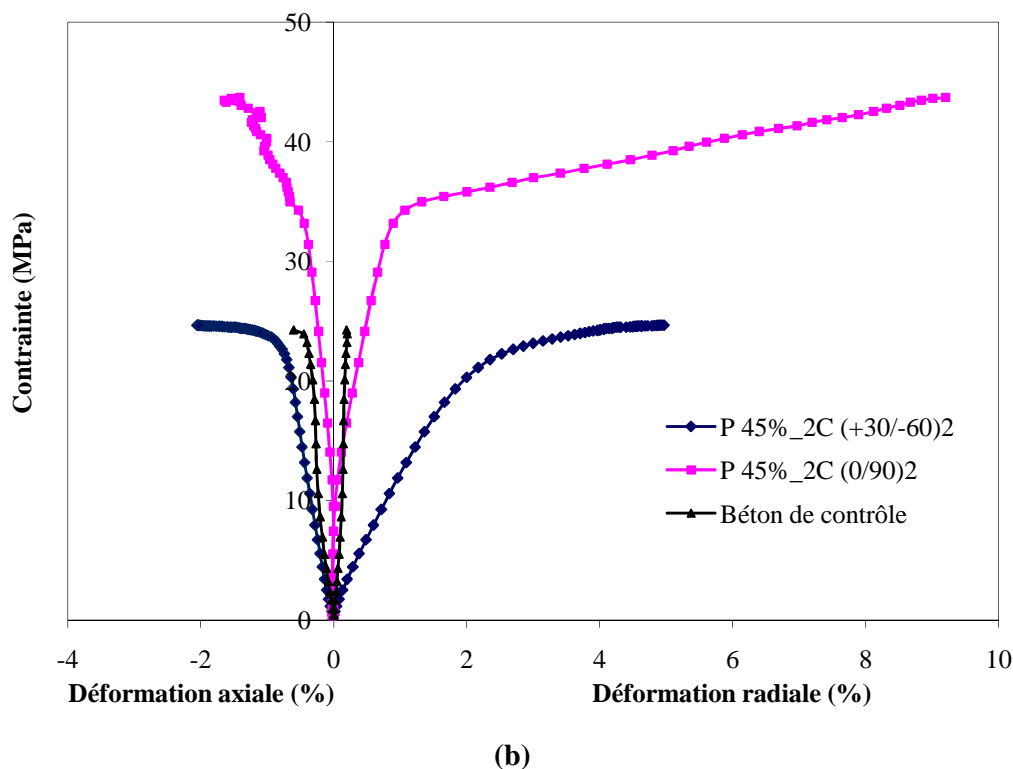
(b)

**Figure IV.14.** Courbes charge/temps des colonnes préchargées à 45% puis renforcées par PRFV orientés à  $(0/90)_2$  et  $(+30/-60)_2$ : (a) du premier et (b) deuxième chargement.

### IV.3.2.2 Comportement contrainte/déformation

La figure IV.15 représente le comportement contrainte/déformation, obtenu par des gauges d'extensométrie, des mêmes essais montrés dans la figure IV.10, pour mieux cerner l'influence du renforcement par confinement des PRFV. Là encore, il apparaît clair que les contraintes les plus élevées sont obtenues pour les colonnes confinées par l'empilement  $(0/90)_2$ .





**Figure IV.15.** Comportement contrainte/déformations des colonnes préchargées à 45% puis renforcées par PRFV orientés à  $(0/90)_2$  et  $(+30/-60)_2$  : (a) premier et (b) deuxième chargement.

Les courbes du deuxième chargement (Fig. IV.15b) montre bien une dégradation notable de la rigidité comparativement au premier chargement (Fig. IV.15a) notamment pour la colonne confinée par l'empilement  $(+30/-60)_2$  dans la première phase, contrairement aux courbes charge/temps. La deuxième phase, qui été un plateau dans le premier essai, est caractérisé par une faible pente légèrement croissante pour l'empilement  $(+30/-60)_2$ . L'empilement  $(0/90)_2$  présente plus de performance que dans le premier chargement soit une augmentation de la résistance de 14,6% ainsi que, dans les déformations axiale et radiale respectivement soit 305% et 381%.

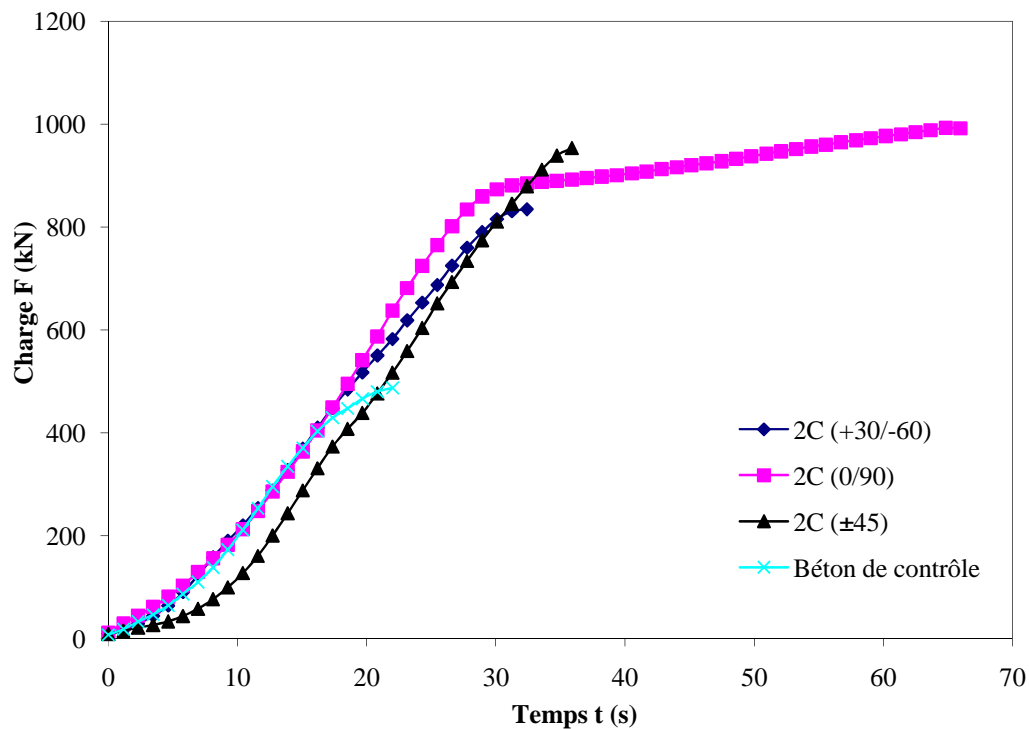
### IV.3.3 Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton non préchargé et renforcé par PRFV

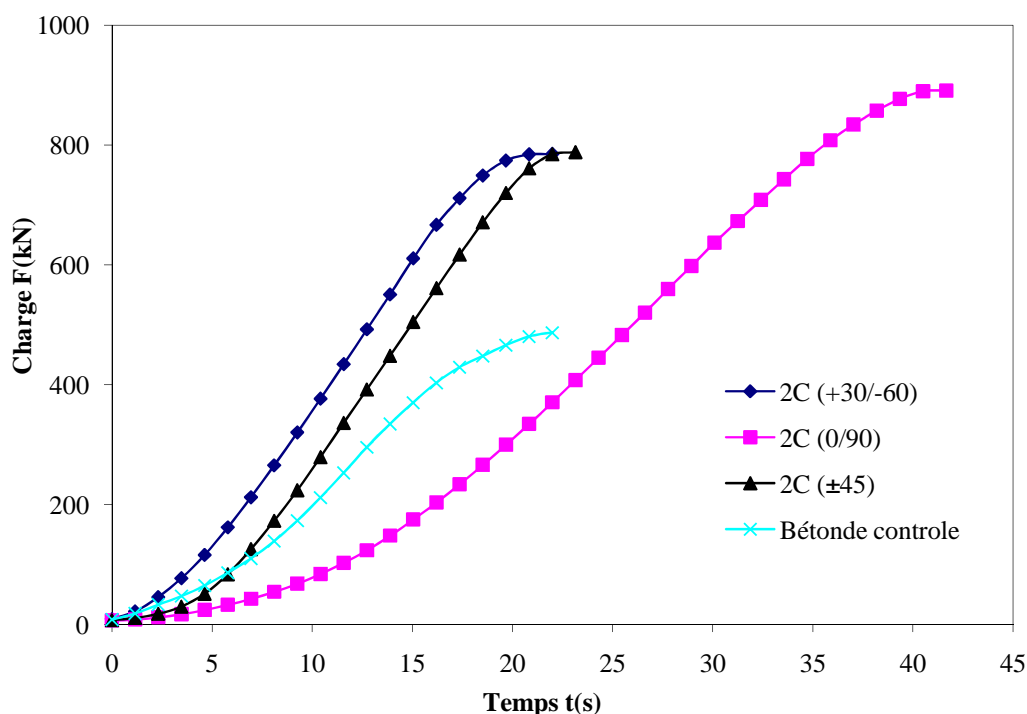
#### IV.3.3.1 Comportement charge/temps

Les figures IV.16 représentent le comportement charge/temps des colonnes non préchargées puis renforcées par des PRFV ayant les orientations  $(+30/-60)_2$ ,  $(\pm 45)_2$  et  $(0/90)_2$  respectivement. Le comportement est similaire à celui des éprouvettes préchargées mais avec des capacités portante très important soit une augmentation de 68%  $(+30/-60)_2$  et 37 % pour

$(0/90)_2$  par rapport aux éprouvettes préchargées. Dans la première et la deuxième phase du premier chargement (Fig. IV.16a) toutes les courbes sont presque identiques, c'est-à-dire qu'elles possèdent presque la même rigidité, alors que la troisième phase est formée seulement dans le cas des éprouvettes renforcées par l'empilement  $(0/90)_2$ . Ce résultat confirme celui obtenu dans le cas des éprouvettes préchargées.

Malgré la dispersion notée entre les courbes après le deuxième chargement (Fig. IV.16b) le comportement des éprouvettes renforcées par PRFV restent toujours très important par rapport à celui du béton de contrôle. L'orientation des fibres à une grande influence et un effet très important sur le comportement des colonnes confinées ceci est bien montrée dans les courbes du deuxième chargement.





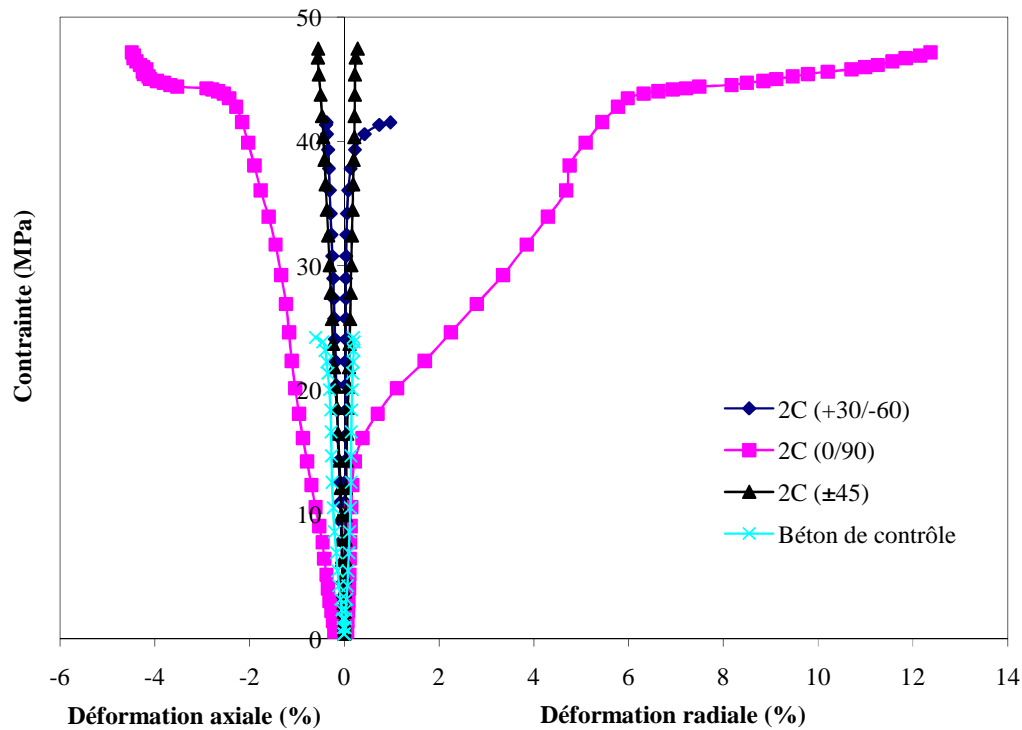
**Figure IV.16.** Courbes charge/temps des éprouvettes confinées par PRFV orientées à  $(+30/-60)$ ,  $(\pm 45)$  et  $(0/90)$  comparé avec celle le béton de contrôle. (a) du premier chargement et (b) le deuxième.

#### IV.3.3.2 Comportement contrainte/déformation

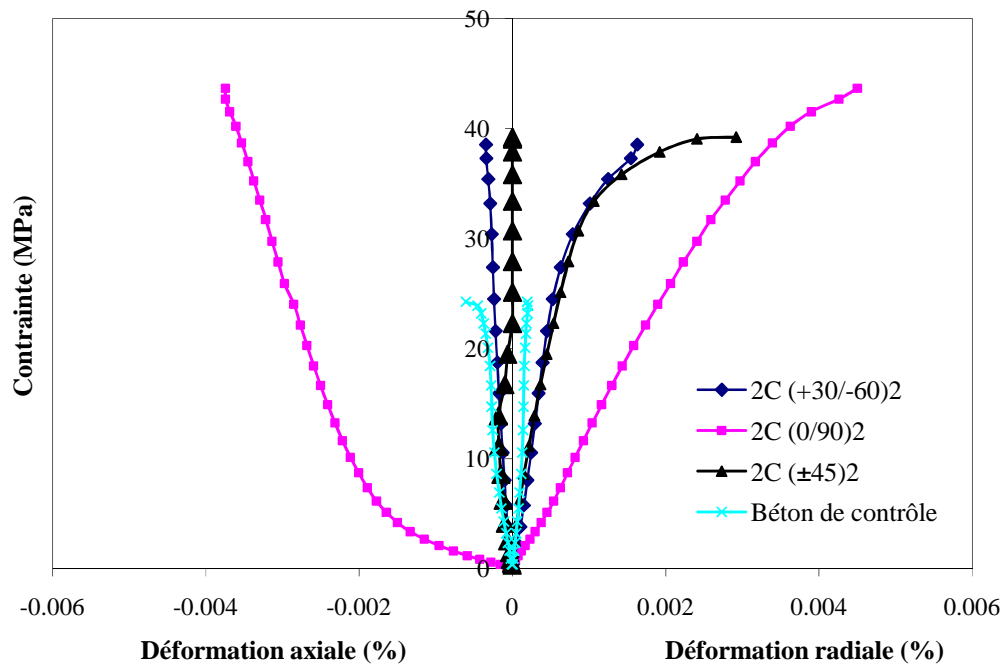
Le comportement contrainte/déformations des colonnes saines renforcées par PRFV de premier chargement est illustré dans la figure IV.17a. Les trois empilements utilisés offrent des gains en résistance et en déformations que ce soit axiale ou radiale très importantes, à titre d'exemple l'empilement  $(0/90)_2$  présente moins de rigidité que les deux autres empilements mais avec des augmentations meilleures sur tout les niveaux soit les valeurs de : 95, 650 et 6260% respectivement de la résistance et de déformations axiale et radiale (Tableau IV.4). La colonne confinée par l'empilement  $(\pm 45)_2$  produise une rigidité plus importante que le premier empilement avec la même augmentation en résistance mais celle en déformations axiale et radiale sont très faibles. Alors que, le dernier empilement  $(+30/-60)_2$  montre le gain le plus bas de la résistance soit 71% avec un comportement rigide quoique les gains de déformations n'est plus loin de celui obtenu pour  $(+30/-60)_2$ .

La figure IV.17b représente le comportement de deuxième chargement. Elle montre une chute de la rigidité plus importante, particulièrement pour l'empilement  $(0/90)_2$  avec une fable dégradation de 8% de la résistance que dans le premier chargement, ainsi des abaissements considérables en déformation axiale et notamment en déformation radiale soit 19,8% et 174,6% respectivement. Concernant les deux empilements restants, ils représentent moins de rigidité et peut de ductilité avec faibles dégradations en contrainte.





(a)



(b)

**Figure IV.17.** Comportement contrainte/déformation des colonnes saines renforcées par PRFV orientées à  $(+30/-60)_2$ ,  $(\pm 45)_2$  et  $(0/90)_2$  comparé avec le béton de contrôle : (a) Premier et (b) Deuxième chargement.

**Tableau IV.2.** Valeur moyenne des résultats sur les colonnes en béton préchargées ou non puis confiné par PRFV.

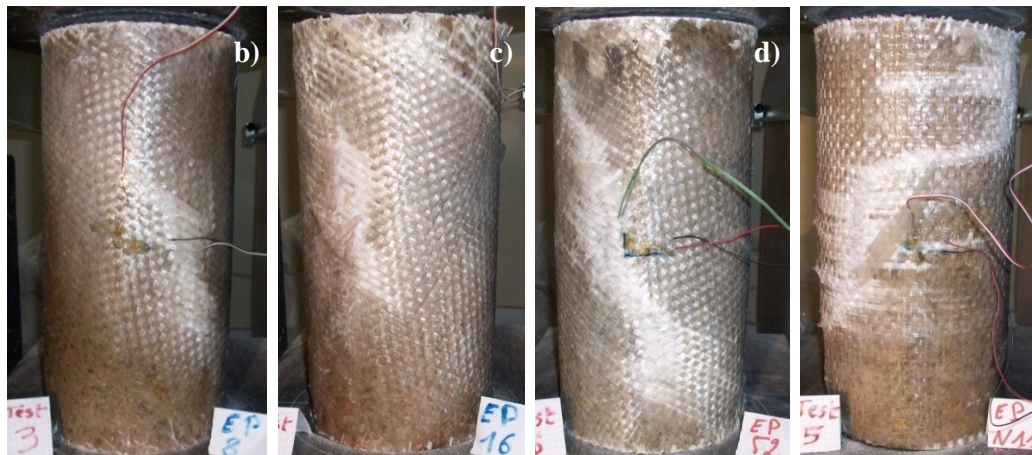
	Eprouvettes et niveaux de préchargement	$F_{\max}$ (kN)	$f'_c$ (MPa)	$f'_{cc}$ (MPa)	$f'_{cc}/f'_{co}$	$\varepsilon_{cc}$ %	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{r,rupt}$ %	$\varepsilon_{r,rupt} / \varepsilon_{ro}$
Ep Préchargées	béton	487,10	24,24	24,24	1,00	1,94	1,00	0,31	1,00
	[30%] $_{(+30/-60)_2}$	661,50		32,91	1,36	2,53	1,30	6,75	21,70
	[45%] $_{(0/90)_2}$	724,06		38,11	1,57	1,29	0,66	3,06	9,84
	[45%] $_{(+30/-60)_2}$	497,00		24,72	1,02	5,00	2,58	14,12	45,40
	[90%] $_{(+30/-60)_2}$	589,60		29,34	1,21	6,73	3,47	7,37	23,70
Ep Non préchargées	$_{(+30/-60)_2}$	834,40		41,51	1,71	1,50	0,77	1,55	4,98
	$_{(\pm 45)_2}$	953,84		47,46	1,96	1,77	0,91	0,45	1,45
	$_{(0/90)_2}$	992,55		47,14	1,95	14,36	7,40	19,78	63,60

$f'_{cc}$ : résistance en compression axiale du béton confiné ;  $\varepsilon_{cc}$   $\varepsilon_{r,rupt}$  : déformations axiale et radiale respectivement.

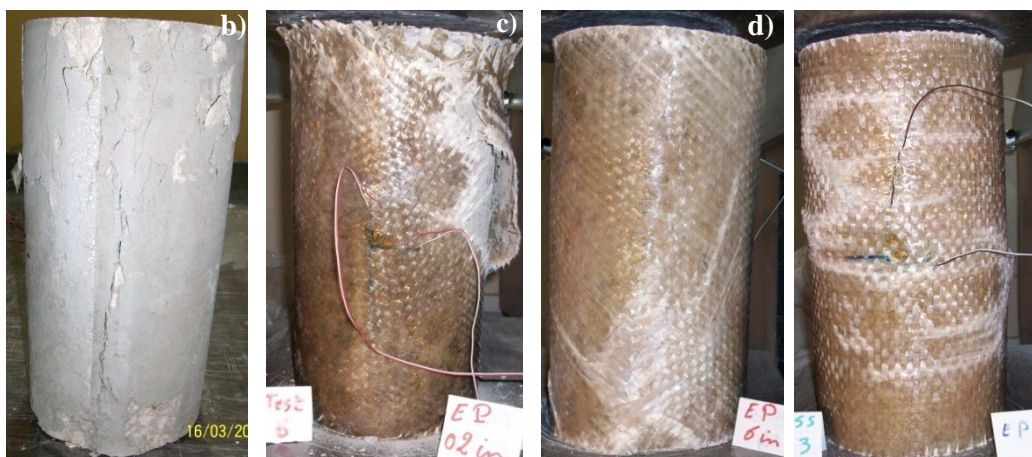
#### IV.3.3.3 Modes d'endommagement et de rupture

Les faciès de rupture du béton et celui enregistrées pour les colonnes préchargées à 30, 45 et 90% de la capacité portante du béton de contrôle, puis confinées par les empilements  $(+30/-60)_2$  et  $(0/90)_2$ , ainsi celles non préchargées sont illustrées sous forme des photos dans la figure IV.18. L'endommagement est initié par un délaminage entre les enveloppes PRFV et le béton ayant pour conséquence le changement de couleur noté sur les photos (la présence du délaminage fait que les photos deviennent plus blanches ; zones les plus endommagées). Ensuite, un développement des fissures est obtenu suivant les directions des fibres alors que la rupture totale des éprouvettes s'effectue par déchirement de l'enveloppe composite dans le sens vertical (c'est-à-dire dans le sens du chargement).

Après l'étude faite sur les colonnes préchargées et non puis renforcées par des enveloppes PRFV. En conséquence, les modes de rupture de ces colonnes se fait d'une manière similaire et l'orientation des fibres est le seul facteur qui influe sur ces dernier.



**A).** Colonnes préchargées à 30, 45 et 90% puis renforcées par le stratifié  $(+30/-60)_2$  a), b), et c) respectivement et préchargée à 45% puis confinée par  $(0/90)_2$  d).



**B).** Béton de contrôle a) et colonnes renforcées respectivement par les stratifiés  $(+30/-60)_2$ ,  $(\pm 45)_2$ , et  $(0/90)_2$  a), b), et c).

**Figure IV.18.** Modes d'endommagement et de rupture des éprouvettes.

## IV.4 Conclusions

Sur la base des résultats obtenus de l'étude portée sur l'évaluation du comportement mécanique en compression uni-axiale des colonnes en béton confinées par des enveloppes en matériaux composites (PRFC et PRFV) extérieurement collées, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

➤ 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 colonnes. Les PRFC offrent des augmentations considérables en résistance et en déformations axiale et radiale par rapport aux PRFV.

➤ La rupture des colonnes confinées par PRFC est marquée par une rupture brutale des fibres et de type ductile pour les PRFV.

➤ L'utilisation des PRFV dans le confinement des éprouvettes de béton (notamment dans le cas de l'hybride H2) offre une augmentation importante aussi bien dans la contrainte de compressions que pour les déformations radiale et axiale avec un coût très intéressant comparativement aux fibres de carbonées.

L'étude du comportement et de l'endommagement des colonnes non préchargée et préchargées aux niveaux 30, 45 et 90% de la charge portante du béton de contrôle, puis confinées par les empilements  $(0/90)_2$  et  $(+30/-60)_2$  nous conduit aux conclusions suivantes :

➤ L'étude du comportement des éprouvettes en béton non préchargé et confinées par PRFV orienté  $(0/90)_2$ ,  $(\pm 45)_2$  et  $(+30/-60)_2$  conduit à des augmentations en résistance respectivement jusqu'à 95, 96 et 71% comparativement aux celles de béton de contrôle (non renforcées). Par contre les meilleurs gains en déformations axiale et radiale sont enregistrés pour l'empilement  $(0/90)_2$  soit de 640 % et 6260% respectivement. Donc on conclure que l'orientation des fibres à un effet très important sur le comportement des éprouvettes confinées. L'étude faite prouve l'efficacité de cette technique de réparation et conduit à des augmentations des résistances et donne une bonne ténacité aux déformations dues aux charges axiales, qui résultent 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'évaluation du comportement structural des colonnes en béton préchargées aux niveaux 30, 45 et 90% puis réparées par collage de deux plis de PRFV orientés à  $(0/90)_2$  et  $(+30/-60)_2$

➤ La rupture et les modes d'endommagement des colonnes confinées dépendent fortement du type et de la nature de l'enveloppe composite.

---

## *Conclusion générale*

---



# CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail a accentué l'étude du comportement mécanique des structures renforcées par collage de matériaux composites en fibres de verre\_E «PRFV» et de carbone «PRFC». Nous nous sommes intéressés particulièrement aux cas des colonnes cylindrique courtes en béton, ces dernières sont renforcées ou réparées par confinement (recouvrement) de couches composite afin de restaurer (prolongé leur durée de vie) et d'augmenter leur capacité portante en compression uniaxiale. En générale, la technique de renforcement et de réhabilitation par collage des couches en PRF peut apporter des gains significatifs aux structures endommagées lors de leur réparation. En effet, le composite peut compenser la perte de rigidité des éprouvettes dues à la fissuration du béton en compression, augmenter la capacité portante des éprouvettes en exploitant la bonne résistance en compression du béton, et 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. D'après les résultats expérimentaux et les discussion effectuées, les principales conclusions suivantes peuvent être tirées:

- la technique des chargements répétés adopté dans cette thèse constitue une nouveauté dans le domaine de renforcement des structures par matériaux composite, que se soit pour des éprouvettes près chargé ou non avant le renforcement par recouvrement.
- l'épaisseur de l'enveloppe PRF a un effet considérable sur le comportement, la charge à la rupture, la ductilité et le mode d'endommagement des colonnes renforcées. Ainsi que l'augmentation du niveau (épaisseur) de confinement a peu d'effet sur la pente de la portion initiale (zone élastique) des courbes contrainte/déformations, mais a un effet considérable sur la pente de la seconde portion (zone plastique).
- en examinant le chargement répété, toutes les éprouvettes augmentent leur rigidité après le premier chargement, indépendamment du type et du nombre de couches utilisées. Cependant, la charge et le temps à la rupture diminues avec l'augmentation du nombre de chargement, alors qu'on observe un effet de renforcement, c'est-à-dire que par exemple dans les 2<sup>ème</sup> tests la charge maximale et plus importante que celle du béton de contrôle. Il s'avère aussi que l'augmentation du nombre de couches n'est pas nécessairement favorable à la résistance des éprouvettes pendant le chargement répété.



➤ les éprouvettes en béton de contrôle (non renforcées) se rompent dès le premier chargement, par contre celles renforcées par des couches PRF peut supporter de 5 à 7 chargements répétitifs en fonction du type de renfort utilisé.

➤ l'analyse de l'index de performance  $C_I$  prouve que le confinement par deux couches de tissu T1 donne un excellent index d'efficacité avec un coût optimal, indiquant donc que, pour les éprouvettes confinées en compression, la fibre de verre utilisé dans ce travail est extrêmement concurrentielle à la fibre de carbone utilisé précédemment dans d'autres travaux. Ces constatations démontrent que ce système de renforcement est très efficace, tant au niveau de la performance que de la rapidité de mise en œuvre. D'un point de vue économique, il ne fait aucun doute qu'il sera concurrentiel face aux méthodes traditionnelles de renforcement qui demandent des interventions beaucoup plus longues et complexes.

➤ les colonnes renforcées par des plis en PRFC permettent une augmentation appréciable de la contrainte à la rupture en compression comparativement aux celles renforcées par des plis en PRFV. Par contre, la rupture des éprouvettes confinées par PRFC est marquée par une rupture brutale des fibres de carbone, et elle est du type ductile pour celles confinées par PRFV.

➤ une amélioration nette de la charge ultime est enregistrée pour toutes les architectures et les configurations du confinement employé. Particulièrement dans le cas de l'hybride H2 qui permet une amélioration significative en résistance et en déformations axiale et radiale avec un coût très intéressant (moins chère).

➤ l'étude du comportement des éprouvettes en béton non préchargé et confinées par collage de deux plis de PRFV ayant les orientations (0/90), ( $\pm 45$ ), et (+30/-60) conduit à des augmentations de la capacité portante jusqu'à 103% pour l'empilement (0/90)<sub>2</sub>, 95% pour l'empilement ( $\pm 45$ )<sub>2</sub>, et jusqu'à 71% pour l'empilement (+30/-60)<sub>2</sub> comparativement aux éprouvettes en béton de contrôle (non renforcées). Cependant, les gains significatifs en résistance de l'ordre de 71, 96 et 95% sont enregistré pour les trois empilements utilisés (0/90), ( $\pm 45$ ), et (+30/-60) respectivement. Par contre, les meilleurs gains en déformations axiale et radiale sont enregistrés pour l'empilement (0/90)<sub>2</sub>. On conclusion, l'orientation des fibres à un effet très important sur le comportement des éprouvettes confinées.

➤ les éprouvettes en béton pré-chargées aux niveaux 30, 45 et 90 % puis réparées par collage de deux couches de tissu T1 en PRFV orientés à (0/90) et (+30/-60) montre l'efficacité de cette technique de réparation et conduit à des gains notables en résistance et en déformations axiale et radiale.



---

## *Références bibliographique*

---



# Références bibliographiques

---

- [AIP-02] : Comité technique AIPCR des Ponts et autres Ouvrages routiers (C11) (2002), “ Utilisation de matériaux innovants pour la construction et la réparation des ponts”, 11.09.B.
- [ACI] : ACI 440.XR “Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures”, ACI Committee 440.
- [ASTM D3171] : Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials
- [ASTM C39/C39M- 9a] : Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- [BAK-02] : Bakis, C. E Bank, L. C. F. ASCE, Brown, V. L. M. ASCE, Cosenza, E. Davalos, J. F. A.M. ASCE, Lesko; J. J. Machida, A. Rizkalla, S. H. F. ASCE, and Triantafillou, T. C. M. ASCE, (2002), “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction: State of the Art Review ”, *Journal of Composite Construction*, 6 (2), 73-87.
- [BAC-05] : BACKELANDT, A. (2005) “Etude des mecanismes d’adesion a l’interface resine/ciment en vue de la reparation des ouverages de genie civil”, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquees de Lyon.
- [BER- 10] : Bertholot, J. M. (2010) “Mécanique des matériaux et structures composites ”, Institut superieur des materiaux et mecaniques avances. Le Mans \_ France
- [BIS-07] : BISBY, L. A. (2007) “ Introduction à l’utilisation des composites de PRF en construction”; université de Queen’s ; Canada.
- [BOU-08] : BOUCHELAGHEM. H, (2008), “Etude du comportement mécanique des matériaux composites : Application au renforcement des colonnes en BA”, mémoire de magister, université 08 Mai 1945 de Guelma.
- [BOU-11a] : BOUCHELAGHEM, H., BEZAZI, A., SCARPA, F., (2011), “Strength of concrete columns externally wrapped with composites under compressive static loading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(19), pp. 1671–1688.
- [BOU-11b] : BOUCHELAGHEM, H., BEZAZI, A., SCARPA, F., (2011), “Compressive behaviour of concrete cylindrical FRP-confined columns subjected to a new sequential loading technique”, *Journal of composite: parte B*, 42, pp 1987-1993.

- [BEN-09]** : BENZAID, R., CHIKH, N-E., MESBAH, H., (2009), “study of the compressive behaviour of short concrete columns confined by fiber reinforced composite”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34, N°1B, pp.15-26.
- [CRO-06]** : CROSTON, T., (2006) “étude expérimentale de comportement d’une poutre”, These de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Bordeaux.
- [CRO-07]** : CROTEAU, P. (2007), “Documents généraux et Lexique ; Définition des termes : défauts des structures en béton”, commission d’enquête sur le viaduc de la Concorde, Québec.
- [COL-08]** : COLOMB, F., TOBBI, E., P., FERRIER, et HAMELIN, H., (2008) “Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials”, *Journal of Composite Structures*, Vol (82), N°4, pp 475-487.
- [GRE-06]** : GREEN, M.F., BISBY, L.A., FAM, A.Z., KODUR, V.K.R. (2006) “FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, p. 928-937.
- [GER-03]** : GEROMEY, S., (2003) “Evaluation des paramètres d’obtention de la qualité des bétons projetés utilisés dans des soutènements provisoires, des revêtements définitifs et des renforcements d’ouvrages”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [GIR-96]** : GIRODET, C. (1996) “Endommagement des mortiers sous sollicitations thermomécaniques: Influence des caractéristiques des matériaux sur la résistance au gel interne des bétons”. These de Doctorat, Université de Lyon 1, INSA de Lyon.
- [GLO-06]** : Glossaires des matériaux composites (2006), “Centre d’animation régional en matériaux avancés” «C.A.R.M.A»
- [GRA-01]** : GRANATA, P., J., PARVIN, A., (2001), “An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connection” *Journal of Composite Structures*, 53, pp 163-171.
- [HAR-98]** : 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. 411-425.
- [HYV-09]** : HYVERT, N., (2009), “Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton”, Thèse de doctorat, Université Paul SABATIER - TOULOUSE III.

- [HAD-07]** : HADI, M. N. S., (2007), “Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading”, *Journal of Composite Structures*, 77, 92-96.
- [KNE-07]** : KNEVELER, M. (2007) “ Mise en œuvre des matériaux composites ”, Institut Catholique d’Arts et Métiers (ICAM).
- [KAR-09]** : KARBHARI, V. M., GHOSH, K. (2009), “Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges” *Journal of Composite: Part A*. **40**, pp 1353–1363.
- [KAR-04]** : Karbhari, V. M. (2004),”Fiber reinforced composite bridge systems\_Transition from the laboratory to the field” *Journal of Composite Structures* **66**, 5-16.
- [LAM-03]** : LAM, L., TENG, J.G., (2003), “Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete”, *Journal of Construction Building Materials*, **17**, pp 471-489.
- [LI-06]** : LI, G. (2006) “Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylinders”, *Journal of composite structures*, Volume 74, pp 475–483.
- [LAC-08]** : LACLAU, B. (2008), “Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites”. REFHORM/ Fonds Commun Aquitaine-Euskadi
- [MIR-90]** : MIRMIRAN, A. SHAHAWY, M. (1990), “Behaviour of concrete columns confined by fibre composites”, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 123(5), 583-590.
- [MIR-97]** : MIRMIRAN, A., and SHAHAWY, M., (1997),” Dilation characteristics of confined concrete”; *Journal Mechanics of cohesive-frictional materials*, vol. **2**, 237-249.
- [MAT-05]** : 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**, pp.258-267.
- [RHA-02]** : RHAZI, J., LAURENS, S., BALAYSSAC, J. P., BALLIVY, G., (2002), “Evaluation de l’état de santé des structures de béton par les technologies accoustiques et électromagnétiques”; 4<sup>ème</sup> Conférence spécialisée en génie des structures de la société canadienne de génie civil. Montréal, Québec, Canada
- [RAS-08]** : RASHADUL Islam, MD. (2008) “Inventory of FRP strengthening methods in masonry structures”, Master’s thesis, Advanced Masters in Structural Analysis of Historical Construction, Technical University of Catalonia, Barcelona.
- [SAA-06]** : SAAVEDRA, A., (2006) “contrôle de forme de passerelle composite”, Thèse de doctorat, institut doctoral Paris Tech.

- [SAA-94]** : 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.
- [SAM-98]** : SAMAAN, M. MIRMIRAM, A. SHAHAWY, M. (1998) “Model of concrete confined by fibre composites”, *Journal of Structural Engineering ASCE*; 124 (9), 1025-1031.
- [SHA-00]** : SHAHAWY, M. Mirmiran, A. Beitelman, T. (2000), “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns”, *Journal of Composite Part B*, 31, N°.6, pp.471-480.
- [SHE-02]** : SHEHATA, L A. E. M., CARNEIRO, L. A. V., and SHEHATA, L. C. D., (2002), “Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets”, *Journal of Materials and Structures*, Vol. 35, pp 50-58.
- [THA-11]** : B. THAUVIN, M. MENGUY, N. ROUXEL, S. L’HERMITE, J. BILLON, S. LEFEBVRE, B. BERENGER, (2011) “Alteration du béton en site maritime”, (CETMEF) centre d’études techniques maritimes et fluviales.
- [TAM-08]** : TAMUZS, V., VALDMANIS, V., TEPFERS, R., GYLLTOFT, K., (2008), “Stability analysis of CFRP-wrapped concrete columns strengthened with external longitudinal CFRP sheets”, *Journal of Mechanics of Composite Materials*, vol. 44 (3), 199-208.
- [TAM-07]** : TAMUZS, V., VALDMANIS, V., GYLLTOFT, K., and TEPFERS, R., (2007). ‘Behavior of CFRP-confined concrete cylinders with a compressive steel reinforcement’. *Journal of Mechanics of Composite Materials*, Vol. 43, No. 3.
- [TEC-05]** : TECHNO-BETON, Bulltin Technique n : 4, “La fissuration non-structurale du béton” publié par l’Association béton Québec.
- [VAN-06]** : P. VANNUCCI, (2006), ‘Méthodes Avancées en Optimisation des Structures’ UVSQ – LISV Master DSME, université de Versailles.
- [ZHE-08]** : ZHELYAZOV, T., (2008), “Renforcement des structures en béton arme par collage de matériaux composites”, Thèse de doctorat Université de Reims Champagne Ardenne.
- [ZHA-00]**: ZHANG, S., YE, L., MAI, Y.W., (2000), “A Study on Polymer Composite Strengthening Systems for Concrete Columns”, *Journal of Applied Composite Materials* 7, pp. 125–138.
- [http://www.lrmh.fr/lrmh/w\_publications/beton/gel\_deg.htm- Les cycles de gel-dégel et gélivité]** : consulté le 15/03/2012.

[<http://www.guichetdusavoir.org/viewtopic.php?f=2&t=47163>, **Attaques chimiques du béton**] : consulté le 15/03/2012.

[[http://www.lrmh.fr/lrmh/w\\_publications/beton/alkali.htm](http://www.lrmh.fr/lrmh/w_publications/beton/alkali.htm), **Le vieillissement du béton\_alkali reaction**] : consulté le 15/03/2012.

[[www.ryounes.net/cours/MC\\_I.pdf](http://www.ryounes.net/cours/MC_I.pdf)] : consulté le 01/03/2012.

[[http://mms2.ensmp.fr/mms\\_paris/plaque/polycop/f\\_plaque\\_poly.pdf](http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/plaque/polycop/f_plaque_poly.pdf)] : Date de la dernière consultation le 10/09/2012.

[[http://julien.caulier.free.fr/images/doc\\_tech/FdV\\_tech.pdf-12](http://julien.caulier.free.fr/images/doc_tech/FdV_tech.pdf-12)] : consulté le 01/03/2012

[<http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-la-fibre-de-verre---presentation-et-applications-3166.htm>] : consulté le 20/11/2012.

[<http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>] : consulté le 10/09/2012.

[[http://www.aquitaine-industrie.com/iso\\_album/01\\_materiaux\\_composites.pdf](http://www.aquitaine-industrie.com/iso_album/01_materiaux_composites.pdf)] : consulté le 25/08/2012.

[<http://cee.usc.edu/assets/013/60977.pdf>] : consulté le 25/08/2012.

[<http://old.fibrolux.com/fr/main/profiles-prv/pultrusion/>] : Consulté le 01 Mars 2012

[**CRO-07**] : Crosteau ; P, (2007), “Définition des termes : défauts des structures en béton”, Documents généraux et Lexique, commission d’enquête sur le viaduc de la Concorde Québec.

---

# *Annexe 1*

---





## SIKA WRAP® HEX 230 C SIKADUR® 330

Système composite de renforcement de structures,  
à base de tissu de fibres de carbone et de résine époxy.

Enquête Technique SOCOTEC, CCT 37.

### Présentation

Le SIKA WRAP HEX 230 C est un tissu de fibres de carbone.  
Couleur : noir.  
Le SIKADUR 330 est une résine époxy d'imprégnation sans solvant, à 2 composants.  
Couleur : gris.

### Caractères généraux

- Haute résistance en traction.
- Utilisable pour le renforcement vis-à-vis des efforts de flexion, de traction et de cisaillement.
- Facile d'application sur des surfaces planes ou courbes (poutres, poteaux, dalles, murs, voûtes, dômes, etc).
- Insensible à la corrosion.
- Faible épaisseur du composite.

### Domaines d'application

Le tissu SIKA WRAP HEX 230 C s'utilise avec la résine époxydique SIKADUR 330 pour la réparation et le renforcement des structures en béton, bois, maçonnerie, soumises à des sollicitations de flexion, de cisaillement, principalement dans les cas suivants :

- augmentation de la capacité portante de la structure,
- renforcement des structures vis-à-vis de l'effort tranchant (complète le procédé SIKA CARBODUR, CCT 37),
- mesure préventive anti-sismique,
- réparation de dommages,
- renfort et fretage de poteaux,
- changement de destination des locaux, réaménagement.

### Caractéristiques

#### physiques et mécaniques

#### Tissu SIKA WRAP HEX 230 C

- Fibres de carbone à haute résistance.
- Orientation unidirectionnelle des fibres : 97 % de fils de chaîne pour assurer la résistance, 3 % de fils de trame pour assurer la stabilité dimensionnelle.
- Masse surfacique : 225 g/m<sup>2</sup>.
- Epaisseur : 0,13 mm.
- Résistance en traction des fibres : 3 500 MPa.
- Module d'élasticité des fibres en traction : 230 000 MPa.
- Allongement à la rupture : 1,5 %.



### Résine SIKADUR 330

- Aspect : composant A blanc - composant B gris.
- Consistance : pâteuse.
- Rapport composant A / composant B : 4/1 en poids.
- Densité : 1,3 environ à 20°C.
- Durée Pratique d'Utilisation (D.P.U.) :

15°C	20°C	35°C
2 heures	35 minutes	25 minutes

- Adhérence sur béton sablé (EN 24624) : supérieure à la cohésion du support (dès 24 h).
- Résistance à la compression : > 55 MPa à 2 jours et 20°C.
- Résistance à la traction : > 30 MPa à 2 jours et 20°C.
- Module d'élasticité en flexion : E = 3800 MPa à 7 jours et 23°C.
- Dureté shore D : > 70 à 2 jours et à 20°C

### Composite SIKa WRAP HEX 230 C / SIKADUR 330

Valeurs caractéristiques mesurées après 7 jours à 23°C :

- résistance en traction : 750 MPa,
- module d'élasticité en traction : 55 000 MPa,
- allongement à la rupture : 1,15 %.

#### Conditionnement

##### Tissu

Rouleaux de longueur 50 m et de largeur 300 mm ou 600 mm.

##### Résine

Kit prédosé (A+B) de 5 kg.

##### Kit SIKa CRACKFIX

- Tissu : 1 rouleau de 3,5 m, largeur 305 mm,
- Résine : 1 kit prédosé (A+B) de 1 kg.

#### Stockage - Conservation

##### Tissu

Stocker à l'abri de l'humidité et de la poussière.

##### Résine

La durée de conservation est de 18 mois en emballage intact non ouvert, stocké à une température comprise entre 5°C et 25°C.

#### Consommation

##### Tissu

Selon le dimensionnement réalisé lors de l'étude par le Bureau d'Etudes expérimenté en calcul de renforcement de structures.

Nota : il est possible de prévoir jusqu'à 3 couches de tissus superposées.

##### Résine

- En tant que couche d'apprêt : 0,7 à 1,2 kg/m<sup>2</sup> suivant la rugosité et la porosité du support béton.
- En tant que couche d'adhérence pour une couche de tissu supplémentaire : 0,5 kg/m<sup>2</sup>.
- En tant que couche de finition sablée avant recouvrement par un mortier à base de ciment : 0,5 kg/m<sup>2</sup>.

#### Agréments, essais officiels

Enquête Technique SOCOTEC, CCT 37.

#### Mode d'emploi

##### Conditions d'utilisation

- Lors de l'application, la température du produit, du support et de l'ambiance doit être comprise entre + 10°C et + 35°C et l'hygrométrie doit être inférieure à 80 %. Veiller à ce qu'il n'y ait pas de risque de condensation sur le support (se reporter au diagramme de Mollier).
- Le système SIKa WRAP doit être protégé d'une exposition directe au rayonnement solaire.
- La température maximale admissible en service est de 50°C.

<b>Matériel de mise en œuvre</b>	<p><b>Tissu</b> Ciseaux spéciaux ou cutter en bon état de fonctionnement (un outil émoussé ou usagé peut endommager ou effiloche le tissu lors de la découpe); brosse ou rouleau d'imprégnation; rouleau de marouflage.</p> <p><b>Résine</b> Brosse, rouleau.</p>
<b>Préparation du support</b>	<p>Le support doit être propre, sain, exempt de laitance, de graisse, d'huile, de produit de cure, de particules non ou peu adhérentes, de tout revêtement de type peinture, etc.</p> <p>Le support doit être sec (humidité <math>\leq 4\%</math>).</p> <p>Le support béton doit être âgé d'au moins 28 jours et avoir une cohésion superficielle, après préparation, d'au moins 1,5 MPa.</p> <p>Balèbres de coffrage et saillies ne doivent pas excéder 0,5 mm. Si nécessaire, ragréer à l'aide du SIKADUR 41 F (voir notice technique n° 6.11).</p> <p>Les angles saillants de la structure doivent être arrondis, jusqu'à obtenir un rayon d'au moins 10 mm, par exemple par ponçage au disque diamanté.</p>
<b>Préparation du tissu SIKAWRAP HEX 230 C</b>	<p>Découper le tissu aux dimensions appropriées suivant les indications du Bureau d'Etudes en veillant à ne pas endommager l'extrémité découpée; veiller à ne pas plier le tissu et à toujours le conserver en position enroulée.</p>
<b>Préparation de la résine SIKADUR 330</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.</li> <li>■ Verser la totalité du composant B dans le composant A.</li> <li>■ Mélanger avec un agitateur électrique muni d'une hélice pendant environ 3 minutes jusqu'à obtenir un mélange uniforme de couleur grise.</li> <li>■ Transvaser l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ 1 minute, à faible vitesse afin de limiter l'entraînement d'air dans la résine.</li> <li>■ La durée de vie en pot débute dès le mélange des deux composants. Elle est plus longue à basses températures et se raccourcit à hautes températures.</li> </ul> <p>Pour augmenter la durée d'utilisation par température élevée, il est recommandé de diviser la colle mélangée en petites portions. Une autre méthode efficace consiste à refroidir les 2 composants avant le mélange.</p>
<b>Mise en œuvre</b>	<p><b>Etape A</b> Appliquer à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse le SIKADUR 330 sur le support.</p> <p><b>Etape B</b> Conformément au calepinage et au dimensionnement réalisés par le Bureau d'Etudes, placer le tissu découpé sur la couche d'apprêt, en veillant à la correcte orientation des fibres. Noyer soigneusement le tissu dans la résine avec le rouleau de marouflage. Répartir la résine au rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène.</p> <p><b>Etape C</b> En cas d'application de couches supplémentaires de tissu (au maximum 2), appliquer à chaque fois une couche de résine à raison d'environ 0,5 kg/m<sup>2</sup>. A 20°C ceci doit être réalisé dans les 60 minutes suivant la pose de la couche précédente de tissu. Si tel n'est pas le cas, respecter alors un temps d'attente d'au moins 12 heures avant de procéder à l'application d'une nouvelle couche de résine. Nota : en cas de températures basses et/ou d'humidité relative élevée, la surface du composite peut être devenue poisseuse. Avant de poursuivre, il faut enlever ce film poisseux en lavant la surface avec une éponge saturée d'eau puis en la rinçant. Laisser sécher. Reprendre ensuite l'exécution à l'étape B.</p> <p><b>Etape D (éventuelle)</b> Pour augmenter la rugosité nécessaire à l'adhérence d'un revêtement de finition à base de ciment, il est possible d'appliquer une couche supplémentaire de résine d'environ 0,5 kg/m<sup>2</sup>, puis de la saupoudrer à l'état frais de sable de quartz propre et sec.</p>

## Renseignements importants

Le recouvrement des lés de tissu, dans le sens longitudinal des fibres, doit être d'au moins 100 mm.  
Plusieurs bandes de tissu peuvent être juxtaposées sans recouvrement.  
Les restes éventuels de SIKADUR 330 mélangé ne doivent être laissés à durcir que dans des récipients métalliques et en quantités inférieures à 1 kg, en raison des risques liés à la montée en température.

## Nettoyage des outils

Le nettoyage du matériel s'effectue avec le NETTOYANT SIKADUR (voir notice technique n° 6.90) avant polymérisation de la résine.  
Le SIKADUR 330 durci s'enlève mécaniquement.

## Précautions d'emploi

Chez certaines personnes, les résines époxy et les durcisseurs peuvent engendrer une irritation de la peau et des muqueuses.  
Le NETTOYANT SIKADUR est un produit inflammable contenant des solvants aromatiques. Il doit être utilisé en extérieur.  
Consulter les fiches de données de sécurité accessibles par Minitel 3613, code SIKASECUR ou sur internet <http://www.sika.fr> (services gratuits).

## Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel  
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.  
«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger / ALGERIE

Tel. : 213 (0) 21 50 21 84 [www.sika.com](http://www.sika.com)  
Fax : 213 (0) 21 50 22 08

---

## *Annexe 2*

---



## Sikadur-330

### Résine d'imprégnation pour tissu de renforcement

Présentation	Résine époxy sans solvant à 2 composants.
Domaines d'application	Résine d'imprégnation pour les tissus « secs » de renforcement de la gamme SikaWrap. Primaire d'imprégnation des supports rugueux pour le renforcement avec les tissus SikaWrap-100G, SikaWrap-103C.
Caractères généraux	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Thixotrope (facile à appliquer notamment en vertical, en sous-face)</li> <li>■ Facile à appliquer au rouleau, à la brosse, à la truelle</li> <li>■ Hautes caractéristiques mécaniques</li> <li>■ Sans solvant</li> </ul>
Agréments, essais officiels	CCT 37 + Enquête technique SOCOTEC (France) Institut de recherche pour les Routes et Ouvrages d'art en Pologne : IBDiM N° AT/99-04-0537
Caractéristiques	
Coloris	Comp. A : blanc Comp. B : gris
Conditionnement	Kit de 5 kg
Stockage	Entre 5 et 25°C
Conservation	24 mois à partir de la date de production en emballage intact et non entamé.
Données techniques	
Densité du mélange	1,3 environ
Consistance du mélange	Pâteuse
Température de transition vitreuse	« Heat distortion temperature » (selon norme ASTM D648) 36°C après 7 jours à 10°C 47°C après 7 jours à 23°C 53°C après 7 jours à 35°C 43°C après 7 jours à 10°C + 7 jours à 23°C
Résistance en traction	30 MPa après 7 jours à 23°C (selon norme DIN 53455)
Allongement à la rupture	0,9 % après 7 jours à 23°C (DIN 53455)
Module d'élasticité	Module d'élasticité en traction (DIN 53455) : 4 500 MPa après 7 jours à 23°C Module d'élasticité en flexion (ISO 178) : 3 800 MPa après 7 jours à 23°C



## Conditions d'application

Proportions du mélange A : B = 4 : 1 en poids

**Consommation** 0,5 à 1,0 kg/m<sup>2</sup> suivant la rugosité du support et le type de tissu à imprégner

**Préparation du support** Préparer le support par sablage ou ponçage. Il doit être propre, sain, sec, exempt de laitance, de graisse, d'huile, de produit de cure, d'anciens revêtements, de particules non ou peu adhérentes, ...  
La surface doit être plane (tolérance de 15 mm sur une longueur de 1 mètre).  
Les balèvres de coffrages et saillies ne doivent pas excéder 0,5 mm. Si nécessaire, ragréer à l'aide de Sikadur-41F.  
Les fissures d'une largeur supérieure à 0,25 mm doivent être injectées à l'aide de Sikadur-52, suivant les méthodes habituelles d'injection.  
Après préparation, le béton, destiné à être renforcé, doit avoir une cohésion superficielle d'au moins 1 MPa (suivant le type de tissu SikaWrap utilisé).  
Les angles saillants de la structure doivent être arrondis jusqu'à obtenir un rayon d'au moins 10 mm. Ceci peut être fait en utilisant une ponceuse à disque diamanté.

## Mise en oeuvre

**Conditions d'utilisation** Température (support et ambiance) lors de l'application : +10°C à +35°C  
Température en service : -40°C à +50°C  
Humidité du support : maximum 4 %  
La température ambiante lors de l'application doit se situer 3 degrés au-dessus du point de rosée.  
La résine Sikadur-330 doit être protégée de la pluie pendant au moins les 12 premières heures suivant l'application.

**Préparation du mélange** Verser le composant B dans le composant A et mélanger pendant 3 minutes, à l'aide d'un agitateur électrique muni d'une hélice à faible vitesse de rotation (500 tours par minute au maximum) afin d'éviter l'entraînement d'air, jusqu'à l'obtention de la consistance homogène.

**Nettoyage des outils** Nettoyer le matériel à l'aide du Nettoyant Sikadur avant polymérisation de la résine.  
Après durcissement, la résine peut être enlevée mécaniquement.

**Mise en oeuvre**

- découper le tissu aux dimensions prévues par le Bureau d'Etudes
- appliquer le Sikadur-330 sur le support préalablement préparé, en utilisant une brosse, un rouleau ou une truelle.
- Sans attendre, placer et positionner le tissu conformément aux indications fournies par le Bureau d'Etudes.
- maroufler le tissu sur la couche de résine à l'aide du rouleau marouffleur afin que la résine traverse et imprègne le tissu  
Cette opération se réalise dans le sens des fibres et de façon à évacuer l'air éventuellement emprisonné.  
Lisser la surface à l'aide d'une large brosse pour homogénéiser la surface du composite ainsi créé.
- application éventuelle d'une couche supplémentaire de tissu : appliquer d'abord une couche de résine Sikadur-330 dans un délai de 60 minutes à 20°C après l'application de la couche précédente. Si ce n'est pas possible, attendre au moins 12 heures avant l'application. Continuer comme indiqué à l'étape c).
- application éventuelle d'un revêtement à base de ciment comme finition : dans ce cas, appliquer une couche de résine à raison de 0,5 kg/m<sup>2</sup>, puis saupoudrer du sable de quartz pour renforcer l'adhérence du revêtement hydraulique.



## Remarques générales :

- A basse température ou à humidité relative élevée, la surface de la résine Sikadur-330 peut rester légèrement collante même après plusieurs heures de séchage. Pour appliquer une couche supplémentaire de tissu, il faut avant d'appliquer la couche de résine nettoyer la surface encore poisseuse à l'aide d'une éponge imbibée d'eau puis sécher la surface.
- Le recouvrement du tissu SikaWrap dans le sens des fibres doit être d'au moins 100 mm.
- La superposition des couches de tissus unidirectionnels posés bord à bord n'est pas nécessaire.
- La résine doit être protégée de la pluie pendant au moins 12 heures après l'application.
- En service, le composite doit être protégé d'une exposition directe au rayonnement solaire, par exemple en recouvrant le composite de SikaGard 550W Elastic.

## Durée de Vie en Pot

- 90 min à 10°C
- 30 min à 35°C

La durée de vie en pot (pot life) démarre dès le malaxage des 2 composants (résine et durcisseur). A basse température il sera plus long qu'à haute température. Plus la quantité de mélange est importante, plus cette durée est courte. Afin d'augmenter cette durée lors de haute température, il est conseillé de répartir le mélange dans plusieurs récipients ou de refroidir chaque composant avant d'effectuer le mélange.

## Temps ouvert

30 min à 35°C

## Précautions d'emploi

Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Minitel 3613, code SIKASECUR ou sur Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr)

## Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger / ALGERIE

Tel. : 213 (0) 21 50 21 84 [www.sika.com](http://www.sika.com)  
Fax : 213 (0) 21 50 22 08

# Travaux effectués dans le cadre de cette thèse

---

## Publication internationale

**BOUCHELAGHEM, H., BEZAZI, A., SCARPA, F.,** (2011), “Strength of concrete columns externally wrapped with composites under compressive static loading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(19), pp. 1671–1688.

**BOUCHELAGHEM, H., BEZAZI, A., SCARPA, F.,** (2011), “Compressive behaviour of concrete cylindrical FRP-confined columns subjected to a new sequential loading technique”, *Journal of composite: parte B*, 42, pp 1987-1993.

## Conférences

**Hafida Bouchelaghem,** Abderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa, Brahim BELFARHI. « Comportement des éprouvettes en béton préchargées ou non puis renforcées par recouvrement en matériau composite », *Congrès Algérien de Mécanique, 14 – 17 novembre 2011 Guelma - Algérie*

**Hafida Bouchelaghem,** Abderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa. « Comportement des Cylindres en béton renforcés par collage extérieur des FRP », *1<sup>er</sup> Congrès International – GCDD2011-17-19 octobre 2011 Tébessa - Algérie.*

**BOUCHELAGHEM. H., BEZAZI. A., SCARPA. F.** Etude expérimentale des colonnes cylindriques en béton renforcées par FRP et sollicitées en compression uniaxiale. *1<sup>er</sup> Congrès International sur la Mécanique Avancée , 23 – 25 Mai 2010 Annaba – Algérie.*