

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA  
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL**  
**OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL**

**THEME**

**COMPORTEMENT DES CYLINDRES EN BETON CONFINES  
TOTALEMENT OU PARTIELLEMENT**

**Présenté par :**

CHALAL Salah  
DJERROUD Nabil

**Devant le jury composé de :**

Dr. KENNOUCHE. S	UAMOB / GENIE CIVIL	PRESIDENT
Pr. AIT TAHAR. K	UAMOB / GENIE CIVIL	PROMOTEUR
Dr. BOUAMRA. Y	UAMOB / GENIE CIVIL	CO- PROMOTEUR
Dr. HAMI. B	UAMOB / GENIE CIVIL	EXAMINATEUR
Mr. ABDELHAMID. A	UAMOB / GENIE CIVIL	EXAMINATEUR

**Soutenu le 18 / 10 / 2018**

**-Année Universitaire 2017-2018 -**

## **REMERCIEMENTS**

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur AIT TAHAR.K notre encadreur, professeur à l'UAMOB, de nous avoir proposé ce thème et pour son soutien, son aide et sa patience pour l'accomplissement de ce travail. Nous avons beaucoup bénéficié de son expérience et de ses compétences. Nous lui en sommes profondément reconnaissants.*

*Nous souhaitons également remercier chaleureusement Monsieur BOUAMRA.Y, notre Co-encadreur docteur au département de génie civil, et ainsi que Monsieur MOUSSAOUI.B pour la confiance, l'aide et l'encouragement qu'ils nous ont procuré.*

*Nous tenons également à remercier l'entreprise Sarl YHS, son personnel et ainsi que son gérant, CHALAL Youcef de nous avoir ouvert ses portes pour la formulation du béton et la confection de nos éprouvettes.*

*Nous remercions aussi chaleureusement Mr.MERZOUK Mourad pour son soutien et son aide indéfectible.*

*Nous tenons également à remercier tout le personnel du laboratoire de génie civil pour leur aide et leur patience pendant la réalisation de nos expériences.*

*Nous remercions très vivement tous les membres du jury qui nous en fait l'honneur de participer à l'examen de notre travail, nous leur exprimons notre profonde gratitude.*

*Nos derniers remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.*

## **DEDICACES**

*Nous tenons en premier lieu dédier*

*Ce modeste travail à nos chers parents, sans leur  
soutien et amour, ne nous seront jamais arrivé au point  
où nous en sommes aujourd'hui*

*La moindre de nos réussites et le fruit de leurs  
sacrifices*

*A nos frères et sœurs*

*Aux familles CHALAL et DJERROUD*

*A tous nos amis*

## RESUME

L'endommagement et le développement de la fissuration au cours de la durée de vie des éléments en béton entraînent des pertes de rigidité et de résistance. Les techniques de renforcement et de réhabilitation par des matériaux composites peuvent compenser et restituer les performances mécaniques de résistance à un niveau acceptable permettant de prolonger la durée de service de ces éléments. Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme ce qui conduit finalement à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement par l'enveloppe composite, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé 'confinement du béton'. L'étude entreprise dans ce travail constitue une contribution à l'étude de l'influence de nombres de couches de l'enveloppe composite sur le degré de confinement, dans le but d'optimiser le nombre de couches nécessaire pour réaliser un bon confinement en toute sécurité et économie.

Ce travail est totalement dédié aux investigations expérimentales du comportement des cylindres en béton confinés par plusieurs couches de tissus en fibres de verre FRP, de déterminer ainsi l'évolution du degré de confinement en fonction du nombre de couches de l'enveloppe composite et de mettre en évidence l'influence de renforcement d'une partie du cylindre de béton sur le comportement global de l'élément, en termes de résistance et surtout le mode d'endommagement et de rupture.

Les différents résultats permettent de mener une analyse globale concernant les gains de résistance et de déformation et d'optimiser le nombre et la position des couches de tissus de fibres de verre FRP. Si l'augmentation significative en ductilité et en résistance est directement reliée à l'utilisation d'enveloppe de composites, le degré de confinement par contre varie avec le nombre de couches d'une manière non linéaire. Enfin, le renforcement d'une partie de la colonne peut diminuer la résistance globale de l'élément et surtout accélérer l'endommagement et la rupture dans les régions de la rotule plastique, qui se trouve aux extrémités des spécimens cylindriques.

**Mots clés :** béton, composite, confinement, expérimental, endommagement et rupture.

## ABSTRACT

Damage and the development of cracking during the service life of the concrete elements lead to loss of rigidity and resistance. Reinforcement techniques and rehabilitation by composite materials can compensate and restore the mechanical resistance performance to an acceptable level to extend the service life of these elements. When the concrete is subjected to axial compression, it deforms which ultimately leads to the rupture of the concrete. When the concrete is held laterally by the composite envelope, the strength of the concrete and its ductility will be increased. This phenomenon is commonly referred to as 'concrete confinement'. The study undertaken in this work is a contribution to the study of the influence of number of layers of the composite envelope on the degree of confinement, with the aim of optimizing the number of layers necessary to achieve good confinement with all security and economy.

This work is totally dedicated to the experimental investigations of the behavior of concrete cylinders confined by several FRP fiber glass fabric layers, thus to determine the evolution of the degree of confinement as a function of the number of layers of the composite envelope and to put highlighting the reinforcing influence of a part of the concrete cylinder on the overall behavior of the element, in terms of strength and especially the mode of damage and rupture.

The different results make it possible to carry out a global analysis concerning the strength and deformation gains and to optimize the number of fiber glass fabric layers FRP. While the significant increase in ductility and strength is directly related to the use of composite shells, the degree of confinement varies with the number of layers in a non-linear manner. Finally, the reinforcement of a part of the column can decrease the overall strength of the element and especially accelerate the damage and the rupture in the regions of the plastic ball, which is at the ends of the cylindrical specimens

**Keywords:** concrete, composite, confinement, experimental, damage and rupture

## ملخص

الأضرار وتطور التشقق خلال فترة خدمة عناصر الخرسانة تؤدي إلى فقدان الصلابة والمقاومة. يمكن لتقنيات التعزيز وإعادة التأهيل بواسطة المواد المركبة تعويض واستعادة أداء المقاومة الميكانيكية إلى مستوى مقبول لتمديد فترة خدمة هذه العناصر. عندما تتعرض الخرسانة للضغط المحوري ، فإنها تشوه مما يؤدي في النهاية إلى كسر الخرسانة. عندما يتم تثبيت الخرسانة بشكل جانبي من خلال الغلاف المركب ، سيتم زيادة قوة الخرسانة ومطانتها. هذه الظاهرة تسمى "الاحتواء" الخرسانة الدراسة التي أجريت في هذا العمل هي مساهمة لدراسة تأثير عدد طبقات الغلاف مركب على درجة الاحتواء، من أجل تحسين عدد من الطبقات المطلوبة لتحقيق الاحتواء جيد مع كل الأمن والاقتصاد.

هذا العمل مخصص بالكامل للتحقيقات التجريبية لسلوك الاسطوانات الخرسانية المحصورة في عدة طبقات من الألياف الزجاجية FRP ، وبالتالي تحديد تطور درجة الحبس كدالة لعدد طبقات الغلاف المركب ووضعها تسليط الضوء على التأثير المعزز لجزء من الاسطوانة الخرسانية على السلوك الكلي للعنصر ، من حيث القوة وخاصة طريقة الضرر والتمزق

تمكننا النتائج المختلفة من إجراء تحليل عالمي يتعلق بمكاسب القوة و الشقوق والكسر ولتحسين عدد طبقات الألياف الزجاجية FRP. في حين أن الزيادة الكبيرة في الليونة والقوة ترتبط مباشرة باستخدام الأصداف المركبة ، تختلف درجة الحبس مع عدد الطبقات بطريقة غير خطية. وأخيرًا ، يمكن أن يؤدي تقوية جزء من العمود إلى تقليل القوة الكلية للعنصر ، خاصةً تسريع التلف والتمزق في مناطق الكرة البلاستيكية ، التي تكون في نهايات العينات الأسطوانية.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة، مواد مركبة ، الاحتواء ، التجريبية ، الشقوق والكسر.

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES</b>	
I.1.Introduction.....	6
I.2. Les Matériaux composites.....	6
I.2.1. Définition, Constituants et Domaine d’application des matériaux composites.....	6
I.3. Comportement mécanique d'un composite unidirectionnel.....	16
I.4. Mécanisme de rupture et endommagement des matériaux composites.....	17
I.5. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale.....	18
I .6. Renforcement par les matériaux composites.....	19
Conclusion du chapitre.....	21
<b>CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONFINEMENT DE BETON</b>	
II.1. Introduction.....	23
II.2. Comportement du béton confiné.....	24
II.2.1. Notion de confinement.....	24
II.2.2.Catégories des méthodes de renforcement usuelles.....	26
II.2. 3. Comparaison des méthodes de renforcement.....	28
II.2.4. Définition du module de confinement et de la contrainte de confinement....	29
II.3. Synthèse bibliographique exhaustive.....	30
Conclusion du chapitre.....	44
<b>CHAPITRE III : INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES</b>	
III. 1. Introduction.....	46
III.2. Présentation des matériaux étudiés.....	47

III.2.1. Ciment.....	47
III.2.2 Sable.....	47
III.2.3. L'eau .....	47
III.2.4. Matériau composite « FRPV ».....	47
III.2.4.1. Tissu de verre.....	48
III.2.4.2. Préparation de la résine pour le collage du tissu de fibres de verre.....	48
III.3. Formulation du béton.....	49
III.3. 1. Analyse granulométrique et composition.....	49
III.3. 2. Calcul des masses volumiques.....	51
III.3. 3. Formulation du Béton.....	51
III.4. Fabrication et préparation des spécimens cylindriques.....	54
III.4. 1. Type d'éprouvette.....	54
III.4.2 Variantes considérées.....	54
III.4.3. Nomenclature des éprouvettes.....	54
III.4.4. Mise en place du tissu composite 'FRP'.....	55
III.5. Chargement et acquisition des valeurs.....	56
III.6. Comportement des cylindres en béton totalement confinés.....	56
III.7. Comportement des cylindres de béton partiellement confinés.....	61
III.7.1 Variantes considérées.....	62
III.8. Analyse des modes de rupture des différentes variantes.....	65
1- Béton de référence (Témoin).....	66
2- Renforcement de la zone inférieure du cylindre 'SC 1R INF'.....	67
3- Renforcement de la zone supérieure du cylindre (SC 1R SUP (10cm) .....	68
4- Renforcement de la zone centrale du cylindre 'UC 1C PC.....	68
5- Confinement variable 1 enveloppe + 2 renforcements extrémités 'CC1C2R SUP INF (5cm)'.....	69
6- Renforcement de la zone centrale du cylindre 'CC 1C PC'.....	70
Conclusion partielle.....	71
Conclusion générale.....	73
Références bibliographiques.....	75

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Composition des matériaux composites.....	6
<b>Figure I.2 :</b> Les différentes familles de matrice.....	9
<b>Figure I.3 :</b> Principaux matériaux de renfort.....	10
<b>Figure I.4 :</b> Bande de tissu de verre.....	11
<b>Figure I.5 :</b> Tissu de fibres de carbone.....	12
<b>Figure I.6 :</b> Tissu de fibres aramides.....	13
<b>Figure I.7 :</b> Principales formes des renforts.....	14
<b>Figure I.8:</b> Structures des composites.....	15
<b>Figure I.9 :</b> Tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance.....	15
<b>Figure I.10 :</b> Courbe contrainte-déformation dans le cas $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ .....	18
<b>Figure I.11 :</b> Courbe contrainte-déformation dans le cas $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$ .....	19
<b>Figure I. 12 :</b> Exemples de confinement des colonnes et poteaux.....	20
<b>Figure I.13 :</b> Stratification en contact des colonnes.....	20
<b>Figure II.1:</b> Courbes contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné.....	24
<b>Figure II.2 :</b> Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton.....	25
<b>Figure II. 3 :</b> Stratification au contact (WBAC 2003) .....	26
<b>Figure II.4 :</b> Enroulement filamentaire ((a) Monti 2003, (b) Master Builders, Inc. and Structural Preservation Systems 1998, Balaguru et al. 2009).....	27
<b>Figure II.5 :</b> Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » (Monti 2003).....	28
<b>Figure II.6:</b> Différents niveaux de confinement.....	30
<b>Figure II.7.</b> Orientation des fibres dans les cylindres enveloppés de PRFC.....	31
<b>Figure II.8 :</b> Modèle trilinéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales.....	32
<b>Figure II. 9 :</b> Modes de rupture typiques des éprouvettes renforcées de PRF.....	33
<b>Figure II.10 :</b> Concept de béton confiné en acier équivalent.....	37
<b>Figure II. 11 :</b> Courbe contrainte-déformation du béton confiné par FRP.....	39
<b>Figure II. 12 :</b> Modes de rupture des spécimens.....	40
<b>Figure II.13 :</b> Courbe contrainte-déformation simplifiées de béton confiné par FRP..	40

<b>Figure II.14:</b> (a) Instrumentation ; (b) Mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone.....	41
<b>Figure III.1 :</b> Tissu de fibres de verre.....	48
<b>Figure III.2.</b> Types de spécimens cylindriques considérés.....	55
<b>Figure III.3</b> Spécimens d'essais : a) <i>préparation du support béton</i> , b) <i>cure d'hydratation des cylindres en béton</i> , c) <i>mise en place du tissu composite FRP</i> .....	55
<b>Figure III. 4:</b> <i>Machines d'essais pour les différents spécimens</i> : a) chargements et acquisition des résultats, b) et c) : système LVDT.....	56
<b>Figure III. 5 :</b> Histogramme des valeurs moyennes pour les différents spécimens : a) charges appliquées, b) contraintes de rupture, c) masses des éprouvettes.....	58
<b>Figure III. 6 :</b> Évolution de la résistance en fonction du nombre de couches.....	58
<b>Figure III. 7 :</b> Courbe contrainte – déformation du béton.....	59
<b>Figure III. 8 :</b> Évolution de la contrainte (MPa) en fonction du temps (s).....	59
<b>Figure III. 9 :</b> Évolution du degré de confinement en fonction du nombre de couches.....	60
<b>Figure III. 10 :</b> Différentes variantes considérées.....	65
<b>Figure III. 11 :</b> Histogramme des valeurs moyennes des différents spécimens.....	66
<b>Figure III.12 :</b> Mode de rupture du béton témoin de référence.....	66
<b>Figure III.13 :</b> Mode de rupture du cylindre confiné 'SC 1R INF'.....	67
<b>Figure III.14 :</b> Mode de rupture du cylindre confiné 'SC 1R SUP'.....	68
<b>Figure III.15 :</b> Mode de rupture du cylindre confiné 'UC 1C PC.....	68
<b>Figure III.16 :</b> Mode de rupture du cylindre confiné 'CC1C2R SUP INF'.....	69
<b>Figure III.17 :</b> Mode de rupture du cylindre confiné 'CC 1C PC'.....	70

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau II.1.</b> Comparaison des différentes méthodes de renforcement des colonnes.....	29
<b>Tableau III.1 :</b> Caractéristiques géométriques et élastiques du tissu composite.....	48
<b>Tableau III.2 :</b> Caractéristiques de la résine.....	49
<b>Tableau III.3 :</b> Valeurs moyennes de la force et contrainte des différentes variantes.....	57
<b>Tableau III. 4 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques de résistance.....	59
<b>Tableau III.5 :</b> Force- contrainte des spécimens considérés.....	65

### *Nomenclature :*

**PRF :** Polymères Renforcés de Fibre

**FRP :** Fiber Reinforced Polymer

**PRFV :** Polymères Renforcés de Fibre de Verre

**PRFC :** Polymères Renforcés de Fibres de Carbone

**PRFA :** Polymères Renforcés de Fibre Aramide

$\sigma_m$  : Contrainte en traction de la matrice

$\sigma_{mu}$  : Contrainte ultime en traction de la matrice

$\tau_m$  : Contrainte de cisaillement de la matrice

$\tau_{mu}$  : Contrainte ultime de cisaillement de la matrice

$\tau_d$  : Contrainte de décohésion de l'interface fibre-matrice

$\epsilon_{fu}$  : Déformation ultime des fibres

$\epsilon_{mu}$  : Déformation ultime de la matrice

$\sigma_{cu}$  : Contrainte à la rupture du composite

$(\sigma_m)_{\epsilon_{fu}}$  : Contrainte dans la matrice pour une déformation égale la déformation  $\epsilon_{fu}$  à la rupture des fibres

$V_f$  : Fraction volumique du renfort fibreux

$E_l$  : Le module de confinement

$f_l$  : La contrainte de confinement

$E_f$  : Le module d'élasticité du FRP

$f_f$  : La résistance à la rupture en traction du FRP

$\rho_f$  : La fraction volumique du FRP au béton

$t_f$  : L'épaisseur de la fibre

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## **Introduction générale**

Les matériaux innovants tels que, les composites et plus particulièrement les polymères renforcés de fibres (FRP) sont de plus en plus appliqués dans la réparation et le renforcement des éléments de structure en béton, eu égard aux avantages qu'ils présentent comparativement aux matériaux conventionnels, à savoir : légèreté, résistance mécanique et chimique, durabilité, facilité de mise en forme et longue durée de vie.

Le recours au renforcement des structures en béton par des composites a connu un essor important dès le développement des techniques de renforcement par collage d'éléments en acier sur les faces des éléments de structure. Mais tenant compte de la grande sensibilité de l'acier à la corrosion, son poids élevé, etc..., des matériaux composites sont proposés comme substitut potentiel à l'acier dans plusieurs domaines du Génie-Civil.

Actuellement, le confinement du béton se réalise à l'aide de matériaux composites à base de fibres de verres, de carbone et autres. Toutes les études réalisées s'accordent sur l'augmentation de la résistance ultime, la déformation correspondante au pic et la ductilité. L'amélioration de ces propriétés mécaniques permet aux éléments confinés, en l'occurrence les piles et poteaux cylindriques, les poutres et dalles de mieux reprendre les sollicitations auxquelles y sont assujetties. Les forces et contraintes ultimes augmentent significativement avec l'augmentation du nombre de couches composites, mais le degré de confinement procuré par l'enveloppe n'est pas directement proportionnel au nombre de couches ; ce qui nous a encouragé à mener cette étude expérimentale pour mettre en évidence ce paramètre dans le but d'optimiser le nombre de couches pour un meilleur rendement.

**Ainsi, le présent travail** s'inscrit dans le cadre de la réhabilitation et du renforcement par les matériaux composites FRP des cylindres en béton. Il constitue une contribution à l'étude d'une partie du projet de recherche PRFU sous la responsabilité du Pr. Ait Tahar K, portant sur le comportement des colonnes soumises à un confinement variable et l'analyse du confinement passif des éléments de structure en béton.

La technique utilisée consiste en le collage des enveloppes composites à base de fibres de verre FRP sur toute la circonférence de cylindres en béton. Les gains en résistance sont

## Introduction générale

évalués et analysés en tenant compte du nombre de couches de composites. Dans ce travail de recherche, on s'est intéressé à étudier l'influence du nombre de couches sur le degré de confinement, dans le but d'optimiser le nombre de couches nécessaires pour réaliser un bon confinement en toute sécurité et économie, ainsi que l'étude du confinement partiel progressif, à travers des essais préliminaires pour mettre en évidence l'influence de la zone confinée sur le comportement global du cylindre. Pour mener à bien cette investigation, une analyse expérimentale et une étude numérique à base des éléments finis ont été menées pour mettre en évidence tout l'intérêt de notre travail.

Le travail est présenté sous forme de quatre chapitres liés directement à la thématique générale proposée dans ce travail et est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Après une *introduction générale* sur la thématique traitée dans ce travail de recherche, où la problématique et les objectifs recherchés sont définis, le **chapitre 1** est totalement consacré à la présentation d'une synthèse bibliographique exhaustive qui résume les principales définitions, la constitution et le comportement mécanique des matériaux composites. Actuellement les matériaux composites connaissent différentes applications dans le domaine de génie civil.

**Le second chapitre** est dédié à la revue bibliographique sur le confinement de béton. Les différentes techniques de confinement sont largement présentées et discutées. On s'est plus intéressé aux cas de confinement du béton qui consiste à empêcher ces déformations, réalisé par une enveloppe externe en composite. Une présentation de quelques travaux réalisés par des chercheurs sont également résumés et présentés.

**Le troisième chapitre est totalement dédié** à l'étude expérimentale réalisée dans le cadre de cette thèse. La caractérisation des matériaux utilisés, la composition du béton, la nature des tissu en fibres de verre, les dimensions des éprouvettes, le procédé et variantes de confinement considérées, le dispositifs d'essai mécanique ainsi que les différents résultats obtenus sous chargement axial de compression sont présentés dans des tableaux et

## Introduction générale

illustrés par des graphes et des histogrammes, où l'apport du confinement en termes de résistance et la variation du degré de confinement en fonction de nombre de couches sont présentés et analysés. Les modes de rupture observés pour chaque variante de confinement considérée sont également illustrés et discutés.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle. La synthèse des différents résultats obtenus est effectuée en conclusion générale. Des perspectives aux travaux futurs sont formulées.

---

***CHAPITRE I :***

***SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE  
SUR LES MATERIAUX  
COMPOSITES***

---

## **CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES**

### **I.1. Introduction**

Depuis de longues années, les chercheurs de par le monde ne cessent de développer de nouveaux matériaux et les techniques de renforcement et de réparation des éléments de structures en béton endommagées. Les matériaux composites proposent de nombreux avantages comparés aux matériaux dits traditionnels. Suivant les applications auxquelles ils sont destinés, leurs performances mécaniques et chimiques permettent de répondre à des contraintes techniques plus complexes. Ces matériaux légers peuvent intégrer la technologie et offrir une grande liberté de forme. Le facteur économique reste le principal moteur car pour être viable, le composite doit être compétitif. [54].

Le recours aux composites pour le renforcement des éléments en béton connaît de plus en plus des applications dans le domaine si vaste de génie civil, en particulier dans les ouvrages d'art, soit le tablier pour les charges de flexion et de cisaillement soit les piles et culées pour les charges axiales de compression.

### **I.2. Les Matériaux composites :**

#### **I.2.1. Définition, Constituants et Domaine d'application des matériaux composites :**

Les matériaux composites sont constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [1].

Un matériau composite structural est composé de deux phases : une phase discontinue appelée 'renfort' et une phase continue appelée 'matrice'. Le renfort présentant diverses architectures, assure la tenue mécanique. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La matrice qui est une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa

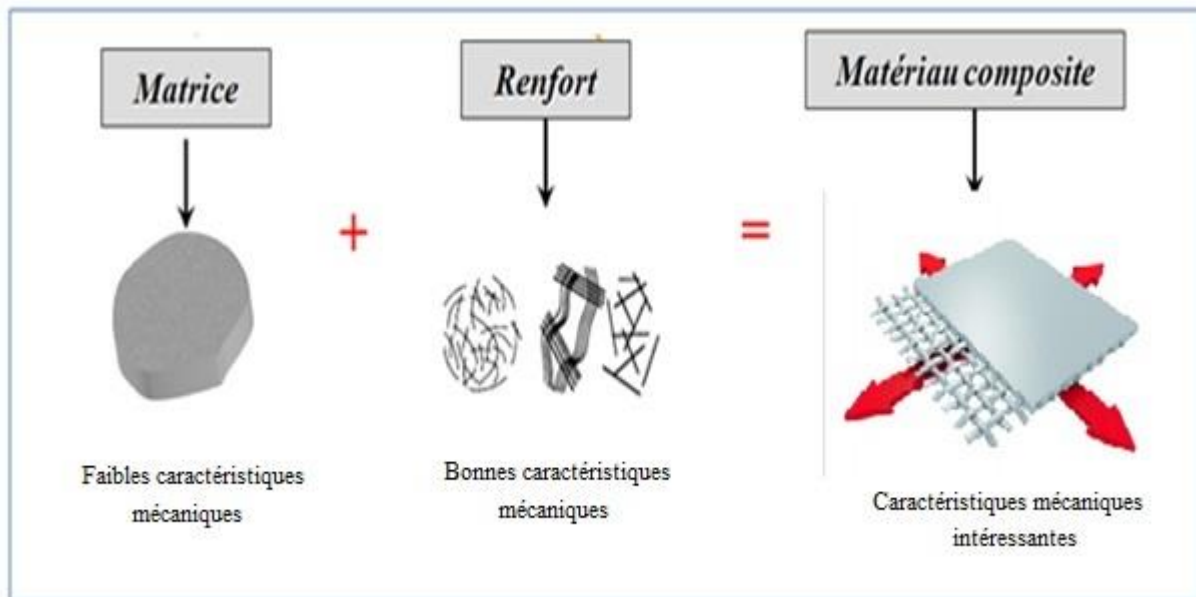
position initiale et d'assurer la transmission des efforts. La liaison entre les fibres et la matrice est appelée interface. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope. Des charges renforçantes ou non renforçantes et des additifs sont utilisés pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. Ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...)[1, 2].

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrices organiques (CMO) : constituent les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle. Les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) : réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température
- Les composites à matrices métalliques (CMM) : utilisés dans les industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Au début, les matériaux composites étaient utilisés plus dans l'industrie et particulièrement dans les domaines aérospatial et aéronautique, où les gains de masse sur structures sont stratégiques. Le développement de ces matériaux à hautes performances, a permis d'élargir le domaine d'application, en effet actuellement les matériaux composites sont très utilisés dans le domaine du sport, du génie civil, du domaine naval, du secteur automobile, du domaine éolien (principal consommateur actuel de fibres de carbone) et du domaine pétrolier off-shore (réalisation de risers composites) [1,2].

Les composites connaissent actuellement de principales applications dans tous les domaines grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [55]. Il convient de noter que tous les types de matériaux ne peuvent être associés et que la qualité de l'adhésion entre la matrice et les renforts est un point essentiel dans le choix des constituants.



**Figure I.1:** Composition des matériaux composites

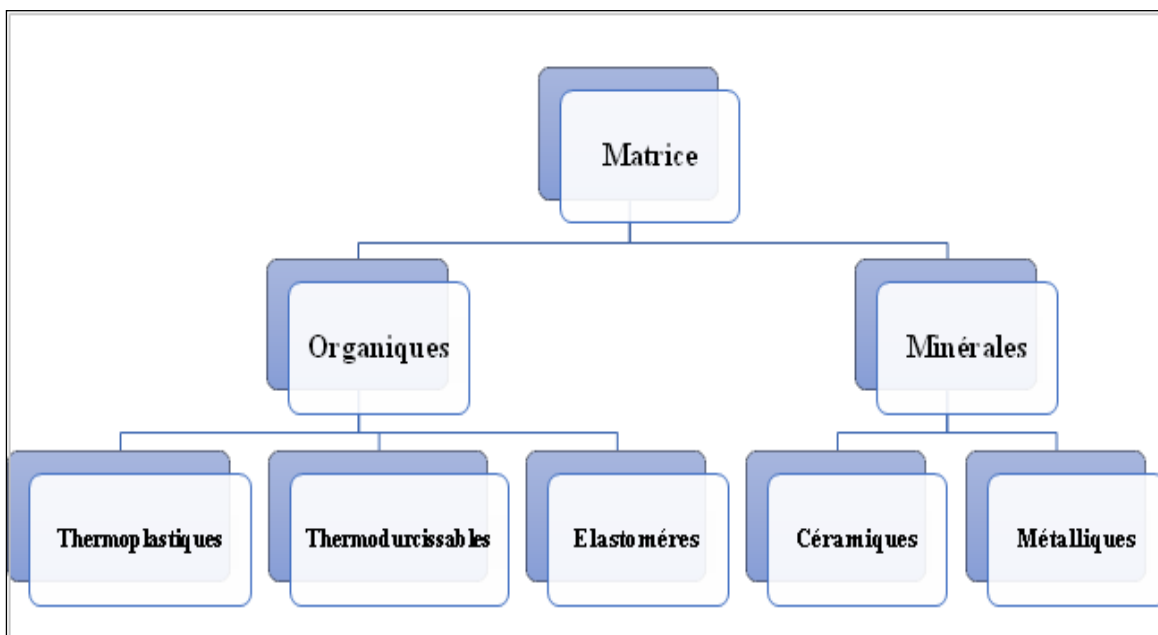
Les matrices employées pour ces composites sont des *résines polymères*. Il en existe deux types, qui possèdent des propriétés foncièrement différentes et sont employées dans des filières distinctes [3] :

- Les *thermoplastiques* : se présentent sous forme solide (granulés, plaques...). Sont mis en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement ; Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. La facilité de mise en œuvre et des faibles coûts des thermoplastiques permet une production plus importante comparativement aux autres matrices. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.).
- Les *thermodurcissables* : se présentent sous forme liquide visqueux et sont mis en forme par polymérisation avec ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification. Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques. Exemple : les polyesters insaturés (vinylester, les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes, .. etc.).

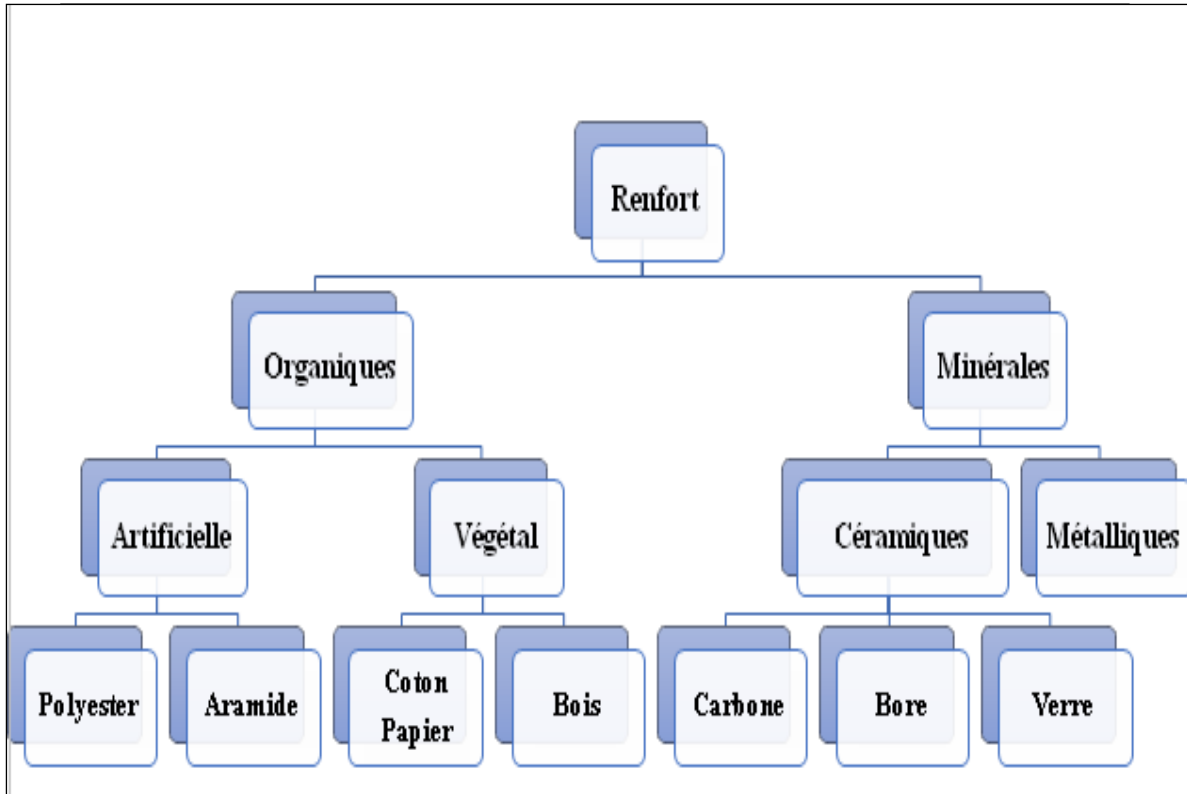
Les fibres usuelles et plus courantes utilisées avec ces matrices sont :

- Les fibres de *verre* (PRF) : représentent 95% des renforts utilisés dans la pratique. Elles ont une grande résistance et sont onéreuses ;
- Les fibres de *carbone* : elles plus onéreuses mais possèdent de très bonnes performances (résistance). Elles sont surtout utilisées en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs ;
- Les fibres d'*aramide* (Kevlar) ou de *polypropylène* : se distinguent par leurs résistantes aux chocs et leur ténacité ;
- Les fibres *végétales* comme le chanvre ou le lin : sont très répandues dans la nature. Abondantes, peu coûteuses et renouvelables. Elles possèdent des résistances acceptables pour des applications visées.

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Le renfort permet d'accroître les propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer les propriétés physiques, tels que les comportements au feu, la tenue en température, etc. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique, etc.). Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou particules (mat) ou fibres continues (unidirectionnel, tissus ou textures multidirectionnelles). Les principaux matériaux de renfort sont résumés dans l'organigramme donné par la figure I.3.



**Figure I.2** : Les différentes familles de matrice [1, 4, 56]



**Figure I.3 :** Principaux matériaux de renfort. [1,2,4,56]

Les fibres sont classées sous forme de deux grandes familles :

- **Continue** : fibres longues utilisées pour des composites à haute performance (HP). Ces fibres offrent des résistances à la rupture et des modules d'élasticité beaucoup plus élevés [1].
- **Discontinues** : fibres courtes, ou particules (sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids).

Il existe plusieurs types de renforts fibreux, à titre indicatif, nous présentons les fibres suivantes :

- **Fibre de verre :** Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile. Il est composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. le cout de production des fibres de verre est faible et moins onéreux, le rapport performances/prix est excellent. Actuellement les fibres de verre sont les plus utilisées dans la production et confection des matériaux composites.



**Figure I.4 :** Bande de tissu de verre

Les caractéristiques physico-chimiques des fibres de verre sont :

- Résistance à la traction* : à masse équivalente, la fibre de verre est deux fois plus résistance que l'acier.
  
- Isolation électrique* : c'est une des caractéristiques principales de la fibre de verre qui offre des débouchés partout où le besoin d'une isolation à l'électricité est recherché.
  
- Isolation thermique* : avec un point de fusion de 800°C, la fibre de verre résiste bien aux températures élevées.

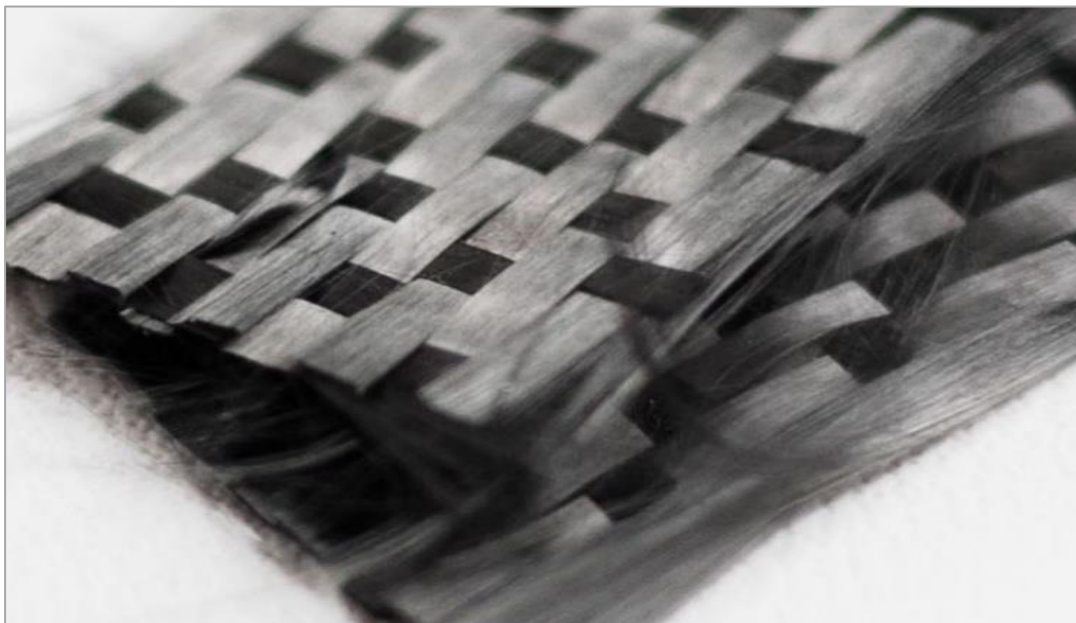
-*Stabilité dimensionnelle* : la fibre de verre est très stable avec un allongement à la rupture de 3%. La fibre de verre connaît très peu d'allongement et de retrait dans les conditions normales d'utilisation.

- *Faible absorption d'humidité* : la fibre de verre étant d'origine minérale, elle n'absorbe quasiment pas l'humidité.

-*Résistance aux produits chimiques et aux UV.*

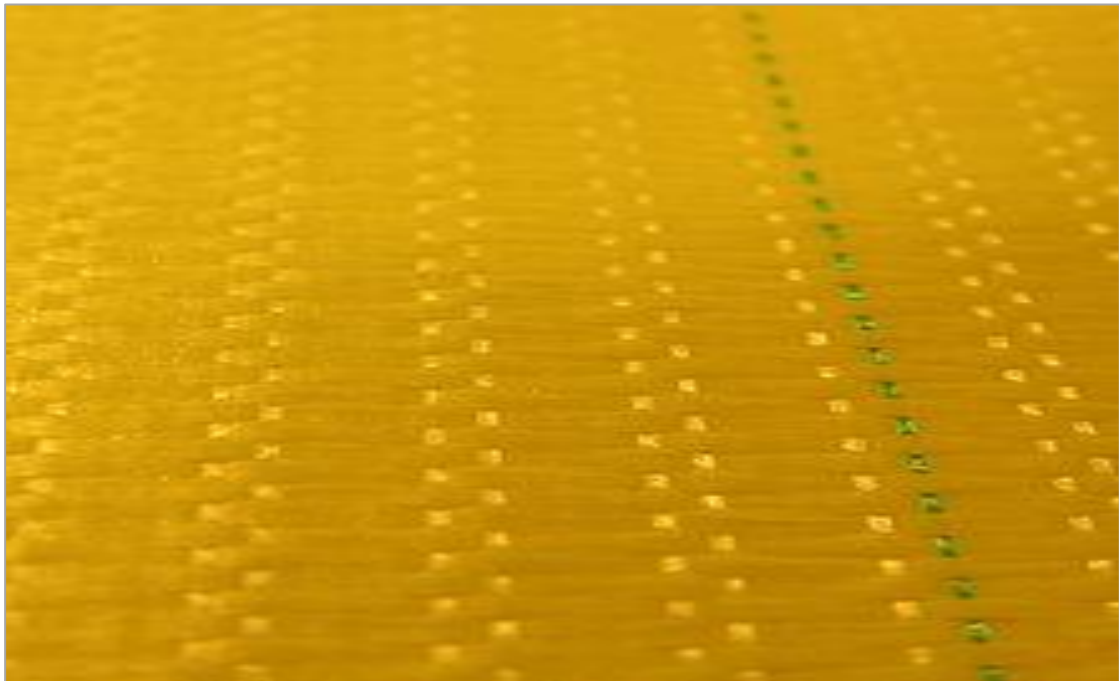
- *Economique* : la fibre de verre a un coût compétitif au regard de l'ensemble de propriétés qu'elle confère au composite.

- **Fibre de carbone** : Les fibres de carbone ont la structure du graphite. Elles proviennent de fibre acrylique et du brai et elles se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé. La masse volumique faible (inférieure à 2000 kg/m) conduit à des propriétés mécaniques spécifiques théoriques remarquablement élevées qui est due à la structure hexagonale d'atomes de carbone, disposés en plans cristallographiques parallèles. Les caractéristiques des fibres élaborées restent cependant élevées et peuvent atteindre aujourd'hui pour les fibres les plus performantes de l'ordre de 650 GPa pour le module d'Young et de 4000 MPa pour la contrainte à la rupture.



**Figure I.5** : Tissu de fibres de carbone

- **Fibres aramides** : sont les plus utilisées. Elles sont issues de la chimie des polyamides aromatique, et connu sous le nom « kevlar ». Ceux sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constituée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. Elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Les fibres aramides ont une bonne tenue au feu. Par contre, lors de leur renforcement des composites, on observe une faible résistance à la compression et à la flexion, du fait d'une mauvaise adhérence avec les résines.

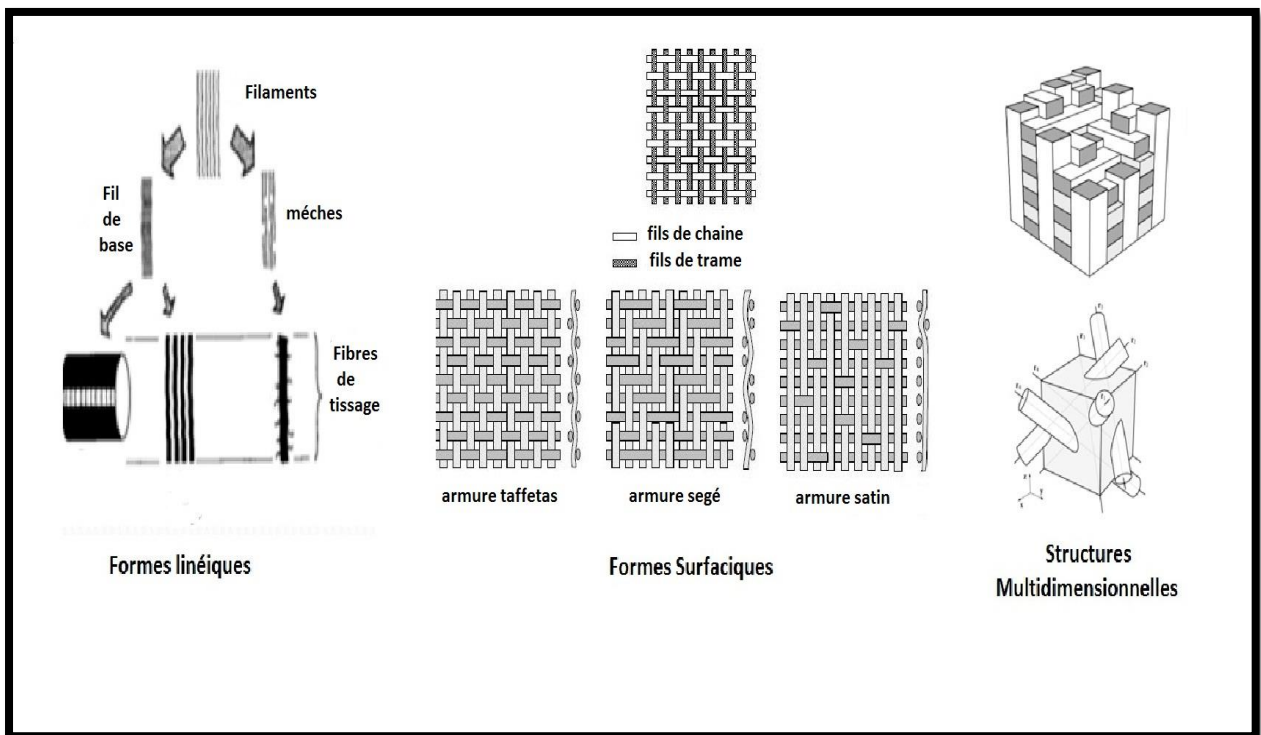


**Figure I.6** : Tissu de fibres aramides

- **Fibres céramiques** : des fibres à base de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Elles sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :
- Les fibres de bore (B),
  - Les fibres de carbure de bore (B<sub>4</sub>C),

- Les fibres de carbure de silicium (SiC),
- Les fibres de bore-carbure de silicium, appelées « BorSiC »

Ces fibres possèdent des caractéristiques mécaniques assez bonnes et se conservent à des températures pouvant aller de 500°C à 1000°C. Les fibres céramiques sont souvent associées à des résines thermodurcissables de type époxyde à cause de leur bonne adhérence avec ces dernières.



**Figure I.7 :** Principales formes des renforts.

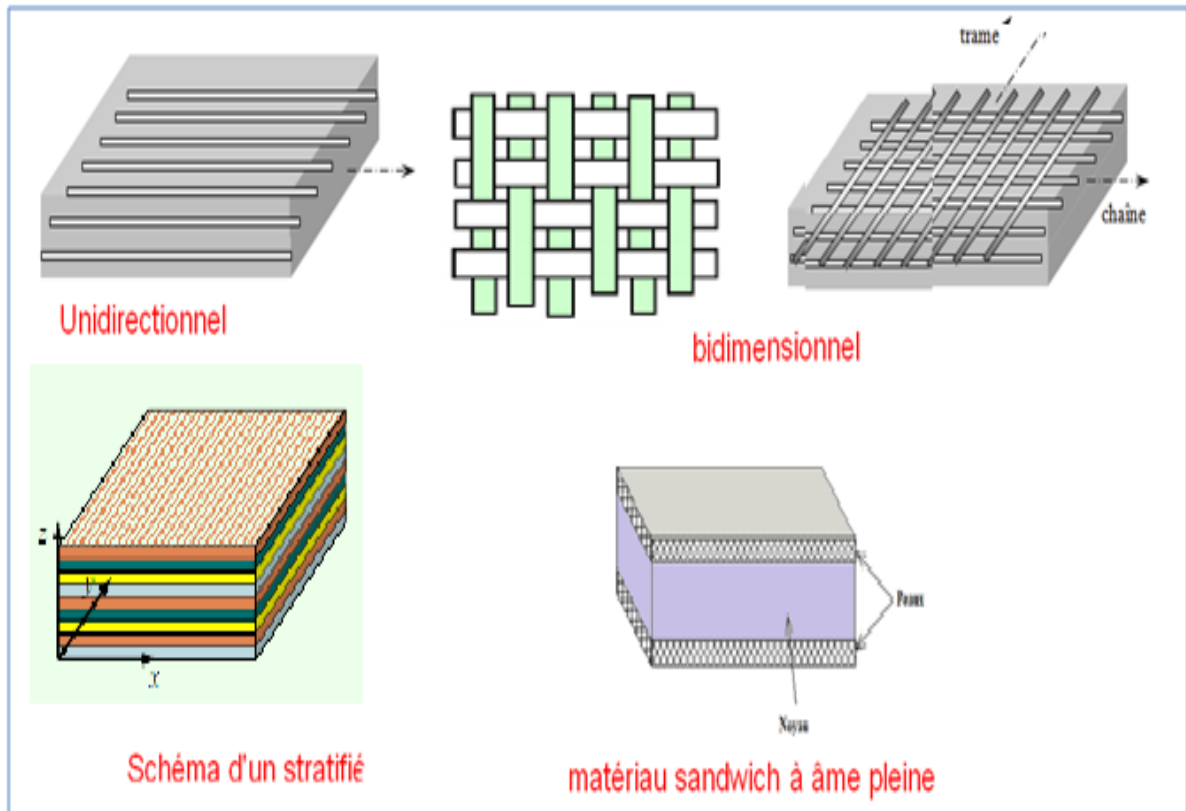


Figure I.8: Structures des composites.

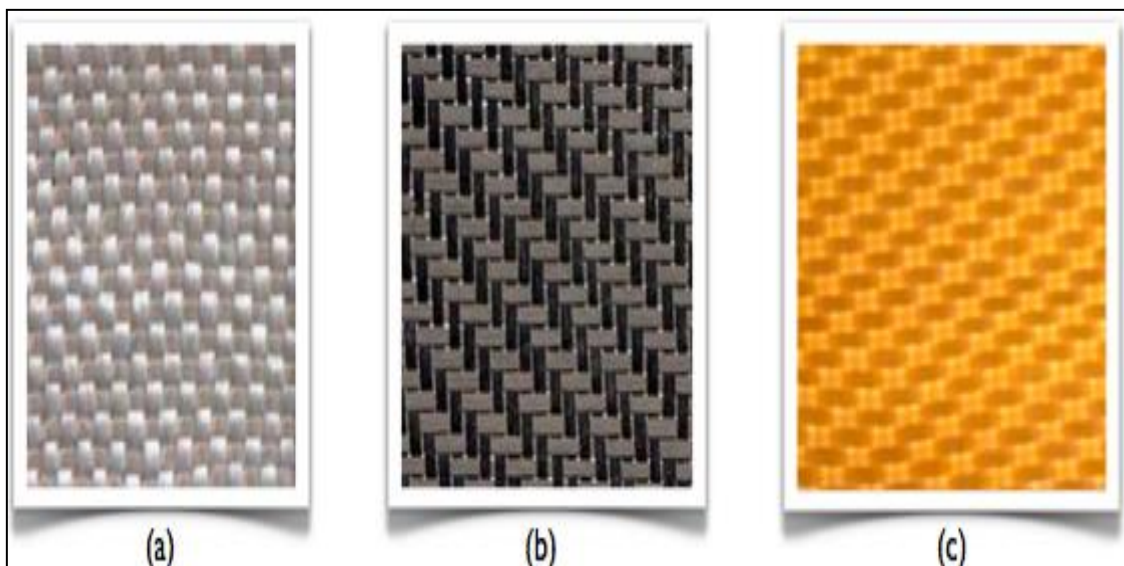


Figure I.9 : Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar).

### I.3. Comportement mécanique d'un composite unidirectionnel :

La plupart des matériaux anisotropes possèdent une structure présentant une ou plusieurs symétries, ce qui réduit alors le nombre de constantes indépendantes nécessaires pour décrire le comportement du matériau. Le matériau composite est considéré comme un matériau orthotrope qui possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux. Un matériau composite est dans la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

La matrice de rigidité s'écrit donc comme suit [1,2,] :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & C_{55} & 0 \\ & & & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est dans ce cas égal à 9.

Si l'on considère une cellule élémentaire de ce type de matériau, constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice. On obtient un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution. C'est pourquoi ce type de matériau est appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse.

$$2 = T$$

Cette propriété conduit à la forme suivante des matrices de rigidité et de flexibilité :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & C_{66} & 0 \\ & & & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad [S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (S_{22} - S_{23}) & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & S_{66} & 0 \\ & & & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les propriétés du matériau unidirectionnel sont déterminées par 5 constantes indépendantes.

#### **I.4. Mécanisme de rupture et endommagement des matériaux composites :**

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une « discontinuité » locale de matière appelée *fissure*. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de micro -fissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut c'est la microfissuration [1,2,4]. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique à partir des microfissures existantes c'est la macro fissuration. Dans le cas des matériaux composites l'amorce de la fissure se produit généralement bien avant le changement du comportement macroscopique. La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de 'l'accumulation de divers mécanismes élémentaires. Les différents mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel sont :Rupture des fibres, Rupture transverse de la matrice, Rupture longitudinale de la matrice et Rupture de l'interface fibre-matrice

#### **Remarques :**

- Les mécanismes ne sont pas isolés car il y a toujours une coexistence entre eux, ils se développent suivant la nature des matériaux et des conditions de sollicitations externes ;
- Il existe plusieurs critères de rupture des matériaux orthotropes le plus couramment utilisé dans le calcul de pré dimensionnement est le critère de « Hill-Tsai » par analogie au critère de « Von-Mises » appliqué pour les matériaux isotropes dans le domaine élastique ;
- La fissuration transverse est obtenue quand la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice ;
- La fissuration longitudinale est obtenue quand la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture  $\tau_{mu}$ , généralement au voisinage d'une fibre ;
- La rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice se produit quand  $\tau_d < \tau_{mu}$ .

**I.5. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale :**

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ( $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ ), soit par rupture transverse de la matrice dans les cas contraires. Dans le cas où  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$  les courbes contrainte déformation sont représentées sur la figure ci-dessous, en admettant l'égalité des déformations dans les fibres et dans la matrice on peut écrire [1,2] :

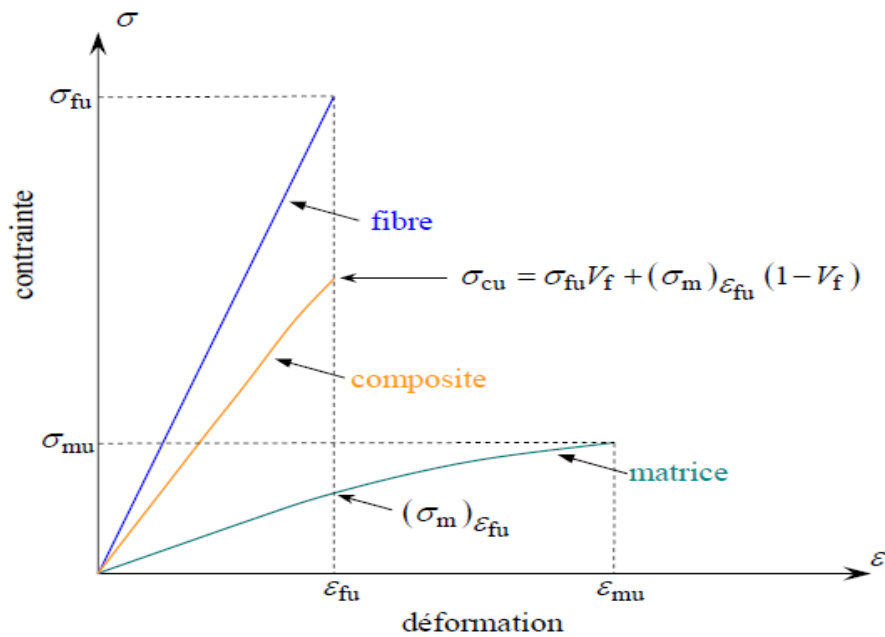
$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_{fu}} (1 - V_f) \dots\dots\dots(4)$$

Avec :

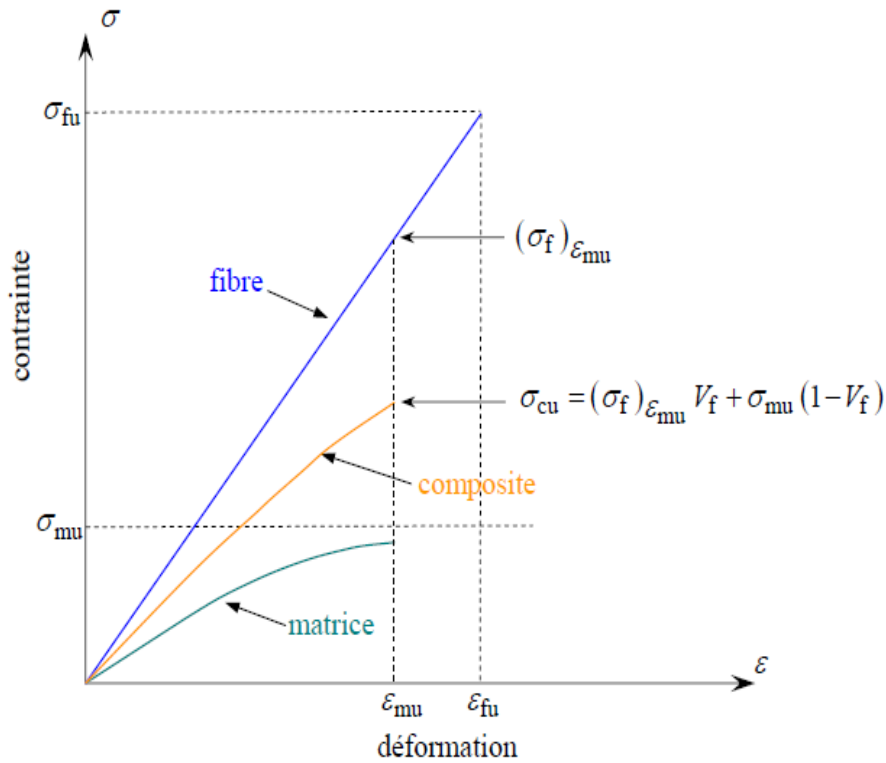
$\sigma_{cu}$  : contrainte à la rupture du composite

$V_f$  : Fraction Volumique des fibres

$(\sigma_m)_{\epsilon_{fu}}$  : contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation  $\epsilon_{fu}$  à la rupture des fibres.



**Figure I.10 :** Courbe contrainte-déformation dans le cas  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$  [1].



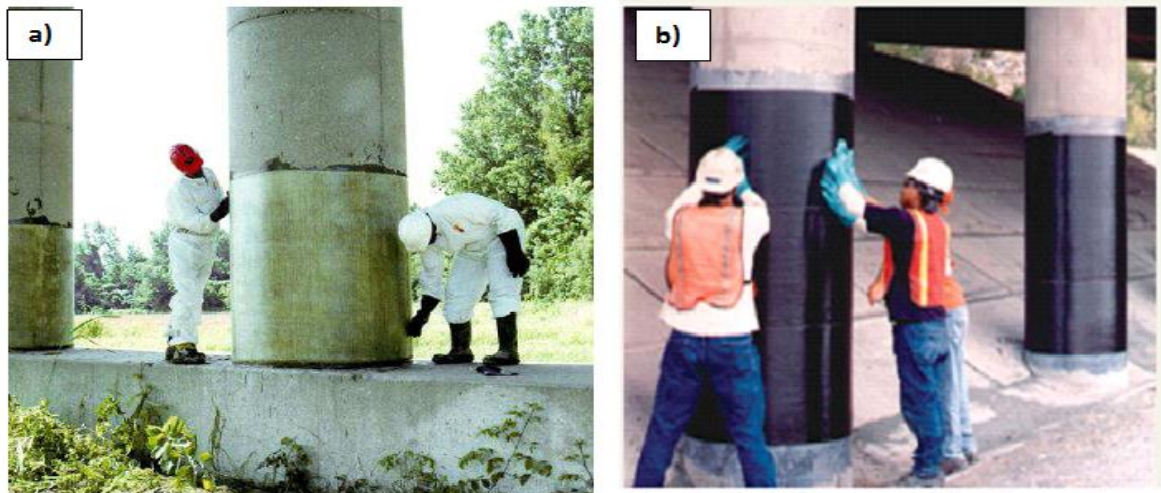
**Figure I.11** : Courbe contrainte-déformation dans le cas  $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$  [1].

Pour les fibres de verre, les performances sont limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Les performances à la rupture des composites sont obtenus par une bonne optimisation des propriétés des constituants.

#### **I.6.6. Renforcement par les matériaux composites :**

En génie civil, le collage de matériaux composites sur le support béton est utilisé pour reprendre les sollicitations de flexion, de cisaillement (dalles et poutres) et de compression (poteaux)[3,8,9,10,11,12] . Les fibres les plus utilisées sont essentiellement des tissus en fibres de carbone et les fibres de verre, qui peuvent être orientées dans différentes directions afin d'optimiser leur utilisation. Deux types de tissus sont proposés sur le marché : les tissus secs et le tissu pré imprégnés. La matrice la plus recommandée, pour une meilleure adhérence est la matrice époxy. Les propriétés mécaniques du renfort dépendent principalement des caractéristiques des fibres, de leur orientation, de leur forme, de leur rapport volumétrique par rapport à la matrice, de la qualité de l'interface entre la plaque composite et l'élément en béton

ainsi que du procédé de fabrication. Les principaux avantages du collage des matériaux composites sont leur légèreté, leur excellente résistance à la corrosion, ainsi que l'absence de réaction avec des agents agressifs extérieurs, tels que le sel, les produits chimiques et l'alcalinité du béton [ 7,8]



**Figure I.12.**Exemples de confinement des colonnes et poteaux [6]



**Figure I. 13.** Stratification en contact des colonnes [6]

La figure I.13 représente un cas de renforcement pratique des piles d'un Pont de l'autoroute US 87 (Californie - années 90) renforcées en 2005 (fibres de verre) après le décret de mise à jour des charges de trafic en 2004 et la prise en compte de l'augmentation des charges sismiques de dimensionnement [6].

**Remarque :**

Différentes techniques ont été développées pour le renforcement des poteaux et colonnes en béton armé avec des matériaux composites de type FRP. Il existe actuellement trois types de renforcement : le renforcement par enroulement filamentaire, le renforcement par stratification et renforcement par chemisage par enveloppe préfabriquée (tissu en fibres de verre ensimées). Les poteaux et colonnes sont généralement renforcés par des enveloppes continues ou discontinues (bandes sous forme d'anneaux discrets ou spirales continues. Le confinement améliore non seulement la résistance mais également la ductilité. Les figures I.12 et I.13, illustrant le confinement des colonnes et poteaux par stratification en contact, nous a conduit à proposer d'étudier l'influence de renforcement d'une partie de la colonne sur le comportement global de l'élément, en termes de résistance et surtout le mode d'endommagement et de rupture. Les résultats seront présentés ultérieurement.

**Conclusion du chapitre :**

Vu l'état actuel de dégradation du bâti existant, dans un avenir très proche, des opérations de réparation et de renforcement seront plus que nécessaires pour réhabiliter les constructions et ouvrages ayant subits des dommages moyens ou importants. Cette revue bibliographique sur les matériaux composites nous a permis de mettre en exergue leurs performances mécaniques et l'intérêt de ces matériaux dans les opérations de renforcement et de réparation des éléments en béton grâce à leur résistance et leur légèreté. A cet effet, on s'est intéressé au cas de renforcement des poteaux circulaires par des enveloppes composites FRP, appelé 'Confinement'. La notion de confinement et la synthèse exhaustive de quelques travaux antérieurs seront développées dans le prochain chapitre.

---

***CHAPITRE II :***

***REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR  
LE CONFINEMENT DE BETON***

---

## CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONFINEMENT DE BETON

### II.1. Introduction :

Le principe du confinement consiste à mobiliser une pression latérale ou radiale sur le support béton due à la différence de rigidité entre le matériau composite et le béton. En effet, lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit des fissures qui augmentent avec l'accroissement de la charge ce qui conduit finalement à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement par la chemise composite, de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées [11,12,14,16,25,37,38]. Ce phénomène est communément appelé 'confinement du béton'. Dans la pratique, le confinement des colonnes en béton est généralement réalisé par collage d'une enveloppe externe à base de fibres de carbone ou de verre.

Pour rappel, le béton est le matériau le plus consommé dans le monde (1m<sup>3</sup>/habitant/an). Il représente plus de 80% du marché de l'industrie de la construction. Le processus de fabrication et de mise en œuvre du béton est fortement énergivore (1,85 MWh/m<sup>3</sup>). Au cours de sa durée de vie, il subit des dégradations (mécaniques, thermiques, chimiques, environnementales, etc.), en effet, malgré le renforcement intérieur par des armatures métalliques, les structures en béton, suite aux différentes dégradations et dommages nécessitent après un certain temps un renforcement structurel supplémentaire pour assurer leur fonctionnement mécanique de service. Les causes de dégradations sont multiples, à titre indicatif, on peut citer :

- Dégradation physico-chimique (Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, Incendies, etc.)
- Causes accidentelles
- Erreurs de conception (Armature insuffisante ou mal placée, mauvais dimensionnement, insuffisance du ferrailage, Mauvais matériaux, vieillissement des matériaux etc.)
- Changement des conditions d'utilisation (Changement d'usage de la structure, Installation de machinerie lourde, sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction, etc.)

Il est alors indispensable de réaliser des opérations de réparation, de renforcement et de confortement, selon le degré d'endommagement subi. Trois opérations sont généralement préconisées : protection (corrosion), réparation (compenser les pertes des propriétés mécaniques) et renforcement (améliorer les performances mécaniques).

Dans ce chapitre, on s'intéressera au cas de renforcement des colonnes ou confinement par les matériaux composites. A cet effet, une synthèse bibliographique exhaustive du comportement du béton confiné des différentes techniques de confinement des colonnes sera présentée dans ce chapitre.

## II.2. Comportement du béton confiné :

### II.2.1. Notion de confinement :

Enormément de travaux de recherches expérimentales sont réalisés de par le monde pour mettre en évidence tous les aspects de confinement de béton par matériaux composites et de comprendre le comportement mécanique pour mettre au point des modèles théoriques de résistance et de déformation, afin de définir l'état de comportement jusqu'à rupture des éléments confinés. [12,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26]

La Figure II.1 présente les courbes typiques contraintes- déformations pour des bétons confinés et non confinés. La différence de comportement entre eux est ainsi montrée ces deux bétons. Généralement, le confinement augmente deux caractéristiques du béton : la résistance en compression  $f_{cc} > f_{co}$  et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression  $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$  [4,].

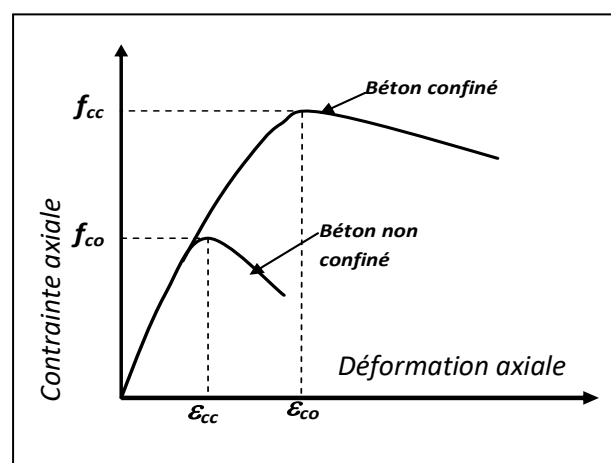
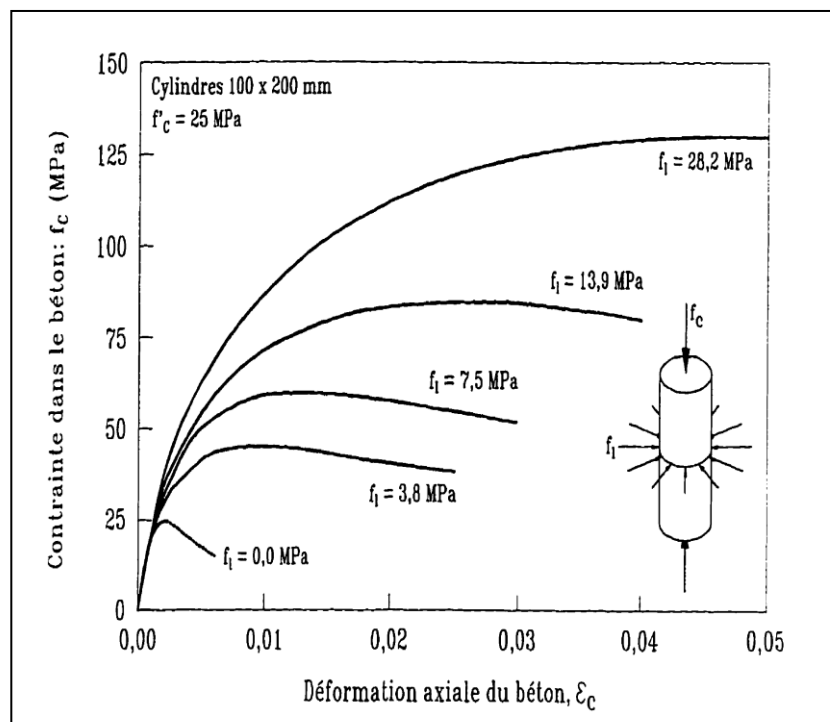


Figure II.1: Courbes contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné [4,27].

On peut observer que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. En effet, le développement du champ de fissuration est ralenti et la propagation de ces fissures est réduite, d'où une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné. Pour des niveaux de contraintes faibles, la réponse du béton confiné est semblable à celle du béton non confiné, par contre lorsque la contrainte dépasse la limite de rupture du béton ordinaire, le FRP se trouve mobilisé et la courbe présente un deuxième tronçon linéaire ascendant jusqu'à la rupture du FRP. Ceci traduit le phénomène de confinement.



**Figure II.2 :** Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton. [4,27].

### II.2.2. Catégories des méthodes de renforcement usuelles :

Ces dernières années, plusieurs techniques ont été développées par différents auteurs pour le renforcement des colonnes existantes saines ou endommagées en béton armé, en utilisant des composites «PRF ». Les méthodes de renforcement peuvent être classés dans trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite «PRF » à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «PRF ».

#### a) -Stratification au contact :

La stratification au contact (stratification directe) est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites «PRF ». Le tissu est constitué de fibres unidirectionnelles ou surfaciques imprégnées par les résines du polymère. Après la préparation du support béton (nettoyage, dépoussiérage à l'aide du papier vert ou autre moyen mécanique), on applique une couche très fine de résine puis on colle le tissu sur le support béton en appliquant une pression mécanique manuelle pour éviter les bulles d'air et assurer ainsi un bon contact.

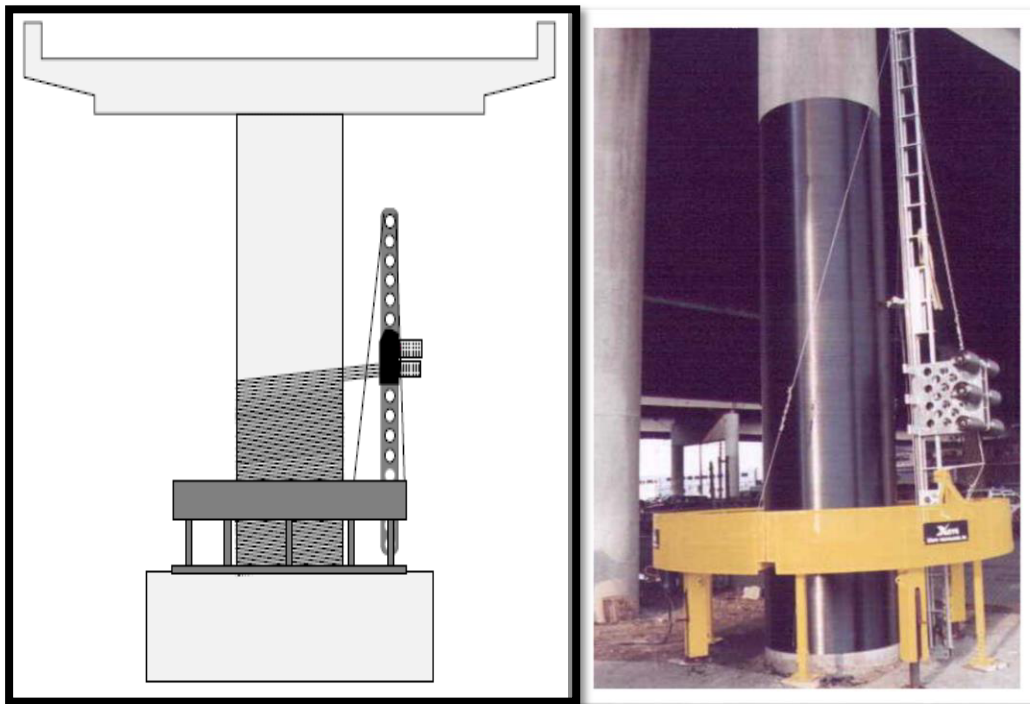


**Figure II. 3 :** Stratification au contact (WBAC 2003)

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

#### b) -Enroulement filamentaire :

La technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur. Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du «PRF », l'orientation de la fibre et le contrôle de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. L'idée de confiner le béton par enroulement de fibres continues imprégnées par la résine a été mentionnée pour la première fois par Fardis et Khalili (1981).

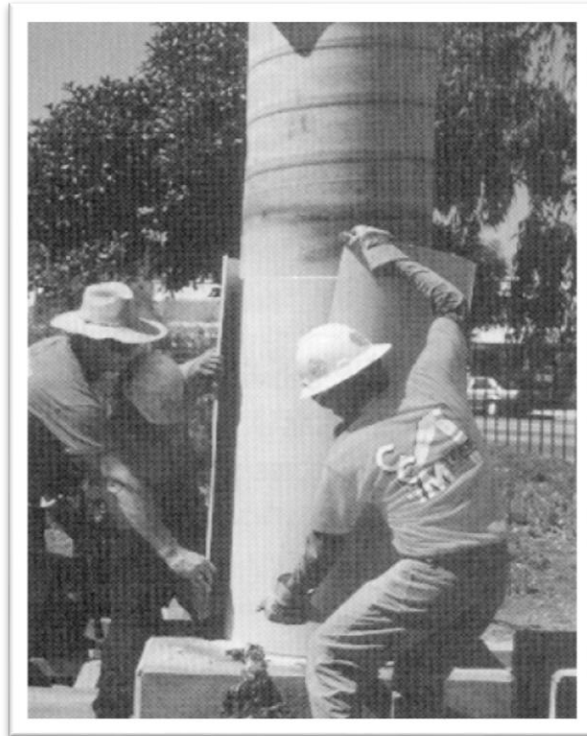


**Figure II.4 :** Enroulement filamentaire ((a) Monti 2003, (b) Master Builders, Inc. and Structural Préservation Systems 1998, Balaguru et al. 2009)

#### c)- Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » :

Le renforcement est assuré par des chemises en «PRF » sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles ont une forme demi cercles ou demi rectangles (Nanni et Norris 1995, Ohno et al. 1997), ou des cercles avec une fente ou en rouleaux continus (Xiao et Ma

1997). Le contact est assuré par un adhésif (Xiao et Ma 1997) ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne (Nanni et Norris 1995, Ohno et al. 1997).



**Figure II.5 :** Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF » (Monti 2003)

### **II.2. 3. Comparaison des méthodes de renforcement :**

Les avantages et inconvénients de chacune des trois méthodes présentées sont résumés dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1.** Comparaison des différentes méthodes de renforcement des colonnes

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<b>Stratification au contact</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité.</li> <li>- Facilité de manutention et de mise en œuvre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un bas niveau de contrôle de la qualité.</li> <li>- Demande beaucoup de main d'œuvre par rapport aux autres techniques.</li> </ul>
<b>Enroulement filamenteux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un contrôle amélioré de la qualité.</li> <li>- Une main d'œuvre réduite sur chantier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de flexibilité.</li> <li>- Exige un équipement spécial</li> </ul>
<b>Coquille préfabriqué</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleur contrôle de la qualité.</li> <li>- Une main d'œuvre réduite sur chantier.</li> <li>- Utile pour modification de la forme des colonnes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilité</li> <li>- Cout de la préfabrication.</li> </ul>

#### II.2.4. Définition du module de confinement et de la contrainte de confinement :

Le module de confinement  $E_l$  et la contrainte de confinement  $f_l$ , sont considérés comme les deux paramètres principaux affectant la capacité portante des cylindres en béton confinés par FRP [28,29,30,31,32,33,34,35,36,37]. Ils sont donnés par les équations suivantes :

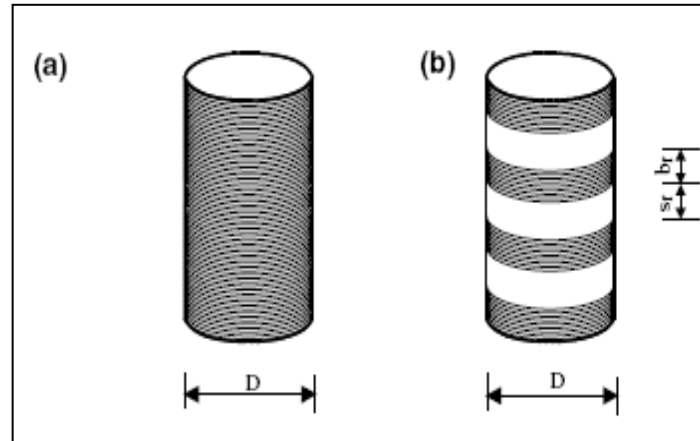
$$E_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \text{ et } f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot f_f \quad (\text{II.1})$$

Avec  $E_f$  le module d'élasticité du FRP ; le  $f_f$  la résistance à la rupture en traction du FRP ; et le  $\rho_f$  la fraction volumique du FRP au béton et  $t_f$  l'épaisseur de la fibre, qui peut être déterminé comme suit :

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f}{D} \quad (\text{II.2})$$

Pour les cylindres entièrement enveloppés, la fraction volumique du FRP au béton est donnée par la relation (II.3).

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D(b_f + s_f)} \quad (\text{II.3})$$



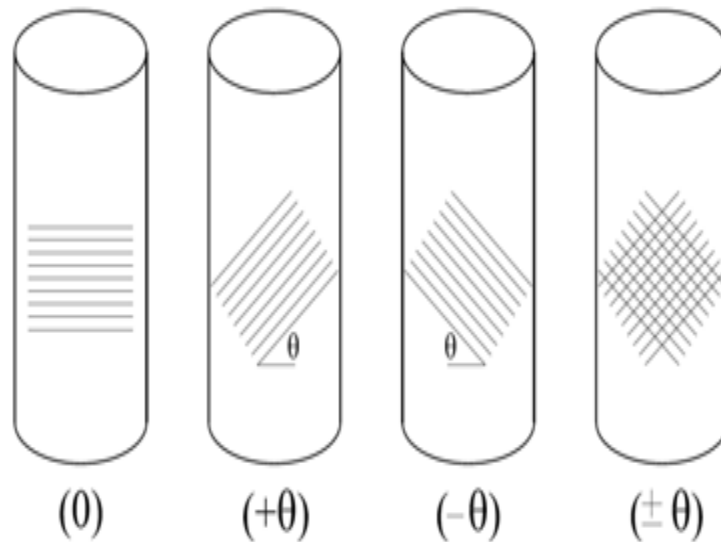
**Figure II.6:** Différents niveaux de confinement [29].  
*a) Cylindre entièrement enveloppé ; b) Cylindre partiellement enveloppé*

### II.3. Synthèse bibliographique exhaustive :

**A.R. Rahai and al [40]** dans leur travail, ils se sont concentrés sur les applications d'enveloppes de PRF en carbone (PRFC) avec diverses orientations de fibres et différentes épaisseurs de couches pour augmenter la résistance axiale et la ductilité des colonnes de béton circulaires non renforcées. Une étude expérimentale sur des cylindres de béton confinés avec des composites PRFC sous chargement axial a été réalisée. Ensuite, une modélisation analytique a été réalisée sur le comportement contrainte-déformation des cylindres de béton circulaires recouverts de CFRP. Un total de 23 cylindres de béton de contrôle enveloppés de PRFC et de 7 cylindres de béton non confinés de diamètre de 150 mm et de hauteur de 300 mm ont été préparés et testés sous compression uni axiale.

Les principaux paramètres expérimentaux considérés sont : l'épaisseur de l'enveloppe et l'orientation des fibres. Quatre épaisseurs d'enveloppes différentes de 0,9, 1,8, 2,7 et 3,6 mm (1, 2, 3 et 4 couches) et quatre orientations de fibre de 0°, 90°, +45° et -45° par rapport à

la direction du cercle ont été étudiées. Les orientations des fibres sont représentées sur la figure II.7.



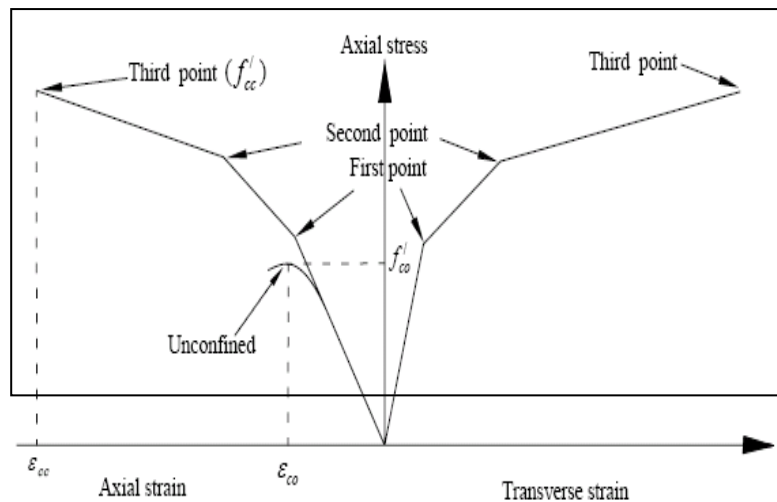
**Figure II.7.** Orientation des fibres dans les cylindres enveloppés de PRFC[40]

**Mirmiran and Shahawy [16]** ont mené des expériences sur des tubes en PRF remplis de béton de  $152,5 \times 305$  mm, chargés axialement et constitués de fibres de verre E unidirectionnelles à  $\pm 15^\circ$  d'angle d'enroulement. Différentes épaisseurs de l'enveloppe de 6, 10 et 14 couches ont été examinées, tandis que l'angle d'enroulement était fixe. Leurs résultats ont indiqué qu'à mesure que l'épaisseur de l'enveloppe augmentait, la résistance et la ductilité augmentaient également. Cependant, leur étude a été concentrée sur une configuration d'angle d'enroulement (angle d'enroulement  $\pm 15^\circ$ ) sans aucune discussion approfondie sur ce paramètre.

**Rochette and Labossiere [41]** ont étudié l'influence de l'épaisseur de l'enveloppe et de la forme de la section transversale (circulaire, carrée et rectangulaire) sur la résistance de la colonne en béton. Les enveloppes avaient une orientation d'angle de  $0^\circ$  par rapport à l'axe horizontal, à l'exception d'une colonne carrée enveloppée avec la configuration  $\pm 15^\circ / 0^\circ$  (angle-cerceau). Leur étude sur l'orientation des fibres a été limitée à une configuration de test et une configuration de cerceau.

**Pessiki et al. [42]** ont réalisé des expériences sur des éprouvettes de béton carré et circulaire à petite échelle sous charge axiale. Les enveloppes de PRF étaient composées de PRVF multidirectionnel à  $0^\circ / \pm 45^\circ$ , de PRFV unidirectionnel à  $0^\circ$  et de pellicules de PRFC à  $0^\circ$ . La résistance à la compression augmentait de 128% pour les spécimens circulaires de petite taille avec une enveloppe de PRF de  $0^\circ / \pm 45^\circ$  et 244% pour les échantillons circulaires avec des enveloppes en PRFC de  $0^\circ$  à deux épaisseurs. En outre, par rapport aux éprouvettes sans enveloppe, les contraintes axiales ultimes (au pic) ont augmenté d'environ sept fois.

**Chaallal et al [13]**, ont développé un modèle de confinement qui décrit le comportement des colonnes de béton rectangulaires avec FRP. Le tissu composite est collé sur la circonférence des spécimens considérés. Le chargement appliqué est une charge axiale de compression. 90 spécimens rectangulaires représentant deux résistances de béton (21MPa et 41MPa), et cinq nombres différents des couches de FRP (0, 1, 2, 3 et 4) ont été considérés. Les résultats d'essai ont montré que le confinement réalisé par le FRP améliore la portance et la ductilité des colonnes rectangulaires.



**Figure II.8.** Modèle tri linéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales.

**Li et al. [43]** ont conduit une étude expérimentale sur 27 cylindres de béton enveloppés avec six orientations de fibres. Ils ont constaté que la résistance, la ductilité et le mode de rupture des cylindres en béton FRP dépendent de l'orientation des fibres et de l'épaisseur de l'enveloppe composite. Les fibres orientées selon un certain angle entre la direction du cercle

et la direction axiale peuvent donner une résistance inférieure aux fibres le long de la direction transversale ou dans la direction axiale.

**Mahfoud Touhari and RatibaMitiche-Kettab[44]** ont étudié le comportement des cylindres en béton armé de PRF soumis à une charge de compression axiale. Au total, 54 bouteilles en béton armé PRF avec 2 types d'enveloppes composites en PRF, un polymère renforcé de fibres de Carbone (PRFC) et un polymère renforcé de fibres de verre (PRFV) ont été testées sous compression axiale monotone. Les effets de plusieurs paramètres tels que la résistance du béton non confiné, le type de composite de PRF et le nombre de couches de PRF sont étudiés. Trois différents mélanges de béton ont été examinés, avec une moyenne de résistance à la compression de 26, 40 et 60 MPa. La contrainte circonférentielle de rupture de PRF et l'effet de la pression de confinement latéral efficace ont été étudiés. La résistance maximale à la compression axiale et la déformation correspondante des cylindres de béton confinés en FRP et non confiné ont été comparées. Les résultats obtenus montrent que les cylindres renforcés en PRFC procurent une augmentation significative de la contrainte de compression finale par rapport à ceux renforcés par le PRFV. Un nouveau modèle est présenté pour prédire la résistance axiale en compression et la contrainte correspondante des colonnes confinées en PRF



**Figure II. 9.** Modes de rupture typiques des éprouvettes renforcées de PRF : (a) et (b) rupture des enveloppes en PRFV de haut en bas, (c) rupture annulée des enveloppes en PRFC, (d) rupture localisée en

PRFC en section inférieure, (e) rupture CFRP localisée à la section supérieure, f) une rupture localisée en PRFC à la section médiane[44].

Au total, 54 cylindres de béton enveloppés de PRF ont été soumis à une compression axiale monotone. Trois lots de béton (faible, normale et haute résistance), trois nombres différents d'enveloppes et deux types de PRF (enveloppes PRFC et PRFV) ont été étudiés. Les améliorations de la résistance et de la ductilité du béton confiné en PRF des cylindres sont significatives. L'amélioration de la contrainte et de la déformation dépend du type d'enveloppes composites de PRF, de la résistance du béton témoin (non confiné) et du nombre de couches de renforcement.

Les résultats obtenus montrent que :

1. Les résistances et les déformations des spécimens confinés avec des matériaux en PRF sont grandement améliorées par rapport aux cylindres en béton non confinés ;
2. La rupture de toutes les colonnes en béton confiné est marquée par la rupture des matériaux en PRF, elle se produit prématurément. La contrainte ultime des enveloppes est beaucoup plus faible que la contrainte de rupture obtenue à partir du test de traction ;
3. La réaction contrainte-déformation observée des cylindres en béton armé PRF peut être divisée en trois zones distinctes. La première zone est approximativement linéaire correspondant à la forme passive du matériau FRP et la deuxième zone est non linéaire en tant que zone de transition. Dans la troisième zone, le confinement de PRF est activé pour fournir une capacité de charge supplémentaire ;
4. Les résultats des essais indiquent que les échantillons de béton confinés en PRF de Carbone ont des résultats significativement meilleurs par rapport au cas de PRF en verre ;
5. L'efficacité de confinement diminue avec l'augmentation de la résistance du béton non confiné, la même quantité de FRP conduit à une augmentation de la résistance à la compression d'environ 69%, 40% et 31% respectivement pour les résistances basses, normales et élevées ;
6. Les forces et contraintes ultimes augmentent significativement avec l'augmentation du Nombre de couches composites, mais l'effet n'est pas directement proportionnel au nombre de couches ;
7. Le confinement avec des matériaux en PRF a produit un champ de contrainte triaxial dans le béton, ce qui a permis d'améliorer la résistance à la compression, la contrainte

maximale et la déformation. Sur la base des résultats expérimentaux observés, un nouveau modèle de résistance à la compression est proposé. Ce modèle prouve que la capacité ultime des cylindres en béton armé de PRF, donnée en termes de résistance ultime et de déformation axiale, dépend de la pression de confinement effective à la rupture et de la résistance du noyau de béton non confiné. Un bon accord a été obtenu entre les résultats du modèle expérimental et proposé.

**Michel LeBlanc[46]** a présenté les résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement de colonnes circulaires en béton de 1000 mm de hauteur, confinées à l'aide d'enveloppes de fibre de carbone (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer) collées en surface. Le composite utilisé est un CFRP bidirectionnel collé à l'aide d'une résine d'époxy qui a été conçue pour une utilisation structurale.

Les objectifs spécifiques visés par cette étude sont : (a) Évaluer l'influence du rapport longueur sur diamètre ( $L/D$ ) sur la performance des colonnes, (b) Évaluer l'influence de la résistance du béton en compression ( $f_c$ ) sur la performance des colonnes, (c) Évaluer l'influence du nombre de plis de confinement sur le comportement des colonnes et (d) Comparer les résultats expérimentaux obtenus avec les formules empiriques existantes.

Pour mener à bien cette investigation, deux programmes de recherche ont été réalisés : un programme préliminaire exploratoire comportant l'étude de 12 cylindres de  $200 \times 200$  mm et un programme principal comportant l'étude de 36 colonnes de 1000 mm de hauteur. Le programme principal est ciblé pour étudier les paramètres suivants : (a) le diamètre des colonnes (150 et 200 mm), (b) la résistance du béton (15, 30 et 40 MPa) et (c) le nombre de plis de confinement (sans pli, un pli et deux plis).

En général, les résultats montrent que la résistance en compression des colonnes augmente lorsque le nombre de plis de CFRP augmente. Le gain maximum de résistance en compression a été de 98 % pour les colonnes confinées de deux plis par rapport aux colonnes non confinées de la série de béton de 15 MPa. Par ailleurs, le gain en résistance est supérieur lorsque la résistance du béton est moindre.

Les trois paramètres ( $L/D$ ,  $f_c$ , nombre de plis de confinement) ont influencé, de façon plus ou moins prononcée, la performance de la colonne. Plus spécifiquement, l'effet de confinement relié au diamètre des colonnes varie en fonction du degré de confinement des colonnes. En fait, la résistance à la compression des colonnes confinées de 200 mm est supérieure de 27 % à celle des colonnes non confinées de 150 mm. Inversement, les gains de résistance à la

compression des colonnes confinées de 150 mm ont été supérieurs à ceux des colonnes de 200 mm pour les confinements à l'aide d'un pli et de deux plis de CFRP. Ceci laisse croire que, compte tenu de leur plus grande rigidité, les colonnes de diamètre de 200 mm nécessiteraient un plus grand degré de confinement (3 ou 4 plis) pour atteindre le même gain de résistance que les colonnes de 150 mm.

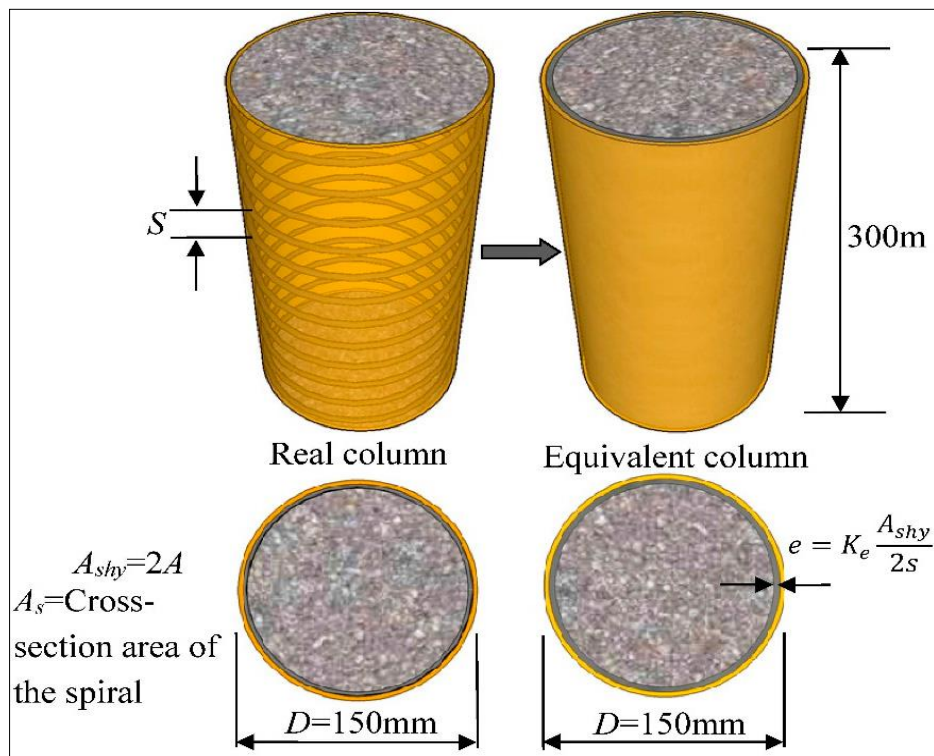
Aucune tendance prédominante ne s'est dégagée de l'étude quant à l'emplacement des ruptures des colonnes. Par ailleurs, aucune relation évidente n'a été observée entre le niveau de contrainte atteint, l'emplacement et l'importance de la fissuration pour une colonne donnée. La colonne de 150 mm de la série de 30 MPa a atteint des déformations axiales et transversales supérieures aux autres colonnes. Une déformation maximale de 10 800  $\mu\epsilon$  a été atteinte transversalement par une colonne de 150 mm de la série de 30 MPa, confinée à l'aide de deux plis de CFRP. Cette déformation s'approche de la déformation ultime spécifiée par le manufacturier, de l'ordre de 14 000  $\mu\epsilon$ .

**Chaallal et al.[39]**, ont présenté les résultats expérimentaux obtenus sur des colonnes en béton non armé confinées avec des tissus en « PRF » de carbone collé sur le support béton en surface. 24 essais ont été réalisés sur des colonnes circulaires de diamètre 150 mm et 200 mm et 1000 mm de hauteur.

Six modèles de confinement choisis ont été utilisés pour réaliser une comparaison détaillée entre les résultats expérimentaux et les résultats donnés par les modèles de comportement considérés. Les paramètres de comparaison sont : le rapport de la résistance à la compression du béton confiné sur celle du béton non confiné ( $f'_{cc}/f_{co}$ ), le gain sur la charge ultime des colonnes. Les résultats de cette recherche ont permis de conclure que pour des colonnes de béton à faible résistance, les modèles théoriques existants dans la littérature surestiment la résistance du béton confiné, et par conséquent, la charge ultime des colonnes.

**Liang Huang et al[47]** ont présenté les résultats expérimentaux et la modélisation analytique du comportement en compression axiale des cylindres en béton confinés à la fois par un tube en polymère renforcé de fibres de verre (GFRP) et un renfort en spirale en acier interne (SR). La structure en béton est appelée béton confiné GFRP-SR. Le nombre de couches de GFRP (1, 2 et 3 couches) et les ratios volumétriques de SR (1,5% et 3%) étaient les variables expérimentales. Les résultats des essais indiquent que le confinement en tube GFRP et en SR augmente remarquablement la résistance ultime à la compression, la capacité de dissipation

d'énergie et la ductilité du béton. Le rapport volumétrique de SR a une influence plus prononcée sur la capacité de dissipation d'énergie du béton confiné avec plus de couches de PRFV.



**Figure II.10** : Concept de béton confiné en acier équivalent [47]

Ils ont formulé les conclusions suivantes :

1. Une augmentation significative de la résistance et de la ductilité du béton peut être obtenue en utilisant des tubes en PRFV et des SR. Contrairement au processus explosif observé dans les bouteilles de béton confinées en PRFC, le processus de rupture du béton confiné PRF-SR était calme et le béton confiné PRF-SR avait une bonne résistance à la compression résiduelle après la rupture du PRFV ;
2. L'augmentation du rapport SR volumétrique pour un cylindre ayant le même confinement FRP entraîne une augmentation des pressions latérales de confinement maximales réelles des tubes en PRFV, ce qui est différent des résultats d'Eid et Paultre (2009) [33] pour CFRP-TSR confiné béton.

**H. Zhaoa And M. N. S. Hadi[49]** ont présenté leur idée qui consiste à installer des matériaux relativement bon marché tels que des mailles en fibre de verre domestique et des treillis en acier galvanisé  $12,7 \times 12,7$  dans le coffrage des colonnes. Un total de 12 éprouvettes cylindriques, d'une longueur de 925 mm et 205 mm diamètre, ont été coulés et testés sous charge concentrique, excentrique et pure en flexion.

Les résultats des tests ont montré que les treillis en acier galvanisé (S12.7WM) ont considérablement amélioré la capacité de charge sous des charges concentriques et excentriques, mais n'a pas augmenté significativement la ductilité des colonnes pour chaque cas de charge. FGFM a significativement amélioré la ductilité de colonnes sous chargement concentrique, mais la signification a diminué avec l'augmentation de l'excentricité.

**Kargahi M.[50]** évalue la résistance des tubes en «PRF » remplis de béton soumis à une compression uni-axiale. Les tubes sont à base de filaments en fibres de verre type E avec une résine de polyester enroulés à un angle de  $\pm 75^\circ$  par rapport à l'axe longitudinal du tube. Une augmentation de la résistance du béton de l'ordre de 2,5 à 3,5 fois la résistance du béton non confiné est rapportée

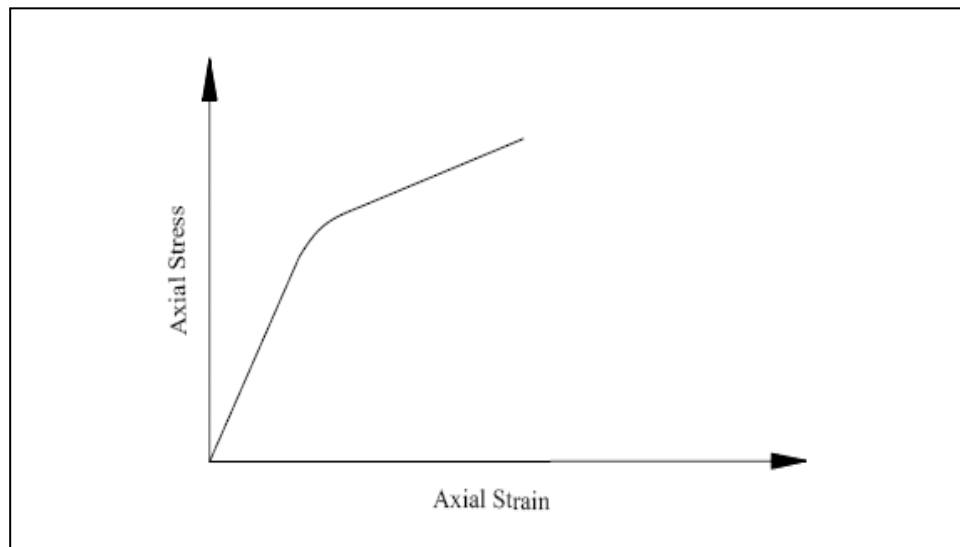
**Picher et al[51]** ont examiné l'effet de l'orientation des fibres de confinement sur le comportement des cylindres en béton confinés à l'aide de «PRF ».

Les observations suivantes sont énoncées

- Le confinement en « FRP » procure aux cylindres une ductilité et une résistance à la compression accrues ;
- Cette technique de confinement en «PRF » est également efficace pour les colonnes rectangulaires ;
- Bien que la rigidité axiale diminue avec l'angle d'orientation, la ductilité reste quasiment constante ;

**Mirmiran et Shahawy [16]**, ont effectué 30 essais de compression uni axiale sur spécimens cylindriques de dimensions ( $\emptyset 152,5 \times 305$  mm), 24 spécimens sous forme de tubes en FRP remplis du béton et 6 spécimens de béton témoin. La résistance de béton témoin varie entre 29,6 et 32MPa. Les résistances des tubes de FRP se sont étendues de 524MPa à 641MPa. Les chercheurs ont rapporté que la rupture de cisaillement était le mode de rupture primaire, ils

ont noté qu'à la courbe contrainte déformation de béton confiné par FRP est une fonction bilinéaire sans la branche descendante.



**Figure II. 11** : Courbe contrainte-déformation du béton confiné par FRP [16].

*Saafi et al*[25] ont conduit des études expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de CFRP et de GFRP. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression du béton. La résistance à la compression moyenne du béton moyenne est de 38MPa à 28 jours. Ils ont constaté que les colonnes renforcées par les tissus en fibres de carbone ou en fibres de verre montrent une croissance significative de la résistance et la ductilité comparées à celles des spécimens non confinés.

Le taux d'accroissement dépend de l'épaisseur, des propriétés mécaniques du tube composite et de la résistance du béton témoin. Le mode de rupture des spécimens composites a été généralement marqué par la rupture du tube de fibre avec l'éclatement le long de mi-hauteur du spécimen (Voir figure ci-dessous). Dans le cas des tubes de fibre de carbone, la rupture était plus soudaine et a été accompagnée d'une rupture simultanée du tube composite et de l'écrasement du noyau de béton.

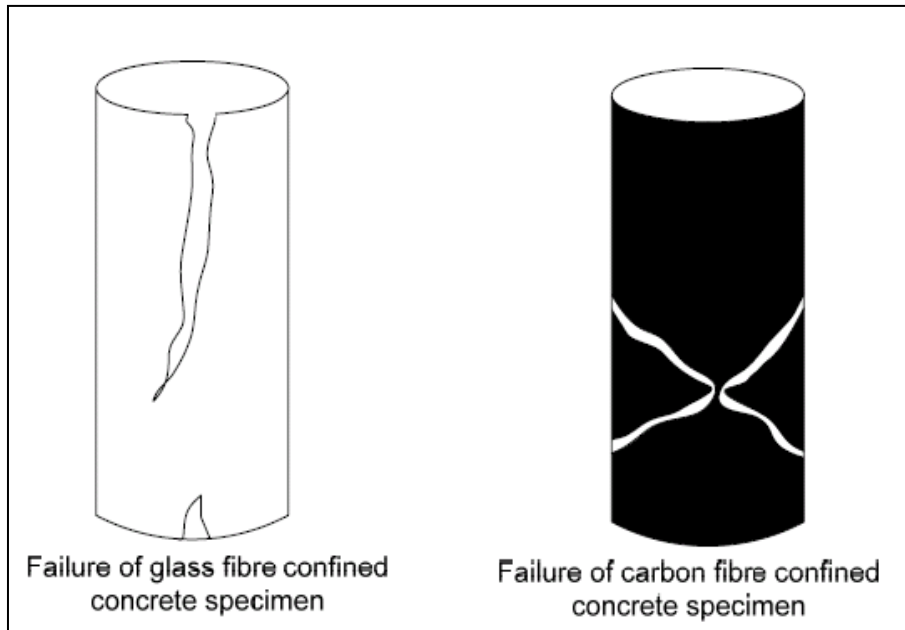


Figure II. 12 : Modes de rupture des spécimens[25].

La courbe contrainte-déformation du béton confiné par les tubes en FRP est illustrée dans la figure suivante, elle présente une allure bilinéaire dans les directions axiales et latérales.

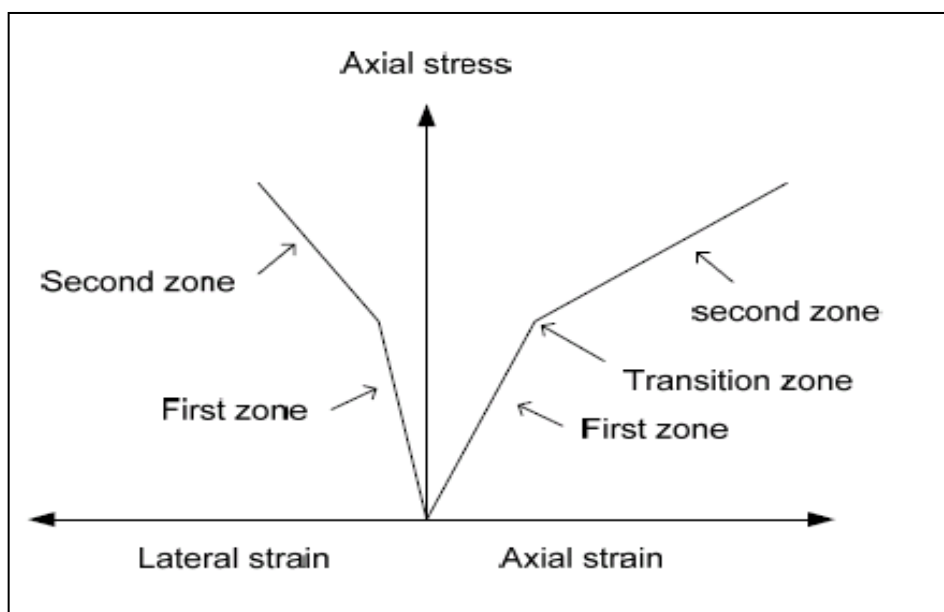
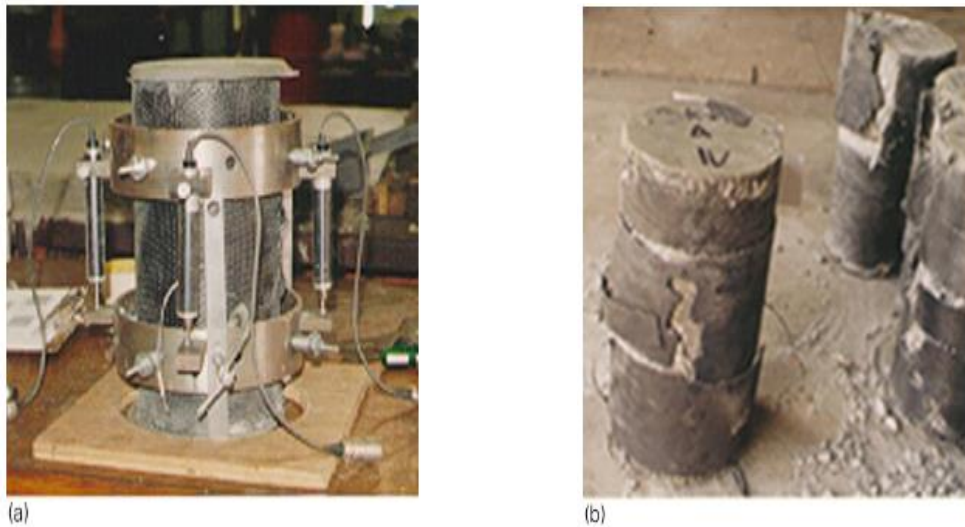


Figure II.13 : Courbe contrainte-déformation simplifiées de béton confiné par FRP[25].

**Shahawy et al[26]** ont réalisé des essais de compression axiaux sur un total de 45 cylindres de béton confiné par fibres de carbone et 10 cylindres de béton non confiné avec un diamètre de 155mm et une hauteur de 305mm. De leurs travaux [73], les auteurs ont constaté que l'enveloppe a augmenté de manière significative la résistance et la ductilité du béton en raccourcissant sa dilatation latérale. Un modèle de confinement qui a été à l'origine développé pour les tubes FRP en verre remplis de béton a montré la bonne concordance avec les résultats d'essai.



**Figure II.14:** (a) Instrumentation ; (b) Mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone[26]

**Rousakis etkarabinis[38]**, ont étudié l'efficacité du confinement des polymères renforcés de fibres «PRF » dans l'amélioration de la ductilité et la résistance des éléments en béton armé soumis à une compression axiale monotone. Les auteurs ont montré que le confinement avec des matériaux composites «PRF » peut améliorer considérablement la résistance à la compression, la ductilité ainsi que la capacité d'absorption d'énergie du béton de faible résistance et la ductilité axiale et radiale des spécimens en béton armé confiné avec des matériaux composites «PRF » a été presque du même niveau que celle des spécimens en béton confinés seulement avec des matériaux composites «PRF ».

**Abbasnia et Ziaadiny**[53] ont présenté les résultats d'une série d'essais de compression axiale cyclique sur 10 spécimens prismatiques carrés (152 x 152 x 305 mm) avec un rayon de coins  $R = 29$  mm. Les échantillons ont été soumis à divers modes de chargement cyclique pour examiner différents aspects du comportement cyclique du béton confiné avec des matériaux composites «PRF». Les résultats des essais ont montré que la courbe enveloppe de la courbe contrainte-déformation cyclique des spécimens prismatiques carrés en béton confinés avec des matériaux composites «PRF» est approximativement la même que celle du même béton sous chargement axiale monotone.

**Bavarian et al.** [57] étudient les effets de collage en surface de plaques en «PRF» sur les contraintes et les déformations de cylindres en béton. Trois dimensions de cylindres ont été proposées :  $\varnothing 75 \times 150$  mm,  $\varnothing 100$  mm x 200 mm, et  $\varnothing 150 \times 300$  mm, et deux types de matériau composite (verre de type-S et Kevlar-29) sont retenues. Les résultats obtenus montrent que la contrainte et la déformation ultimes ont doublé et triplé pour respectivement 4 épaisseurs de «PRF» en verre de type-S et 4 épaisseurs de Kevlar-29.

**Haroun et al.** [58] ont présentés les résultats d'essais cycliques sur des colonnes de pont réhabilités à l'aide d'enveloppes en matériau «PRFC» extérieurement collées. Les résultats montrent que la rigidité latérale des colonnes n'a pas changé suite à l'ajout de l'enveloppe en «PRFC», et par conséquent, les propriétés cycliques ne changent pas quand on utilise cette méthode de réhabilitation et de renforcement.

**Watanabe et al.** [59] ont étudié expérimentalement et analytiquement l'effet du confinement à l'aide des matériaux composites «PRF» sur la résistance et la ductilité de cylindres en béton soumis à la compression uni-axiale. Des cylindres en béton de dimensions  $\varnothing 100$  mm x 200 mm confinés à l'aide de matériaux composites «PRF» ont été testés en compression. Les paramètres d'essai sont : le type et le nombre de couches de «PRF», types de matériaux composites «PRF». Le nombre de couches de «PRF» est varié de 1 à 4. Les résultats montrent que la résistance à la compression des cylindres de béton réhabilités à l'aide de matériaux composites «PRF» extérieurement collés augmente linéairement avec le nombre de couches de «PRF».

**Shehata et al. (2002) [61]** conduisent un programme expérimental comprenant des essais sur 54 colonnes courtes en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité de colonnes en béton confiné sur la face externe en les recouvrant de tissus en « PRFC ». Les variables étudiées sont : la forme de la section transversale (circulaire, carrée et rectangulaire), la quantité de renforcement caractérisée par le nombre de couche de « PRFC » appliquées aux spécimens (une ou deux couches). Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité de confinement est très influencée par la géométrie de la section des colonnes (circulaire, carrée et rectangulaires) et la pression de confinement exprimée par le nombre de plis de l'enveloppe « PRFC ».

**Pan et al. [60]** présentent les résultats d'une étude expérimentale réalisée sur 6 colonnes élancées de béton armé de section rectangulaires (120 mm x 150 mm) modifiées en section elliptiques enveloppées avec des composite en «PRF », avec un rapport L/b variant entre 4,5 et 17,5 soumises à un chargement de compression axiale. Les résultats montrent que l'effet de l'élancement sur la charge ultime des colonnes en béton enveloppées par «PRF » est plus significatif que celui des colonnes de béton armé ordinaire

## **Conclusion du chapitre**

Cette recherche bibliographique a montré que l'utilisation de matériaux composites pour le confinement de béton, procure à ces éléments confinés, soumis à différents chargements, un comportement ductile. Le confinement permet d'améliorer sensiblement la résistance ultime et la déformation correspondante au pic. Des chercheurs ont montré également que lorsque le nombre de couches de l'enveloppe composite augmente, la résistance augmente également. Les forces et contraintes ultimes augmentent significativement avec l'augmentation du nombre de couches composites, mais l'effet n'est pas directement proportionnel au nombre de couches ;

Dans ce travail de recherche, on s'est intéressé à étudier l'influence de nombres de couches de l'enveloppe composite sur le degré de confinement, dans le but d'optimiser le nombre de couches nécessaires pour réaliser un bon confinement en toute sécurité et économie avec un seuil de résistance acceptable et d'autres part étudier le mode d'endommagement des cylindres en béton confinés partiellement. Dans cette optique, le troisième chapitre sera totalement dédié aux investigations expérimentales du comportement des cylindres en béton confinés par plusieurs couches de tissus en fibres de verre FRP et de déterminer ainsi l'évolution du degré de confinement en fonction du nombre de couches de l'enveloppe composite.

---

***CHAPITRE III :***

***INVESTIGATIONS  
EXPERIMENTALES***

---

## CHAPITRE III : INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES

### III. 1. Introduction

Le présent chapitre est totalement consacré à l'étude expérimentale réalisée dans le but d'une part de caractériser les différents matériaux utilisés, à savoir : le béton et le tissu de fibres de verres FRP et d'autre part d'étudier le comportement des différentes variantes de cylindres de béton confinés totalement et partiellement par du composite FRP. Les différentes étapes de préparation (analyse granulométrique, la formulation du béton, les quantités des constituants, le coffrage, le bétonnage et le démoulage et cure des éprouvettes ainsi que les différents procédés de confinement par le tissu composites (variantes, de confinement) sont présentées et les résultats des essais statiques de compression uni axiale sont présentés et discutés.

La caractérisation classique du comportement mécanique sous un chargement centré axial de compression sur les cylindres permet d'étudier les propriétés mécaniques de résistance, de déterminer les constantes élastiques ainsi que le mode de rupture.

Pour mener à terme cette investigation expérimentale, nous avons tout d'abord effectué un calcul des proportions des constituants du béton, préparé le coffrage, le bétonnage, assuré le mûrissement des éprouvettes, réalisé le collage du tissu FRP autour de la circonférence des cylindres où le support béton a été préalablement nettoyé et enfin, procédé à tous les réglages concernant les essais (machine, paramètres et configuration) et les moyens de mesure. Les cylindres pour chaque série ont été confectionnés à partir du même gâchée du béton. Plusieurs variantes sont considérées : Cylindres de béton de référence (témoin), cylindres confinés par une enveloppe FRP, cylindres confinés par deux enveloppes FRP, cylindres confinés par trois enveloppes FRP. Ces variantes sont considérées pour mettre en évidence l'influence de l'empilement des couches de composite sur le degré de confinement. D'autres essais préliminaires sont également réalisés pour étudier le comportement des cylindres soumis à une pression de confinement variable le long de la hauteur du cylindre, dans le but de mettre en évidence les avantages et inconvénients du confinement d'une partie de l'élément en béton seulement (technique largement utilisée dans la pratique), de déterminer les réponses mécaniques de résistance et d'appréhender le mode de rupture et d'endommagement.

## **III.2. Présentation des matériaux étudiés :**

### **III.2.1. Ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées. Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont finement moulues et broyées, éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile. Cette matière inorganique, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par la suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. On a utilisé un ciment de marque CIMATCEM II /A-L 42.5 R.

### **III.2.2 Sable :**

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée de petits fragments provenant de la désagrégation de roches de nature diverse (notamment silice) ou organique (coquilles, squelettes de coraux...). Les grains de sable sont composés de fragments de roche, de minéraux et peuvent également contenir des débris d'origine organique ou synthétique. En général, les gros granulats sont constitués de fragments de roches tandis que les sables fins sont principalement constitués de minéraux détachés de leur roche d'origine. Dans notre cas nous avons utilisé un sable provient d'une carrière, stocké à l'université, lavé, séché et conservé à l'intérieur du laboratoire (sable sec et propre).

### **III.2.3. L'eau :**

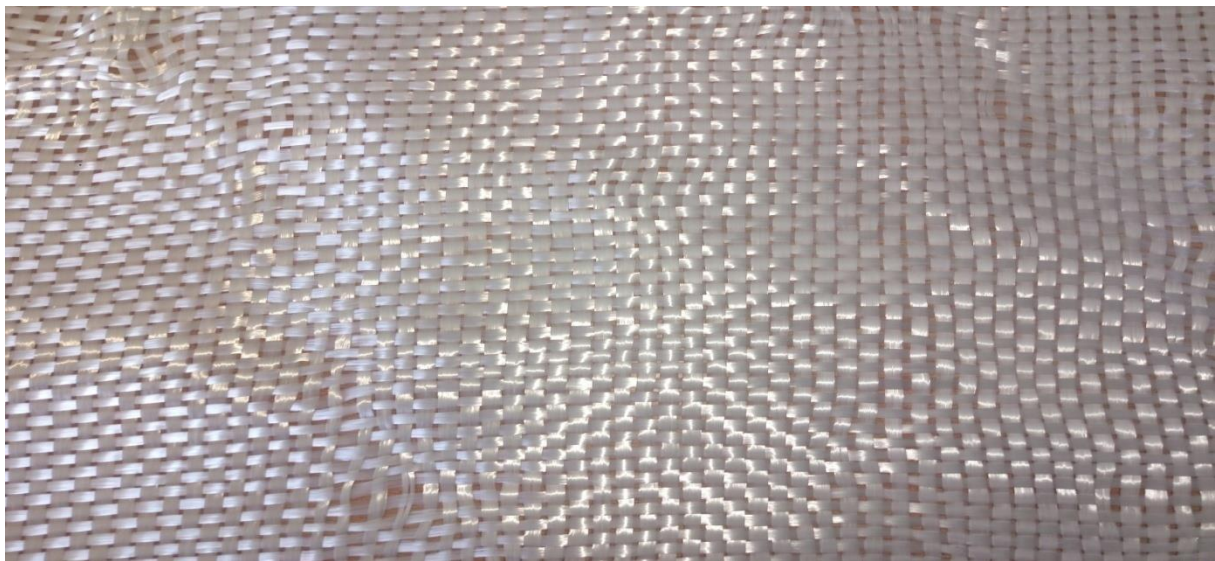
L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau potable (propre).

### **III.2.4. Matériau composite « FRPV » :**

Le confinement des cylindres en béton par un tissu composite à base de fibres de verre permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques à savoir : La résistance ultime à la rupture, la déformation au pic correspondante et la rigidité.

#### III.2.4.1. Tissu de verre :

Le composite utilisé est un tissu bidirectionnel de fibres de verre, qui est un matériau anisotrope. Les fibres de verre ont une résistance élevée, une masse volumique faible, présentent une bonne compatibilité avec la résine, une facilité de mise en œuvre, et un coût faible. Le tissu composite utilisé est montré par la figure III.1. Il est constitué de chaînes (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et de trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaînes). Le comportement de la fibre de verre FRP est élastique. Le matériau est considéré comme un matériau orthotrope. Les caractéristiques géométriques du tissu composite après ensimage et les constantes de rigidité dans les directions principales, sont données par le tableau III.1.



**Figure III.1 :** Tissu de fibres de verre.

**Tableau III.1 :** Caractéristiques géométriques et élastiques du tissu composite

Caractéristiques géométriques	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Maille (mm)	Masse linéique (tex)	Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)
		1 000	390	150	0.31	0.03
Caractéristiques élastiques	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	E1 (MPa)	E2 (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	G <sub>12</sub> (MPa)
		2600	72000	13600	0.31	0.33

### III.2.4.2. Préparation de la résine pour le collage du tissu de fibres de verre :

La résine est composée de composants : La résine (A) organique à performances élevées, de type STR, conçue par Granitex Algérie et un durcisseur (B). La proportion admise pour le mélange est de 25% en masse du composant (B) et 75% en masse du composant (a). Le malaxage par petites quantités est effectué pendant 3 minutes à l'aide d'un agitateur à hélice électrique, avec une vitesse de rotation lente (300t/min maximum) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme de couleur marron clair ou à défaut manuellement en remuant continuellement à faible vitesse pour empêcher l'inclusion de l'air dans le mélange. Il est conseillé, généralement de respecter les recommandations du fabricant quant aux conditions de température et d'humidité. Le durcissement de la résine est obtenu après environ 48 heures à une température ambiante de 25°C. Les essais mécaniques sont réalisés après une dizaine de jours de murissement de la résine (durcissement du matériau composite). Le tableau III.2 résume les caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.

**Tableau III.2** : Caractéristiques de la résine.

Paramètres	Valeur
Densité (ISO 758)	1.1 $\pm$ 0.05 (kg/m <sup>3</sup> )
Viscosité (NF T76-102)	11000 (mPaS) à 25°C
DPU : durée pratique d'utilisation (NFP18 810)	1h15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse 6h Dur 16h
Résistance en compression (NA427)	> 70 (MPa)
Résistance en flexion (NA 234)	> 25 (MPa)
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 (MPa)
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale (A/B)	Résine : 1 Kg Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20 °C	1010 à 1013 ( $\Omega \cdot m$ )

### III.3. Formulation du béton :

#### III.3. 1. Analyse granulométrique et composition :

La formulation et composition du béton utilisé pour préparer les éprouvettes sont réalisés au laboratoire de génie civil de l'université et ainsi qu'au sein de la centrale à béton « YHS »

situé dans la commune d'Ath Mansour, wilaya de Bouira. Tous les détails sont cités ci-dessous :

✓ **Ciment**

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ 45 classe 2

La résistance mécanique assurée par le fabriquant est de 42.5 MPa minimum

✓ **Le sable 0/3**

La masse du sable utilisée est de 1300g.

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)
5	5	5	0.4
2	354	359	28
0.5	600	959	74
0.125	294	1253	96.8
0.08	45	1298	99.8
Fond de tamis		1299	99.99

✓ **Le gravier 3/8**

La masse du gravier 3/8 utilisée est de 3000g

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)
8	26	26	1.6
6.3	648	674	42
5	732	1406	87.9
4	177	1583	98.9
3.15	13	1596	98.9
2	2	1598	99.7
Fond de tamis		1598	99.99

✓ **Le gravier 8/15**

La masse du gravier 8/15 utilisée est de 3000g

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)
20	39	39	1.3
14	1220	1259	42
12.5	688	1947	65
10	706	2654	88.5
8	286	2942	98
6.3	61	3000	100
Fond de tamis	0	/	/

✓ **Le gravier 15/25**

La masse du gravier 15/25 utilisée est de 5000g

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)
25	138	138	2.76
20	2490	2628	52.6
14	2259	4887	97.7
12.5	108	4995	99.9
Fond de tamis	0		

✓ *Le gravier 15/25*

Masse = 400g

- Le volume absolu :  $V_1=400\text{ml} / V_2=560\text{ml}$
- La masse Volumique Abs :  $\rho = \frac{400}{560-400} = 2.5\text{g/ml}$

✓ *Le gravier 3/8*

Masse = 400g

- Le volume absolu :  $V_1=500\text{ml} / V_2=652\text{ml}$
- La masse Volumique Abs :  $\rho = \frac{400}{652-500} = 2.6\text{g/ml}$

✓ *Le gravier 8/15*

Masse = 400g

- Le volume absolu :  $V_1=400\text{ml} / V_2=555\text{ml}$
- La masse Volumique Abs :  $\rho = \frac{400}{555-400} = 2.58\text{g/ml}$

✓ *Le sable*

Masse = 400g

- Le volume absolu :  $V_1=500\text{ml} / V_2=652\text{ml}$
- La masse Volumique Abs :  $\rho = \frac{400}{652-500} = 2.6\text{g/ml}$

*Le Module de Finesse :*

$$Mf = \frac{1}{100} * \sum \text{Refuscumulés en \% destamis}$$

$$Mf = \frac{0.4 + 28 + 74 + 96.8 + 99.8}{100} = 3$$

*Conclusion :  $2.8 < Mf < 3.3 \Rightarrow$  le Sable est un peu grossier*

### III.3.3. Formulation du Béton :

$F_{c28} = 30 \text{ MPa}$  ; Affaissement = 8 cm ;  $D_{\max} = 25 \text{ mm}$

**a) Détermination du rapport E/C :**

On a:  $F_c = G * F_{ce} \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$

- $F_c = 30 * 1.15 = 34.5$
- $F_{ce} = 45 \text{ MPa}$
- $G = 0.6$

Donc :  $34.5 = 0.6 * 45 \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$

$$\frac{C}{E} = 0.5 + \frac{34.5}{27} = 1.78$$

**b) Dosage en Ciment :**

On a  $\frac{C}{E} = 1.78 \Rightarrow C \approx 360 \text{ kg/m}^3$

**c) Dosage en Eau :**

$$\frac{C}{E} = 1.78 \Rightarrow E = \frac{360}{1.78} = 202 \text{ L}$$

Remarque :  $D_{\max} = 25 \text{ mm} \Rightarrow$  Pas de correction d'eau

**d) La Courbe de Référence OAB :**

- Coordonnée de O : (0 ; 0)
- Coordonnée de A : ( $D_{\max}$  ; 100)
- Coordonnée de B : (X ; Y)

$D_{\max} > 20 \text{ mm} \Rightarrow \frac{\text{Module } D_{\max} + 38}{2}$

$$X = \frac{45 + 38}{2} = 41.5$$

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

On a:  $K = +2$

$$K_s = 6 * M_f - 15 = 6 * 3 - 15$$

$$K_s = 3$$

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 2 + 3$$

$$Y = 50$$

$$A = (31.5 ; 50)$$

**e) Pourcentage des constituants d'après la courbe granulométrique :**

Sable = 41.5 % ; Gravier 3/8 = 6% ; Gravier 8/15 = 33.5 % et Gravier 15/25 = 19 %

**f) Coefficient de Compacité «  $\gamma$  » :**

**On souhaite avoir un Béton plastique**

Aff = 8 cm ; Vibration normale ; Dmax = 25 mm

$$\text{Donc : } \gamma = 825$$

Dans notre cas on a un sable et gravillon concassé => on apportera une correction de « -0.03 »

$$\Rightarrow \gamma = 0.825 - 0.03 = 0.795$$

**g) Volume des Granulats :**

$$V_{\text{gra}} = 1000 * \gamma - V_{\text{ciment}} \quad \Rightarrow \quad V_{\text{ciment}} = 360/3100 = 0.116 \text{ m}^3$$

$$\text{Donc : } V_{\text{gra}} = 1000 * 0.795 - 0.116 = 679 \text{ L}$$

**1. Volume Sable :**

$$V_s = \frac{679 * 41.5}{100} = 281.8 \text{ L et } M_s = 281.8 * 2.63 = 741.13 \text{ Kg}$$

**2. Volume Gravier 3/8 :**

$$V_{\text{gra}} = \frac{679 * 6}{100} = 40.74 \text{ L et } M_s = 40.74 * 2.6 = 105.92 \text{ Kg}$$

**3. Volume Gravier 8/15 :**

$$V_{\text{gra}} = \frac{679 * 33.5}{100} = 227.5 \text{ L et } M_s = 227.5 * 2.58 = 587 \text{ Kg}$$

**4. Volume Gravier 15/25 :**

$$V_{\text{gra}} = \frac{679 * 19}{100} = 129.01 \text{ L et } M_s = 129.01 * 2.5 = 322.5 \text{ Kg}$$

**h) La masse Volumique Théorique :**

$M_v = 2116.55 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$  Béton Normal

**III.4. Fabrication et préparation des spécimens cylindriques :****III.4.1. Type d'éprouvette :**

Des cylindres de diamètre 160mm et de hauteur 320 mm ont été réalisés afin de caractériser le béton utilisé, pour des raisons de stabilité. Les cylindres ont été coulés dans des moules normalisés, puis décoffrés au bout de 48 heures. Ils ont subi par la suite, une cure d'hydratation à température modérée et constante pendant 28 jours selon la norme NF EN12390-4 comme indiqué sur la figure III.2.

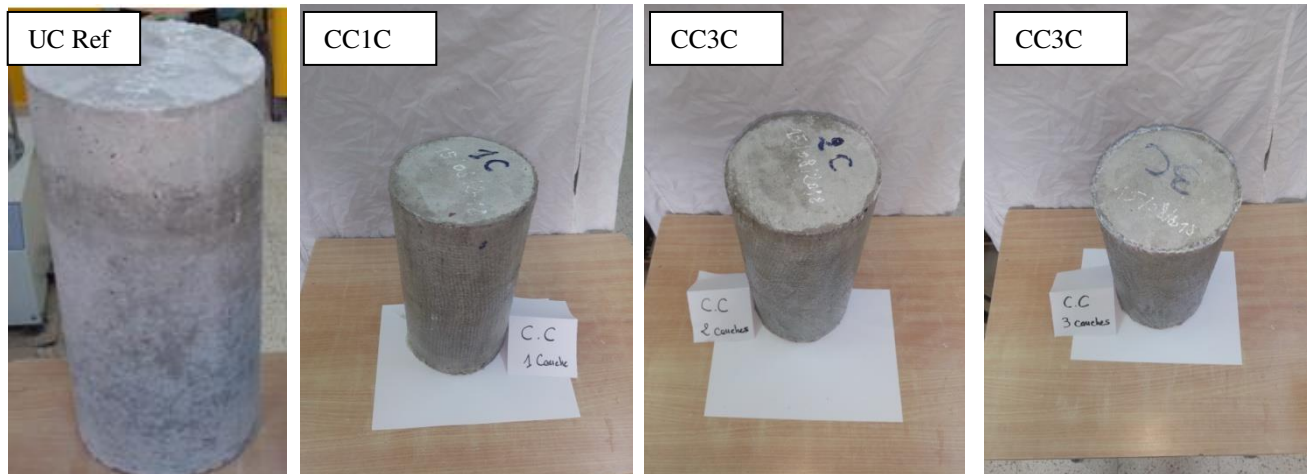
**III.4.2 Variantes considérées :**

Quatre variantes sont considérées : Cylindres de béton de référence (témoin), cylindres confinés par une enveloppe FRP, cylindres confinés par deux enveloppes FRP, cylindres confinés par trois enveloppes FRP. Les cylindres destinés au confinement ont subits un traitement de la surface latérale. Ils ont été nettoyés à l'aide d'un papier verre, dans le but d'obtenir une surface à la fois légèrement rugueuse et propre de toute impureté, pouvant provenir de produits de coffrage ou de laitance du béton.

**III.4.3.Nomenclature des éprouvettes :**

Une nomenclature des éprouvettes a été adoptée pour faciliter l'identification. Les séries d'éprouvettes réalisées sont désignées comme suit :

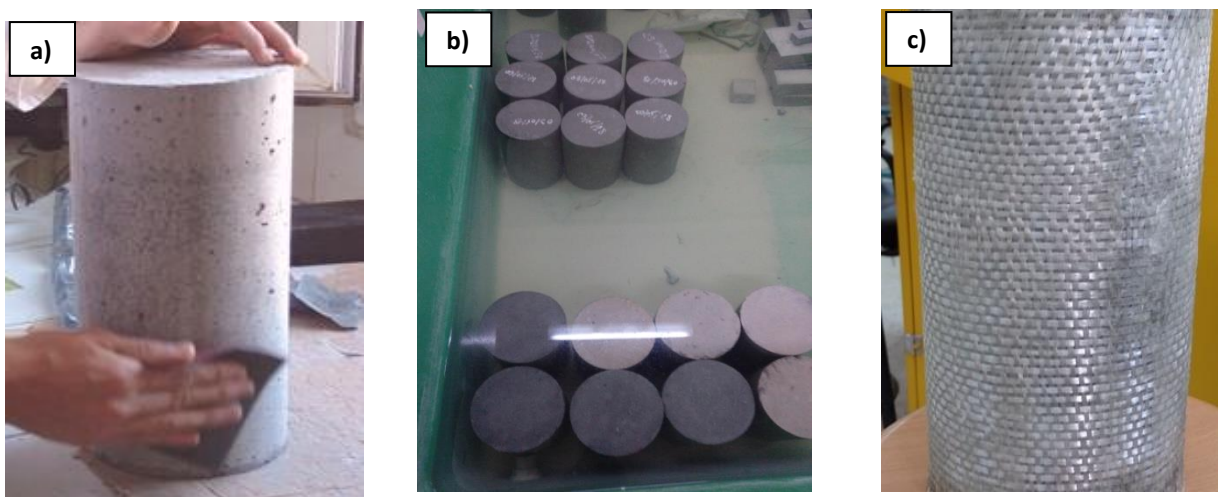
<b>Eprouvettes</b>	<b>Désignation</b>
UC Ref	Cylindre non confiné de référence (témoin)
CC1C	Cylindre confiné avec 1 enveloppe composite (1 couche)
CC2C	Cylindre confiné avec 2 enveloppes composites (2 couches)
CC3C	Cylindre confiné avec 3 enveloppes composites (3couches)



**Figure III.2.** Types de spécimens cylindriques considérés

#### III.4.4. Mise en place du tissu composite 'FRP' :

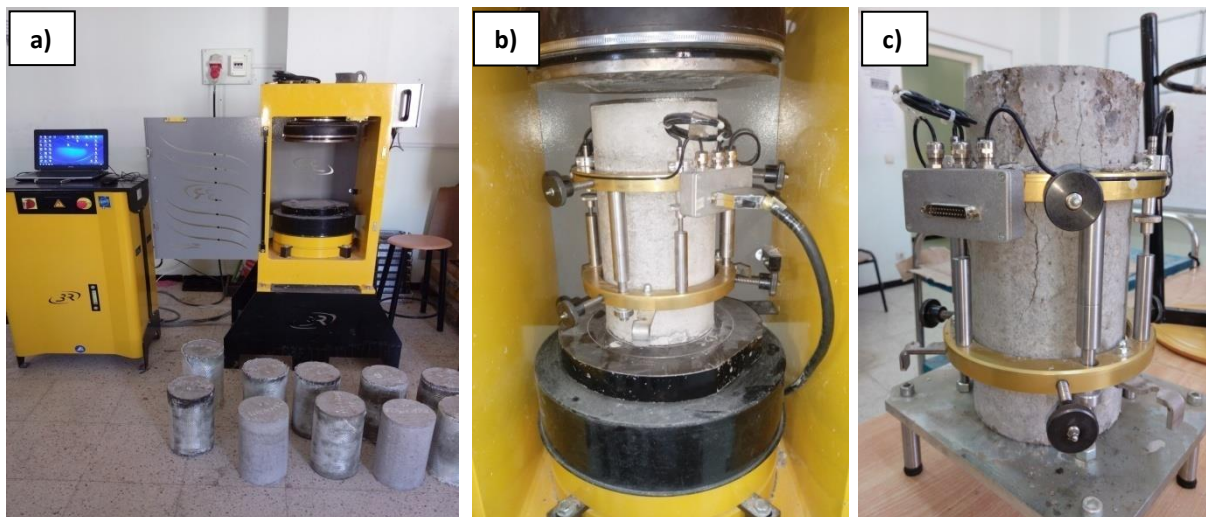
Le matériau composite est confectionné à base d'un tissu de fibres de verre (tissu FRPV) et une résine époxy STR. L'opération consiste à enduire la circonférence du cylindre de béton par une couche de résine et coller le tissu composite FRPV. Après sa pose, le composite FRPV a subi un maroufflage à l'aide d'un rouleau, afin d'éliminer les bulles d'air qui pourraient se former lors du collage. Enfin, terminer l'opération par une couche très fine de résine sur le tissu. Notons qu'un chevauchement du tissu sur le quart du périmètre du cylindre est assuré, comme montré par la figure afin d'éviter le décollement du FRP ainsi que la rupture prématurée aux extrémités du cylindre.



**Figure III.3** Spécimens d'essais : a) préparation du support béton, b) cured'hydratation des cylindres en béton, c) mise en place du tissu composite FRP.

### III.5. Chargement et acquisition des valeurs :

L'essai de compression uni axiale des cylindres de béton de Ø160x320 mm, permet de déterminer les caractéristiques du béton, notamment sa résistance à la compression à 28 jours ainsi que l'allure de la courbe d'évolution des contraintes en fonction des déformations (loi de comportement). L'essai illustré par la figure III.4, est conduit sous un chargement quasi-statique avec une vitesse de 0,5 KN/m. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité 3000 KN de type RP 2000 XPE. Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur fixe et un autre supérieur mobile. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite tous les résultats. Les figures ci-dessous illustrent bien tous les différents chargements et acquisition des résultats.



**Figure III. 4:** Machines d'essais pour les différents spécimens : a) chargements et acquisition des résultats, b) et c) : système LVDT

L'essai est conduit sur 03 cylindres. La valeur moyenne de la résistance caractéristique à 28 jours est de 27,4 MPa.

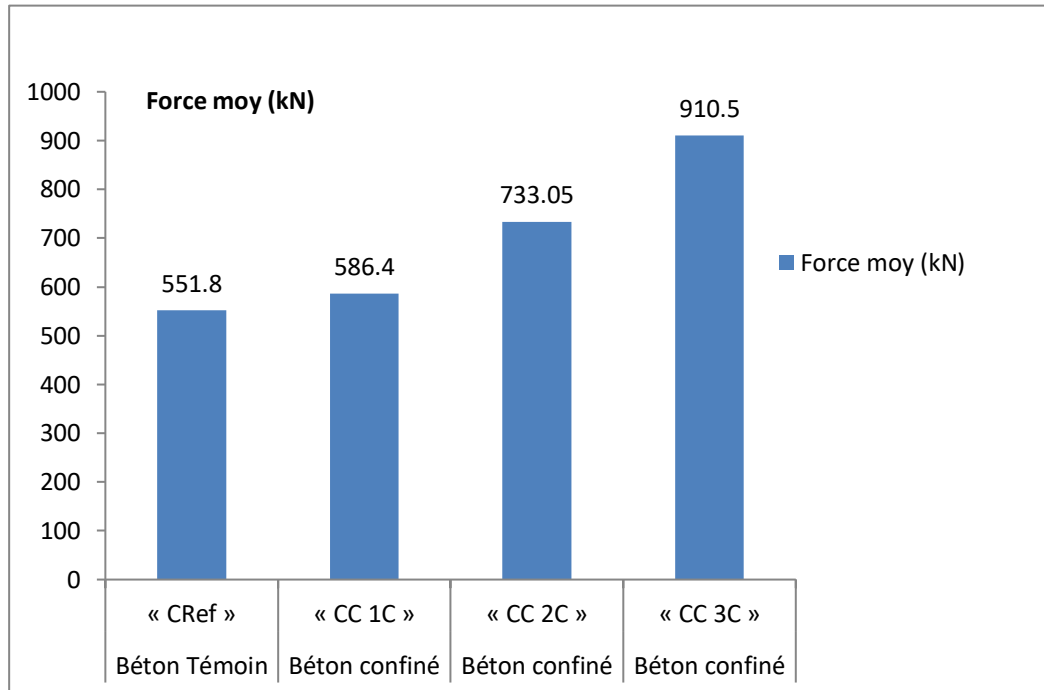
### III.6. Comportement des cylindres en bétons totalement confiné :

La résistance en compression est le paramètre mécanique le plus important du béton. Les éprouvettes pour l'essai de compression sont de type cylindrique de hauteur 320mm et de diamètre 160mm La résistance  $f_{c28}$  est prise comme la valeur moyenne de trois éprouvettes similaires de 28 jours de conservation avec des erreurs inférieures à 15%. Les résultats sont présentés dans le tableau III.3 suivant :

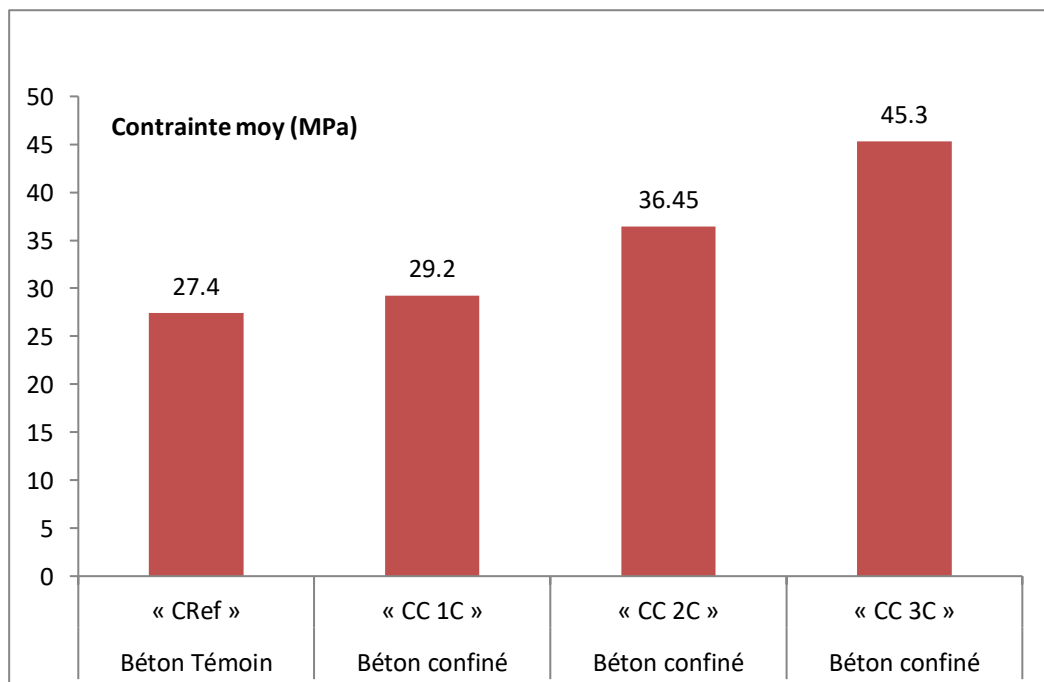
**Tableau III.3** : Valeurs moyennes de la force et contrainte des différentes variantes

	Béton Témoin « CRef »	Béton confiné « CC 1C »	Béton confiné « CC 2C »	Béton confiné « CC 3C »
<b>Force moy (kN)</b>	571,85	581,15	733,05	910,5
<b>Contrainte moy (MPa)</b>	27,40	29,20	36,45	45,3
<b>Masse (g)</b>	14960	15430	15810	15890

a)



b)



c)

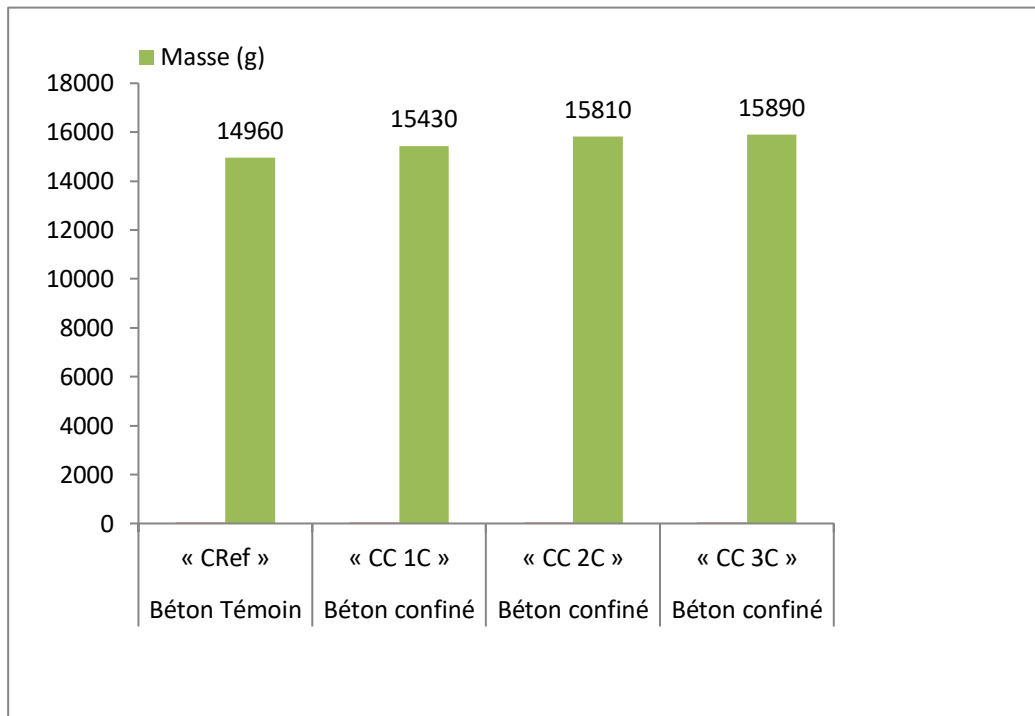


Figure III. 5 : Histogramme des valeurs moyennes pour les différents spécimens : a) charges appliquées, b) contraintes de rupture, c) masses des éprouvettes

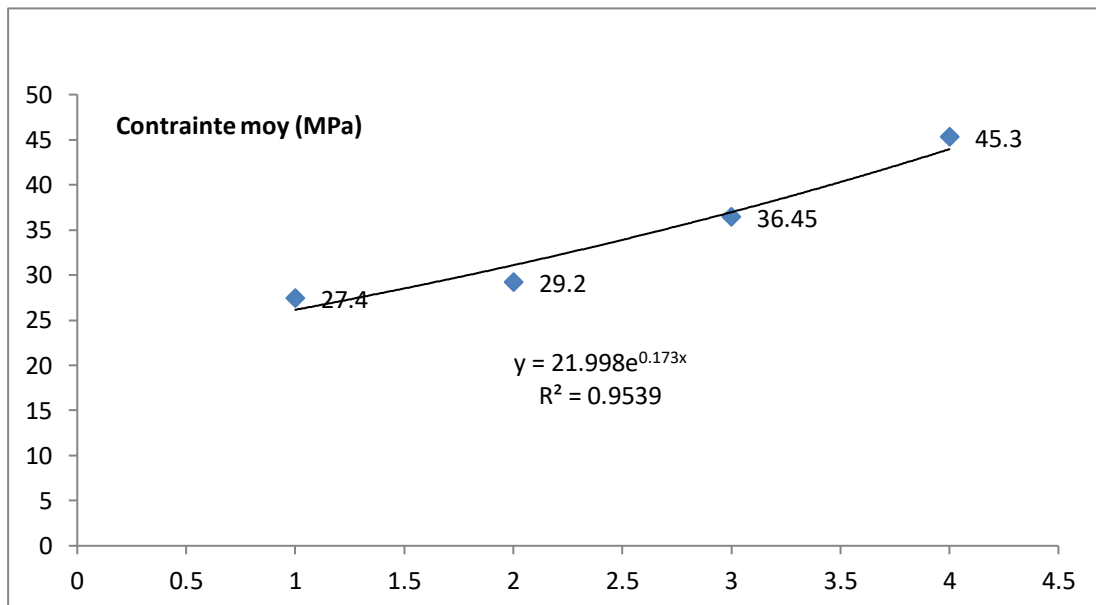


Figure III. 6 : Evolution de la résistance en fonction du nombre de couches

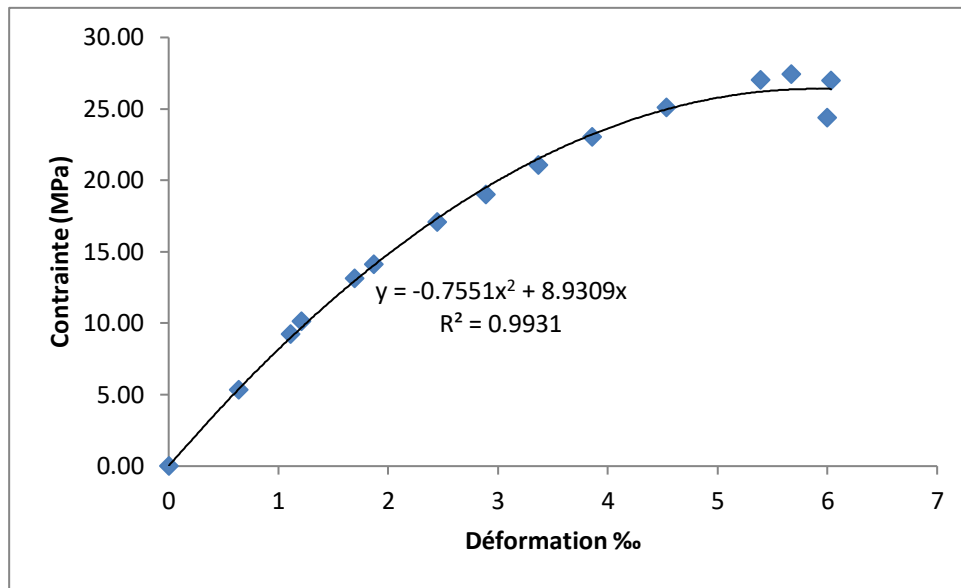


Figure III. 7 : Courbe contrainte – déformation du béton

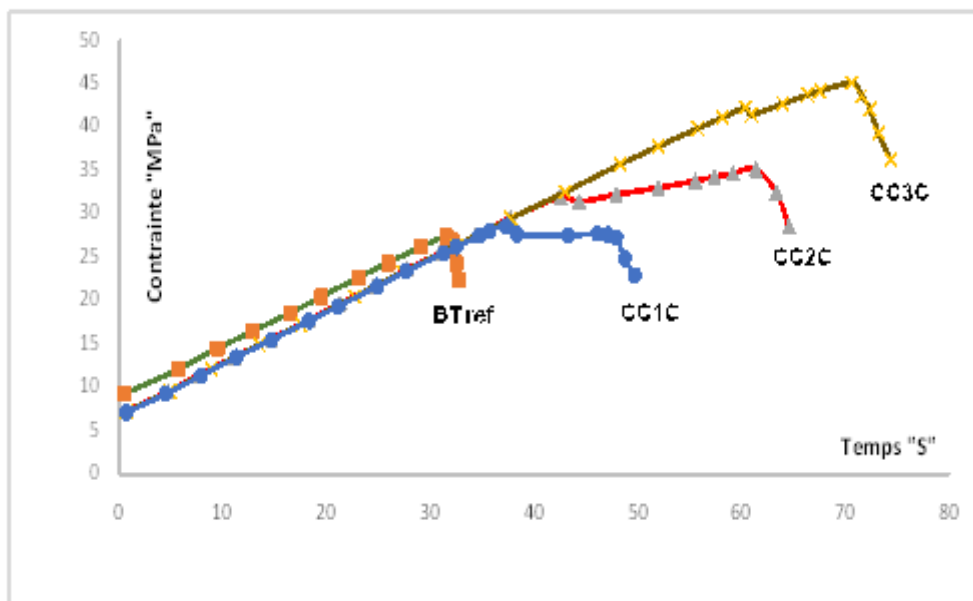
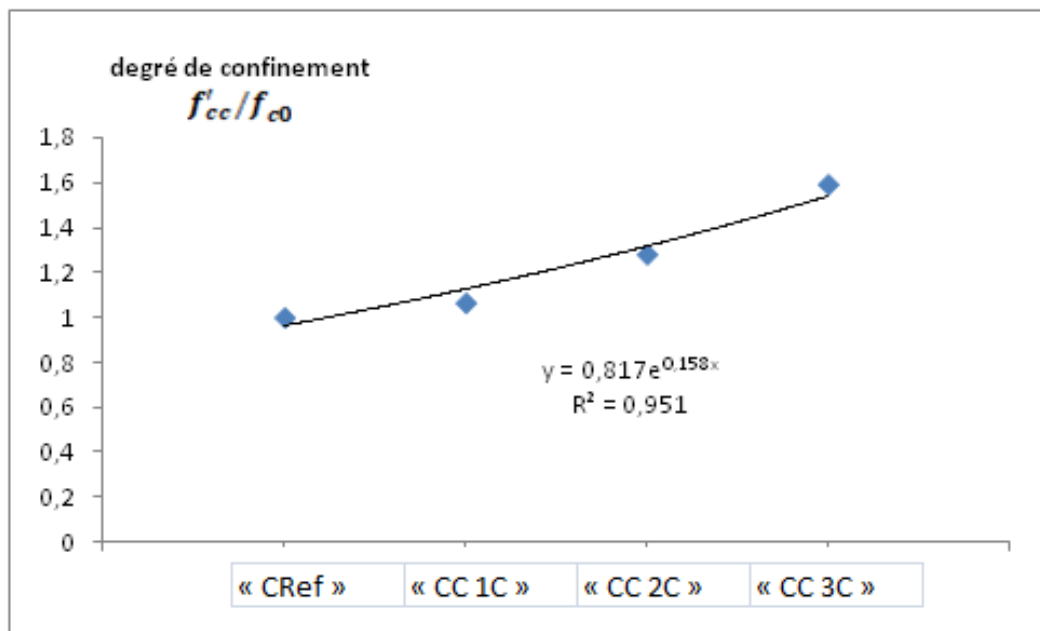


Figure III. 8 : Evolution de la contrainte (MPa) en fonction du temps (s)

Tableau III. 4. Valeurs moyennes des caractéristiques de résistance

Spécimen	Contrainte (MPa)	Degré de confinement $f'_{cc}/f_{c0}$
'C Ref '	27,4	1
CC1C	29,2	1.065
CC2C	36,45	1.281
CC3C	45,3	1,592



**Figure III. 9 :** Evolution du degré de confinement en fonction du nombre de couches

Les différents résultats expérimentaux nous permettent de formuler les conclusions suivantes :

- 1- Tous les spécimens présentent au début de chargement un comportement élastique linéaire, après la mobilisation de la pression radiale de confinement, les courbes s'incurvent mais pour les spécimens confinés, les résistances continuent à augmenter jusqu'à atteindre la valeur ultime de rupture. Les déformations correspondantes au pic des résistances croient également. C'est une zone de déformation plastique. Le comportement devient non linéaire.

Pour le cylindre de béton témoin, ceci correspond à l'apparition puis le développement du champ de fissuration jusqu'à la rupture du béton. La rupture se produit au-delà du pic, zone définie par une courbe descendante avec une grande vitesse de propagation des fissures verticales ;

- 2- La valeur de la résistance au pic définit la contrainte ultime qui caractérise la résistance du béton à la compression. Cette résistance varie en fonction du nombre de couches de composite utilisées pour le confinement. Plus le nombre augmente, plus la résistance augmente. Mais cette résistance ne varie pas linéairement avec le nombre de couche, contrairement à la pression de confinement qui varie d'une manière proportionnelle au nombre de couches, selon différents auteurs qui considèrent que le

module de confinement  $E_l$  et la contrainte de confinement  $f_l$ , sont considérés comme les deux facteurs principaux affectant la capacité portante des cylindres en béton confinés par FRP.

La pression latérale de confinement est proportionnelle à la contrainte de traction dans l'enveloppe de FRP et à l'épaisseur de l'enveloppe de FRP ' $t_{frp}$ ' et inversement proportionnelle au diamètre de la section de béton confinée ' $d$ ' ;

- 3- Le degré de confinement défini par le rapport  $F_{CC}/F_{C0}$  augmente en fonction du nombre de couches d'enveloppe composite, cependant, cette augmentation n'est pas de forme proportionnelle.

Selon le degré d'endommagement, il serait intéressant d'optimiser le nombre de couches de composite pour une meilleure efficacité du confinement. Aussi, un modèle mathématique doit être établi pour relier cette épaisseur ou nombre de couches du composite au degré de confinement, qui sera en fonction de la résistance souhaitée à procurer à l'élément nécessitant une réhabilitation par confinement

### III.7. Comportement des cylindres de béton partiellement confinés :

Des essais préliminaires sur des séries de cylindres en béton partiellement confinés sont réalisés dans ce travail. L'objectif tel qu'il est défini dans le thème de recherche cité précédemment est de mettre en évidence les avantages et inconvénients d'un tel procédé de confinement.

En effet, dans la pratique, tel qu'il a été mentionné dans la recherche bibliographique, des colonnes de béton, généralement les piles de ponts sont confinées partiellement, dès fois seule la partie endommagée est confinée, ce qui influe sur le comportement global de l'élément. Si en général, la résistance du béton confiné est améliorée, dans ce procédé de confinement, la résistance globale de l'élément et le mode de rupture sont affectés d'une manière significative, selon la zone ou parties de l'élément ayant subis un confinement par le matériau composite FRP.

Les différents modes de rupture observés seront donc présentés et discutés, qui permettront de mieux comprendre le comportement structural et d'optimiser les procédés et techniques de confinement selon le type d'endommagement obtenu.

### III.7.1 Variantes considérées :

(06) Six variantes sont considérées dans ce travail :

1. **UC Ref** : Cylindre de béton de référence
2. **CC 1C PC** : Cylindre confiné par 1 enveloppe composite et doublement confiné dans sa zone centrale,
3. **SC 1R SUP** : Cylindre confiné dans la zone supérieure de hauteur égale à  $1/3h$
4. **SC 1R INF** : Cylindre confiné dans la zone inférieure de hauteur égale à  $1/3 h$
5. **UC 1C PC** : Cylindre confiné juste dans la partie centrale de hauteur égale à 12 cm,
6. **CC1C2R SUP INF (5cm)** : Cylindre confiné par 1 enveloppe composite et doublement confiné aux deux extrémités de hauteur chacune égale à  $1/6$  h du cylindre

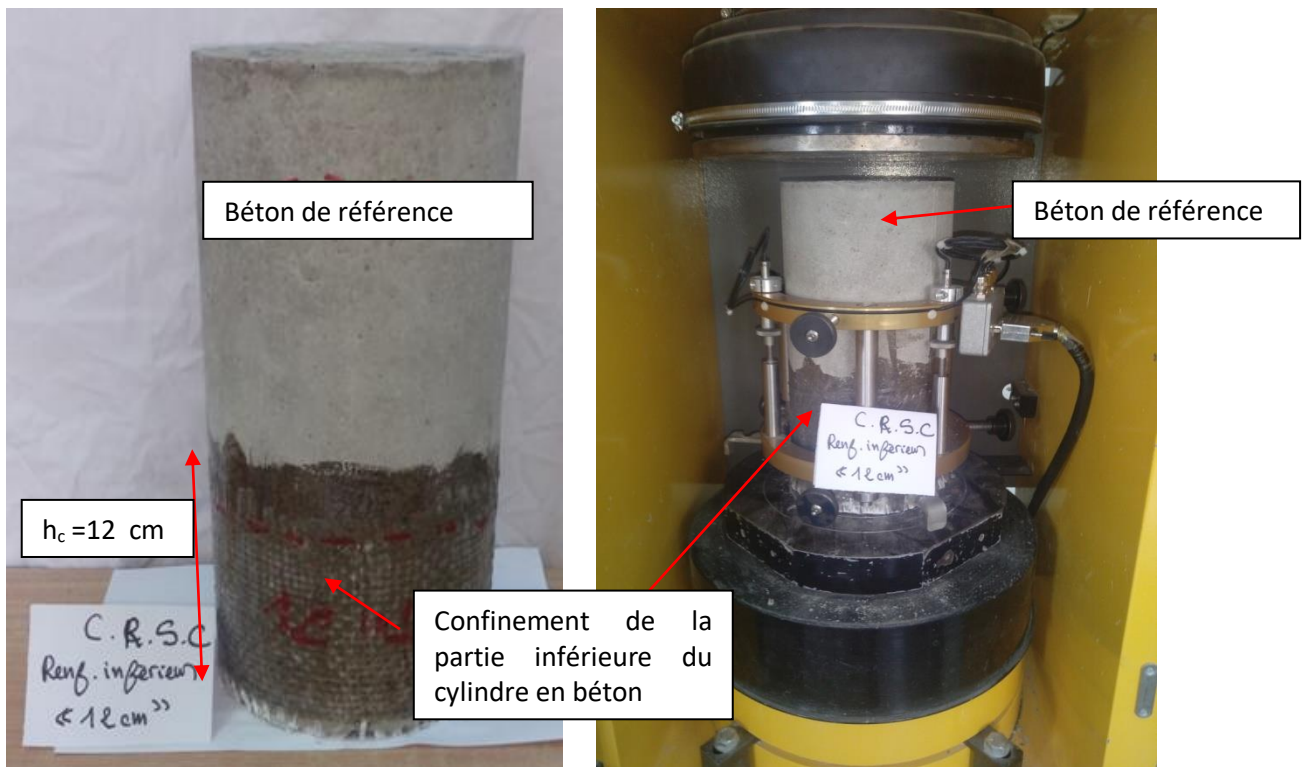
❖ **UC Ref** : Cylindre de béton de référence



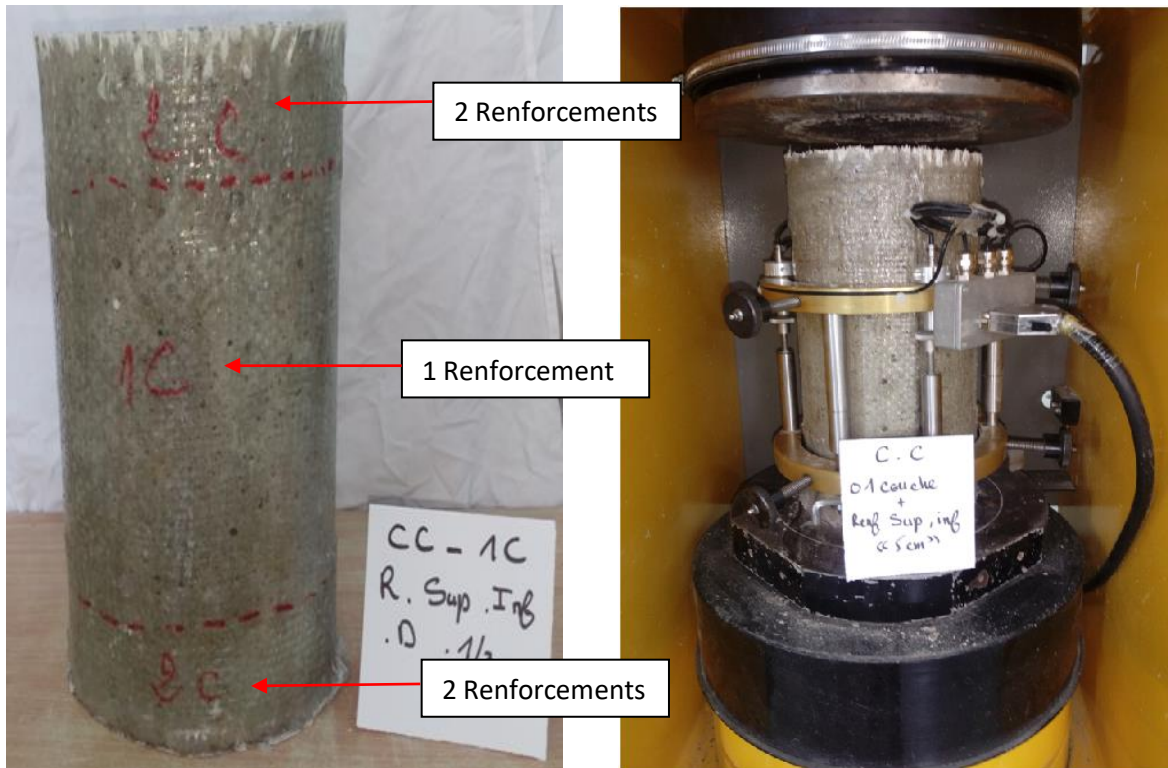
❖ SC 1R SUP :Cylindre confiné dans la zone supérieure de hauteur égale à 1/3h



❖ SC 1R INF :Cylindre confiné dans la zone inférieure de hauteur égale à 1/3h



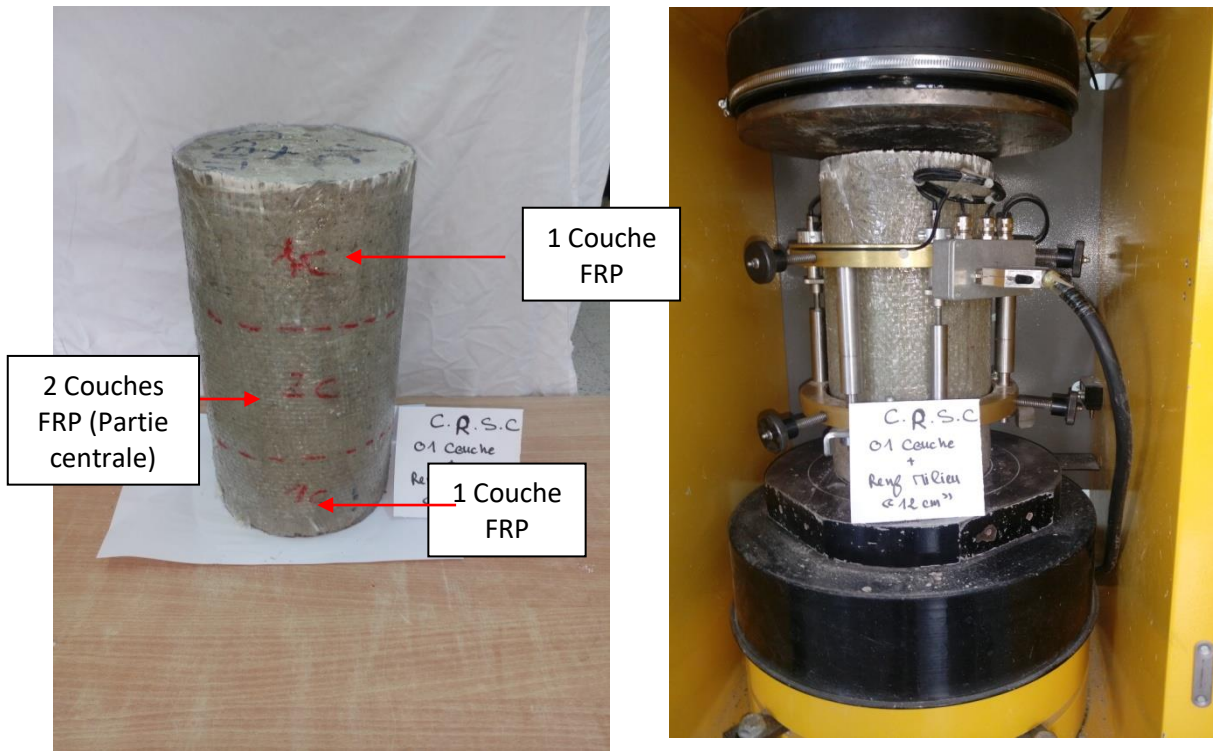
- ❖ **CC1C2R SUP INF (5cm)** : Cylindre confiné par 1 enveloppe composite et doublement confiné aux deux extrémités de hauteur chacune égale à  $\frac{1}{6}$  h du cylindre.



- ❖ **UC 1C PC** : Cylindre confiné juste dans la partie centrale de hauteur égale à 12 cm



- ❖ **CC 1C PC** : Cylindre confiné par 1 enveloppe composite et doublement confiné dans sa zone centrale



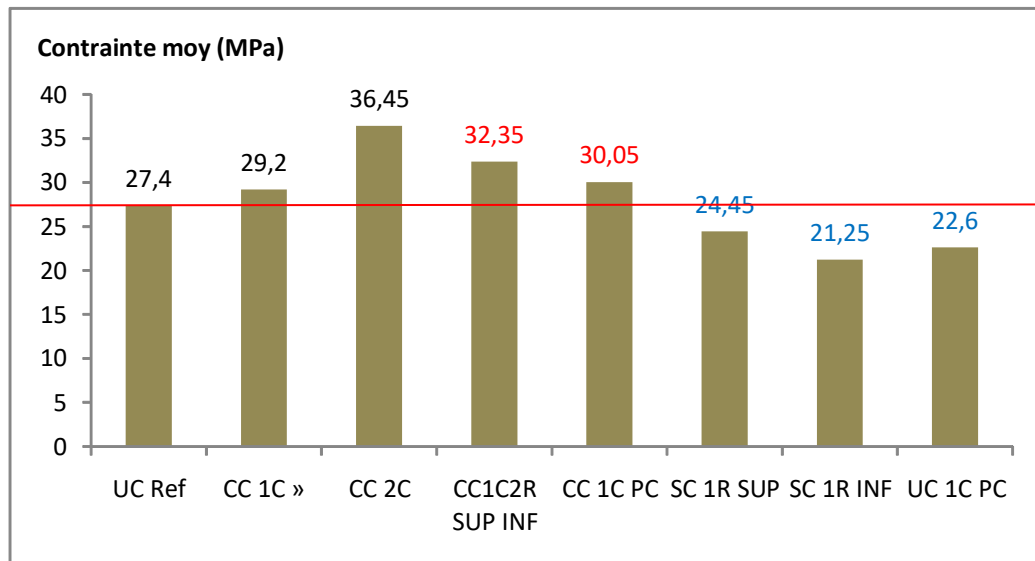
**Figure III.10** : Différentes variantes considérées

### III.8. Analyse des modes de rupture des différentes variantes :

Les différents résultats des essais de compression sont résumés dans le tableau III.5 :

**Tableau III.5.** Force- contrainte des spécimens considérés

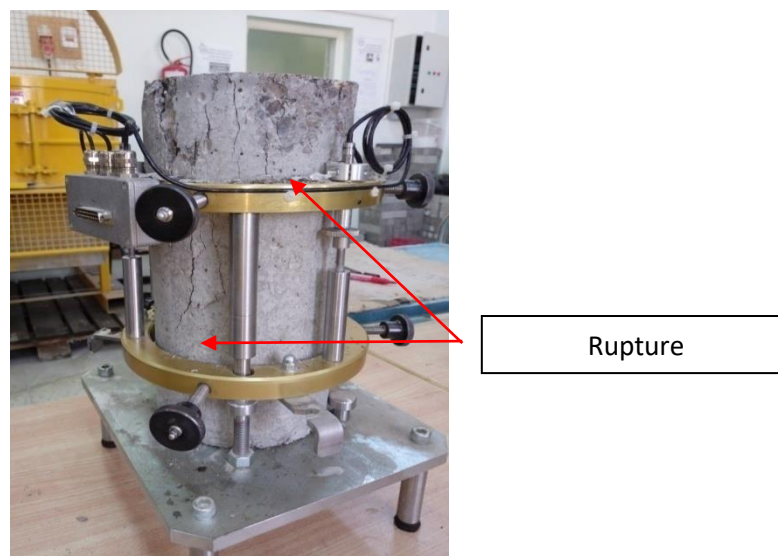
	UC Ref	CC 1C »	CC 2C	CC1C2R SUP INF	CC 1C PC	SC 1R SUP	SC 1R INF	UC 1C PC
<b>Force moy (kN)</b>	571,85	581,15	733,05	650,7	604,65	490,95	427,15	455,1
<b>Contrainte moy (MPa)</b>	27,40	29,20	36,45	32,35	30,05	24,45	21,25	22,6



**Figure III. 11:** Histogramme des valeurs moyennes des différents spécimens

D'après l'histogramme Fig.III.11, on constate que le confinement partiel permet d'augmenter la résistance à condition qu'au moins une enveloppe soit réalisée sur l'élément. Cette augmentation est de l'ordre de 18,06 % pour le spécimen CC1C 2R Sup inf et de 9,7% pour le spécimen CC1CPC, par rapport au cylindre de référence (non confiné). Cependant, lorsque le spécimen est confiné partiellement, on observe une chute de la résistance comparativement au béton de référence. En conclusion, il est déconseillé de confiner partiellement les éléments en béton, néanmoins cette conclusion doit être étayée par d'autres essais et une analyse numérique.

### 1- Béton de référence (Témoin)



**Figure III.12 :** Mode de rupture du béton témoin de référence

Le mode de rupture observé est typique. Une fissure longitudinale est obtenue. Typiquement, la courbe contrainte-déformation présentent une pente initiale jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de déformation plastique plus importante. Généralement, la courbe de comportement contrainte – déformation présente trois phases de comportement bien distinctes :

- Une première phase de comportement identique à celui d'un matériau homogène et élastique, celle-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$ .
- Une deuxième phase qui nous permet d'atteindre le maximum de la contrainte pour une certaine déformation, cette phase se distingue par la densification des fissures avec la formation de la fissure longitudinale magistrale.
- La troisième phase se traduit par une courbe décroissante qui se termine par la « ruine » des spécimens.

La rupture est obtenue sous une charge de 571,85Kn et une contrainte  $\sigma_{rup.} = 27,4$  MPa.

## 2- Renforcement de la zone inférieure du cylindre 'SC 1R INF'

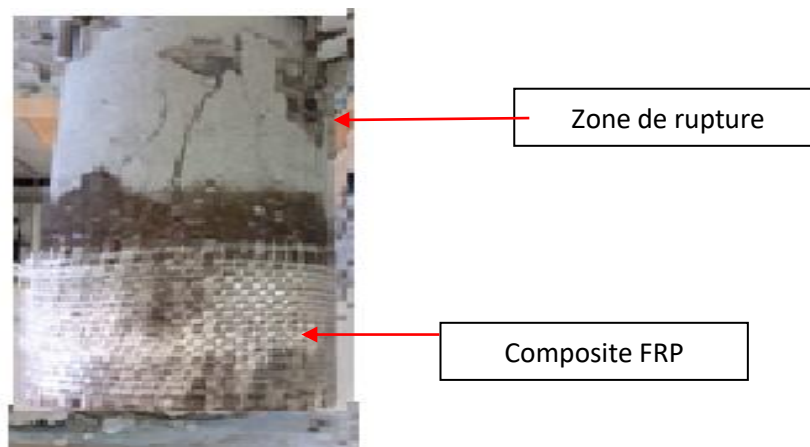
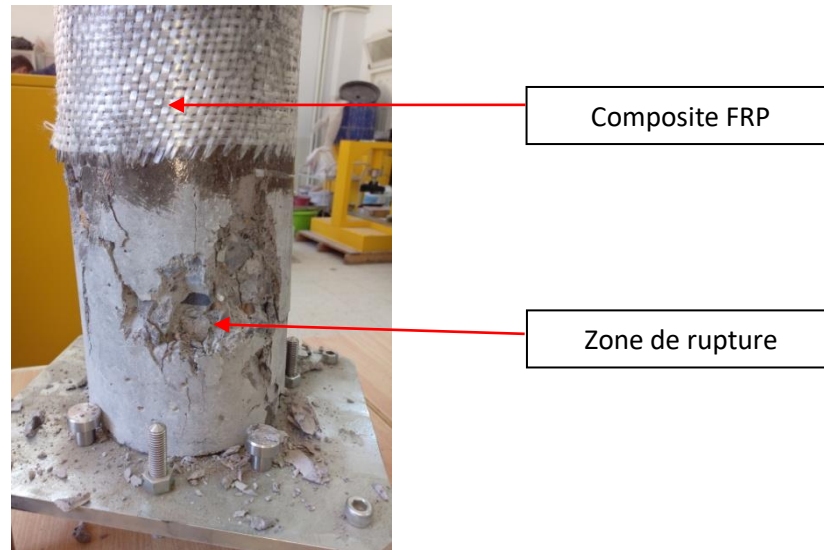


Figure III.13 : Mode de rupture du cylindre confiné 'SC 1R INF'

L'enveloppe composite bloque les déformations radiales dans la zone confinée du cylindre en béton, d'où la rupture du cylindre se produit dans la partie non renforcée restante. A cet effet, le renforcement juste d'une partie de la colonne ne procure pas une résistance plus importante au cylindre. Les résultats montrent que la rupture est obtenue pour des valeurs inférieures à celle de la résistance du béton de référence. La rupture du cylindre est produite par une charge inférieure à celle exercée sur le cylindre de référence. La rupture est obtenue sous une charge de 427,1 Kn et une contrainte  $\sigma_{rup.} = 21,25$  MPa.

### 3- Renforcement de la zone supérieure du cylindre (SC 1R SUP (10cm),



**Figure III.14 : Mode de rupture du cylindre confiné 'SC 1R SUP'**

C'est le même mode de rupture observée dans le cas du cylindre confiné dans sa partie inférieure sauf que la zone de rupture est inversée. Elle est produite dans la partie inférieure non renforcée du cylindre. En effet, la partie supérieure est bien confinée, donc elle s'oppose aux déformations radiales, c'est le comportement inverse par rapport au cas de renforcement de la zone inférieure. Les mêmes conclusions peuvent être formulées. La rupture est obtenue sous une charge de 490,09 Kn et une contrainte  $\sigma_{rup.} = 24,45$  MPa.

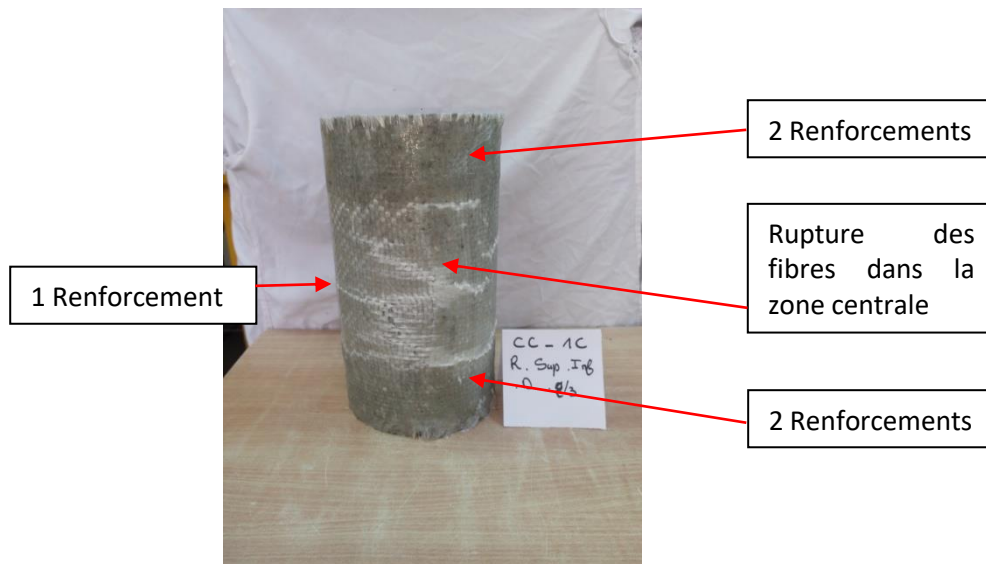
### 4- Renforcement de la zone centrale du cylindre 'UC 1C PC



**Figure III.15 : Mode de rupture du cylindre confiné 'UC 1C PC**

Pour cette variante, on observe des ruptures soit dans la partie supérieure soit dans la partie inférieure. La hauteur de la zone assujettie aux déformations radiales est réduite. En effet, la partie centrale du cylindre est renforcée par 1 couche de composite, donc elle résiste mieux comparativement aux deux parties non renforcées. La rupture est obtenue sous une charge de 455,1 Kn et une contrainte ultime maximale  $\sigma_{rup.} = 22,6\text{MPa}$ , valeurs largement inférieures à celles obtenues pour le béton de référence. Cette variante de confinement est non recommandée.

### 5- Confinement variable 1 enveloppe + 2 renforcements extrémités 'CC1C2R SUP INF (5cm)'



**Figure III.16** : Mode de rupture du cylindre confiné 'CC1C2R SUP INF'

Pour cette variante, le double renforcement des extrémités rend ces parties plus rigides, donc la rupture est obtenue dans la partie centrale du cylindre moins confinée. La contrainte ultime au pic est de  $32,35\text{MPa}$ . Pour cette variante la rupture est produite par des charges supérieures aux autres spécimens. Aussi, on a remarqué le décollement de l'enveloppe composite FRP se produit dans la zone centrale. La rupture est obtenue par la rupture de l'enveloppe. Enfin, le cylindre présente une stabilité dimensionnelle, aucune déformation macroscopique n'est observée. L'allure des spécimens après rupture est comparable à un cylindre sain avec quelques ruptures des fibres dans la zone centrale. La rupture est obtenue sous une charge de 650,7 Kn et une contrainte ultime maximale moyenne  $\sigma_{rup.} = 32,35\text{MPa}$ . L'amélioration de la résistance est d'environ de 18,10% par rapport au béton témoin et une

perte de résistance d'environ de 12,7% par rapport au cylindre confiné avec 2 couches. Le gain en matériau est de l'ordre de 65-70%.

#### 6- Renforcement de la zone centrale du cylindre 'CC 1C PC'



**Figure III.17.** Mode de rupture du cylindre confiné 'CC 1C PC'

Pour cette variante, on observe des ruptures soit dans la partie supérieure soit dans la partie inférieure. La hauteur de la zone assujettie aux déformations radiales est réduite. La rupture est obtenue sous une charge de 604,65 Kn et une contrainte ultime maximale  $\sigma_{rup.} = 30,05$  MPa. On observe également une certaine stabilité dimensionnelle de l'élément.

### Conclusion partielle

L'analyse globale concernant les gains de résistance et de déformation permettant ainsi l'optimisation de nombre de couches de tissus de fibres de verre FRP est réalisée dans cette étude. Les enveloppes de matériaux composites appliquées aux cylindres de béton permettent d'augmenter les performances de résistance et modifient le mode de rupture. Cette augmentation de la résistance évolue en fonction de nombres de couches de composites utilisées pour le confinement du béton, comme le montrent les expériences conduites par des chercheurs qui ont démontré qu'une augmentation significative en ductilité et en résistance est directement reliée à l'utilisation d'enveloppe de composites. Cependant, les résultats obtenus montrent clairement que le degré de confinement varie avec le nombre de couches d'une manière non linéaire. Il est recommandé de mener une étude portant sur l'optimisation de l'épaisseur ou le nombre de couches pour assurer une bonne efficacité de la technique de confinement par des enveloppes composites. Aussi, pour le cas des cylindres soumis à une pression de confinement variable ou juste une partie du cylindre est soumise au confinement, les résultats mettent en évidence que dans les régions qui se trouvent aux extrémités des spécimens cylindriques, la déformation du béton avant la rupture est supérieure qu'au milieu des colonnes. Cette observation est étayée par les résultats obtenus, en effet, le spécimen confiné par une enveloppe sur l'ensemble du cylindre et doublement confiné aux deux extrémités de hauteur chacune égale à  $(1/6) h$  du cylindre (CC1C2R SUP INF) présente des performances très acceptables en termes de résistance ( $\sigma_{rup.} = 32,35$  MPa) avec un gain important en matériaux composites de 65-70% en masse.. Non seulement la résistance est améliorée mais le mode de rupture est aussi influencé. La rupture est obtenue dans la zone centrale. La rupture longitudinale du tissu composite définit le mode de rupture global de l'élément considéré. Pour cette raison, nous recommandons d'augmenter les forces de confinement, dans la région de la rotule plastique. Les autres spécimens ont tous subi des ruptures au quart de la base ou au quart de la tête des cylindres selon le mode de renforcement considéré, sauf pour les spécimens renforcés dans la partie supérieure ou inférieure, où l'on a constaté que la rupture est obtenue dans la partie non confinée avec des résistances plus faibles comparativement au cylindre non confiné de référence. Donc, en conclusion, le renforcement d'une partie de la colonne peut diminuer la résistance globale de l'élément et surtout accélérer l'endommagement et la rupture, par contre le renforcement des extrémités permet d'obtenir des résistances acceptables avec un gain en masse du composite.

---

***Conclusion générale***

---

## **Conclusion générale**

Durant sa durée de vie, les structures en béton armé subissent des dégradations d'ordre mécanique et physico-chimique qui affectent directement leur capacité portante, en particulier la résistance mécanique. Une réhabilitation par renforcement ou réparation est donc nécessaire pour procurer aux éléments de structures endommagés un certain seuil de résistance souhaitable qui leur permettra de continuer à assurer leur fonctionnement de service en conformité avec les exigences de résistance, les normes et codes de calcul en vigueur. A cet effet, le renforcement des structures par les matériaux composites intéresse de plus en plus les chercheurs dans le domaine de la réhabilitation, eu égard aux performances mécaniques de ces nouveaux matériaux et leur bonne compatibilité avec le support béton.

Dans ce travail, des essais mécaniques de compression ont été réalisés sur des spécimens cylindriques normalisés dans le but de mettre en évidence l'influence du nombre de couches de composites sur le degré de confinement. S'il est admis et confirmé par plusieurs auteurs que la résistance du béton confiné augmente avec l'épaisseur du composite, néanmoins cette augmentation varie d'une manière non proportionnelle avec l'épaisseur de l'enveloppe composite ou le nombre de couches de composites utilisées.

Les différents résultats expérimentaux obtenus dans ce travail montrent une nette amélioration de la résistance à la rupture des spécimens confinés, comparativement aux éprouvettes de référence, ont permis de mieux comprendre la contribution des enveloppes composites à base de fibres de verre à l'augmentation de la résistance et enfin, ces résultats permettront d'optimiser la conception de l'enveloppe composite utilisée pour le confinement des colonnes en béton. En effet, pour des raisons économiques, il est recommandé d'utiliser un nombre de couches selon le degré d'endommagement, pour une résistance souhaitée.

Aussi, les résultats des essais préliminaires menés sur les cylindres en béton soumis à un confinement partiel ou une pression radiale variable, nous ont permis de formuler quelques conclusions qui mettent en évidence l'influence de ce mode de confinement sur le mode de rupture et endommagement. Selon le cas envisagé, lorsqu'on confine une partie du cylindre seulement, la résistance diminue et la rupture est obtenue dans la partie non confinée, sauf dans le cas du confinement total par une enveloppe avec un confinement partiel des extrémités. A titre indicatif, cette observation est étayée par les résultats obtenus, en effet, le spécimen confiné par une enveloppe

### Conclusion générale

sur l'ensemble du cylindre et doublement confiné aux deux extrémités de hauteur chacune égale à  $(1/6) h$  du cylindre (CC1C2R SUP INF) présente des performances très acceptables en termes de résistance ( $\sigma_{rup.} = 32,35 \text{ MPa.}$ ) avec un gain important en matériaux composites de 65-70% en masse. Aussi, non seulement la résistance est améliorée mais le mode de rupture est aussi influencé. Une meilleure stabilité dimensionnelle est observée.

Enfin, afin de tirer des conclusions encore plus précises, il serait intéressant en perspectives de réaliser des essais pour appréhender le comportement réel de tels éléments de structures soumis à un confinement variable.

---

***Références bibliographiques***

---

## **Références bibliographiques**

- [1] Berthelot, J-M ; « Matériaux composites –comportement mécanique et analyse des structures »,Paris . Livre, éditions :Lavoisier, p15. (2005).
- [2] Gay. D., “ matériaux composites ”. Édition Hermès, pp 672. Paris 1989
- [3] Ait Taleb. S ‘Analyse du comportement des poutres non – homogènes renforcées par des plaques composites’ thèse de doctorat LMD en génie civil , université de Tizi ousou, Année 2016
- [4] Kheloui. F . ‘Modélisations du comportement à la fatigue d’éléments de construction en béton de fibres.’ Thèse de doctorat en génie civil, université de Tizi ousou, Année 2012
- [5] Abou Chakra. F , Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes, mémoire d’ingénieur CNAM ED. HAL, DEC 2017
- [6] Quiertant. M , Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites, Module Maintenance, Pathologie et Réparation des ouvrages, Mastère ENPC - 1 juin 2016, IFSTTAR - France
- [7] Bouzeboudja. F ‘Poinçonnement de dalles armées de tissus composites’ thèse de doctorat en génie civil, université de Tizi ousou, Année 2016
- [8] El Houssain Rochdi ; Contribution a l’analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites ; thèse de doctorat ; université Claude Bernard - lyon 1 ; France ; 2004
- [9] Bentayeb. F, Ait tahar. K, Chateauneuf. A, . « ‘New technique for reinforcement of concrete columns confined by embedded composite grid’ Revue Construction and Building Materials, ed. ELSEVIER,22 (2008) 1624–1633
- [10] Hamelin. P,. “Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites” AFGC, Document scientifiques et techniques, recommandation provisoire, décembre 2003 – 148p.
- [11] Berthet, J.F., Ferrier E. Et Hamelin P. “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A: Experimental study”, Construction and Building Materials, Vol. 19, pp. 223-232, 2005.
- [12] Benzaid Riad “Contribution à l’Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton” ; université Constantine, thèse de doctorat 2010 - 288p.
- [13] Chaallal O, Hassan M, LeBlanc M. “Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines”, ASCE, Journal of Composites

for Construction, Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 2006

[14] Ali Ahmed. C., ‘Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation thèse de doctorat LMD en génie civil , université de Tizi ouzou, Année 2016

[15] A.R. Rahai1 , P. Sadeghian2 and M.R. Ehsani., ‘ Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites’ , The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

[16] Mirmiran A, Shahawy M., ‘Behavior of concrete columns confined by fiber composites’. J Struct Eng ASCE 1997;123(5):583-90) .

[17] Rochette P, Labossiere P., ‘Axial testing of rectangular column models confined with composites’. J Compos Constr ASCE 2000;4(3):129-36.

[18] Pessiki S, Harries K, Kestner JT, Sause R, Ricles J.M., ‘Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets’. J Compos Constr ASCE 2001;5(4):237-45.

[19] Parvin A, Jamwal AS., ‘ Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders’ .Compos Struct 2005;67(4):437-42.

[20] Parvin A, Jamwal AS., ‘Performance of externally FRP reinforced columns for changes in angle and thickness of the wrap and concrete strength’, Compos Struct 2006;73(4):451-57.

[21] Abbasnia, R., Ziaadiny, H. “Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression”, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 493-505, 2009 .

[22] Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab, ‘behaviour of frp confined concrete cylinders: experimental investigation and strength model’ , Periodica Polytechnica Civil Engineering, 60(4), pp. 647–660, 2016

[23] Liang Huang ,\*, Xiaoxun Sun , Libo Yan and Deju Zhu, ‘Compressive Behavior of Concrete Confined with GFRP Tubes and Steel Spirals’, Polymers 2015, 7, 851-875; doi:10.3390/polym7050851

[24] H. Zhaoa And M. N. S. Hadi’, Experimental Investigation on Using Mesh as Confinement Materials for High Strength Concrete Columns’ , Procedia Engineering 14 (2011) 2848–2855

[25] Saafi, M., Toutanji, H.A. et Li, Z. “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes”, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509, 1999.

[26] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman T. “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns”, *Composites: Part B*, Vol. 31, pp. 471-480, 2000.

[27] Qing-Sheng Young, Qing-Huang Qin, Dai-Hua Zheng. “Analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concret hybrid structure”. *Composite Structure*, 57 (2002) 221-226..

- [28] G.Wu “Experimental study and theoretical analysis on strengthening concrete structures with FRP”, Phd thesis southeast, university, Nanjing, China, 2002.
- [29] G. Wu, Z.T. Lü, Z.S. Wu. “Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites”. *Construction and building materials* 20, 134-148, 2006.
- [30] Sheikh, S.A. et Uzumeri, S.M. “Strength and ductility of tied concrete columns”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102, 1980.
- [31] Steiner, W, “Strengthening of structures with FRP strips” In: El – Badry, MM (Ed) *Advanced composite materials in bridges and structures*, Canadian Society for Civil Engineering Montreal, pp.407-417, 1996.
- [32] Thériault, M., Neale, K.W. et Claude, S. “Fiber-reinforced polymer-confined circular concrete columns: Investigation of size and slenderness effects”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 8, No. 4, pp. 323-331, 2004.
- [33] Toutanji, H. “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets.” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No.3, pp. 397- 404, 1999.
- [34] Xiao, Y., Martin, G.R., Yin, Z., Ma, R., “Seismic retrofit existing reinforced concrete bridge columns using a prefabricated composite wrapping system”, *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI’96*, Saadatmanesh, H. et Ehsani, M.R., Editors, Tucson, Arizona, US-A., pp. 903-916, 1996.
- [35] Xiao, Y. et Wu, H. “Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 13, pp. 1187-1201, 2003.
- [36] Youssef, M.N., Feng M.Q., et Mosallam A.S. “ stress-strain model for concrete confined by FRP composites” *Composites: Part B*, Vol. 38, pp. 614-628, 2007.
- [37] Ait tahar K, Chateauneuf A, ‘Confinement of the Concrete Structures by Embedded Composite Grids’ *journal Key Engineering Materials* Vol. 425, 2010 pp 195-216 , special volume is *Trends in Composite Materials and their Design*. Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1662-9795. [www.scientific.net/ KEM. 425. 195.](http://www.scientific.net/KEM.425.195)
- [38] Rousakis, T.C., Karabinis, A.I. “Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects”, *Materials and Structures*, Vol. 41, No. 9, pp. 1595-1611. (2008).
- [39] Chaallal O, Hassan M, LeBlanc M. “Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 2006.
- [40] A.R. Rahai1 , P. Sadeghian2 and M.R. Ehsani., ‘ Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites’ , *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China.

- [41] Rochette P, Labossiere P., 'Axial testing of rectangular column models confined with composites'. *J Compos Constr ASCE* 2000;4(3):129-36.
- [42] Pessiki S, Harries K, Kestner JT, Sause R, Ricles J.M., 'Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets'. *J Compos Constr ASCE* 2001;5(4):237-45.
- [43] Li G, Maricherla D, Singh K, Pang S, John M., 'Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylinders'. *Compos Struct* 2006;74(4):475-83.
- [44] Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab, 'behaviour of frp confined concrete cylinders: experimental investigation and strength model' , *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), pp. 647–660, 2016
- [45] Mostafa Osman, Ata El-Kareim Shoeib Soliman., ' Behavior of confined columns under different techniques', *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural and Construction Engineering* Vol:9, No:1, 2015,
- [46] Michel LeBlanc , 'Confinement de colonnes de béton circulaires à l'aide de fibre de carbone' , maîtrise en génie de la construction m. ing., Montréal, Septembre 2000
- [47] Liang Huang ,\*, Xiaoxun Sun , Libo Yan and Deju Zhu, 'Compressive Behavior of Concrete Confined with GFRP Tubes and Steel Spirals', *Polymers* 2015, 7, 851-875; doi:10.3390/polym7050851
- [48] Xuan Hong Vu ,\*, Yann Malecot , Laurent Daudeville , Eric Buzaud ,. ' Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio', *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) 1105–1120. [www.elsevier.com/locate/ijsolstr](http://www.elsevier.com/locate/ijsolstr)
- [49] H. Zhaoa And M. N. S. Hadi', 'Experimental Investigation on Using Mesh as Confinement Materials for High Strength Concrete Columns' , *Procedia Engineering* 14 (2011) 2848–2855
- [50] Kargahi, M. "Fiber reinforced plastic FRP shell as external reinforcement for concrete columns", MS Thesis, University of Central Florida, Orlando, Florida, 116 p, 1995.
- [51] Picher, F., Rochetter, P. et Labossière, P. "Confinement of concrete cylinders with CFPP", *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI'96*, Edited by Saadatmanesh, H. et Ehsani, M. R., Tucson, Arizona, pp. 829-841,1996.
- [52] Ait tahar K, Taouche F , Bouamra Y, Parametric analysis of the models of confinement of the concrete column , *Key Engineering Materials*, ISSN 1013-9826, Volume 498 , pp1-14, 2012, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1662-9795. [www.scientific.net/](http://www.scientific.net/)
- [53] Abbasnia, R., Ziaadiny, H. "Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 493-505, 2009 .
- [54] KHALAFA A, Etude de comportement mécanique d'un matériau composite stratifié.Mémoire de magister, M'hamedBouguera, Boumerdes. Algerie. 2010

- [55] Agoudjil, B. "A comparative analysis of dielectric, rheological and thermophysical behaviour of ethylenevinylacetate/BaTiO<sub>3</sub> composites," J. Phys. D:Appl. Phys., vol. 41, pp. 1-7, 2008.
- [56] Progelhof, R. C, Throne J. L., and Ruetsch R. R., "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems," Ploymer Engineering and Science, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [57] Bavarian, B., Shively, R., Ehrgott, R., et Di Julio, R., "External support of concrete structures using composite materials", *Proceedings of the First International Using Composites ininfrastructure*, ICCI'96, Editors:Saadatmanesh, H. et Ehsani, M. R., Tucson, Arizona, pp. 917-928. (1996).
- [58] Harmon, T.G., Could, P.L., Wang, E. et Ramakiishnan, S., "Behavior of confinedconcreteundercyclicloading", Proceedings of the Second International Conferences on Composites ininfrastructure, ICCI'98, Editors:Saadatmanesh, H. et Ehsani, M.R., Tucson, Arizona, pp. 398-409. (1998)
- [59] Watanabe, K., et al. "Confinement effect of FRP sheet on strength and ductilityofconcretecylindersunderuniaxial compression", Non metallic FRP Reinforcementfor Concrete Structures,Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 1, Sapporo, Japan, pp. 233-238. (1997),
- [60] Pan, J.L., Xu, T. et Hu, Z.J. "Experimental investigation of loadcarryingcapacity of the slenderreinforcedconcretecolumnswrappedwith FRP", Construction and Building Materials,Vol. 21, pp. 1991-1996 (2007)
- [61] Ibrahim A. E. M. Shehata, Luiz A. V. Carneiro, Lidia Shehata (2002) Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets