

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

MINISTERE 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 : STRUCTURES**

**THEME**

**INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA ZONE CONFINÉE PAR DES  
COMPOSITES 'GFRP' SUR LA RESISTANCE DES CYLINDRES EN  
BÉTON**

**Présenté par :**

OULD AMROUCHE Massinissa  
OUABED Djaber

**Devant le jury composé de :**

M. ABDELHAMID .A	UAMOB / GENIE CIVIL	PRESIDENT
Pr. AIT TAHAR. K	UAMOB / GENIE CIVIL	PROMOTEUR
Dr. BOUAMRA. Y	UAMOB / GENIE CIVIL	CO- PROMOTEUR
Mme. BOUMAIZA. M	UAMOB / GENIE CIVIL	EXAMINATRICE
M. BELMIHOUB. H	UAMOB / GENIE CIVIL	EXAMINATEUR

**Soutenu le 18 / 07 / 2019 à 9h00**

**- Année Universitaire 2018-2019 -**

## ***Remerciements***

Nos premiers remerciements vont pour le bon dieu, le tout puissant, qui nous a donné la force et la sagesse.

Nos vifs remerciements vont aussi à notre encadreur professeur à l'*UAMOB*, ***M.AIT TAHAR.K*** qui a nous proposé et dirigé ce travail, pour son aide, son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail, ses orientations et pour ses conseils pertinents tout au long de cette recherche.

Nous remercions vivement également Dr. ***BOUAMRA.Y***, notre CO - encadreur pour ses recommandations, ses encouragements et son aide dans la partie 'simulation numérique'.et ainsi que Monsieur ***MOUSSAOUI.B*** d'avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires pour la partie expérimentale.

Nous tenons également à remercier tout le personnel du Laboratoire central des travaux publics et du Laboratoire du génie civil d'*UAMOB* pour sa patience et sa disponibilité lors des essais expérimentaux.

Nous souhaitons également remercier le bureau d'étude ***EI MOUHANDICINE*** pour son aide.

En dernier, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## DEDICACES

*Du profond du cœur, je dédie ce modeste travail à ma très chère mère Djamila, mes frères Hamou et Lyes mes tantes et mes oncles que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A la mémoire de mon grand-père Mbarek et à la mémoire de ma grand-mère Yama que dieu le miséricordieux, les accueille dans son paradis éternel.*

*A toute ma famille et mes amis.*

*A mon binôme DJABER,*

*A mes camarades.*

*Et à tous ce qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, je vous remercie.*

**Massinissa**

## DEDICACES

*Du profond du cœur, je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont donné de la confiance en moi même et surmonté tous les obstacles de la vie, devenue un paradis en leurs présence avec ses tendres paroles.*

*A mes frères et sœurs*

*Aux familles OUABED et LAMRI*

*A mon binôme MASSINISSA*

*A tous mes amis*

*A toute la promotion 2018/2019 de génie civil*

*Et à tous ce qui ont contribué de prés ou de loin pour la réalisation de ce travail, je vous remercie.*

*Djaber*

## RESUME

Les différentes techniques et modèles de confinement par collage de matériaux composites rapportés dans la littérature scientifique ont confirmés que la pression latérale du confinement dépend surtout des caractéristiques géométriques et mécaniques des composites.

Le présent travail consiste à étudier expérimentalement et numériquement l'influence de la hauteur de la zone confinée définie par le rapport  $x/h$  sur le comportement global des cylindres en béton soumis à un chargement de compression axiale. A cet effet, une investigation expérimentale a été réalisée sur des spécimens en béton de dimensions normalisées totalement et partiellement confinés par collage externe de GFRP composites.

Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration, à la fois, de la résistance à la compression et de la ductilité des éprouvettes testées. La résistance à la compression du béton varie avec la hauteur de la zone confinée et la rupture des spécimens est toujours localisée dans la zone non confinée. Les différents résultats expérimentaux ont été confrontés à ceux obtenus par la simulation numérique réalisée à base des éléments finis (Abaqus). Une bonne concordance des résultats est obtenue.

**Mots clés :** Béton, Confinement, GFRP, essais, Simulation numérique, Confrontation, Abaqus.

## ABSTRACT

The different techniques and models of confinement using a bonded composite materials reported in the scientific literature have confirmed that the pressure of the confinement depends mainly on the geometrical and mechanical characteristics of the composites.

The present work consists to study experimentally and numerically the influence of the height of the confined zone defined by the ratio  $x / h$  on the overall behavior of concrete cylinders subjected to axial compression loading. For this purpose, an experimental investigation was carried out on concrete specimens of standardized dimensions totally and partially confined by external bonding GFRP composites.

The experimental results showed an improvement in both compressive strength and ductility of the test of cylindrical specimens. The compressive strength of concrete varies with the height of the confined zone and the failure of the specimens is always located in the unconfined part of cylinder. Experimental results were compared to those obtained by FE analysis (Abaqus). A good concordance of the results was obtained.

**Keywords:** Concrete, Confinement, GFRP, tests, Numerical simulation, Comparison, Abaqus.

## ملخص

التقنيات والنماذج المختلفة للاحتواء عن طريق إصاق المواد المركبة الواردة في المؤلفات العلمية أكدت أن الضغط الجانبي للاحتواء يعتمد بشكل أساسي على الخصائص الهندسية والميكانيكية للمواد المركبة. يتكون العمل الحالي من دراسة تجريبية وعددية لتأثير ارتفاع المنطقة المحصورة المحددة بواسطة النسبة  $x/h$  على السلوك الكلي للأسطوانات الخرسانية التي تخضع لتحميل ضغط محوري. لهذا الغرض تم إجراء تحقيق تجريبي على عينات خرسانية ذات أبعاد موحدة محصورة كلياً وجزئياً بواسطة اللصق الخارجي للمواد المركبة GFRP. أظهرت النتائج التجريبية تحسناً في كل من قوة الضغط وليونة العينات المختبرة. تتغير قوة الضغط للخرسانة مع ارتفاع المنطقة المحصورة ويحدث تمزق العينات دائماً في المنطقة غير المحصورة. تمت مقارنة النتائج التجريبية المختلفة بالنتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة العددية بناءً على العناصر المنتهية (Abaqus). تم الحصول على تطابق جيد للنتائج.

**الكلمات المفتاحية :** الخرسانة ، الاحتواء ، الاختبارات المحاكاة العددية ، المقارنة ، Abaqus .

# Sommaire

## INTRODUCTION

## CHAPITRE I : LE MATERIAU BETON ET TECHNIQUES DE CONFINEMENT

I.1	Introduction.....	3
I.2	Le béton .....	4
I.2.1	Historique.....	4
I.2.2	Définition .....	4
I.2.3	Les composants du béton .....	5
I.2.4	Caractéristiques physiques et mécaniques .....	6
I.2.4.1	Caractéristiques physiques (masse volumique) .....	6
I.2.4.2	Caractéristiques mécaniques .....	6
I.3	Techniques de renforcement.....	9
I.3.1	Définition .....	9
I.3.2	Gainage .....	9
I.3.3	Le béton projeté .....	10
I.3.4	Précontrainte extérieure .....	11
I.3.5	Collages des tôles d'acier.....	11
I.3.6	Matériaux composites .....	12
I.3.6.1	Définition et propriétés .....	12
I.3.6.2	Composition des matériaux composites.....	12
I.3.6.3	Propriétés mécaniques des composites .....	16
I.3.6.4	Renforcement des éléments structuraux .....	17
I.4	Confinement de béton.....	18
I.4.1	Comportement typique du béton.....	18
I.4.2	Comportement du béton confiné.....	19
I.4.3	Méthode de confinement.....	19
I.4.4	Mode de rupture du béton confiné .....	21
I.5	Conclusion partielle .....	25

## CHAPITRE II : INVESTIGATION EXPERIMENTALE

II.1	Introduction.....	26
II.2	Caractérisation des matériaux.....	26

II.2.1	Généralités .....	26
II.2.2	Analyse granulométrique par tamisage .....	26
II.2.3	Mode opératoire.....	27
II.2.4	Détermination de la propreté superficielle .....	29
II.2.5	Essai d'équivalent de sable à 10% de fines .....	30
II.2.6	Détermination de la masse volumique.....	31
II.2.7	Essai Los Angeles.....	32
II.3	Formulation du béton.....	33
II.3.1	La courbe OAB.....	34
II.3.2	Pourcentage des granulats .....	35
II.3.3	Adjuvant .....	37
II.3.4	Composition du béton.....	37
II.4	Réalisation des éprouvettes.....	37
II.4.1	Confections des éprouvettes .....	37
II.4.2	Conservation des éprouvettes .....	38
II.4.3	Matériau composite « GFRP » .....	39
II.4.3.1	Tissu de verre .....	39
II.4.3.2	Préparation de l'adhésif (résine époxy).....	40
II.4.4	Application du composite GFRP.....	41
II.4.5	Nomenclature des éprouvettes.....	42
II.5	Conclusion partielle .....	43

## CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

III.1	Introduction.....	44
III.2	Essai de compression simple du béton .....	44
III.3	Présentation des résultats et analyses .....	45
III.4	Confrontation des courbes contraintes- déformations des différents spécimens.....	52
III.5	Analyse des résultats et conclusion .....	56

## Chapitre IV : Simulation numérique

IV.1	Introduction.....	57
IV.2	Présentation de logiciel.....	57
IV.3	Système d'unité .....	58
IV.4	Propriétés des matériaux.....	59
IV.5	Les étapes de modélisation .....	59
IV.5.1	Premier module : Part.....	60
IV.5.2	Deuxième module : <i>Property</i> .....	60
IV.5.3	Troisième module : <i>Assembly</i> .....	61
IV.5.4	Quatrième module : <i>Step</i> .....	61
IV.5.5	Cinquième module : <i>Interaction</i> .....	62

IV.5.6	Sixième module : <i>Load</i> .....	62
IV.5.7	Septième module : <i>Mesh</i> .....	63
IV.5.8	Huitième module : <i>Job</i> .....	63
IV.5.9	Neuvième module : <i>Visualisation</i> .....	64
IV.6	Résultats.....	64
IV.6.1	Cartographies des contraintes.....	65
IV.6.2	Cartographie des dommages.....	66
IV.6.2.1	Dommages en compression .....	66
IV.6.2.2	Dommages en traction .....	67
IV.6.3	Cartographie des déformations.....	68
IV.6.3.1	Déformations dans les cylindres .....	68
IV.6.3.2	Déformations dans les composites .....	69
IV.6.4	Courbes contraintes – déformations et confrontation.....	70
IV.7	Confrontation simulation – expérimentale .....	73
IV.8	Analyse des résultats et conclusion : .....	78

## CONCLUSION GENERALE

## Liste des Figures

Figure I.1: classes granulaires principales. ....	5
Figure I.2: Les différents constituants du béton destiné à la construction. ....	6
Figure I.3: Essai de compression uni axiale. ....	6
Figure I.4: Essai de traction par fendage. ....	7
Figure I.5: Essai de traction par flexion. ....	7
Figure I.6: Diagramme contrainte-déformation en compression. ....	8
Figure I.7: Chemisage en acier. ....	9
Figure I.8: Chemisage en béton armé. ....	10
Figure I.9: Béton projeté par voie sèche. ....	10
Figure I.10: Béton projeté par voie humide. ....	10
Figure I.11: Application d'effort de précontrainte. ....	11
Figure I.12: Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées. ....	11
Figure I.13: Organigramme illustrant les différentes familles de matrice. ....	13
Figure I.14: Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort. ....	13
Figure I.15: Exemple de tissu de fibre (a) verre (b) carbone (c) aramide. ....	14
Figure I.16: Eléments composants de la forme linéique. ....	15
Figure I.17: fibres formes tissu et rubans. ....	15
Figure I.18: Mat de verre. ....	16
Figure I.19: Éléments composants de la structure multidimensionnelle. ....	16
Figure I.20: Poteau circulaire en béton armé confiné par matériaux composites. ....	17
Figure I.21: Poutres en béton armé renforcées par FRP composites. ....	18
Figure I.22: Courbe contrainte-déformation du béton en compression sous chargement statique. ....	18
Figure I.23: Courbes contraintes déformation d'un béton confiné et non confiné. ....	19
Figure I.24: Confinement des poteaux par stratification directe. ....	20
Figure I.25: Confinement des poteaux par enroulement filamentaire. ....	20
Figure I.26: Confinement des poteaux par coquille PRF préfabriquée. ....	21
Figure I.27: Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP. ....	21

Figure I.28: Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée durant le processus de chargement. ....	22
Figure I.29: Mode de rupture d'un cylindre enveloppé par.....	22
Figure I.30: Concept de béton confiné en acier équivalent. ....	23
Figure I.31: Échec typique des spécimens.....	23
Figure I.32: Confinement partiel hélicoïdal avec CFRP. ....	24
Figure I.33: Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal.....	24
Figure II.1: Série des tamis.....	27
Figure II.2 : Courbes granulométriques des granulats.....	28
Figure II.3: Lavage des graviers pour l'essai de la propreté superficielle.....	29
Figure II.4: Etuve de séchage des matériaux.....	29
Figure II.5: Essai équivalent de sable.....	30
Figure II.6: Essai de masse volumique apparente. ....	31
Figure II.7 : Mesure de la masse volumique absolue. ....	32
Figure II.8: Machine Los Angeles.....	32
Figure II.9:Affaissement de cône d'Abrams. ....	34
Figure II.10: courbe OAB.....	35
Figure II.11: Préparations des moules. ....	38
Figure II.12: Confection des éprouvettes. ....	38
Figure II.13: Eprouvettes démoulées.....	38
Figure II.14: Conservation des éprouvettes dans une chambre humide.....	39
Figure II.15: Tissu de fibres de verre. ....	39
Figure II.16: Différentes variantes de largeur des bandes de tissu de fibre de verre.....	40
Figure II.17: Longueur de chevauchement.....	40
Figure II.18: Composants de l'adhésif : <i>résine et durcisseur</i> .....	41
Figure II.19: éprouvette d'essai : <i>a) préparation du support béton, b) application de la résine sur le béton, c) mise en place de tissu composite, d) tissu collé</i> .....	42
Figure II.20: Différentes variantes des spécimens considérés.....	42
Figure III.1: Essai de compression : <i>a) machine d'essai de compression b) système LVDT</i> . ..	44
Figure III.2: Béton de référence : <i>a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée</i> . ....	45
Figure III.3: Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton.....	46
Figure III.4: Cylindre de bétonpartiellement confiné sur une hauteur de 8cm: <i>a) éprouvette avant essai,b) éprouvette endommagée après essai</i> . ....	46

Figure III.5: Courbe moyenne des contraintes- déformations du cylindre en béton PCC-8. ....	47
Figure III.6 : Cylindre de béton confiné partiellement « x=12cm »: a) <i>éprouvette avant</i> <i>essai</i> , b) <i>éprouvette endommagée</i> . ....	47
Figure III.7: Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-12. ....	48
Figure III.8: Cylindre de béton confiné partiellement « x= 16cm »: a) <i>éprouvette avant</i> <i>essai</i> , b) <i>éprouvette endommagée</i> . ....	48
Figure III.9: Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-16. ....	49
Figure III.10: Cylindre de béton confiné partiellement « x=20cm »: a) <i>éprouvette avant</i> <i>essai</i> , b) <i>éprouvette endommagée</i> . ....	49
Figure III.11: Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-20. ....	50
Figure III.12 : Cylindre de béton confiné totalement : a) <i>éprouvette avant</i> <i>essai</i> , b) <i>éprouvette</i> <i>endommagée</i> . ....	50
Figure III.13: Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton CC.....	51
Figure III.14: Endommagement des spécimens. ....	51
Figure III.15: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC 8 et UC.....	52
Figure III.16 : Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC12 et UC.....	52
Figure III.17: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC -16 et UC.....	53
Figure III.18: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC- 20 et UC.....	53
Figure III.19: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens CC et UC. .....	54
Figure III. 20: Histogramme des valeurs des contraintes ultimes des spécimens. ....	54
Figure III. 21: Confrontation des courbes contraintes – déformations des spécimens.....	55
Figure IV.1: L'interface d'Abaqus/CAE version 6.14. ....	58
Figure IV.2: Modélisation des géométries des éléments. ....	60
Figure IV.3: Propriétés du béton et du composite. ....	60
Figure IV.4: Assemblage des éléments Cylindre - Disque – Composite. ....	61
Figure IV.5: Le module STEP.....	61
Figure IV.6: Modélisation du contact Béton-Disque et Béton-Composite. ....	62
Figure IV.7: Conditions aux limites et chargement.....	62
Figure IV. 8: Maillage du béton et du tissu de fibre. ....	63
Figure IV.9: Module Job. ....	63

Figure IV.10: Module Visualisation.....	64
Figure IV.11: Variantes des spécimens considérés. ....	64
Figure IV.12: Cartographie des contraintes dans les cylindres. ....	65
Figure IV.13: Cartographie des dommages en compression dans les cylindres. ....	66
Figure IV.14: Cartographie des dommages en traction dans les cylindres. ....	67
Figure IV.15: Cartographie des déformations dans les cylindres.....	68
Figure IV.16: Comparaison des déformations dans les composites.....	69
Figure IV.17: Courbe contrainte – déformation pour le cylindre de référence UC.....	70
Figure IV.18: Courbe contrainte – déformation pour PCC-8cm. ....	71
Figure IV.19: Courbe contrainte – déformation pour PCC-12cm. ....	71
Figure IV.20: Courbe contrainte – déformation pour PCC-16cm. ....	72
Figure IV.21: Courbe contrainte – déformation pour PCC-20cm. ....	72
Figure IV.22: Courbe contrainte – déformation CC.....	73
Figure IV.23: Confrontation des courbes contraintes – déformations des spécimens.....	73
Figure IV.24 : Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes-déformations pour spécimens UC. ....	74
Figure IV.25: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-8cm.....	74
Figure IV.26: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-12cm.....	75
Figure IV.27: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-16cm.....	75
Figure IV.28: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-20cm.....	76
Figure IV.29: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens CC. ....	76
Figure IV.30: Diagrammes en barres des contraintes ultimes.....	77
Figure IV.31: Confrontation des valeurs de contraintes : Expérimental VS Simulation. ....	77

# Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Propriétés mécaniques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA».....	16
Tableau II.1: Dimensions nominales des tamis. ....	27
Tableau II.2: Résultats d'analyse granulométrique du gravier 8/15.....	27
Tableau II.3: Résultats d'analyse granulométrique du gravier 3/8.....	28
Tableau II.4: Résultats d'analyse granulométrique du sable 0/3.....	28
Tableau II.5: Teneur en impuretés des gravillons 3/8 et 8/15. ....	30
Tableau II.6: Résultats d'équivalent de sable. ....	30
Tableau II.7: Mesure de la masse volumique apparente <b>pap</b> des granulats. ....	31
Tableau II.8: Résultats d'essai de la masse volumique absolue <b>pab</b> des granulats. ....	31
Tableau II.9: la charge de boulets correspondant à la classe granulaire.....	33
Tableau II.10: Résultats d'essai de los Angeles. ....	33
Tableau II.11: Coefficient granulaire G en fonction de la qualité des granulats et de $D_{max}$ .....	33
Tableau II.12: Correction sur le dosage en eau en fonction de D. ....	34
Tableau II.13: Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. ....	35
Tableau II.14: Compacité du béton en fonction de $D_{max}$ , de la consistance et du serrage ....	36
Tableau II.15: Fiche technique de l'adjuvant utilisé. ....	37
Tableau II.16: Les proportions de la formulation du béton. ....	37
Tableau II.17: Caractéristiques élastiques du tissu de verre.....	39
Tableau II.18: Caractéristiques de la résine.....	41
Tableau II.19: Références des cylindres étudiés. ....	42
Tableau III.1: présentation des résultats des essais. ....	45
Tableau IV. 1: Correspondance des unités. ....	58
Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques du matériau béton. ....	59
Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques du composite (FRP). ....	59
Tableau IV.4 : présentation des résultats des essais. ....	70

## NOMENCLATURE

NOTATION	DÉSIGNATION
FRP	Fiber reinforced polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
$f_{c28}$	Résistance du béton à la compression à 28jours
$f_{tj}$	Résistance du béton à la traction à j jours
$E_{ij}$	Module de déformation longitudinale instantané du béton
$E_{vj}$	Module de déformation longitudinale différé du béton
E	Module de YOUNG.
$\nu$	Coefficient de POISSON
G	Module de déformation transversale
$\sigma_{bc}$	Contrainte de compression dans le béton à l'état limite ultime
$\varepsilon_{bc}$	Déformation du béton
PRFV	Polymères Renforcé de Fibre De Verre
PRFC	Polymères Renforcé De Fibre De Carbone
PRFA	Polymères Renforcé De Fibre Aramide
$f_{cc}$	Résistance du béton confiné à la compression
$f_{co}$	Résistance du béton non confiné à la compression
$\varepsilon_{cc}$	Déformation du béton confiné à la compression
$\varepsilon_{co}$	Déformation du béton non confiné à la compression
PRF	Polymère Renforcé de Fibres
SR	Renfort en spiral en acier
MF	Module de finesse
P	Propreté superficiel
Es	Equivalent de sable
$\rho_{ap}$	Masse volumique apparente
$\rho_{ab}$	Masse volumique absolue
LA	Coefficient Los Angeles
$\sigma_{rup}$	Contrainte de rupture du béton à la compression
$\sigma_{cc}$	Résistance du béton confiné à la compression

---

$\sigma_{c0}$

Résistance du béton non confiné à la compression

---

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

Vu l'état actuel de dégradation des structures en béton, dans un avenir très proche, des interventions de réparation et de renforcement, surtout pour celles ayant subies des dommages importants, sont plus que nécessaires et impératives, afin de les réhabiliter pour assurer leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie.

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) en utilisant des patches, des lamelles, des bandes, et de compression (poteaux) en utilisant des enveloppes.

Le renforcement des poteaux circulaires par des enveloppes composites FRP, est appelé 'Confinement'. 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 aux matériaux composites pour confiner les éléments en béton est une technique largement étudiée par beaucoup de chercheurs qui ont mis en évidence l'augmentation de la résistance ultime et la déformation correspondante au pic. Le confinement améliore non seulement la résistance mais également la ductilité. À cet effet, plusieurs techniques ont été proposées pour renforcer les colonnes et poteaux en béton armé avec des matériaux composites de type FRP, soit par enroulement filamentaire, par stratification et par chemisage en utilisant une enveloppe continue ou discontinue (bandes sous forme d'anneaux discrets ou spirales continues à base de fibres de carbone ou de verre renforcées d'une matrice époxy).

La revue littéraire des différents travaux de recherches ayant porté sur le confinement de colonnes en béton par les FRP, nous a permis de constater que la plupart des recherches ont été conduites sur des colonnes complètement enveloppées avec des matériaux composites.

Néanmoins, certains travaux ont été conduits sur le confinement partiel par collage des cerces en composites en circonférence ou bandes hélicoïdales sur les colonnes en béton. Ceci nous a conduit à s'intéresser au cas de confinement partiel des cylindres courts en béton par des composites à base de fibres de verre renforcées par une résine époxy. L'objectif de notre travail consiste donc à mettre en exergue l'influence de la hauteur de la zone confinée sur la résistance globale du cylindre en béton soumis à une charge de compression axiale à travers des investigations expérimentales et des simulations numériques en utilisant un code de calcul à base des éléments finis.

Ainsi, le présent travail s'inscrit dans le cadre de la réhabilitation et du renforcement des éléments de structures en béton et constitue une contribution parmi d'autres 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.

Le travail est présenté sous forme de quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Après une **introduction générale** exposant l'objectif de notre travail de recherche, dans le **chapitre 1**, une synthèse bibliographique riche et exhaustive est présentée sur le matériau béton et les techniques de confinement utilisées actuellement. Une attention particulière est accordée aux matériaux composites.

**Le second chapitre** est dédié à la caractérisation expérimentale des matériaux considérés dans la confection des éprouvettes. Les différentes étapes de réalisation (caractérisation des matériaux, la formulation du béton, réalisation et conservation des éprouvettes et mise en place de matériaux composite) sont présentées.

**Le troisième chapitre** est totalement dédié à la présentation du dispositif d'essai considéré ainsi que les différents résultats obtenus sous chargement axial de compression. Tous les résultats sont présentés dans des tableaux et illustrés par des graphes et des histogrammes, où l'influence du paramètre  $x/h$  représentant le rapport de la hauteur de la zone confinée sur la résistance globale du cylindre est présentée et analysé. Les modes de rupture observés pour chaque variante de confinement considérée sont également illustrés et discutés.

Dans le **quatrième chapitre**, les résultats de la simulation numérique menée en utilisant un code de calcul à base des éléments finis sont présentées et discutées. Une confrontation avec l'expérimental est réalisée pour la validation du modèle considéré.

Une **conclusion générale** contenant une synthèse des différents résultats obtenus et des perspectives aux travaux futurs, termine notre travail.

---

**CHAPITRE I :**

**LE MATERIAU DE BETON ET  
TECHNIQUE DE CONFINEMENT**

---

## CHAPITRE I : LE MATERIAU BETON ET TECHNIQUES DE CONFINEMENT

### I.1 Introduction

Le béton est le matériau de base le plus utilisé dans le domaine de génie civil depuis plus d'un siècle. L'avantage du béton est sa résistance en compression, mais malheureusement sa résistance en traction reste très faible et constitue l'inconvénient majeur, en plus dans le temps, le matériau béton subit des dégradations d'origines multiples (qualité des composants, sollicitations d'exploitation ou d'environnement, ..). Il peut se dégrader ainsi et perdre une part de ses propriétés. A cet effet , durant leur durée de vie , les ouvrages en béton peuvent nécessiter des interventions de réparation ou de renforcement pour restituer les résistances initiales et de palier aux développements des dégradations (fissures) ce qui permet d'augmenter la durée d'utilisation en remplissant leurs nouvelles fonctionnalités selon les normes requises par les règlements en vigueur.

Dans la littérature spécialisée, de nombreuses solutions techniques de réparation et réhabilitation des structures en béton sont proposées. La majorité des techniques proposées ont connu des applications réelles sur le terrain, surtout dans les pays développés qui ont mis en évidence leur efficacité. Cependant, tenant compte de la pathologie à traiter, après avoir réalisé une auscultation et diagnostic complets et précis des désordres, les causes des dégradations et leurs évolutions, il convient au concepteur de génie civil de choisir la solution technique idoine et appropriée pour réaliser une bonne et efficace réhabilitation de la structure.

Le renforcement par collage des tôles en acier des éléments structures ( poteaux, poutres, dalles, ...) est la première technique de renforcement qui a été considérée, mais suite à ses multiples inconvénients, tels que sa grande sensibilité à la corrosion, ainsi que son poids élevé, récemment beaucoup de chercheurs ont développés de nouveaux matériaux innovants, tels que les matériaux composites, qui actuellement sont alors utilisés comme substitut potentiel à l'acier dans plusieurs domaines du Génie Civil.

Si pour les éléments horizontaux (poutres, dalles,...) on utilise des plaques, des bandes ou lamelles en composites, pour les éléments verticaux, les chercheurs ont introduit la notion de confinement du béton à l'aide de matériaux composites à base de fibres de verres, de carbone, aramide et autre, qui consiste à enrober toute la section de l'élément par une enveloppe composite, qui permet d'exercer une pression sur le béton. Une fois le béton est fissuré,

on mobilise ainsi la pression latérale ou radiale de confinement ce qui provoquera une augmentation de la résistance et la déformation correspondante de l'élément, on améliore donc son comportement et sa durée de vie.

Dans ce présent chapitre, un aperçu du matériau béton (historique, définition, composition et caractéristiques physiques et mécaniques) est présenté succinctement. Une attention particulière est dédiée à la présentation des différentes techniques de renforcement par les matériaux composites.

## **I.2 Le béton**

### **I.2.1 Historique**

Le béton est un matériau de construction qui existait depuis 2000 ans avant JC, il est caractérisé par sa bonne résistance à la compression et sa faible résistance à la traction. Un matériau similaire été connu des égyptiens et des romains mais l'essor réel tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin qui a fait breveter le ciment portland en 1824 [1]. De même, en 1849 Josèphe Monier [2] a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer qui permet au béton de supporter partiellement les contraintes de traction. Cette nouvelle invention a été brevetée en 1967.

A partir du milieu du 19ème siècle, la technologie des bétons et ciment a connu un essor important. Ainsi, dans le marché actuel, on peut trouver toute une panoplie de ciments et bétons, avec des propriétés physico- mécaniques très importantes. Les résistances sont améliorées et l'évolution de l'architecture a permis de diversifier les applications.

### **I.2.2 Définition**

Le béton est un agglomérât de granulats (sable et graviers), de ciment, d'additions minérales, en proportions diverses définies à partir de l'analyse granulométrique. Pour la confection des bétons, un malaxage des différents constituants dans un malaxeur rotatif est réalisé en ajoutant de l'eau propre et des adjuvants (super plastifiants, etc.). Plusieurs méthodes de formulation de béton sont proposées par les auteurs, les méthodes les plus répondues et utilisées dans notre pays sont : la méthode de Dreux – Gorisse et la méthode de Faury basée sur les indices de pondération.

Le matériau béton est un matériau bon marché, économique car il est fabriqué à partir de ressources abondantes localement dans plusieurs régions et pays, en plus de sa résistance en compression, il est durable et assure les isolations thermique et phonique, il peut aisément

épouser des formes architecturales les plus complexes, il suffit juste de préparer le coffrage, il est facile à mettre en œuvre et se marie bien avec l'acier. [3]

### I.2.3 Les composants du béton

#### ➤ Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés « agrégats ».

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles. [3]

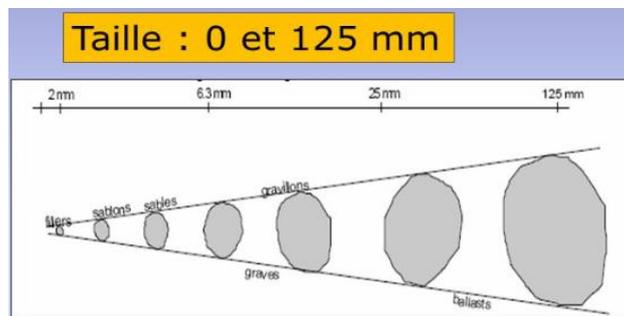


Figure I.1: classes granulaires principales.

#### ➤ Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [4]

#### ➤ Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités inférieure à 5% de quantité de ciment, afin d'améliorer certaines propriétés. Les principaux adjuvants sont :

Les plastifiants, les retardateurs de prise du ciment, les accélérateurs de prise ou de durcissement et les entraîneurs d'air. [4]

#### ➤ Eau de gâchage

De façon générale, l'eau de gâchage doit être propre (exp : eau potable). Il est déconseillé d'utiliser l'eau de mer qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, Les sels sont considérés comme des agents qui provoqueraient les dégradations du béton, Un excès d'impuretés peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité

volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des taches, et corroder les armatures et réduire la durabilité.

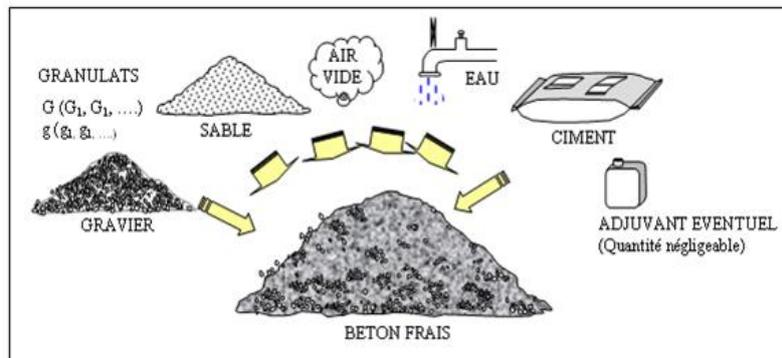


Figure I.2: Les différents constituants du béton destiné à la construction. [31]

## I.2.4 Caractéristiques physiques et mécaniques

### I.2.4.1 Caractéristiques physiques (masse volumique)

- La masse volumique du béton à granulats courants (normal) → 2200 - 2400 kg/m<sup>3</sup>
- La masse volumique du béton à granulats légers → 700 - 1500 kg/m<sup>3</sup>
- La masse volumique du béton à granulats lourds → 3500 - 4000 kg/m<sup>3</sup>

### I.2.4.2 Caractéristiques mécaniques

#### ➤ Résistance à la compression

Le béton est caractérisé par sa résistance à la compression à 28 jours, elle est notée  $f_{c28}$  et est fonction de la nature des constituants, de la classe du ciment utilisé, du dosage en m<sup>3</sup>, et des conditions de fabrication du béton.

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (Résistance à la compression, module d'élasticité  $E$ , le coefficient de poisson et la loi de comportement du béton). Cet essai consiste à exercer une force axiale de compression en utilisant une machine hydraulique de compression sur des éprouvettes normalisées, de forme cylindrique de hauteur  $H=32\text{cm}$  et de diamètre  $\phi =16\text{cm}$  ou sur des éprouvettes cubiques de dimensions normalisées. La charge de rupture 'Frup' est la force maximale enregistrée au cours de l'essai.

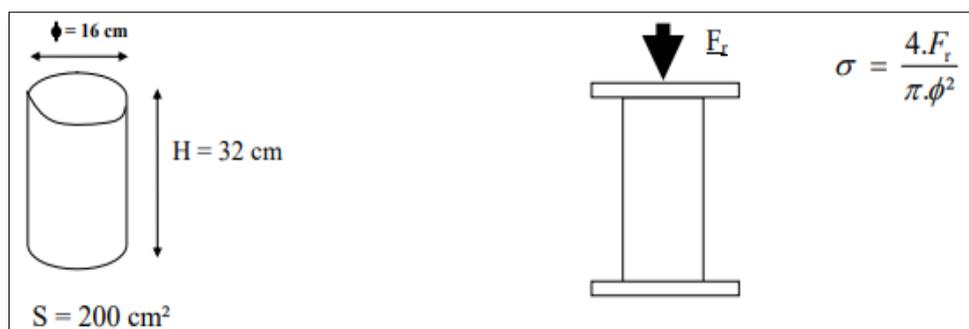


Figure I.3: Essai de compression uni axiale.

➤ **Résistance à la traction**

La mesure directe de la résistance à la traction par un essai de traction axiale étant délicate et difficile à réaliser. Il faut un dispositif spécifique pour réaliser un essai de traction directe sur des éprouvettes normalisées en béton.

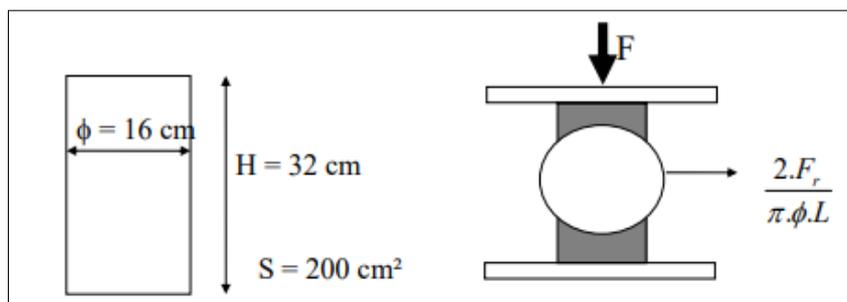
Deux modes opératoires différents sont proposés pour déterminer cette résistance :

- Flexion d'éprouvettes prismatiques non armées.
- Fendage diamétral d'une éprouvette cylindrique (essai Brésilien).

La résistance caractéristique à la traction du béton à (*j*) jours, notée  $f_{ij}$ , est conventionnellement définie par les relations suivantes :

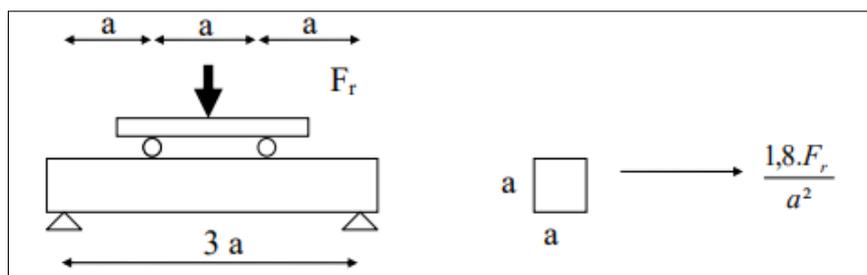
$$f_{tj} = 0.6 + (0.06 \times f_{cj}) \dots \dots \dots (1)$$

➤ **Essai de traction par fendage**



**Figure I.4:** Essai de traction par fendage.

➤ **Essai de traction par flexion**



**Figure I.5:** Essai de traction par flexion.

➤ **Module de déformation longitudinale**

- **Module de déformation longitudinale instantané**

Sous les contraintes normales d'une durée d'application inférieure à **24 heures**, le module de déformation longitudinale instantané du béton âgé de (*j*) jours noté  $E_{ij}$  est égal à :

$$E_{ij} = 11000 \times \sqrt[3]{f_{cj}} \dots \dots \dots (2)$$

• **Module de déformation longitudinale différé**

Sous des contraintes de longue durée d'application, le module de déformation longitudinale différé qui permet de calculer la déformation finale du béton est donné par la formule :

$$E_{ij} = 3700 \times \sqrt[3]{f_{cj}} \dots\dots\dots(3)$$

• **Module de déformation transversale**

Le module de déformation transversale noté «G» est donné par la formule suivante :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(4)$$

E : module de YOUNG.

ν : Coefficient de POISSON.

• **Le coefficient de Poisson**

Le coefficient de poisson ν par définition est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale.

$$\nu = \frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \dots\dots\dots(5)$$

• **Diagrammes contraintes – déformations : Article A.4.3, 4 du BAEL**

Le diagramme contraintes (σ<sub>bc</sub>) déformations (ε<sub>bc</sub>) du béton aux ELU règlementaires est le diagramme de calcul simplifié dit "PARABOLE- RECTANGLE". Le diagramme présenté dans la figure I.6 schématise ces dispositions. [5]

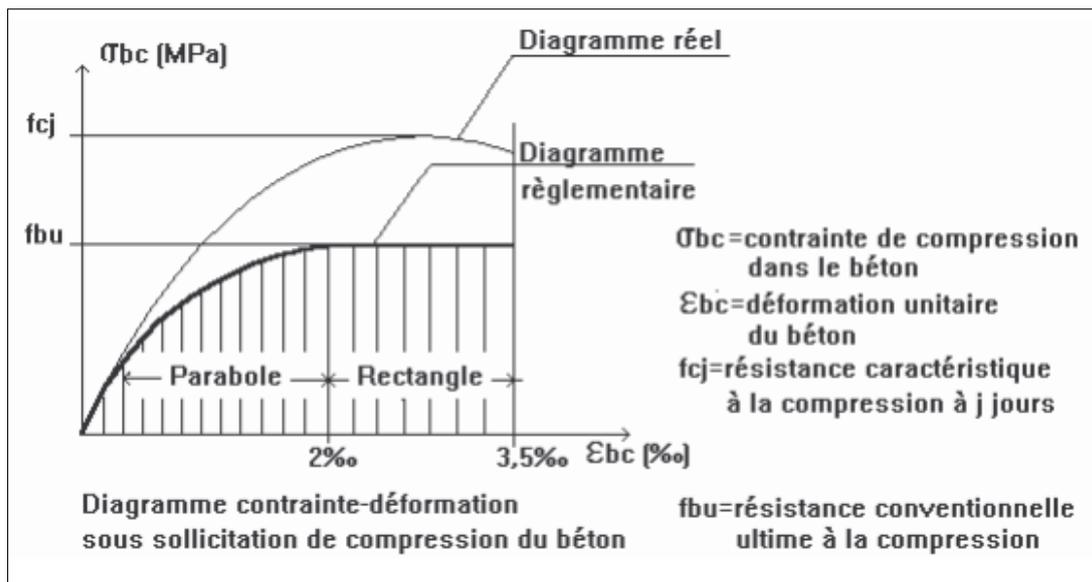


Figure I.6: Diagramme contrainte-déformation en compression.

### I.3 Techniques de renforcement

#### I.3.1 Définition

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier, la ductilité et la résistance d'une structure pour répondre à de nouvelles conditions de service non prises en compte dans les calculs. [6]

#### I.3.2 Gainage

C'est une opération nommée aussi chemisage qui consiste à reconstituer ou à augmenter la section d'un élément en service dans le but d'augmenter sa résistance. Le gainage se réalise selon deux types :

- **En acier**

Généralement cette technique est utilisée pour les poteaux, consiste à souder des cornières longitudinales avec des aciers plats transversaux autour des poteaux rectangulaires figure I.7. Le mince espace entre la chemise et le poteau, généralement inférieur à 10 mm, est rempli de coulis de ciment afin d'assurer la continuité entre la chemise et le poteau. [7]

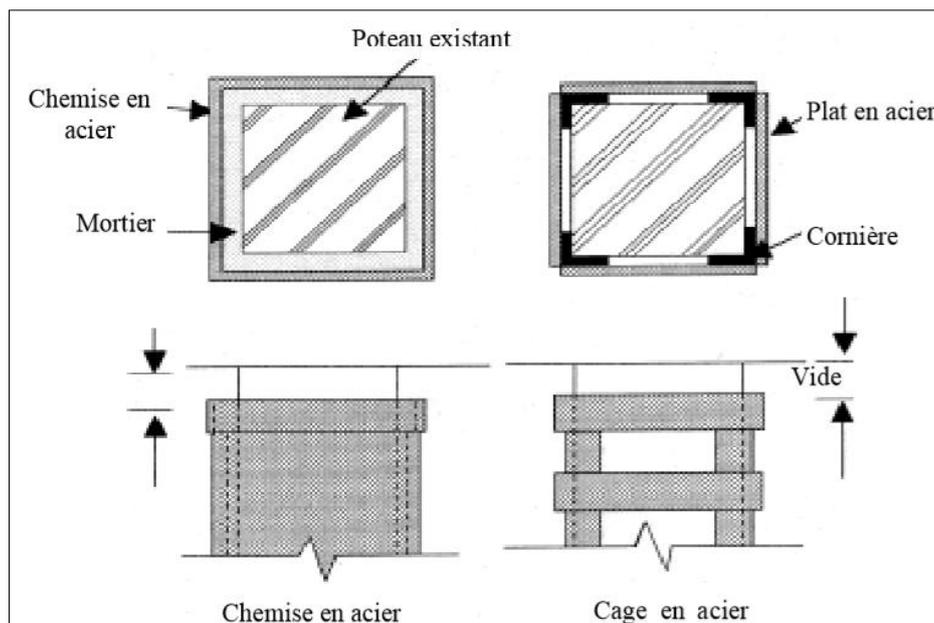


Figure I.7: Chemisage en acier Fukuyama et Sugano (2000).

- **En béton**

L'inconvénient du chemisage en béton armé réside dans l'augmentation considérable des sections figure I.8 par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, (Fukuyama et Sugano 2000, Monti 2003). [7]

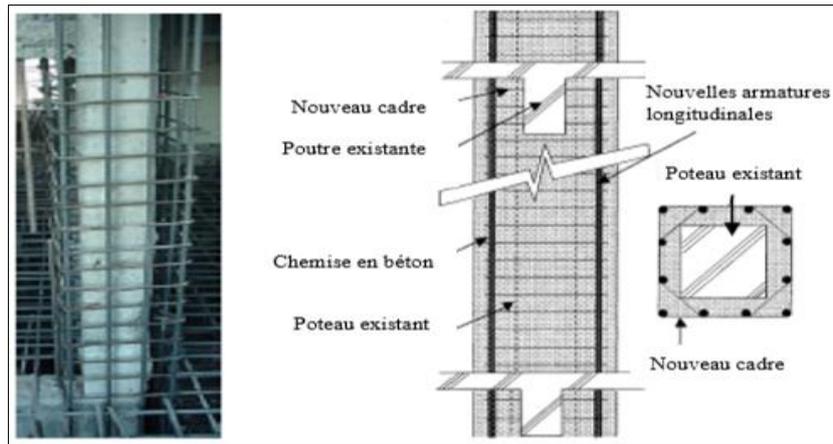


Figure I.8: Chemisage en béton armé (Fukuyama et Sugano 2000).

### I.3.3 Le béton projeté

La méthode du béton projeté est une option souvent utilisée lorsque les surfaces de béton à réparer sont importantes. Ce procédé de renforcement est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.

Deux techniques principales de projection sont proposées : projections par voie sèche et par voie humide, Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale. [8]

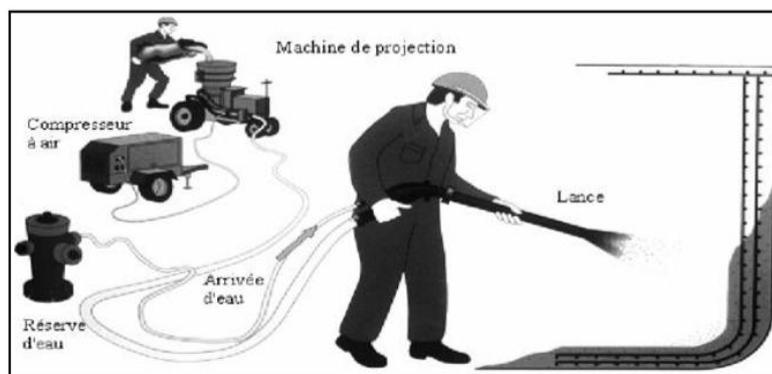


Figure I.9: Béton projeté par voie sèche.

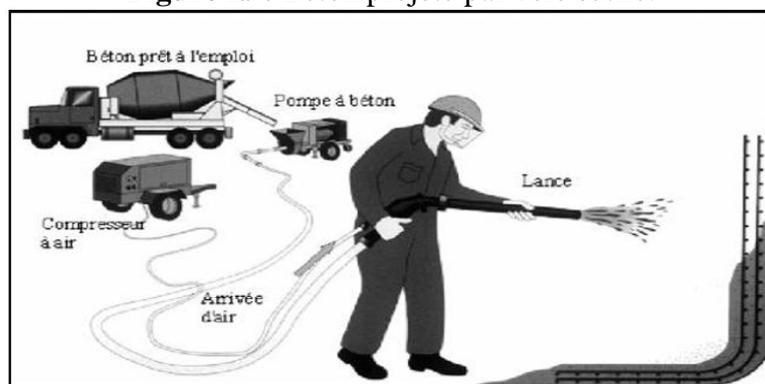


Figure I.10: Béton projeté par voie humide.

### I.3.4 Précontrainte extérieure

La précontrainte additionnelle consiste à appliquer un effort de compression externe à l'aide d'un câble de précontrainte éliminant ainsi les contraintes de traction existante. Elle est applicable généralement pour les dalles de plancher, les poutres et consoles courtes, les vousoirs des tabliers de ponts, etc. [9]

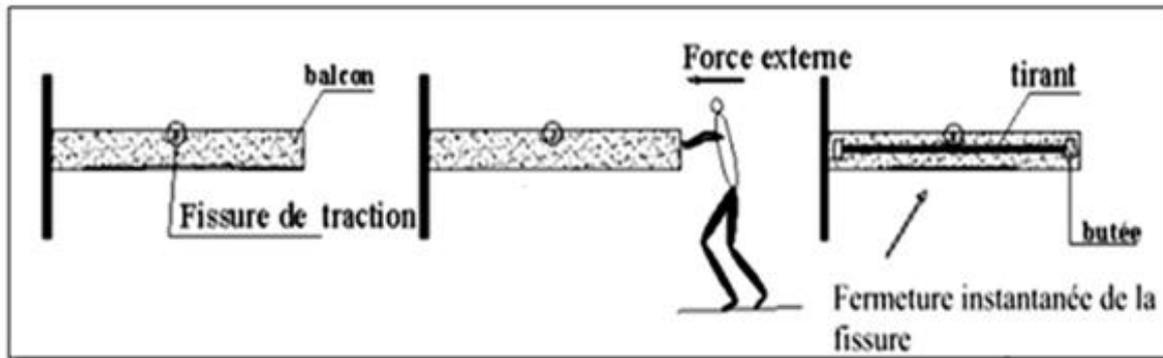


Figure I.11: Application d'effort de précontrainte. [9]

### I.3.5 Collages des tôles d'acier

Ces dernières années, le collage des plaques d'acier sur la sous face des poutres ou dalles pour mieux reprendre les efforts de flexion et des efforts tranchants, est considérée comme une solution prometteuse. Le collage des plaques à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de l'élément renforcée. Suite à l'épaisseur faible des tôles ou plaques d'acier, les dimensions de la structure à réparer ne varient pas énormément. [7]



Figure I.12: Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet- (Luyckx 1999).

### **I.3.6 Matériaux composites**

#### **I.3.6.1 Définition et propriétés**

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Un matériau composite est constitué d'au moins de deux phases, l'une est continue appelée matrice dont le rôle consiste à transmettre les charges aux renforts et protéger ces dernières contre les attaques atmosphériques (corrosion, ...) et une phase discontinue appelée renfort, dont le rôle consiste à supporter toutes les charges. Ils confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Il permet aussi d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc.

L'interface doit être soignée pour éviter les décollements de la plaque de son support béton et les problèmes de délaminage lors du chargement. [10]

Ces matériaux disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels, tels que :

- La légèreté
- Grande résistance à la fatigue
- Liberté de forme
- Une bonne isolation électrique
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité de la chaleur et de la corrosion.

Toutefois, un certain nombre d'inconvénients sont associés aux matériaux composites :

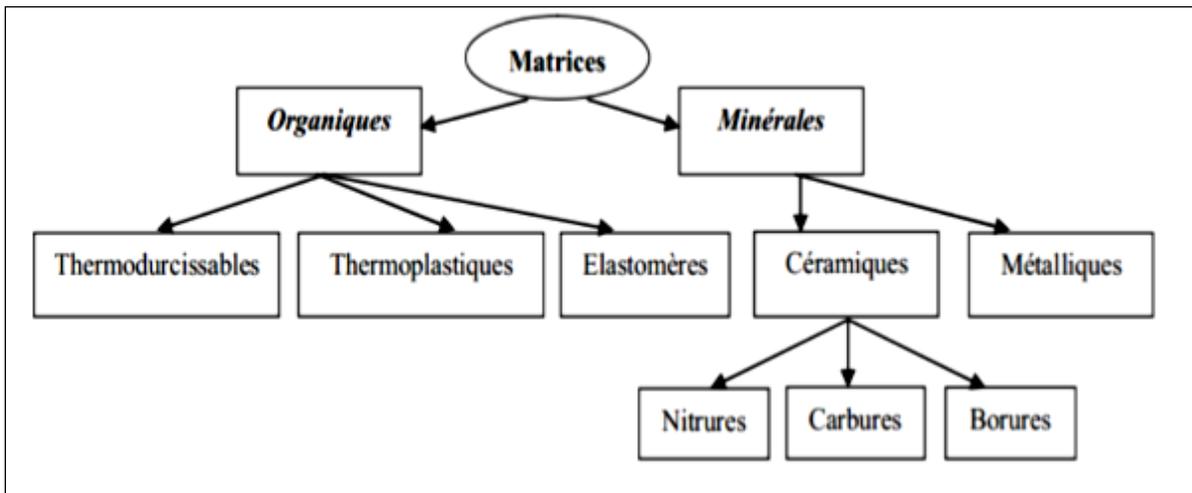
- Coût important du passage matériau métallique à matériau composite, prenant en compte le coût du matériau (des constituants) et le coût associé au procédé de fabrication.
- Sensibilité à l'environnement des matrices organiques entraînant une perte de propriétés mécaniques notables après vieillissement thermique ou hydrique ...

#### **I.3.6.2 Composition des matériaux composites**

- **La matrice**

La matrice assure le transfert des sollicitations aux fibres et de le maintien des fibres en position, elle doit donc être assez déformable et présenter une bonne compatibilité avec les fibres et assure la protection chimique des fibres. Les matrices utilisées dans la fabrication

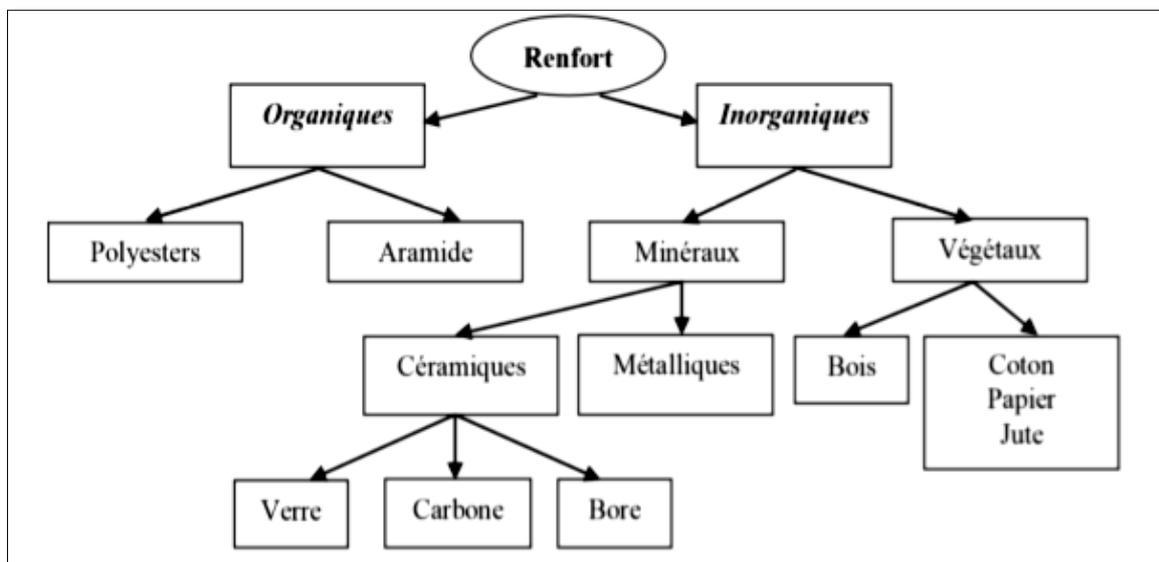
des composites peuvent être minérales ou organiques, ce schéma présente les deux types de matrice.



**Figure I.13:** Organigramme illustrant les différentes familles de matrice. [6]

• **Le renfort**

Les fibres (renforts) constituent le principal élément résistant du ‘FRP’, Leur diamètre varie entre 5 et 25 µm. Elles présentent une bonne résistance à la traction en même temps qu'un comportement élastique linéaire jusqu'à leur rupture.



**Figure I.14:** Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort. [6]

Parmi les fibres les plus utilisées en génie civil, on peut citer :

➤ **carbone**

Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. Leur haut module d'élasticité, est de 200 à 800 GPa et l'allongement ultime est de 0.3 à 2.5 %. La particularité

des fibres de carbone c'est leur non absorption de l'eau et leur résistance aux attaques d'origines chimiques. Comparativement aux aciers extensibles précontraints, leur résistance est excellente à la fatigue, avec une faible relaxation. Parmi les inconvénients, on peut citer leur mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. [7]

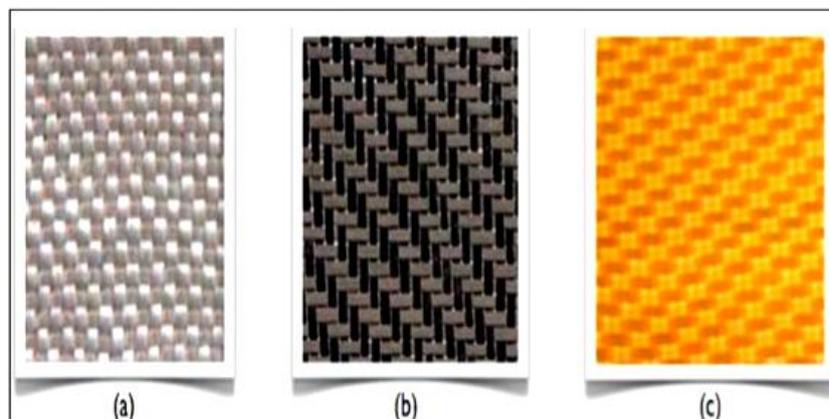
On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires (Chatain 2001). [7]

➤ **Verre**

Les fibres de verre sont plus économiques et moins chères comparativement aux fibres de carbone et les fibres d'aramide. Pour cette raison, le recours à ce type de fibres pour des applications spécifiques dans le domaine de génie civil, de l'industrie des bateaux et d'automobiles connaît un intérêt progressif. Les modules d'élasticité des fibres sont d'environ 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité de fabrication des fibres. Ces fibres présentent malheureusement un problème de relaxation et sont aussi sensibles à l'humidité, d'où la nécessité de faire le bon choix de la matrice pour assurer la protection des fibres. [7]

➤ **Aramide**

Appelés aussi polyamide aromatique. Les fibres d'aramide sont les moins utilisées dans le domaine de Génie civil, surtout pour le renforcement des éléments sollicités en flexion. Les plus connues sont les fibres dites : « kevlar ». Dans le marché, d'autres fibres d'aramide sont proposées, telles que : « Twaron », « Technora », et « SVM ». Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 GPa avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1.5 à 5 % selon la qualité. Les inconvénients sont : sensibilité aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations «ultraviolet », les problèmes de relaxation et de corrosion, et par conséquent, ne sont pas largement utilisées dans les applications de génie civil. [7]



**Figure I.15:** Exemple de tissu de fibre (a) verre (b) carbone (c) aramide.

- **Les formes des renforts**

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

- **Formes linéiques**

Une fibre (diamètre environ de 10  $\mu\text{m}$ ) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres.

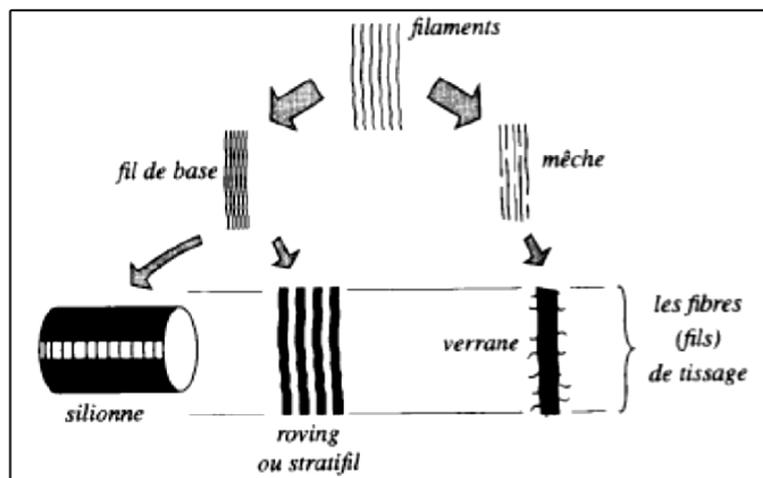


Figure I.16: Eléments composants de la forme linéique.

- **Formes surfaciques**

- **Tissus et rubans**

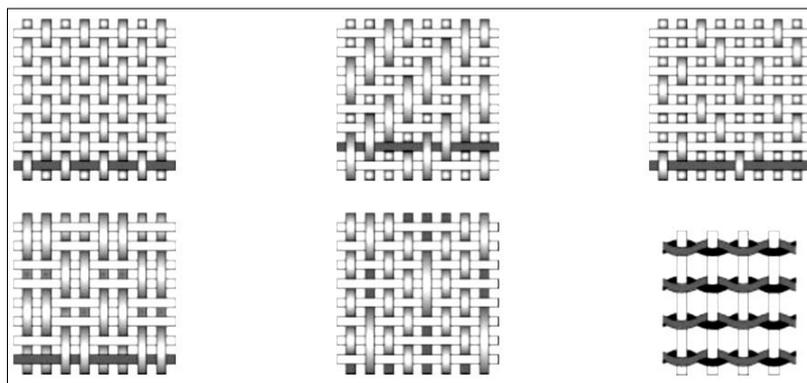


Figure I.17: fibres formes tissu et rubans.

- **Mats**

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



Figure I.18: Mat de verre.

➤ Structures multidimensionnelles

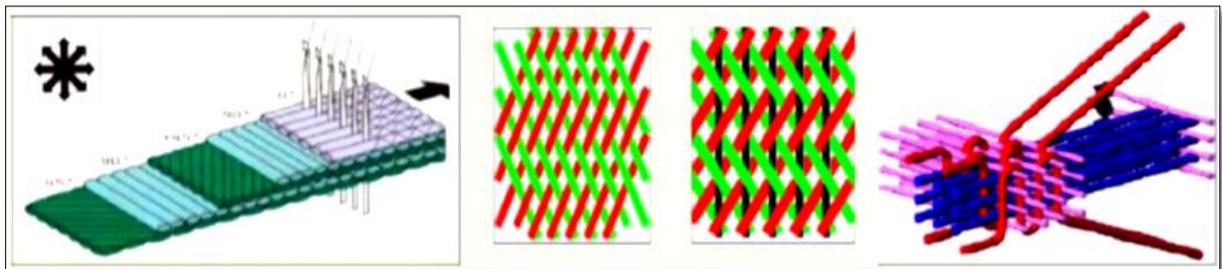


Figure I.19: Éléments composants de la structure multidimensionnelle.

**I.3.6.3 Propriétés mécaniques des composites**

Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont fonction de plusieurs paramètres. Les plus prépondérants sont : les résistances des fibres et de la matrice, la fraction volumique du renfort, les modules d'élasticité des constituants et l'orientation des fibres. Varient considérablement. Elles sont aussi affectées par le volume ou la dimension du composite lui-même (Carolin 2003). En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre (Foo et al. 2001). Les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil sont résumées dans le tableau I.1.

**Tableau I. 1:** Propriétés mécaniques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA»

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg / m3)	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

### I.3.6.4 Renforcement des éléments structuraux

#### a) Poteaux : cas de confinement

Actuellement, avec le développement de nouveaux matériaux, le confinement d'une colonne est réalisé par l'enroulement circonférentiel d'un tissu PRF composite (une enveloppe) autour de la colonne. Vu les caractéristiques mécaniques élevées des composites et leur légèreté. A la fin de la phase élastique du béton, des fissures apparaissent ce qui provoquera la mobilisation de la pression radiale de confinement. En effet, suite à la différence de rigidité entre le béton et le matériau composite FRP, l'enveloppe développe des contraintes de compression qui s'opposent aux contraintes radiales de traction dans le béton engendrées par la charge axiale. Ceci permet d'augmenter la résistance ultime et la déformation correspondante ainsi que la ductilité de la colonne en béton confinée par FRP. Les causes conduisant à renforcer les structures sont assez nombreuses, parmi ces causes on cite :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution.
- Renovations des structures anciennes.
- Changements de la forme de la structure.
- Dégâts dans la structure.
- Nécessités d'améliorer les conditions en service.



**Figure I.20:** Poteau circulaire en béton armé confiné par matériaux composites. [32]

#### b) Poutres

Le renforcement en flexion des poutres et dalles est souvent réalisé par le collage des bandes ou lamelles sur la surface tendue de la poutre, par contre le renforcement en cisaillement peut être assuré par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres, surtout dans les zones proches des extrémités de la jonction Poteau –poutres (Nœuds) ou des appuis dans le cas des systèmes isostatiques.

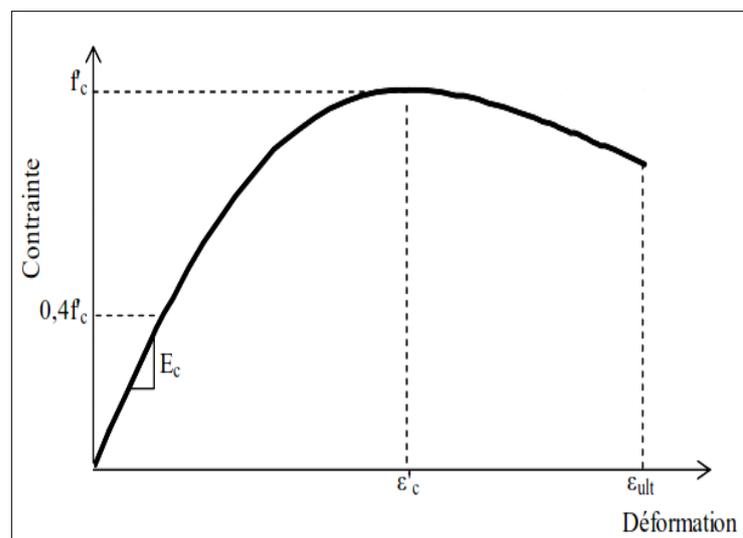


**Figure I.21:** Poutres en béton armé renforcées par FRP composites. [32]

## I.4 Confinement de béton

### I.4.1 Comportement typique du béton

Le comportement typique du béton est caractérisé par sa courbe contrainte-déformation. Après la phase élastique, le béton tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. La figure I.22 illustre la relation contrainte-déformation ( $\sigma$ -  $\epsilon$ ) du béton en compression.



**Figure I.22:** Courbe contrainte-déformation du béton en compression sous chargement statique.

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par une branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du

matériau, généralement admise à 0.002. Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime [12] La réponse du béton à la compression uni axiale est déterminée habituellement en chargeant des spécimens cylindriques normalisés dont le rapport entre la hauteur et le diamètre égale à 2.

#### I.4.2 Comportement du béton confiné

Plusieurs auteurs ont montré dans leurs travaux sur le confinement des colonnes en béton chargées axialement, que la présence de l'enveloppe FRP composites permet une augmentation considérable de la résistance et la ductilité de ces colonnes, car le béton est retenu latéralement par le FRP composite, qui réduit le développement rapide des fissures et empêche cette déformation. [13]

La figure I.23 présente les courbes typiques contraintes -déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure montre la différence du comportement entre les deux bétons.

Le confinement augmente en général deux caractéristique du béton : la résistance en compression  $f_{cc} > f_{co}$  et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression  $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$ .

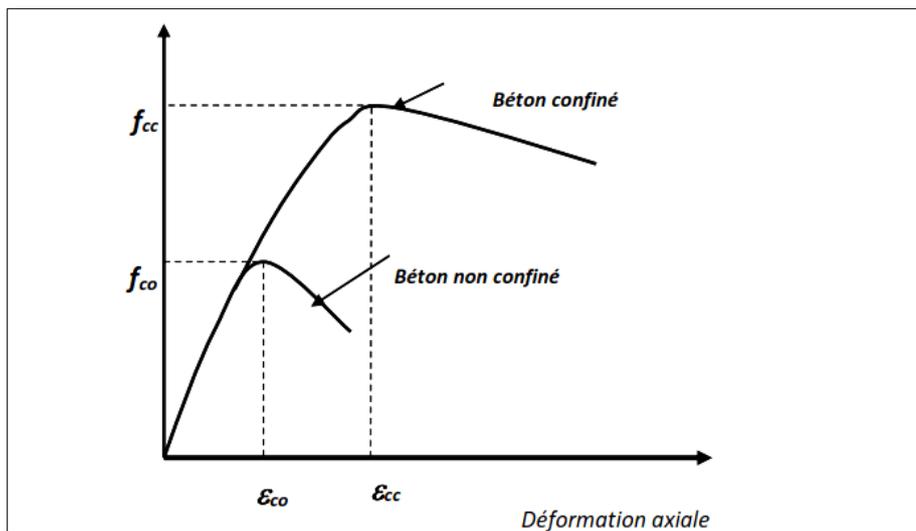


Figure I.23: Courbes contraintes déformation d'un béton confiné et non confiné. [14]

#### I.4.3 Méthode de confinement

Ils existent plusieurs techniques pour confiner les colonnes existantes saines ou endommagées en béton armé, en utilisant des composites PRF. Les trois méthodes les plus commodes et les plus utilisées sont : la stratification directe, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en PRF.

➤ **Stratification directe**

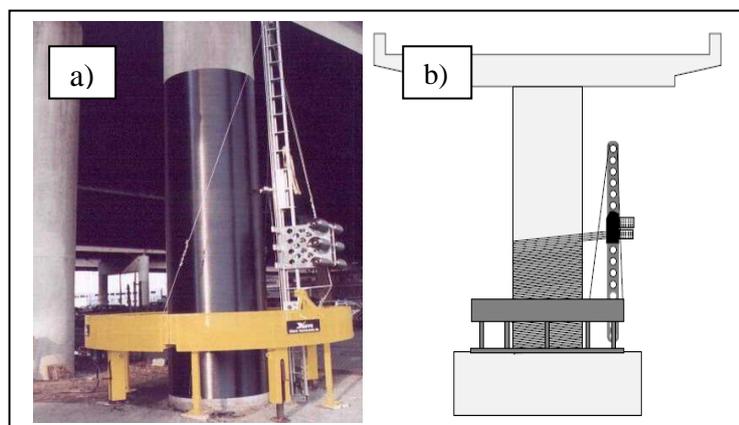
La stratification directe (stratification au contact) est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites PRF. Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés par les résines du polymère et enveloppés ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement.



**Figure I.24:** Confinement des poteaux par stratification directe. [33]

➤ **Enroulement filamentaire**

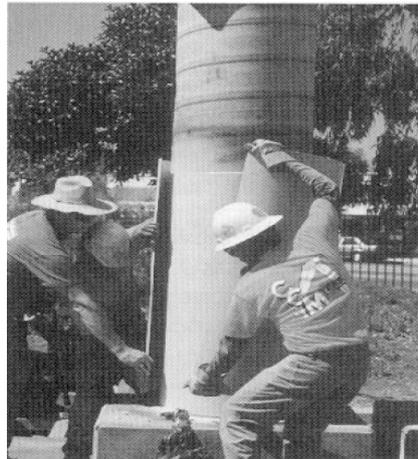
Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur. 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 I.25:** Confinement des poteaux par enroulement filamentaire : a) Monti2003, b) Master Builders, Inc, and Structurak Préservation Systems 1998, Balaguru et al 2009.

➤ **Chemisage par coquille préfabriquée**

Tel que rapporté par plusieurs auteurs dans la littérature, les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en PRF sous forme de coquilles préfabriquées. Elles peuvent être en demi-cercles ou demi-rectangles selon la forme du poteau à confiner. Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en PRF est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésives ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne.

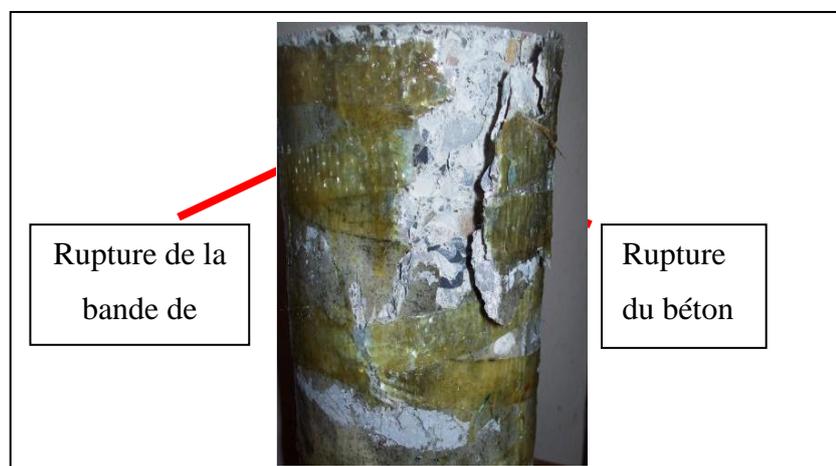


**Figure I.26:** Confinement des poteaux par coquille PRF préfabriquée.

**I.4.4 Mode de rupture du béton confiné**

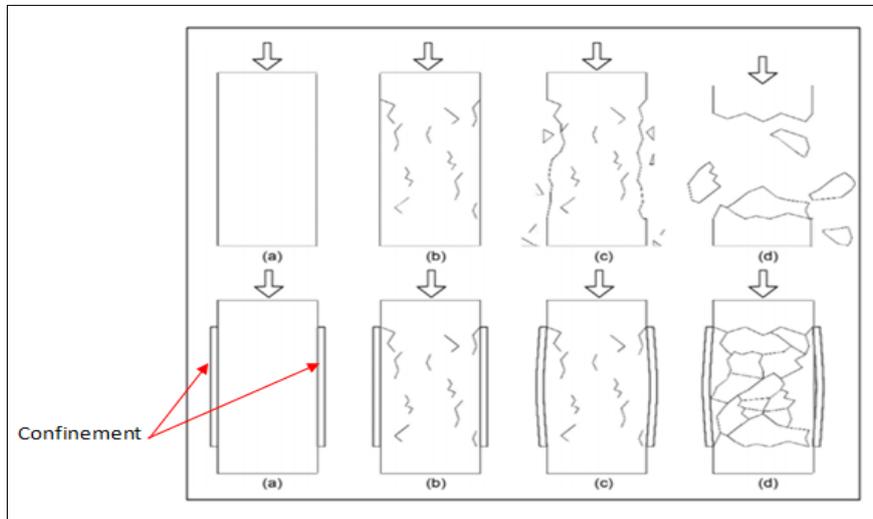
La rupture totale des éléments structuraux en béton confinés avec des composites FRP est obtenue soit par la rupture de l'enveloppe composite dans le sens longitudinal, ou transversal soit par la rupture de l'interface FRP composite- support béton. Le béton endommagé reste emprisonné dans l'enveloppe composite. A titre d'exemples, on présente :

- la rupture d'un cylindre en béton confiné par des bandes composites FRP disposées hélicoïdalement, obtenue par l'auteur. [15]



**Figure I.27:** Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP. [15]

Après rupture, l'auteur a remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement hélicoïdal, jusqu'à la rupture totale des bandes composites. C'est le comportement classique d'un béton confiné sous compression axiale, tel que schématisé sur la figure I.28.



**Figure I.28:** Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée durant le processus de chargement.

- Le mode de rupture obtenu par Shahawy et al [18] qui ont réalisé des essais de compression sur un total de 45 éprouvettes cylindriques du béton confiné par fibres de carbone et 10 éprouvettes cylindriques du béton non confiné avec un diamètre de 155mm et une hauteur de 305mm.



**Figure I.29:** Mode de rupture d'un cylindre enveloppé par des fibres de carbone. [18]

- Le mode de rupture obtenu par Liang Huang et al [19] des cylindres en béton confinés par un tube en polymère renforcé de fibre de verre GFRP et un renfort spirale en acier interne SR

à la fois, avec la variation dans le nombre des couches de GFRP et les ratios volumétriques de SR. La structure en béton est appelée béton confiné GFRP-SR.

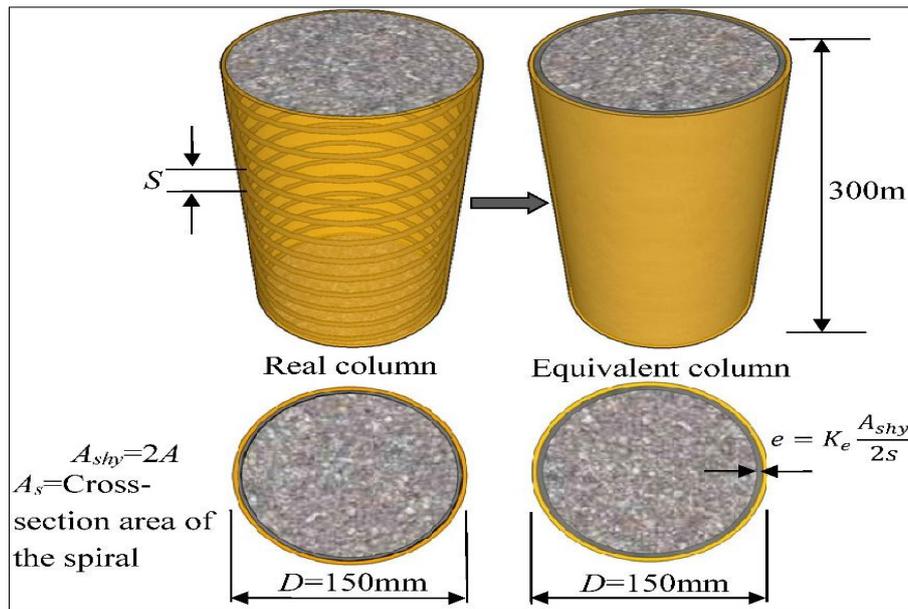


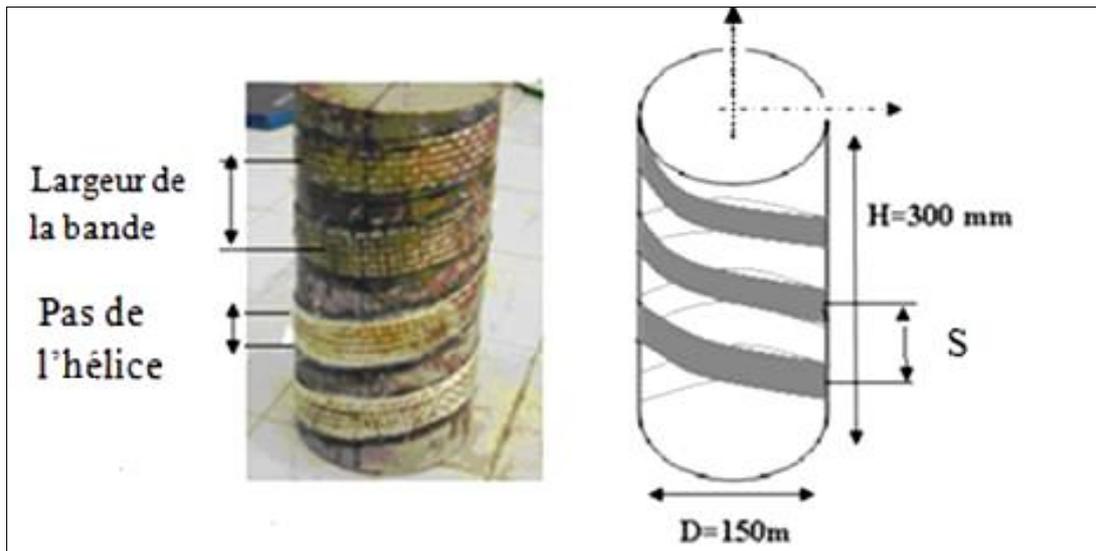
Figure I.30: Concept de béton confiné en acier équivalent. [19]

Les résultats des essais indiquent que le confinement GFRP-SR augmente la résistance ultime à la compression, la capacité de dissipation d'énergie et la ductilité du béton.



Figure I.31: Échec typique des spécimens. [19]

- Le mode de rupture obtenu par Ali Ahmed (2016) [15] qui a proposé une étude qui consiste à coller des bandes hélicoïdales continues en polymère renforcé de fibres de verre « **GFRP** » autour de cylindres en béton. Les gains en résistance et en déformation axiale sont alors évalués et analysés en tenant compte de la largeur de la bande de **GFRP** et du pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre en béton.



**Figure I.32:** Confinement partiel hélicoïdal avec GFRP. [15]

Pareillement, l'augmentation de la largeur de la bande du **GFRP** engendre une augmentation de la résistance et de la ductilité du spécimen, l'auteur a obtenu ainsi des gains en résistance de 26.9%, 14.32% et 2.24% pour des cylindres confinés avec des hélices de 5 spires, 4 spires et 3 spires et des largeurs de 4cm, 3cm et 2cm respectivement.



**Figure I.33:** Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal. [15]

L'augmentation du nombre de spires ou la réduction de la valeur du pas de l'hélice, induit un gain en matière de résistance à la compression et de la ductilité du spécimen. Les gains en résistance est de 39.12% et de 28.32% pour des cylindres confinés avec des hélices de 4 spires et des largeurs de 4cm et 3cm respectivement. L'effet de la largeur de la bande de **GFRP** et du pas de l'hélice et qu'elle forme autour du cylindre sur la résistance à la compression des cylindres confinés. Celle-ci croit avec l'accroissement de la largeur de la bande et le décroissement du pas de l'hélice.

## **I.5 Conclusion partielle**

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de génie civil (structures et ouvrages d'art) à cause de ses caractéristiques mécaniques intéressantes, en particulier sa résistance en compression, résistance au feu, isolation, facilité de mise en œuvre, économie,... ; sauf qu'il subit des dégradations à long terme. La réparation permet de restituer la résistance initiale alors que le renforcement produit une augmentation de la résistance et de la ductilité des structures dégradées ou présentant des défauts de conception ou d'exécution et l'adaptation des structures à de nouvelles conditions d'exploitation ainsi que leur mise en conformité vis-à-vis des règlements en vigueur. La technologie de renforcement ou de réparation avec des Polymères Renforcés de Fibres (FRP), est l'un des procédés les plus utilisés dans le monde. En plus de leur résistance à la corrosion et aux attaques chimiques, les matériaux composites présentent la particularité d'être résistants et légers à la fois.

La revue littéraire des différents travaux de recherches ayant porté sur le confinement de colonne en béton par les FRP, nous a permis de constater que la plupart des recherches ont été conduites sur des colonnes complètement enveloppées avec des matériaux composites.

Néanmoins certains travaux ont été conduits sur le collage des cerces en composites en circonférence de cylindres en béton.

---

**CHAPITRE II :**  
**INVESTIGATION EXPERIMENTALE**

---

## CHAPITRE II : INVESTIGATION EXPERIMENTALE

### II.1 Introduction

Ce chapitre est dédié totalement à la caractérisation expérimentale effectuée au niveau de laboratoire central des travaux publics (LCTP) de Bouira, des différents matériaux utilisés pour la confection des différentes éprouvettes. L'objectif consiste à mettre en évidence l'influence de la hauteur de la zone confinée du cylindre en béton sur la réponse mécanique globale de l'élément considéré. En effet, il a été démontré qu'un confinement total par des chemises composites permet d'augmenter la résistance ultime et la déformation correspondante au pic. Cependant, peu de travaux ont porté sur le confinement partiel, excepté quelques travaux qui ont mis en exergue l'apport du confinement partiel réalisé à travers des bandes discontinues ou en spirales. Dans ce chapitre, les différentes étapes de réalisation (caractérisation des matériaux, la formulation du béton, réalisation et conservation des éprouvettes et mise en place de matériaux composite) sont présentées.

### II.2 Caractérisation des matériaux

#### II.2.1 Généralités

Pour la confection d'un béton ou d'un mortier selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des matériaux utilisés. Les résultats surtout en termes de résistance sont très influencés par les caractéristiques intrinsèques des matériaux.

Pour cela, on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton par des essais normalisés qui seront effectués au laboratoire.

#### II.2.2 Analyse granulométrique par tamisage

Pour déterminer les proportions des constituants du béton, on doit réaliser en premier lieu une analyse granulométrique puis on choisira une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel, etc...

L'essai est basé sur la détermination des tamisât et refus, qui renseigne sur les proportions des différents grains constituant l'échantillon. Une série de tamis emboîtés les uns dans les autres, avec des dimensions des ouvertures décroissantes de haut vers le bas sont utilisés.

Les gravillons 3/8, 8/15 et le sable 0/3 ont été tamisés en utilisant des dimensions normalisées des tamis conformément à la norme (NF P 18-560) [23] :

**Tableau II.1:** Dimensions nominales des tamis.

<b>Module</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
<b>Tamis (mm)</b>	0.063	0.08	0.10	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630
<b>Module</b>	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
<b>Tamis (mm)</b>	0.800	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.300	8.00
<b>Module</b>	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/
<b>Tamis (mm)</b>	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	/



**Figure II.1:** Série des tamis.

### II.2.3 Mode opératoire

Les masses des constituants considérées pour la préparation des échantillons sont données comme suit :

$$M_{\text{Gravier } 8/15} = 3000 \text{ g}$$

$$M_{\text{Gravier } 3/8} = 1768.5 \text{ g}$$

$$M_{\text{Sable } 0/3} = 2270 \text{ g}$$

Les résultats sont présentés dans les tableaux II.2, II.3 et II.4 suivants :

**Tableau II.2:** Résultats d'analyse granulométrique du gravier 8/15.

<b>Tamis</b>	<b>Refus</b>		<b>Tamisât</b>	
	Masse (g)	(%)	Masse (g)	(%)
<b>16</b>	20.6	0.69	2979.40	99.31
<b>14</b>	232	7.73	2768	92.27
<b>12.5</b>	589	19.63	2411	80.37
<b>10</b>	1512.30	50.40	1487.70	49.59
<b>8</b>	2430.40	81.01	569.60	18.99
<b>6.3</b>	2864.80	95.49	135.2	4.51
<b>5</b>	2951.10	98.37	48.9	1.63
<b>4</b>	3000	100	0	0

**Tableau II.3:** Résultats d’analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis	Refus		Tamisât	
	Masse (g)	(%)	Masse (g)	(%)
10	0	0	1768.50	100
8	5.40	0.30	1763.10	99.70
6.3	242.50	13.71	1526	86.29
5	1064.60	60.20	730.90	39.80
2.5	1727	97.65	41.50	2.35
1.25	1755.40	99.26	13.10	0.74
0.63	1768.50	100	0	0

**Tableau II.4:** Résultats d’analyse granulométrique du sable0/3.

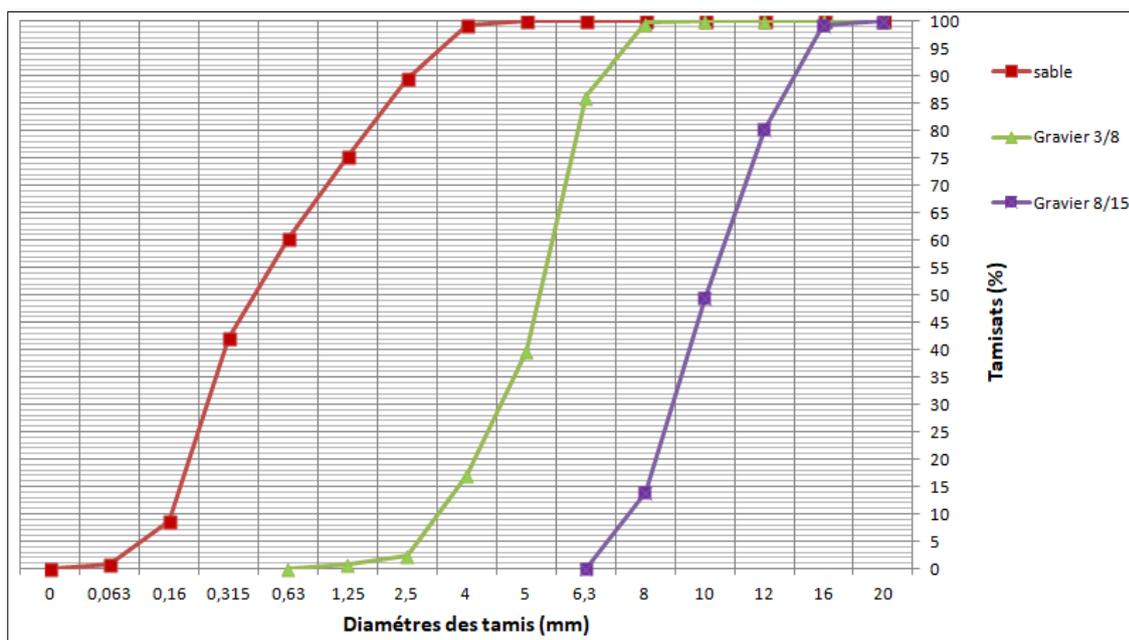
Tamis	Refus		Tamisât	
	Masse (g)	(%)	Masse (g)	(%)
6.3	0	0	2270	100
5	0	0	2270	100
4	17.71	0.78	2252.29	99.22
2.5	234.50	10.33	2035.50	89.67
1.25	556.60	24.52	1713.40	75.48
0.63	900.05	39.65	1369.95	60.35
0.315	1312.51	57.82	957.49	42.18
0.16	2071.83	91.27	198.17	8.73
0.063	2226.87	98.10	43.13	1.90

Pour la détermination de la finesse des sables, on calcule le moule de finesse (MF). Celui-ci correspond à 1/100 de la somme des refus cumulés des séries des tamis suivants :

0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 mm.

$$MF = (91.27 + 57.82 + 39.65 + 24.52 + 10.33 + 0) / 100 = 2.24$$

2.2 < MF < 2.8 → Donc notre sable est un sable moyen.



**Figure II.2 :** Courbes granulométriques des granulats.

Les pourcentages de tamisât cumulés sont présentés sous forme d'une courbe granulométrique, comme l'indique la figure II.2 précédente.

#### II.2.4 Détermination de la propreté superficielle

La propreté superficielle est le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm, est effectué selon la norme (NF P 18-591). [24]

Cet essai est effectué sur les gravillons 3/8 et 8/15, L'essai consiste à séparer par lavage sur tamis 0.5 mm les particules et les impuretés contenues dans l'échantillon.

La propreté superficielle P est obtenue par le rapport :  $P = \frac{m}{M_s} 100$



Figure II.3: Lavage des graviers pour l'essai de la propreté superficielle.



Figure II.4: Etuve de séchage des matériaux.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.5:

**Tableau II.5:** Teneur en impuretés des gravillons 3/8 et 8/15.

Caractéristiques	3/8	8/15
Masse humide non lavé $M_{h1}$ (g)	1633.90	1665.70
Masse humide lavé $M_h$ (g)	1919.50	1586.60
Masse sèche non lavé $M_{s1}$ (g)	1596.90	1656.40
$M_s = (M_{s1} / M_{h1}) \times M_h$ (g)	1876.03	1577.74
Masse sèche lavé $m'$ (g)	1823.70	1552.60
$m = M_s - m'$ (g)	53.03	25.14
Propreté superficielle $P$ (%)	2.83	1.59

D'après les résultats

- ✓  $P(3/8) > 2\%$  : donc, il est nécessaire de laver le matériau.
- ✓  $P(8/15) < 2\%$  : donc, il n'est pas nécessaire laver le matériau.

**II.2.5 Essai d'équivalent de sable à 10% de fines**

L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines est réalisé selon la norme (NF P 18-597) [24] permet de mesurer la propreté d'un sable sur la fraction passant au tamis de 2 mm, et dont la proportion des éléments fins passant au tamis de 0.08 mm a été ramenée à 10 %. Puis on détermine le 'ES' par une valeur numérique exprimant le rapport volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent par la formule suivante :

$$Es = 100 * h2/h1$$

Pour l'agitation des échantillons, on a utilisé la machine illustrée par la figure II.5:



**Figure II.5:** Essai équivalent de sable.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.6 suivant :

**Tableau II.6:** Résultats d'équivalent de sable.

Essai	Hauteur totale $h1$ (cm)	Hauteur de sable visible $h2$ (cm)	Equivalent de sable (%)	La moyenne
1	13.20	8.30	62.87	63.49
2	13.10	8.40	64.12	

Dans notre cas :  $60 < ES < 70$  : donc, notre sable est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses.

**II.2.6 Détermination de la masse volumique**

La masse volumique c'est le rapport entre la masse d'un corps et son volume. On distingue : la masse volumique apparente et la masse volumique absolue.

• **La masse volumique apparente**

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent figure II.6 en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ±5 °C, exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup>, T/m<sup>3</sup>), déterminée par la norme (NF P 18-554) [23].

**Tableau II.7:** Mesure de la masse volumique apparente **ρ<sub>ap</sub>** des granulats.

Matériaux	Masse (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\rho_{ap} = \frac{M}{V}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Sable 0/3	1640.3	945	1.74
Gravier 3/8	1298.4	945	1.37
Gravier 8/15	1351.1	945	1.43



**Figure II.6:** Essai de masse volumique apparente.

• **La masse volumique absolue**

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu (figure II.7) de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup> ou t/m<sup>3</sup>), selon la norme (NF P 18-555) [23].

On utilise la méthode de l'éprouvette graduée.

**Tableau II.8:** Résultats d'essai de la masse volumique absolue **ρ<sub>ab</sub>** des granulats.

Matériaux	Masse (g)	Volume 1 (cm <sup>3</sup> )	Volume 2 (cm <sup>3</sup> )	$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Sable 0/3	1640.3	850	1466.65	2.66
Gravier 3/8	1298.4	850	1343.69	2.63
Gravier 8/15	1351.1	850	1354.14	2.68



**Figure II.7 :** Mesure de la masse volumique absolue.

### II.2.7 Essai Los Angeles

L'essai Los Angeles consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles, telle qu'elle est décrite dans la (NF P 18-573) [25].

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires 4-6.3 mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; 16-31,5 mm ; 25-50 mm, de la granularité du matériau, La résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par le coefficient los Angeles du matériau (LA), avec :

$$LA = 100 \times \frac{m}{5000}$$

Où : m = 5000-m'

m' : est la Masse du refus à 1.6mm lavé et séché



**Figure II.8:** Machine Los Angeles.

Le tableau II.9 présente le choix de nombre des boulets selon la classe granulaire est comme suit :

**Tableau II.9:** la charge de boulets correspondant à la classe granulaire.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 - 10	9	3960	A
10 - 14	11	4840	-150
10 - 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	A
25 - 50	12	5280	-150

Les résultats obtenus sont présentés dan le tableau suivant :

**Tableau II.10:** Résultats d’essai de los Angeles.

Masse d'essai (g)	Nombre de boulet	Masse du refus à 1.6mm lavé et séché M(g)	Coefficient LA (%)
5000	11	3630	27.40

Donc, on peut conclure que notre matériau a une bonne résistance à l’abrasion.

### II.3 Formulation du béton

L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents constituants : graviers, sable, ciment et eau de gâchage, afin d’obtenir un béton de qualité souhaité.

On a utilisé la méthode dite méthode de DREUX-GORISSE.

- La résistance caractéristique souhaitée est  $f_{c28} = 25$  MPa.
- Résistance moyenne à 28 jours  $f_{c28} = 25 + 0.15 \times 25 = 28.75$  MPa.
- L’ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône  $A = 7$  cm
- Le ciment employé est : CPJ CEM II/A 42.5N donc  $f_{CE} = 42.5$  MPa
- Les granulats sont de qualité courante et  $D_{max} = 16$ mm

On peut donc calculer C/E par la formule  $f_c = G \cdot f_{CE} \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$ .

Avec  $G = 0.45$

**Tableau II.11:**Coefficient granulaire G en fonction de la qualité des granulats et de  $D_{max}$ . [4]

Qualité des granulats	Dimension $D_{max}$ des granulats		
	Fins $D_{max} \leq 12.5$ mm	Moyens $20\text{mm} \leq D_{max} \leq 31.5$ mm	Gros $D_{max} \leq 50$ mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$$\frac{C}{E} = \frac{28.75}{0.45 \times 42.5} + 0.5$$

D'où  $\frac{C}{E} = 2$

**C=350kg/m<sup>3</sup>**

$$\frac{C}{E} = 2 \Rightarrow E = 175 \text{ litre/m}^3$$

Remarque : il faut corriger le dosage en eau parce que D<sub>max</sub>=16mm

E= 175 × 1.04      Donc **E = 182 litre/m<sup>3</sup>**

**Tableau II.12:**Correction sur le dosage en eau en fonction de D. [4]

Dimension max des granulats D en mm	5	8à10	12.5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63.5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12



**Figure II.9:**Affaissement de cône d'Abrams.

**II.3.1 La courbe OAB**

Les granulats ont été examinés et jugés satisfaisants leurs courbes granulaires sont représentées sur le graphique. Le module de finesse du sable est satisfaisant.

Le coordonnées des points sont:

- O (0,0)
- B (D<sub>max</sub>, 100)
- A (X, Y)      D<sub>max</sub> < 20mm   => X = D<sub>max</sub>/2

X = 16/2

**X = 8**

Y = 50 - √D<sub>max</sub> + k +k<sub>s</sub> + k<sub>p</sub>

On a:  $k = 2$

$$K_s = 6 \times M_f - 15 = 6 \times 2.24 - 15$$

$$K_s = -1.56$$

$k_p = 0$  (béton non pompable)

$$Y = 50 - \sqrt{16} + 2 - 1.56 + 0$$

$$Y = 46.44$$

**Tableau II.13:** Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats. [4]

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
<b>Forme des granulats (sable en particulier)</b>						
<b>Dosage en Ciment</b>						
<b>400+Fluide</b>	-2	0	-4	-2	-6	-4
<b>400</b>	0	+2	-2	0	-4	-2
<b>350</b>	+2	+4	0	+2	-2	0
<b>300</b>	+4	+6	+2	+4	0	+2
<b>250</b>	+6	+8	+4	+6	+2	+4
<b>200</b>	+8	+10	+6	+8	+4	+6

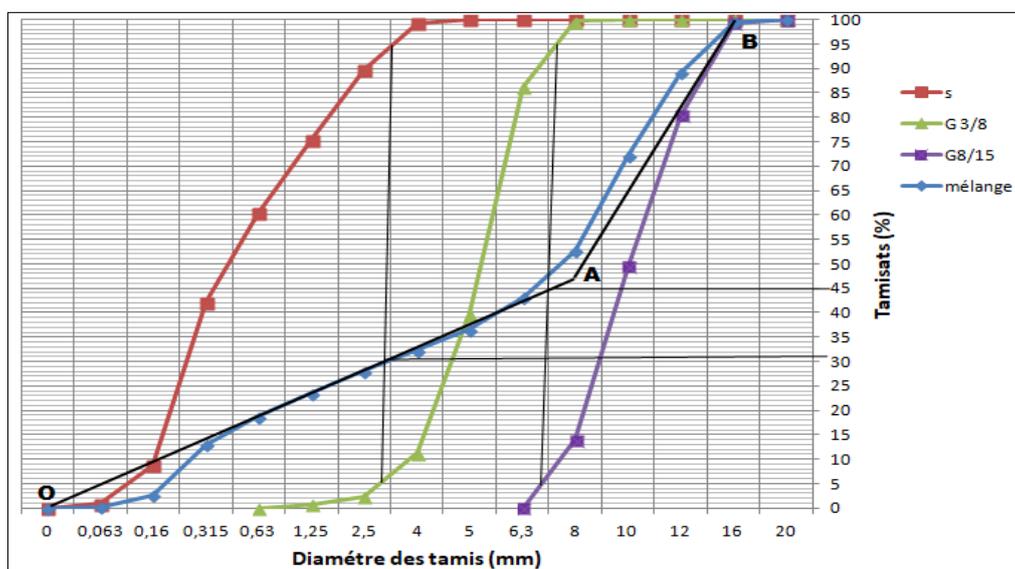
### II.3.2 Pourcentage des granulats

Sable 0/3 = 31%

Gravier 3/8 = 14%

Gravier 8/15 = 55%

En adoptant pour le coefficient de compacité dans le tableau II.14, ( $D_{max} = 16 \text{ mm}$ ), le type de béton est un béton plastique avec une vibration normale, la valeur de  $= 0.815$ .



**Figure II.10:** courbe OAB (pourcentages des granulats).

**Tableau II.14:** Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage. [4]

Consistance	Serrage	Compacité (γ)						
		D <sub>max</sub> = 5	D <sub>max</sub> = 8	D <sub>max</sub> = 12.5	D <sub>max</sub> = 20	D <sub>max</sub> = 31.5	D <sub>max</sub> = 50	D <sub>max</sub> = 80
<b>Molle (TP-F1)</b>	<b>Piquage</b>	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	<b>Vibration Faible</b>	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	<b>Vibration normale</b>	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
<b>Plastique (P)</b>	<b>Piquage</b>	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	<b>Vibration Faible</b>	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	<b>Vibration normale</b>	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	<b>Vibration Puissante</b>	0.755	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
<b>Ferme (F)</b>	<b>Piquage</b>	0.755	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	<b>Vibration Faible</b>	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	<b>Vibration Puissante</b>	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

**Note**  
 \*Ces valeurs sont convenables pour les granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes  
 Sable roulé et gravier concassé (c<sub>1</sub> = -0.01)  
 Sable et gravier concassé (c<sub>1</sub> = -0.03)  
 \*Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de c (c<sub>2</sub> = -0.03)  
 \*Pour un dosage en ciment C≠ 350Kg/m<sup>3</sup> on apportera le terme correctif suivant  
 (c<sub>3</sub> = (C - 350) / 5000)

Pour notre cas, on a un sable et gravier concassé donc, on apportera une correction de « -0.03 »

$$\gamma = 0.815 - 0.03 \Rightarrow \gamma = \mathbf{0.785}$$

• **Volume des granulats**

$$V_{gr} = 1000 \times \gamma - V_{ciment}$$

$$V_{ciment} = m_c / \rho_c = 350 / 3.1$$

$$V_{ciment} = 112.9 \text{ L/m}^3$$

$$V_{gr} = 1000 \times 0.785 - 112.9$$

$$V_{gr} = 672.1 \text{ L/m}^3$$

$$V_s = 672.1 \times 0.31 = 208.35 \text{ L/m}^3$$

$$V_{g\ 3/8} = 672.1 \times 0.14 = 94.1 \text{ L/m}^3$$

$$V_{g\ 8/15} = 672.1 \times 0.55 = 369.65 \text{ L/m}^3$$

• **Masse des granulats**

$$M_s = 208.35 \times 2.66 = 554.21 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_{g\ 3/8} = 94.1 \times 2.63 = 247.48 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_{g\ 8/15} = 369.65 \times 2.67 = 986.96 \text{ Kg/m}^3$$

• **La masse volumique théorique**

$\rho_{th} = 2138.65 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow$  Béton normal.

**II.3.3 Adjuvant**

On a utilisé un adjuvant super plastifiant « Meda Flow » pour améliorer l’ouvrabilité de notre béton. Ses caractéristiques son présentés dans le tableau II.15.

Le pourcentage est égal à 0.4% par rapport au poids du ciment.

$M_{adj} = 0.004 \times 350 = 1.4 \text{ Kg/m}^3$

$V_{adj} = M / \rho = 1.4 / 1.21 = 1.15 \text{ L/m}^3$

**Tableau II.15:** Fiche technique de l’adjuvant utilisé.

Caractéristiques	
Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique à +20°C	1.21 ± 0.03 g/cm <sup>3</sup>
Teneur en chlorure	< 0.1%
Extrait sec	39.0 ± 2.0%
Na2o eq	≤ 1%
Ph	5 ± 2
Point de congélation	-2°c

**II.3.4 Composition du béton**

Les proportions utilisées dans la formulation sont présentées dans le tableau II.6.

**Tableau II.16:** Les proportions de la formulation du béton.

Constituants	Masse en Kg /m <sup>3</sup>
Sable 0/3	554.21
Gravier 3/8	247.48
Gravier 8/15	986.96
Ciment	350
Eau	182
Adjuvant	1.4

**II.4 Réalisation des éprouvettes**

Les cylindres ont été coulés dans des moules normalisés, (de diamètre 16cm et de hauteur 32 cm), puis décoffrés au bout de 48 heures plus tard. Ils ont subi par la suite, une cure d’hydratation à température de 20° constante pendant 28 jours selon la norme NF EN12390-4.

**II.4.1 Confections des éprouvettes**

Avant la confection des éprouvettes, il faut que les moules sont bien nettoyés et humidifiés en utilisant une huile pour faciliter le démoulage.



**Figure II.11:** Préparations des moules.

La confection des éprouvettes est faite en 3 couches appliquant 25 coups de piquage par couche à l'aide d'une tige métallique.



**Figure II.12:** Confection des éprouvettes.



**Figure II.13:** Eprouvettes démoulées.

#### **II.4.2 Conservation des éprouvettes**

La conservation des éprouvettes est faite dans une chambre humide à une température constante de 20°C.



Figure II.14: Conservation des éprouvettes dans une chambre humide.

### II.4.3 Matériau composite « GFRP »

#### II.4.3.1 Tissu de verre

Le tissu bidirectionnel de fibres de verre utilisé dans notre étude est présenté dans la figure II.15.



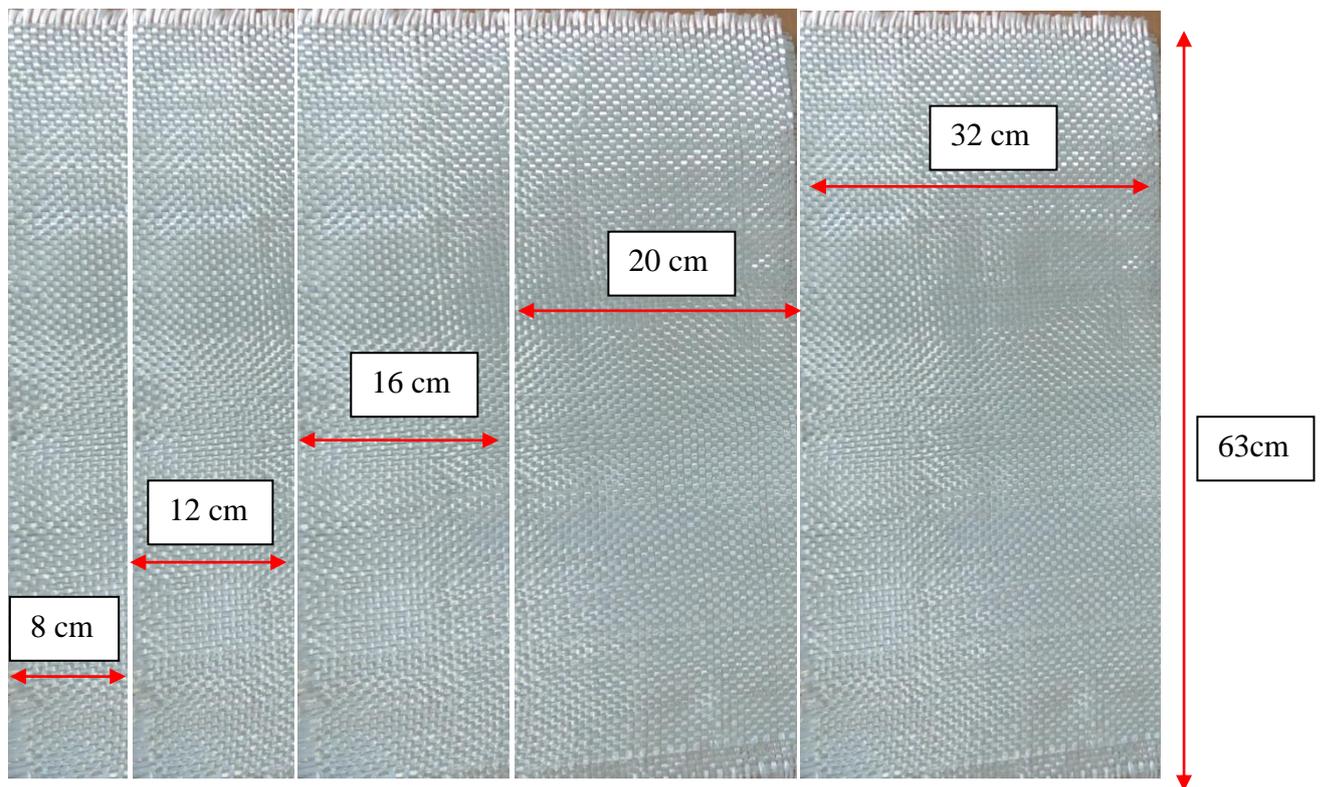
Figure II.15: Tissu de fibres de verre.

Il se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope dont les caractéristiques mécaniques, sont données par le tableau II.17

Tableau II.17: Caractéristiques élastiques du tissu de verre.

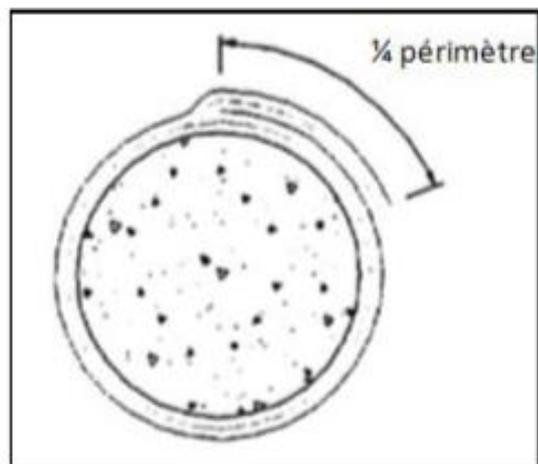
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	E1 (MPa)	E2 (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	G12 (MPa)
2600	72000	13600	0.31	0.33	4700

Les différentes largeurs de bandes du tissu de verre utilisées pour le confinement partiel et total des cylindres en béton sont illustrées dans la Figure II.16.



**Figure II.16:** Différentes variantes de largeur des bandes de tissu de fibre de verre.

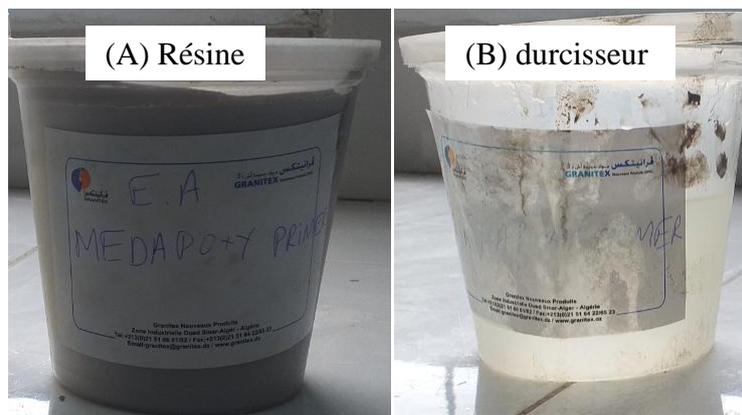
**NB :** Les longueurs des bandes en GFRP à poser en circonférences des cylindres, en sont augmentées d'un quart du périmètre du cylindre, comme montré par la figure II.17. Elles ont pour rôle d'éviter le décollement du GFRP ainsi que la rupture prématurée aux extrémités du cylindre. C'est une longueur de chevauchement telle que préconisée par Benzaid R dans son travail.



**Figure II.17:** Longueur de chevauchement (Benzaid R, 2010).

#### II.4.3.2 Préparation de l'adhésif (résine époxy)

L'adhésif est formé en malaxant deux composants : La résine organique (A) à performances élevées, de type époxyde, conçue par Granitex Algérie et un durcisseur (B) pour activer la polymérisation. Les deux composants sont montrés sur la figure II.18:



**Figure II.18:** Composants de l'adhésif : résine et durcisseur.

Le tableau II.18 résume les caractéristiques de la résine fournies par le fabricant.

**Tableau II.18:** Caractéristiques de la résine.

Paramètres	Valeur
Mass volumique	(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
Resistance en compression (NA427)	> 70 (MPa)
Resistance 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 : 1.05 Kg Durcisseur : 0.300 Kg
Résistivité à 20 °C	1010 à 1013 ( $\Omega \cdot m$ )

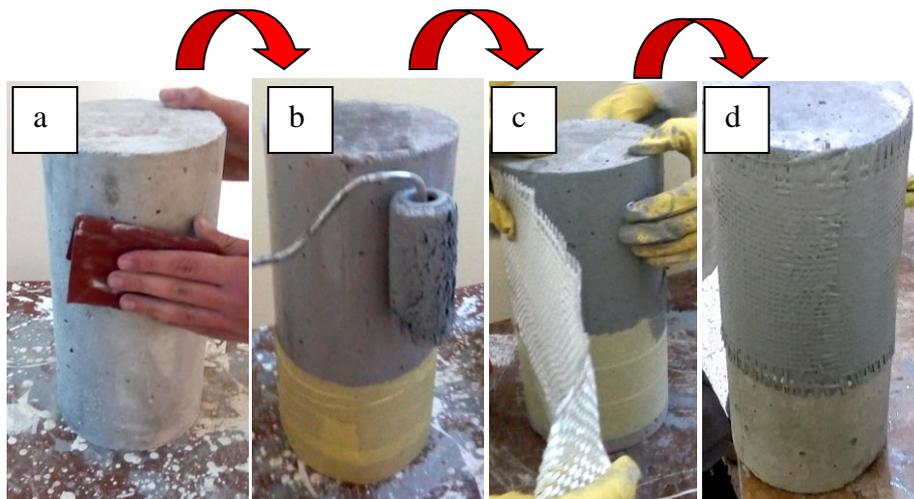
Le mélange est effectué pendant 3 minutes, afin d'obtenir une teinte uniforme de couleur grise, Le malaxage se fait par petites quantités et à faible vitesse pour empêcher l'inclusion de l'air dans le mélange, tout en tenant compte des recommandations du fabricant quand aux conditions de température et d'humidité.

On obtient ainsi, un mélange homogène à utiliser dans un délai variant de 30 à 60 minutes, selon la température ambiante. Au-delà de ce délai, l'adhésif n'est plus utilisable. Le temps nécessaire au durcissement total de la résine est de 10 jours à une température modérée avoisinant 25°C.

#### II.4.4 Application du composite GFRP

Les cylindres destinés au confinement ont été, par ailleurs, soumis à un traitement de la surface latérale pour assurer une bonne adhérence du tissu FRP composite. Un papier verre, est utilisé pour cette opération, pour éliminer toutes les impuretés, pouvant provenir de produits de coffrage ou de laitance du béton. Cette opération est recommandée afin d'éviter le décollement des bandes composites et assurer ainsi une bon efficacité de confinement. Les

différentes étapes de préparation du support béton et collage du tissu GFRP sont illustrées dans la figure II.19.



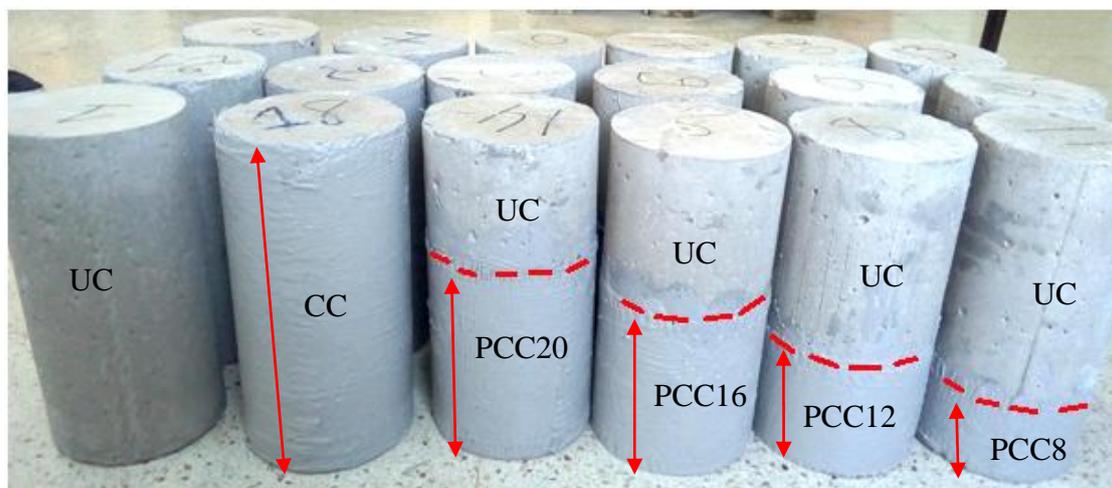
**Figure II.19:** éprouvette d’essai : a) préparation du support béton, b) application de la résine sur le béton, c) mise en place de tissu composite, d) tissu collé.

#### II.4.5 Nomenclature des éprouvettes

Une Nomenclature des éprouvettes a été choisie pour faciliter l’identification. Les séries d’éprouvettes réalisées sont désignées dans le tableau II.19 comme suit :

**Tableau II.19:** Références des cylindres étudiés.

Eprouvettes	Désignation
UC	Cylindre non confiné (Témoin)
PCC-8	Cylindre confiné partiellement sur une hauteur de $x = 8\text{cm}$
PCC-12	Cylindre confiné partiellement sur une hauteur de $x = 12\text{cm}$
PCC-16	Cylindre confiné partiellement sur une hauteur de $x = 16\text{cm}$
PCC-20	Cylindre confiné partiellement avec sur hauteur de $x = 20\text{cm}$
CC	Cylindre totalement confiné $x=h=32\text{ cm}$



**Figure II.20:** Différentes variantes des spécimens considérés.

## **II.5 Conclusion partielle**

L'élaboration et la caractérisation des différents spécimens d'essai considérés dans cette étude ont été réalisées conformément aux règles et normes requises. Les différents essais normalisés ont été conduits au laboratoire de génie civil de l'université de Bouira et au LCTP de Bouira. Les différentes étapes d'élaboration des éprouvettes ainsi que les procédures de collage des tissus de fibres de verre sont présentées et expliquées d'une manière claire et concise.

---

**CHAPITRE III :**  
**PRESENTATION DES RESULTATS ET**  
**DISCUSSION**

---

## CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

### III.1 Introduction

Ce chapitre est dédié totalement à la présentation et discussion des résultats expérimentaux obtenus par un essai de compression axiale sur des cylindres en béton confinés partiellement et totalement par une couche de tissu GFRP composite à base de fibres de verre renforcées par une matrice époxy. L'objectif escompté consiste à mettre en exergue l'influence d'une part de la hauteur de la zone confinée sur la résistance du cylindre en béton et sur le mode de rupture d'autre part.

### III.2 Essai de compression simple du béton

L'essai de compression uni axiale du béton 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.

Des éprouvettes cylindriques de  $\phi 16\text{cm} \times 32\text{cm}$  sont testées selon la norme ASTM C39/C39 M-03. L'essai illustré par la figure III.1, est conduit sous un chargement quasi-statique avec un pas de 0.5 KN/m. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique de type RP 2000 XPE. Avec une étendue de capacité de 3000 KN.

Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et un autre supérieur fixe. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite tous les résultats.



**Figure III.1:** Essai de compression : a) machine d'essai de compression b) système LVDT.

Pour chaque variante, l'essai est conduit sur 03cylindres, La valeur moyenne de la résistance caractéristique du béton à 28 jours est de 24.5 MPa.

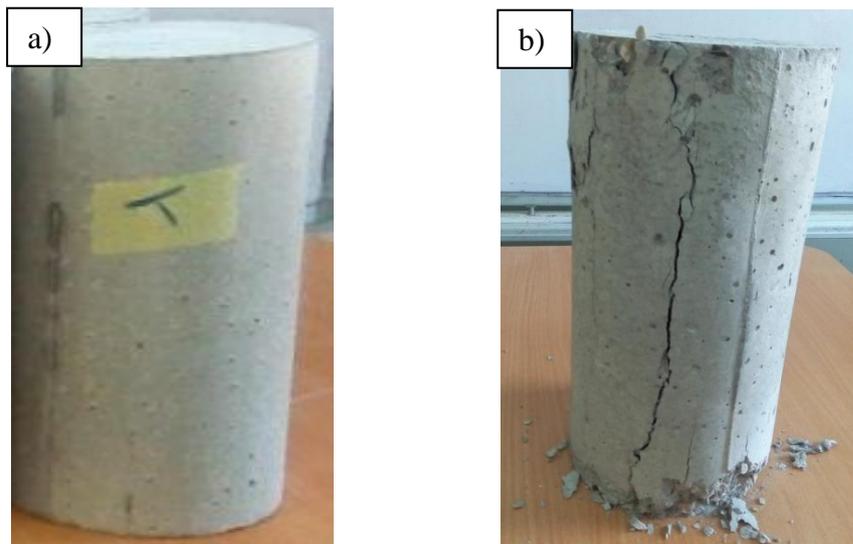
### III.3 Présentation des résultats et analyses

Les différents résultats des essais de compression réalisés sur les différents spécimens considérés sont résumés dans le tableau III.1et illustrés par les graphes III.3, III.5, III.7, III.9.

**Tableau III.1:** présentation des résultats des essais.

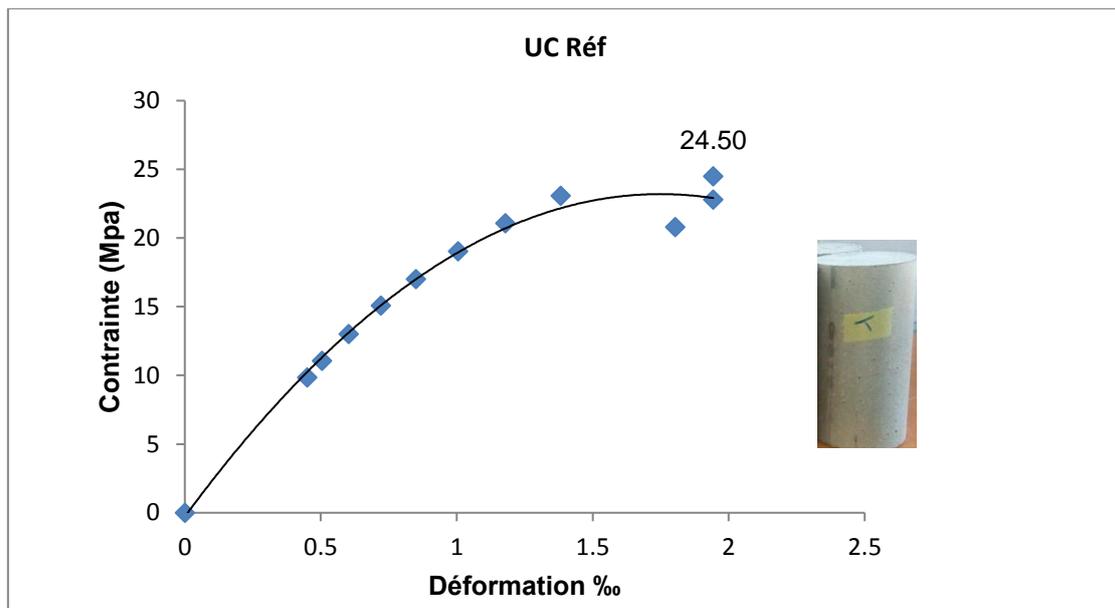
spécimens		x/h	F	F <sub>c0</sub>	F <sub>cc</sub>	gain (%)
UC	/	/	492.35	24.5	/	/
PCC	8	0.25	539.77	/	26.87	9.67
	12	0.375	570.12	/	28.37	15.8
	16	0.5	568.91	/	28.31	15.55
	20	0.625	578.76	/	28.8	17.55
FCC	32	1	649.9	/	32.34	32

#### A) : Béton de référence (témoin) UC



**Figure III.2:** Béton de référence : a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée.

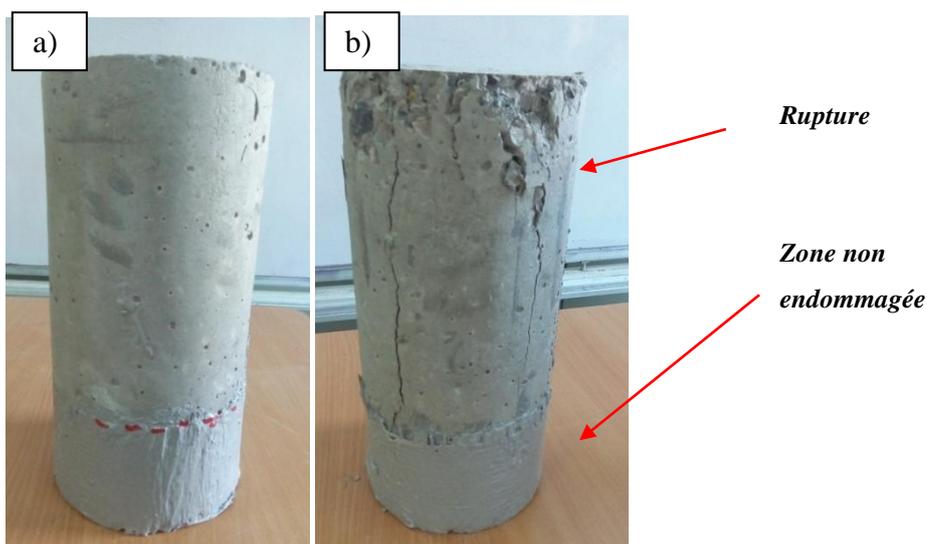
La figure III.2 présente la courbe moyenne des contraintes- déformations des cylindres en béton non confinés sous une charge de compression simple.



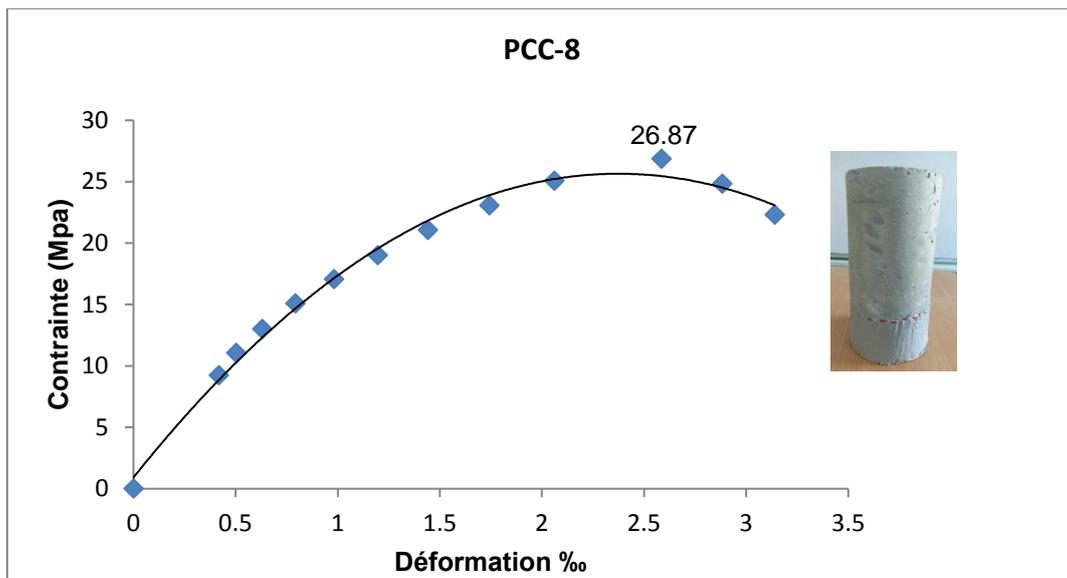
**Figure III.3:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton.

Le mode de rupture observé est typique. Une fissure longitudinale apparait le long de la hauteur du cylindre. Au début du chargement, la courbe est linéaire (proportionnalité entre les contraintes et les déformations), après cette phase, la courbe s incurve et a une forme polynomiale de deuxième degré. Jusqu'à la rupture, ou on observe une chute rapide de la résistance suite à la propagation et développement rapide des fissures. La rupture est obtenue sous une charge de 492.35 K N et une contrainte de rupture  $\sigma_{rup} = 24.5\text{MPa}$ .

**B) : Cylindre partiellement confiné 'PCC-8' sur une hauteur  $x = h/4$**



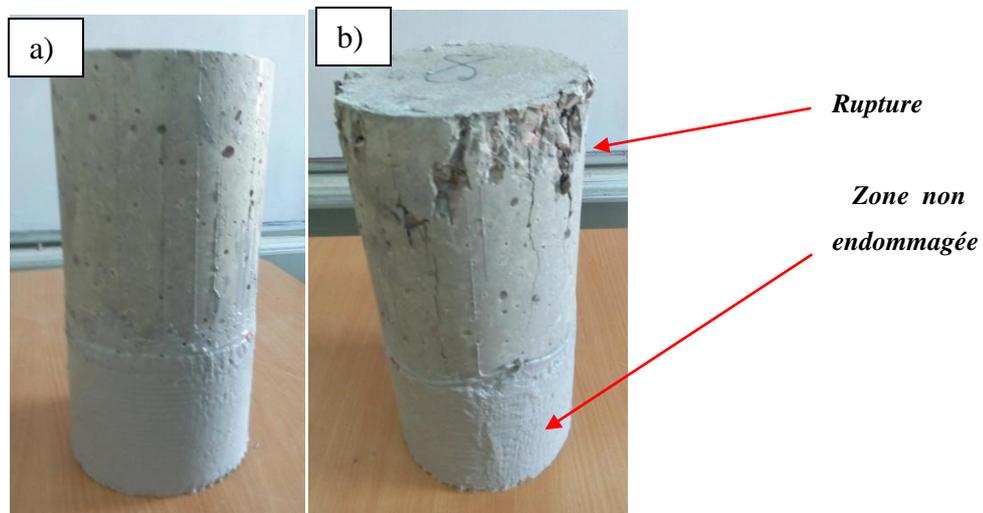
**Figure III.4:** Cylindre de béton partiellement confiné sur une hauteur de 8cm: a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée après essai.



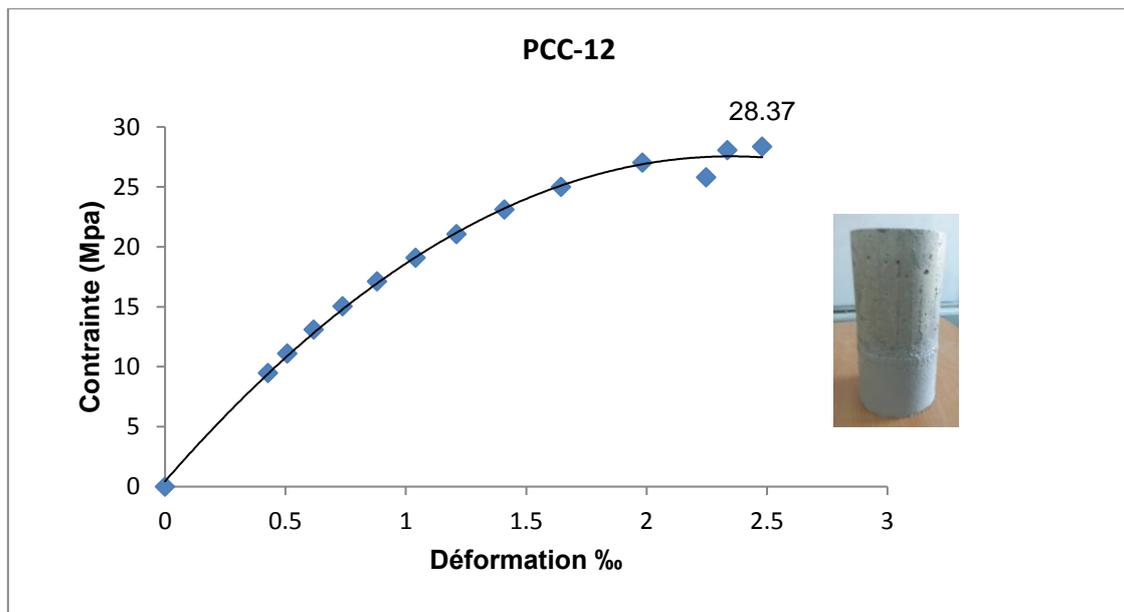
**Figure III.5:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du cylindre en béton PCC-8.

La rupture du cylindre est obtenue sous une charge de 539.77 KN et une contrainte maximale  $\sigma_{rup} = 26.86\text{MPa}$ . On a une augmentation de la contrainte de rupture de 2.37MPa, L'amélioration de résistance est de 9.67% par rapport au témoin. La rupture du cylindre se produit dans la partie non confinée seulement. Aucune fissure n'apparaît dans la partie confinée.

**C) : Cylindre partiellement confiné 'PCC-12' sur une hauteur  $x = 12\text{ cm}$**



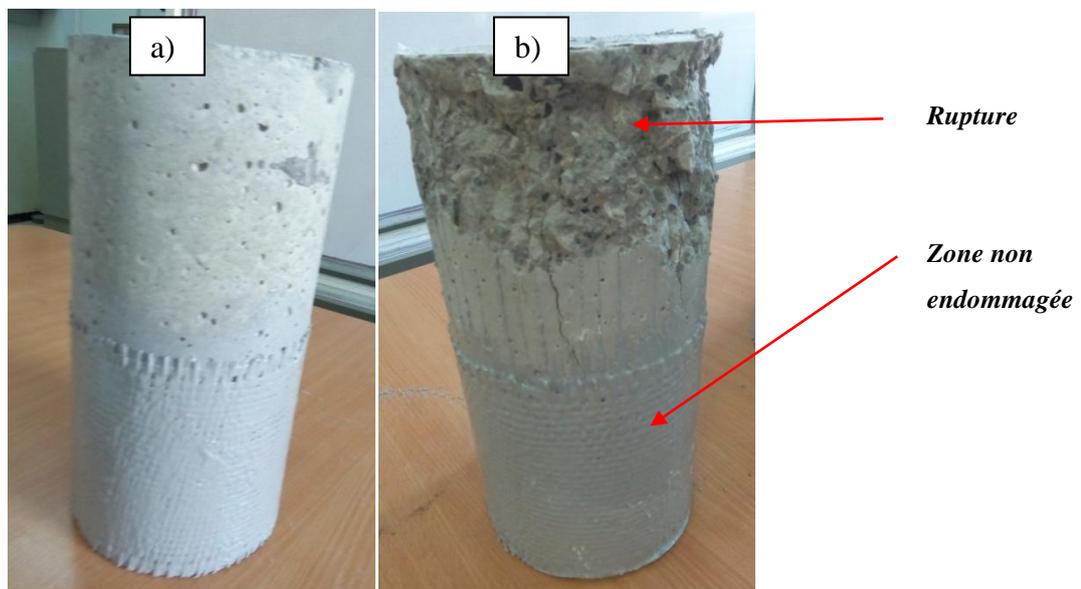
**Figure III.6 :** Cylindre de béton confiné partiellement «  $x = 12\text{cm}$  »: a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée.



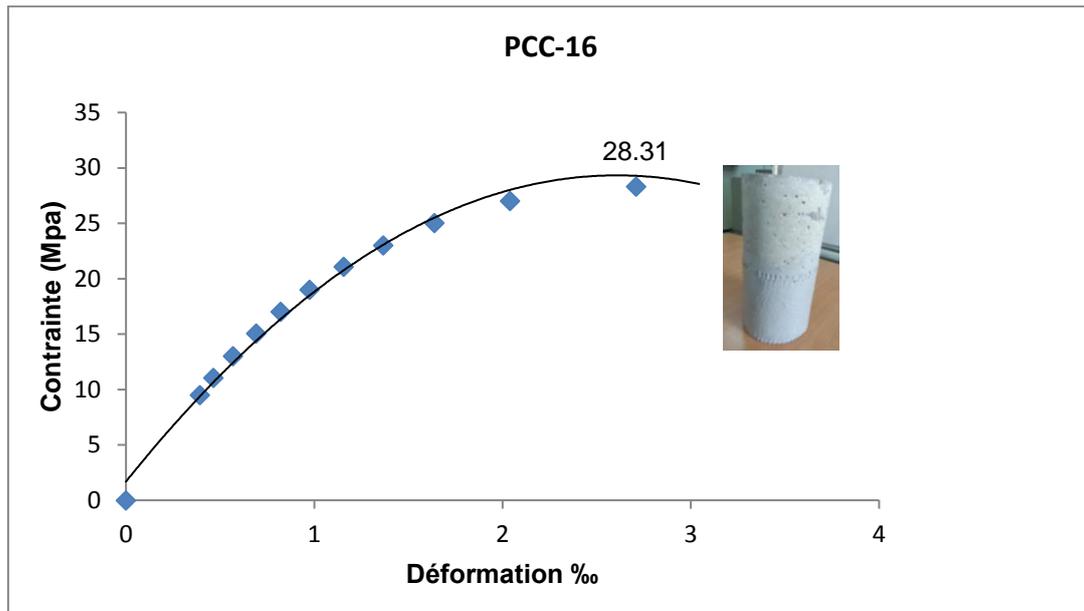
**Figure III.7:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-12.

La rupture du cylindre est obtenue sous une charge de 570.12 KN et une contrainte maximale  $\sigma_{rup} = 28.37$  MPa. On a une augmentation de la contrainte de rupture de 3.87 MPa, L'amélioration de résistance est de 15.8% par rapport au témoin. La rupture se produit toujours dans la partie non confinée seulement et aucune rupture dans la partie confinée.

**D) : Cylindre partiellement confiné 'PCC-16' sur une hauteur  $x = h/2$**



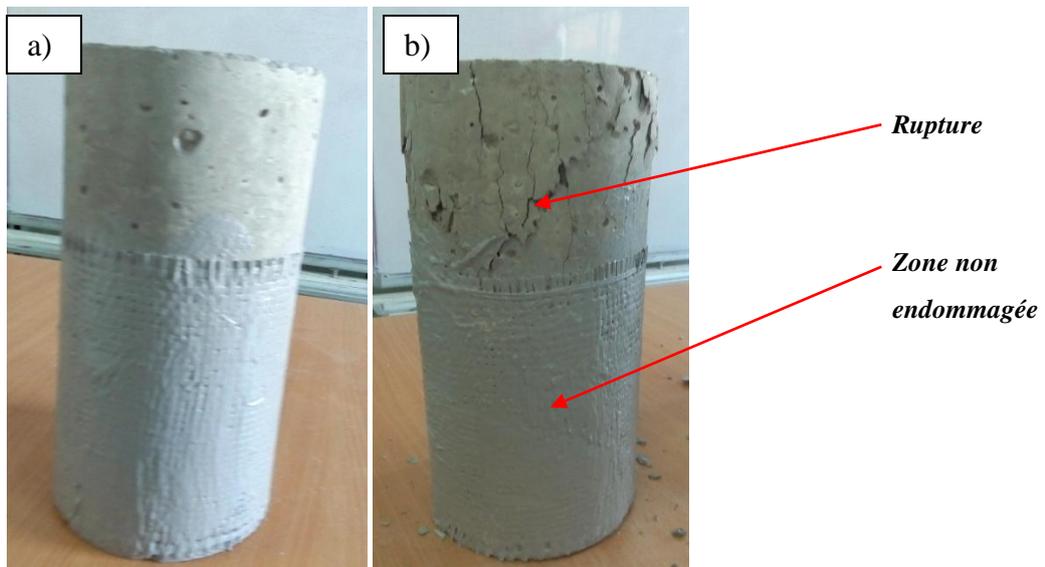
**Figure III.8:** Cylindre de béton confiné partiellement «  $x = 16\text{cm}$  »: a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée.



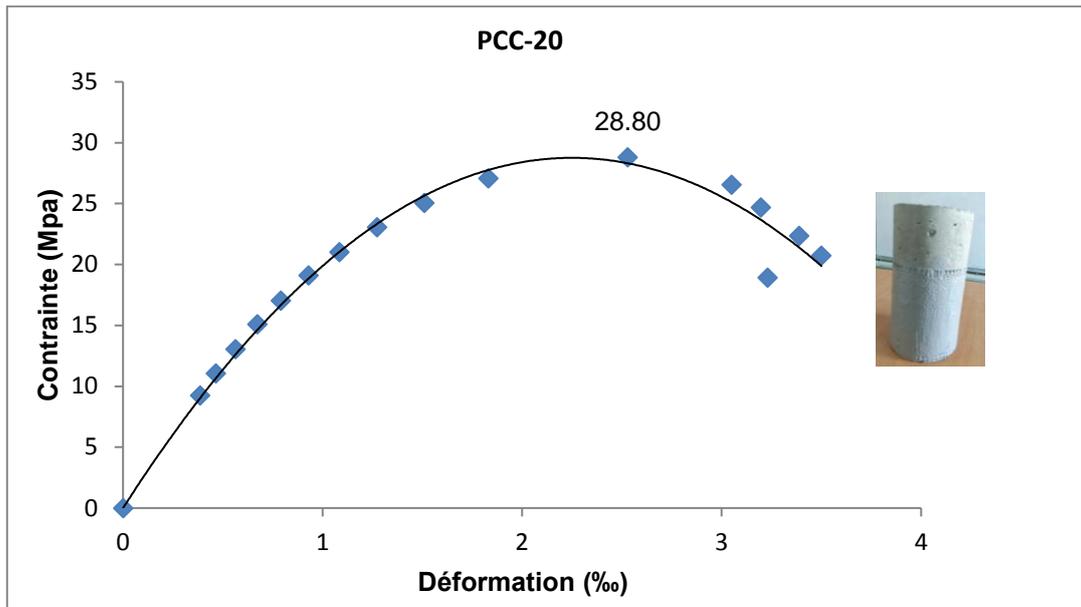
**Figure III.9:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-16.

La rupture du cylindre est obtenu sous une charge de 568.91 KN et une contrainte maximale  $\sigma_{rup} = 28.31$  MPa. On a une augmentation de la contrainte de rupture de 3.81 MPa, L'amélioration de résistance est de 15.55% par rapport au témoin. Comparativement au cylindre partiellement confiné PCC-12, l'amélioration est nulle. La rupture se produit toujours dans la zone non confinée.

**E)- Cylindre partiellement confiné 'PCC-20' sur une hauteur  $x = 20$  cm**



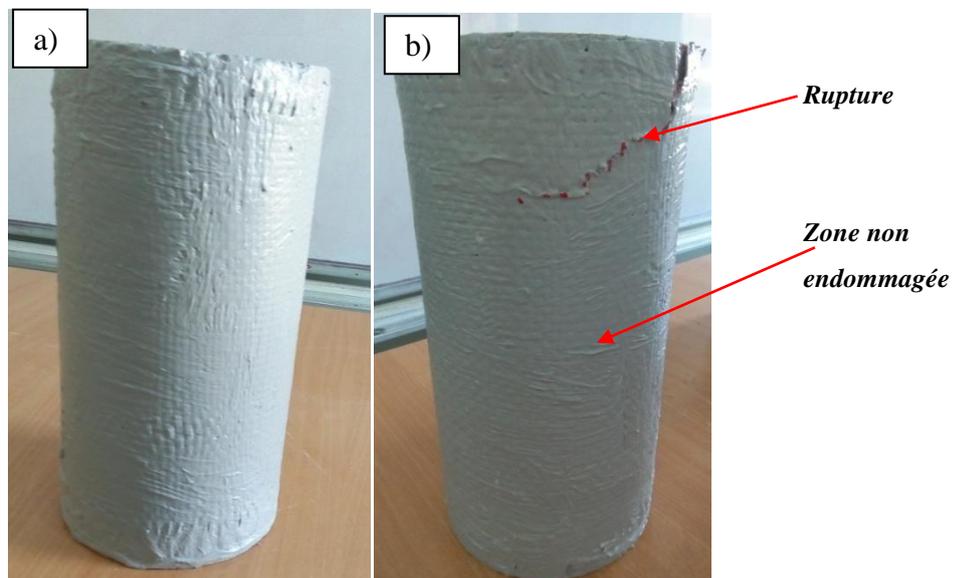
**Figure III.10:** Cylindre de béton confiné partiellement «  $x = 20$  cm »: a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée.



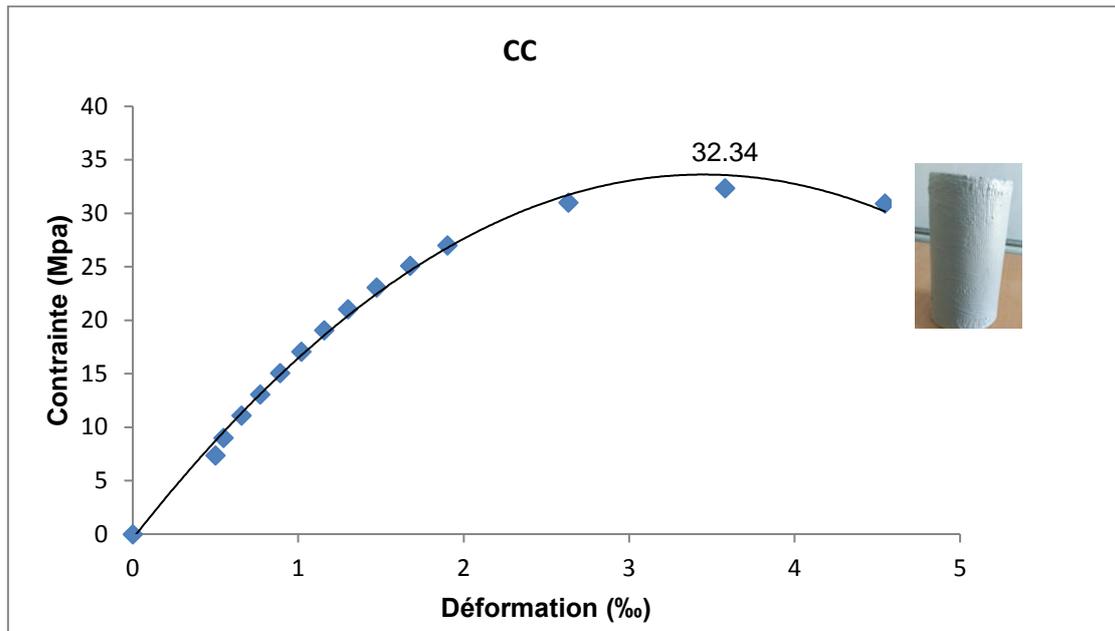
**Figure III.11:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton PCC-20.

La rupture du cylindre est obtenue sous une charge de 578.76 KN et une contrainte maximale  $\sigma_{rup} = 28.80$  MPa. L'augmentation de la contrainte de rupture est de 4.30 MPa comparativement au cylindre de référence. L'amélioration de résistance est de 17.55% par rapport au témoin. La rupture se produit toujours dans la partie non confinée.

**F)- Cylindre totalement confiné 'CC' :**



**Figure III.12 :** Cylindre de béton confiné totalement : a) éprouvette avant essai, b) éprouvette endommagée.



**Figure III.13:** Courbe moyenne des contraintes- déformations du béton CC.

La rupture du cylindre est obtenue sous une charge de 649.90 KN et une contrainte maximale  $\sigma_{rup} = 32.34$  MPa. L'augmentation de la contrainte de rupture est de 7.84 MPa, et l'amélioration de la résistance est de 32% par rapport au témoin. La rupture finale est obtenue par la rupture de l'enveloppe composite.



**Figure III.14:** Endommagement des spécimens.

### III.4 Confrontation des courbes contraintes- déformations des différents spécimens

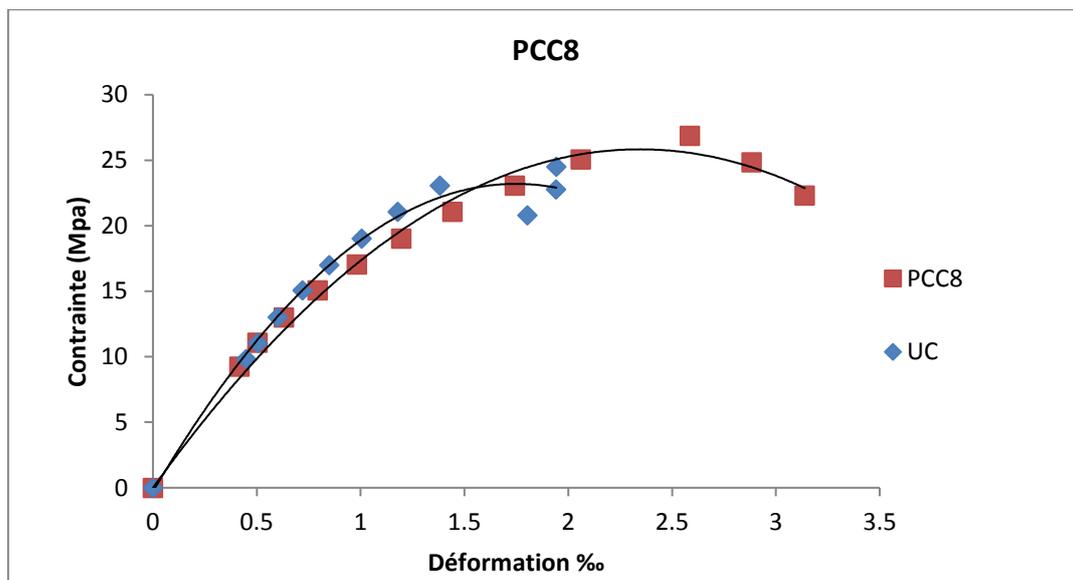


Figure III.15: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC 8 et UC.

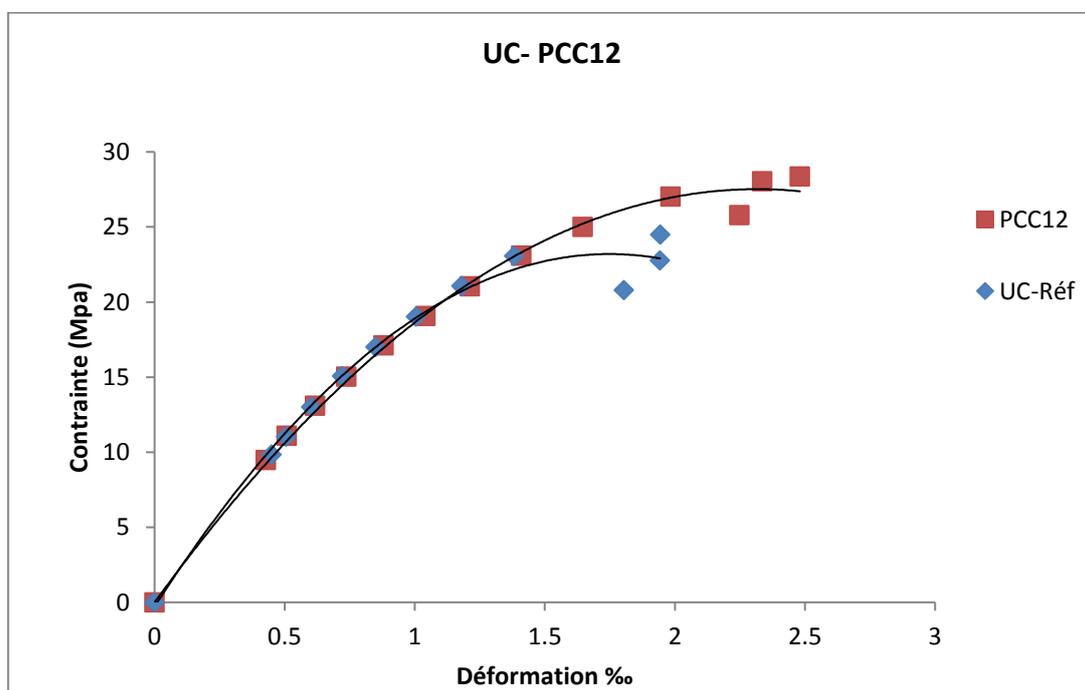


Figure III.16 : Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC12 et UC.

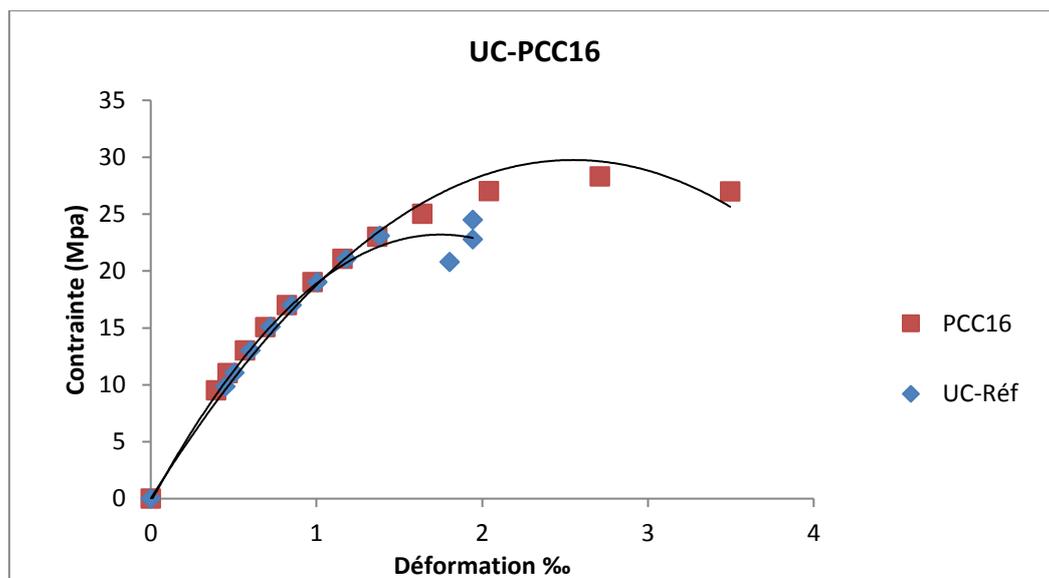


Figure III.17: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC -16 et UC.

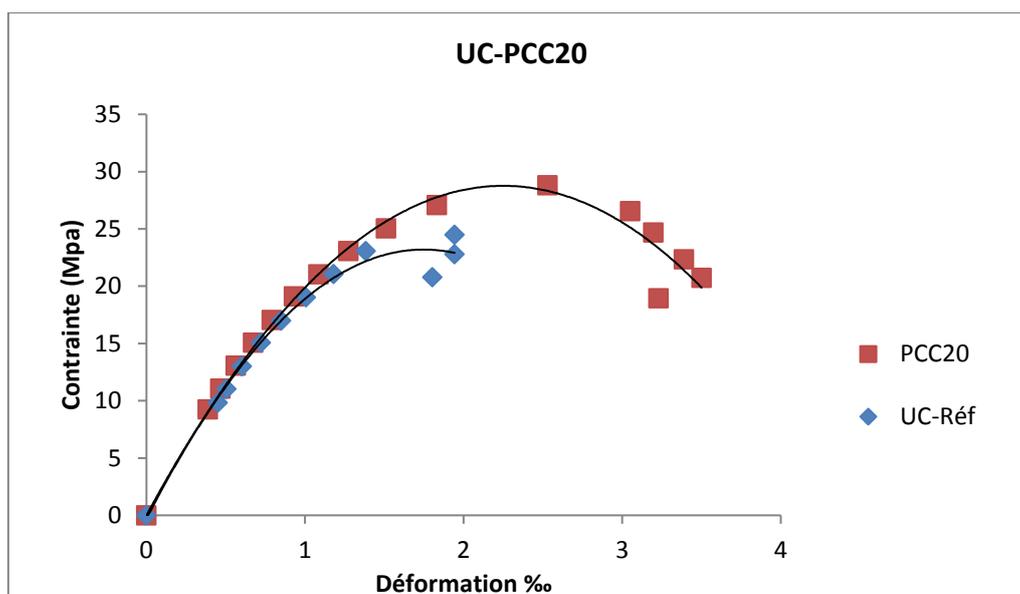


Figure III.18: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens PCC- 20 et UC.

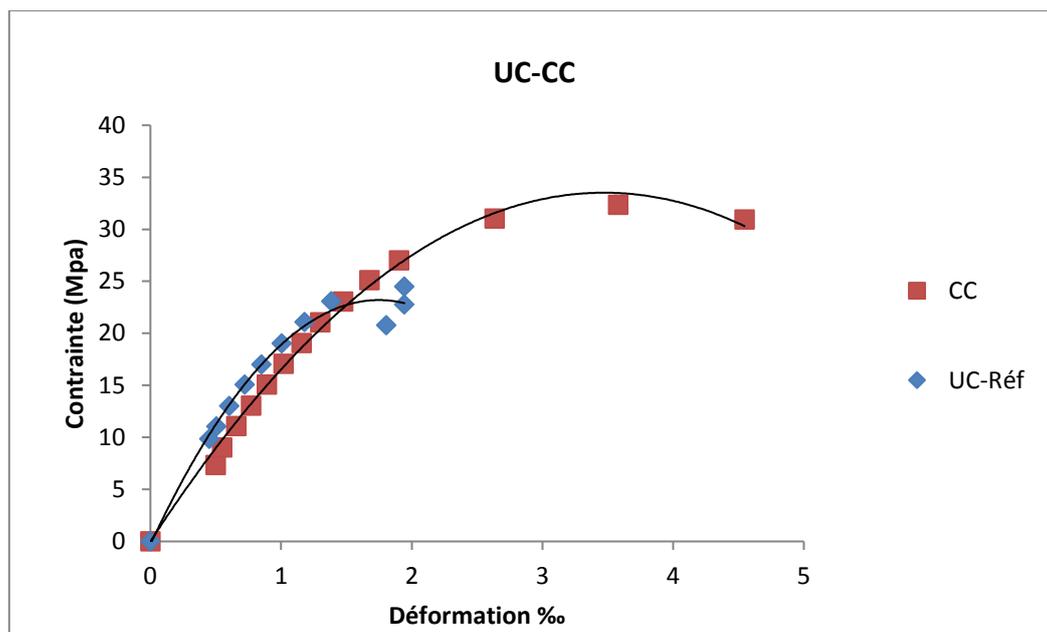


Figure III.19: Confrontation des courbes contraintes - déformations des spécimens CC et UC.

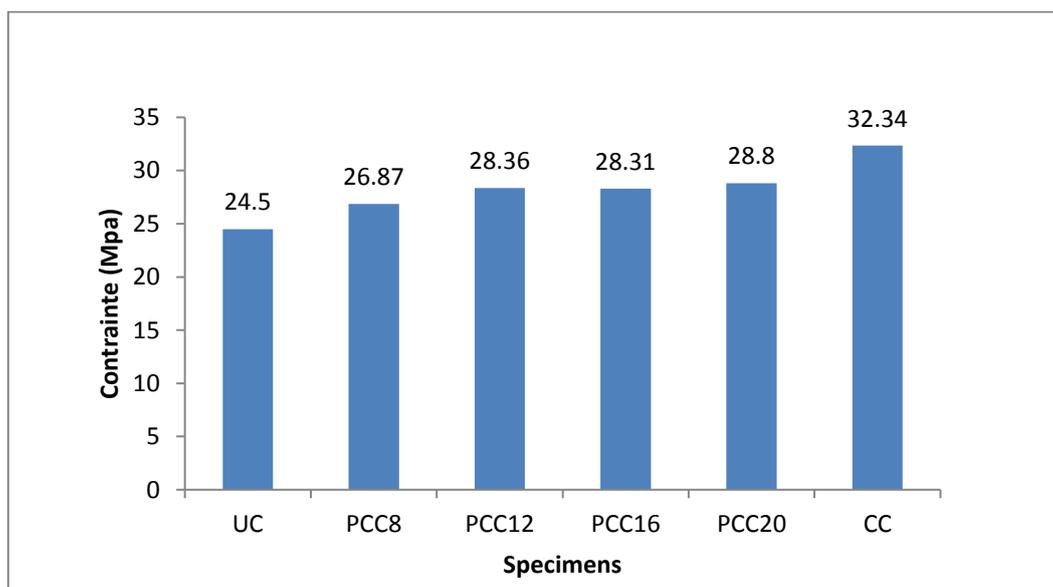


Figure III. 20: Histogramme des valeurs des contraintes ultimes des spécimens.

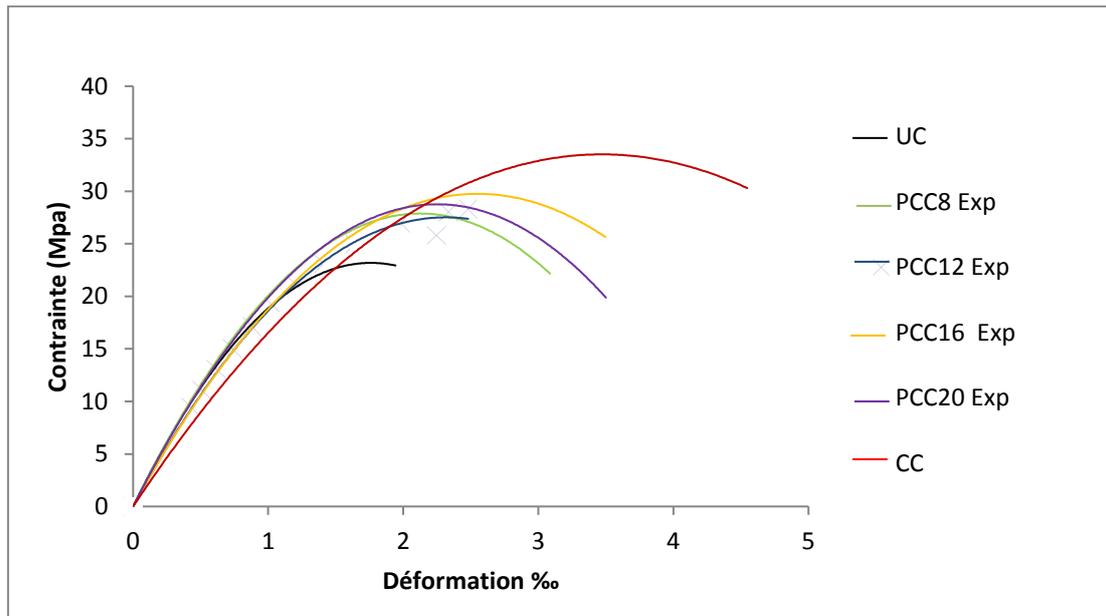


Figure III. 21: Confrontation des courbes contraintes – déformations des spécimens.

### **III.5 Analyse des résultats et conclusion**

Les différents résultats illustrés dans les figures (III.15, III.16, III.17, III.18 et III.19) montrent que le confinement partiel influe sur la résistance ultime et la déformation correspondante au pic, en fonction du rapport  $x/h$  qui définit le rapport de la hauteur de la zone confinée sur la hauteur totale du cylindre. Dans le domaine élastique linéaire, nous observons presque le même comportement où les contraintes sont proportionnelles aux déformations, cependant, dans la phase élasto-plastique, correspondante à la zone d'endommagement jusqu'à la rupture, on remarque une augmentation de la résistance suite à l'effet de confinement procuré par l'enveloppe composite GFRP, qui dépend de la hauteur de la zone confinée. Néanmoins, cette augmentation n'est pas linéaire ; en effet, pour le spécimen PCC-16 comparativement au spécimen PCC-12 l'augmentation de la résistance est très négligeable, elle est de l'ordre de 0.25%. Ce résultat peut être expliqué par le fait que de la découpe du tissu et l'application sur le support béton des bandes composites, des fibres se sont détachées ce qui a réduit la hauteur de la zone confinée. Il s'avère que le renforcement des zones proches des extrémités, permet d'obtenir un bon confinement. Les spécimens PCC-8 et PCC-12 et PCC-20 ont donnés des résultats satisfaisants de l'ordre respectivement de 9.67%, 15.80% et 17.55%. Mêmesi, le confinement total engendre une augmentation de la résistance de l'ordre de 32% par rapport au spécimen témoin (UC), le confinement partiel peut constituer une alternative au confinement total dans le cas des éléments endommagés localement pour un seuil de résistance souhaitée.

Aussi, ces résultats sont considérés comme préliminaires, car on a utilisé juste une couche de composite pour le confinement des cylindres, à cet effet, il est recommandé de poursuivre le travail en procédant au confinement par plusieurs couches de composites pour valider cette approche surtout pour le cas des colonnes endommagées localement, dans le but, non seulement de restituer et améliorer la résistance mais également assurer l'économie de cette technique de renforcement.

Ces résultats seront utilisés dans la confrontation avec les résultats de la simulation numérique qui sera présentée dans le chapitre IV suivant.

---

**CHAPITRE IV :**  
**SIMULATION NUMERIQUE**

---

## CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE

### IV.1 Introduction

Les analyses numériques et les simulations à base des éléments finis connaissent actuellement un essor important dans le domaine du génie civil, car elles permettent un gain de temps de calcul, une qualité de résultats, une minimisation des erreurs et surtout une diminution du coût d'étude avec un nombre d'essais optimisés pour la validation.

Dans le domaine des simulations numériques le champ réel est approché par un champ fictif en se basant sur une discrétisation géométrique et des interpolations mathématiques. La difficulté de la simulation numérique réside dans la création d'un modèle qui reproduit au maximum la réalité (matériaux, condition aux limites), cependant l'étude n'est validée qu'à partir de la confrontation des résultats donnés par les essais mécaniques réels à l'échelle du laboratoire. Actuellement, sur le marché, une panoplie et une large gamme de logiciels sont proposés aux concepteurs, permettant une conception optimale des structures, dans le respect des réglementations techniques et normes de la construction Parmi ces logiciels, nous citerons le code de calcul ABAQUS basé sur la méthode des éléments finis. [29]

Ce chapitre, est totalement dédié à la présentation du logiciel ABAQUS et son fonctionnement. Les différentes étapes menées pour la modélisation des cylindres confinés chargés en compression axiale jusqu'à la rupture et l'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement des cylindres confinés sont succinctement présentées. En s'inspirant des travaux de recherche antérieurs, [26-27] le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D), tout en tenant compte du comportement expérimental des matériaux constitutifs.

### IV.2 Présentation de logiciel

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique et plus particulièrement les problèmes non-linéaires. Il été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS). [28]

Depuis 30 ans, ABAQUS a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer les nouveautés et répondre ainsi aux besoins en octobre 2005, l'entreprise a été rachetée par Dassault industries pour critiquer le package « SIMULIA ». [29]

Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (propriétés mécaniques, géométrie des pièces, choix des éléments,

choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Deux modules sont proposés pour la résolution des analyses :

- ABAQUS/implicite : est un module utilisant des schémas de résolution implicite dits classiques pour des analyses statiques comme la méthode Newton-Raphson ou la méthode de Risks.
- ABAQUS/Explicit : est une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à force de non linéarité matérielle est donc particulièrement adaptée pour les matériaux à comportement adoucissants, comme le béton.

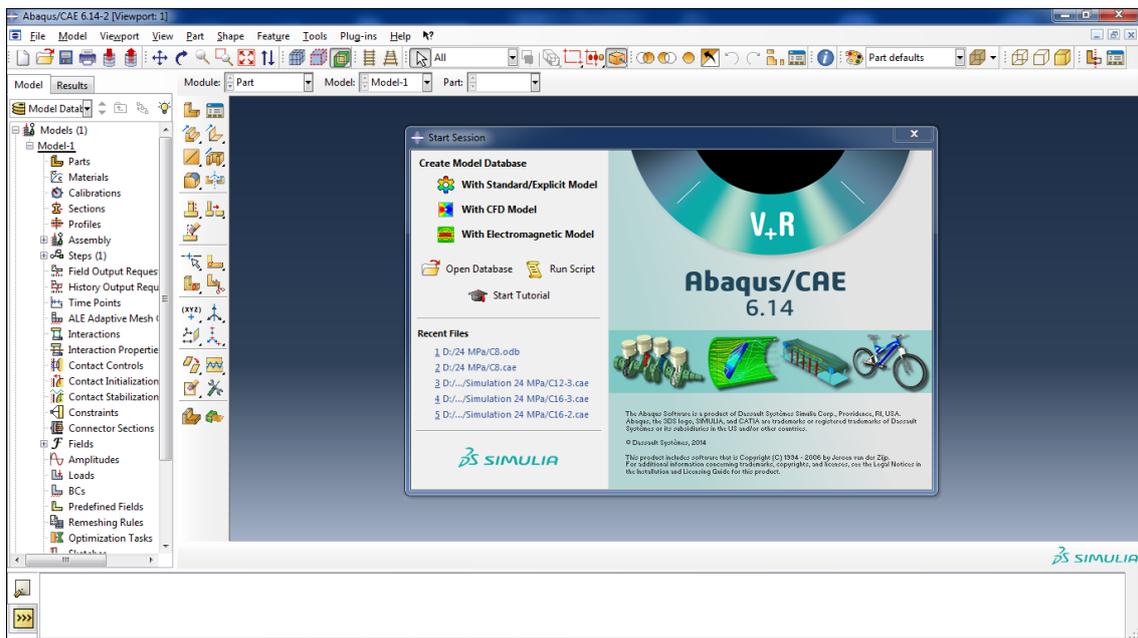


Figure IV.1: L'interface d'Abaqus/CAE version 6.14.

### IV.3 Système d'unité

Le logiciel ABAQUS ne gère pas les unités c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent.

Tableau IV. 1: Correspondance des unités.

Masse (M)	Longueur (L)	Temps (T)	Force (M.l.t-2)	Pression (M.l-1.t-2)	Energie (M.l2.t-2)
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Milli joule
<b>Tonne</b>	<b>Millimètre</b>	<b>Seconde</b>	<b>Newton</b>	<b>MPa</b>	<b>Milli joule</b>

#### IV.4 Propriétés des matériaux

Les caractéristiques mécaniques du béton et le tissu de fibre de verre sont représentées dans les tableaux suivants

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques mécaniques du matériau béton.

Paramètres		Dénotation
Notation	Valeur	
$F_c$ (MPa)	29	Contrainte en compression
$F_{c0} = 0.3 F_c$ (MPa)	8.7	Contrainte élastique en compression
$\epsilon_{c1}$ (‰)	2	Déformation au pic en compression
$F_{t0} = 0.6 + 0.06 F_c$ (MPa)	2.34	Contrainte maximale en traction
$\epsilon_{tm}$ (‰)	1.2	Déformation correspondante à $F_{t0}$
$E = 11000 (F_c)^{1/3}$ (MPa)	33795.48	Module de Young instantané
$W_c$ (µm)	180	L'ouverture maximale des fissures
N	0.19	Coefficient de poisson
$\Psi$	32°	Angle de dilatation
$\alpha_f$	1.16	Rapport entre contrainte bi-axile/uniaxiale
$\alpha_e$	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques mécaniques du composite (FRP).

Paramètres	Valeur	Dénotation
$E1$ (MPa)	72000	Module de Young longitudinal
$E2$ (MPa)	13600	Module de Young transversal
$\nu_{12}$	0.31	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
$\nu_{13}$	0.33	Coefficient de poisson : plan longitudinal/vertical
$G_{12}$ (MPa)	4700	Module de cisaillement sur le plan transversal
$X_t$ (MPa)	1900	Résistance longitudinale en traction
$X_c$ (MPa)	970	Résistance longitudinale en compression
$Y_t$ (MPa)	35	Résistance transversale en traction
$Y_c$ (MPa)	110	Résistance transversale en compression
$S$ (MPa)	70	Contrainte de cisaillement maximale

#### IV.5 Les étapes de modélisation

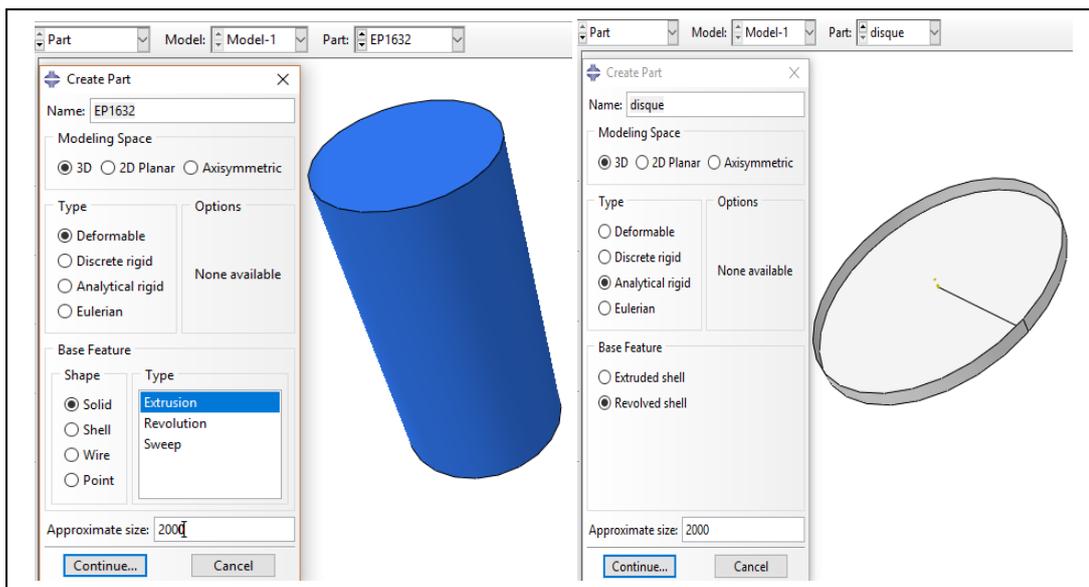
La modélisation du cylindre en béton de diamètre de 16cm et une hauteur de 32cm, a été effectuée selon la norme **NFP18-406** [30] des cerces de largeur variable respectivement égales à 8,12,16,20 et 32cm pour les matériaux composites (FRP), et deux disques rigides d'un diamètre de 20cm ont été modélisés pour le matériau béton. Le béton et les deux éléments ont été assemblés en supposant une liaison parfaite pour tous les éléments. Le premier disque est considéré comme un encastrement et le deuxième est en mouvement, il se

déplace verticalement en comprimant le cylindre. Le système Eprouvette-fibre de verre sont assemblés avec une liaison supposées parfaite.

Pour simuler notre travail, nous avons effectué un passage successif sur les neufs modules de ABAQUS à savoir : Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualisation.

**IV.5.1 Premier module : Part**

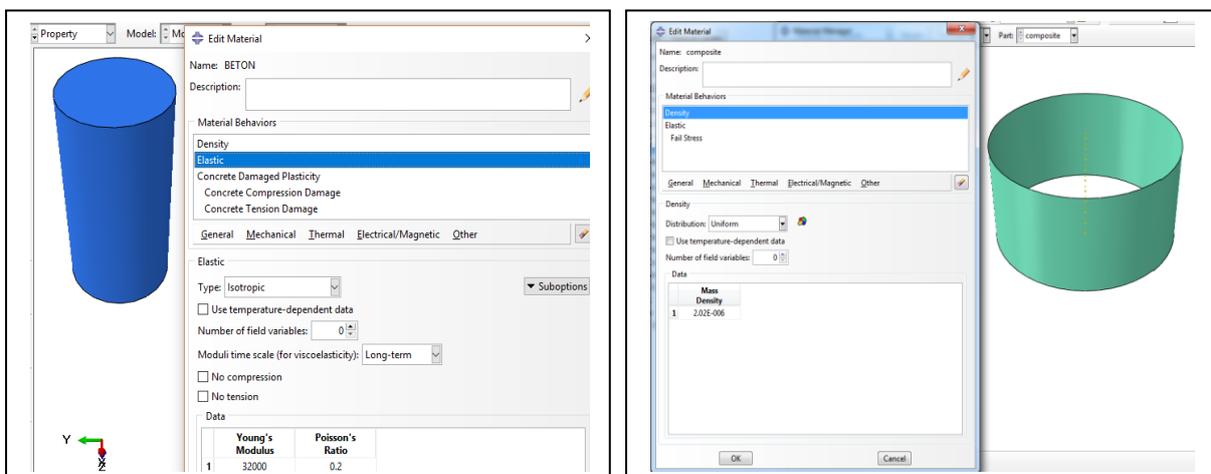
Dans cette première étape, l'utilisateur dessine toutes les pièces du problème. Chaque pièce est créée grâce à l'outil **Create Part**



**Figure IV.2:** Modélisation des géométries des éléments.

**IV.5.2 Deuxième module : Property**

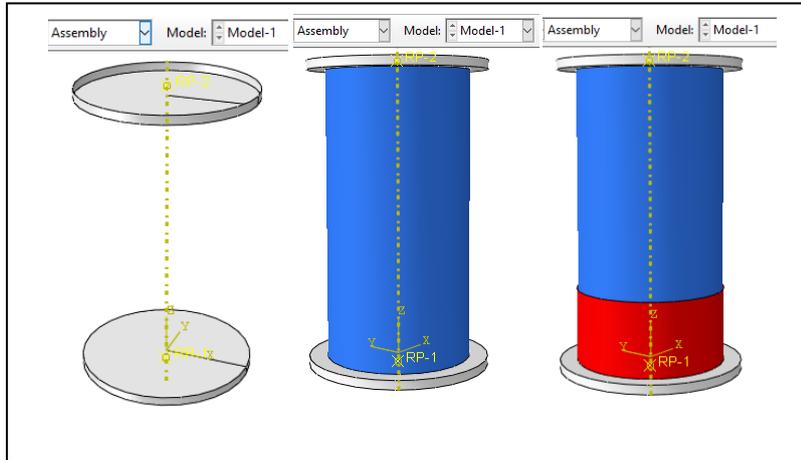
Cette étape sert à affecter les propriétés mécaniques pour chaque élément des différents matériaux utilisés (béton, composite).



**Figure IV.3:** Propriétés du béton et du composite.

**IV.5.3 Troisième module : Assembly**

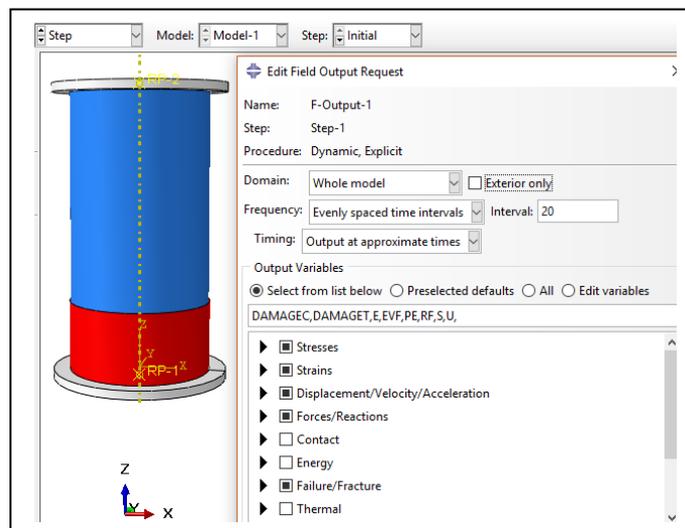
L'utilisateur rassemble toutes les pièces avec « create instance » afin de modéliser le phénomène physique.



**Figure IV.4:** Assemblage des éléments Cylindre - Disque – Composite.

**IV.5.4 Quatrième module : Step**

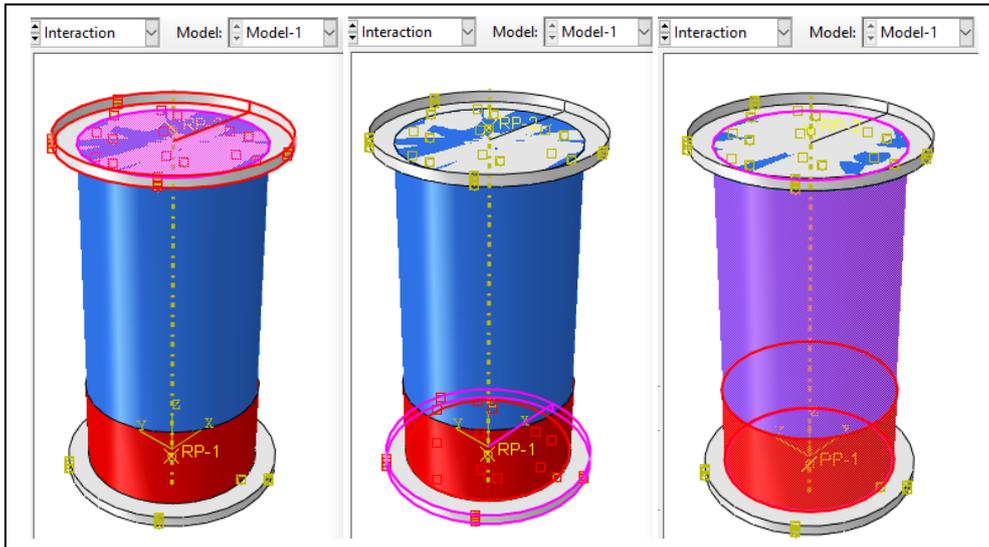
L'utilisateur définit tous les critères de calcul utilisés par Abaqus dans le module Job. En particulier, il détermine l'incrément, valeur du pas de temps, et la valeur du temps final, qui est un temps « virtuel », temps sans unité. Le temps réel ou physique est défini en fonction des unités tableau IV.1 dans 'Material Manager'.



**Figure IV.5:** Le module STEP.

**IV.5.5 Cinquième module : Interaction**

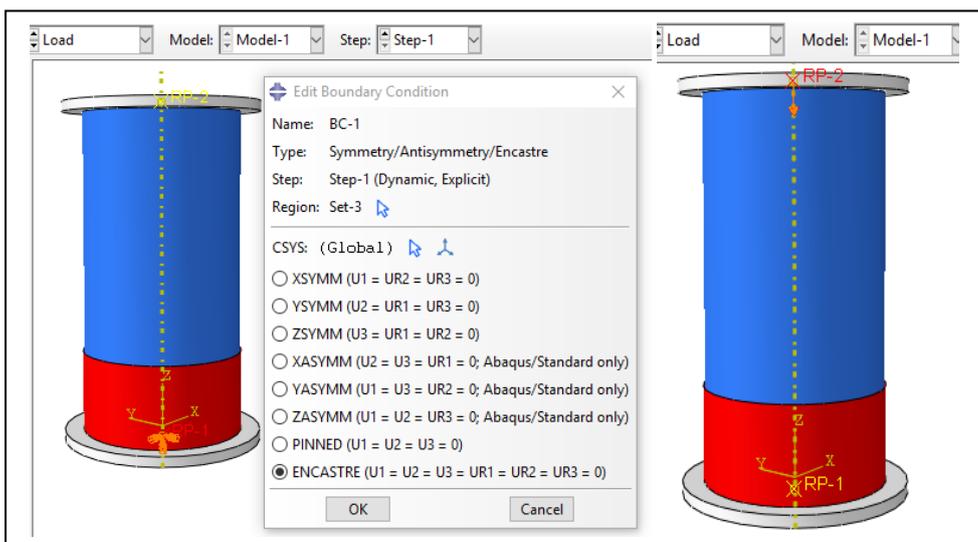
Il définit les interactions entre chaque pièce et introduit les premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connexions éventuelles.



**Figure IV.6:** Modélisation du contact Béton-Disque et Béton-Composite.

**IV.5.6 Sixième module : Load**

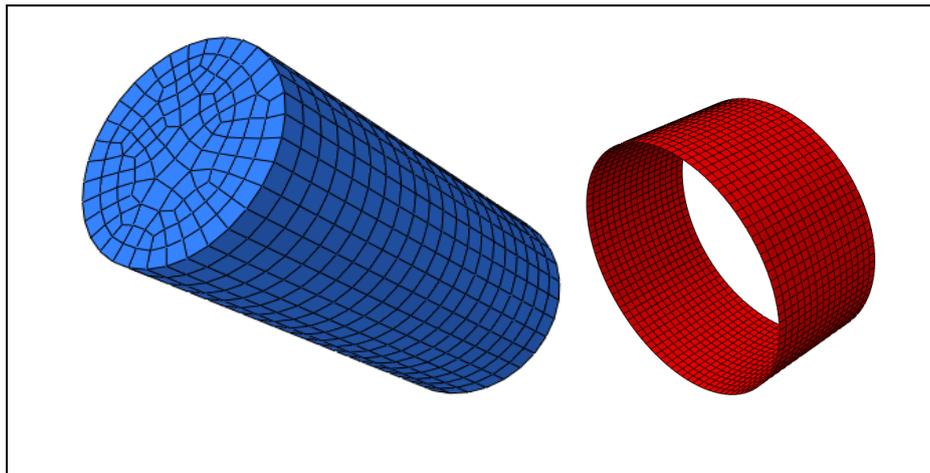
Cette étape est dédiée au chargement et conditions aux limites de notre modèle, ce type de chargement et de conditions aux appuis est analogue à celui utilisé pour les essais expérimentaux. (Une extrémité du cylindre est encastree et une charge axiale de compression a été appliquée sur l'autre surface).



**Figure IV.7:** Conditions aux limites et chargement.

**IV.5.7 Septième module : Mesh**

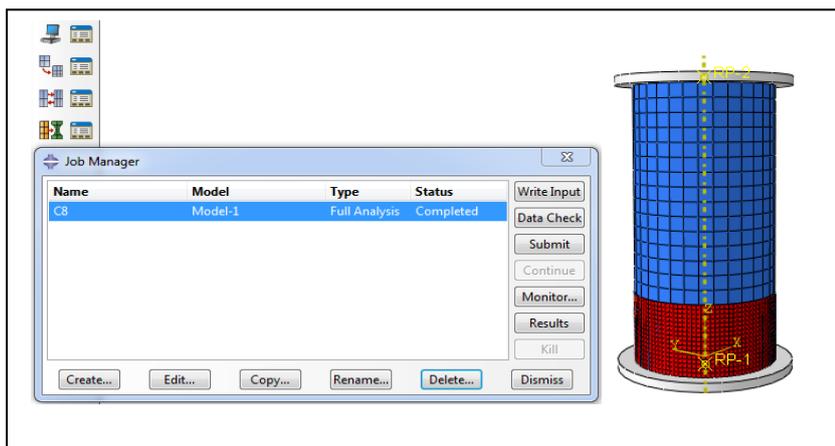
Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément. Dans notre travail, le cylindre de béton a été maillé avec des éléments à 3D qui sont des éléments hexagonaux de 16 mm de côté, présentant 8 nœuds ayant chacun 3 degrés de liberté, tandis que les bandes en GFRP composites sont maillées avec des éléments surfaciques quadrilatéraux de 5 mm de côté, présentant 4 nœuds ayant 8 degrés de liberté.



**Figure IV. 8:** Maillage du béton et du tissu de fibre.

**IV.5.8 Huitième module : Job**

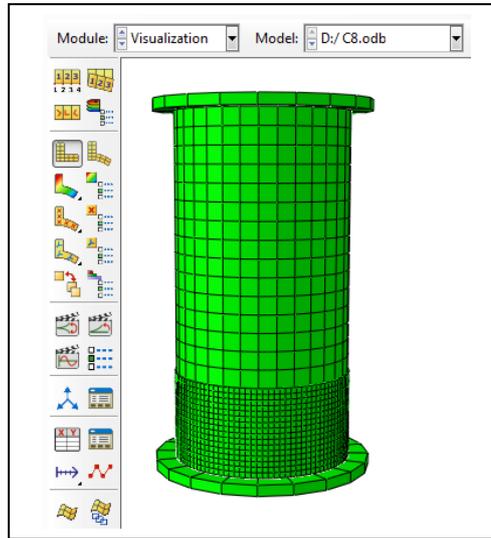
Le module 'Job' reprend les caractéristiques de calcul dans le module 'Step'. Nous pouvons lancer plusieurs calculs différents



**Figure IV.9:** Module Job.

**IV.5.9 Neuvième module : Visualisation**

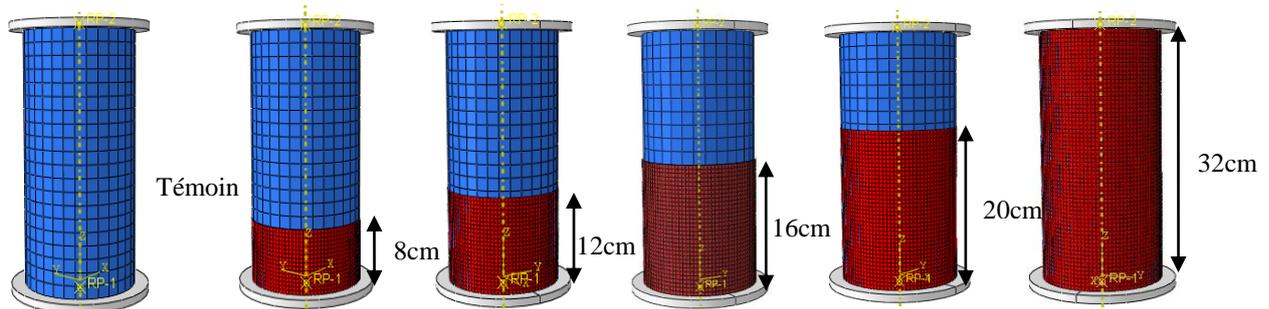
Les résultats du calcul numérique sont représentés dans ‘Results’ et dans ‘Field output’ on visualise les déformations, les contraintes, les forces nodales et l’endommagement.



**Figure IV.10:** Module Visualisation.

Les différents spécimens considérés dans notre travail sont présentés sur la figure IV.11.

Toutes les éprouvettes sont soumises à un essai de compression axiale jusqu’à la rupture.



**Figure IV.11:** Variantes des spécimens considérés.

**IV.6 Résultats**

Les différents résultats obtenus par la simulation numérique, illustrent le champ des contraintes, déformations, déplacements et le champ de déformations développés pour les six (6) types d’éprouvettes :

C-Témoin (cylindre non confiné de référence).

CPC-8cm (cylindre partiellement confiné par un tissu de FRP de 8cm de hauteur).

CPC-12cm (cylindre partiellement confiné par un tissu de FRP de 12cm de hauteur).

CPC-16cm (cylindre partiellement confiné par un tissu de FRP de 16cm de hauteur).

CPC-20cm (cylindre partiellement confiné par un tissu de FRP de 20cm de hauteur).

CC (cylindre totalement confiné par un tissu de FRP de 32cm de hauteur).

Sont présentés et analysés dans ce qui suit.

IV.6.1 Champs des contraintes

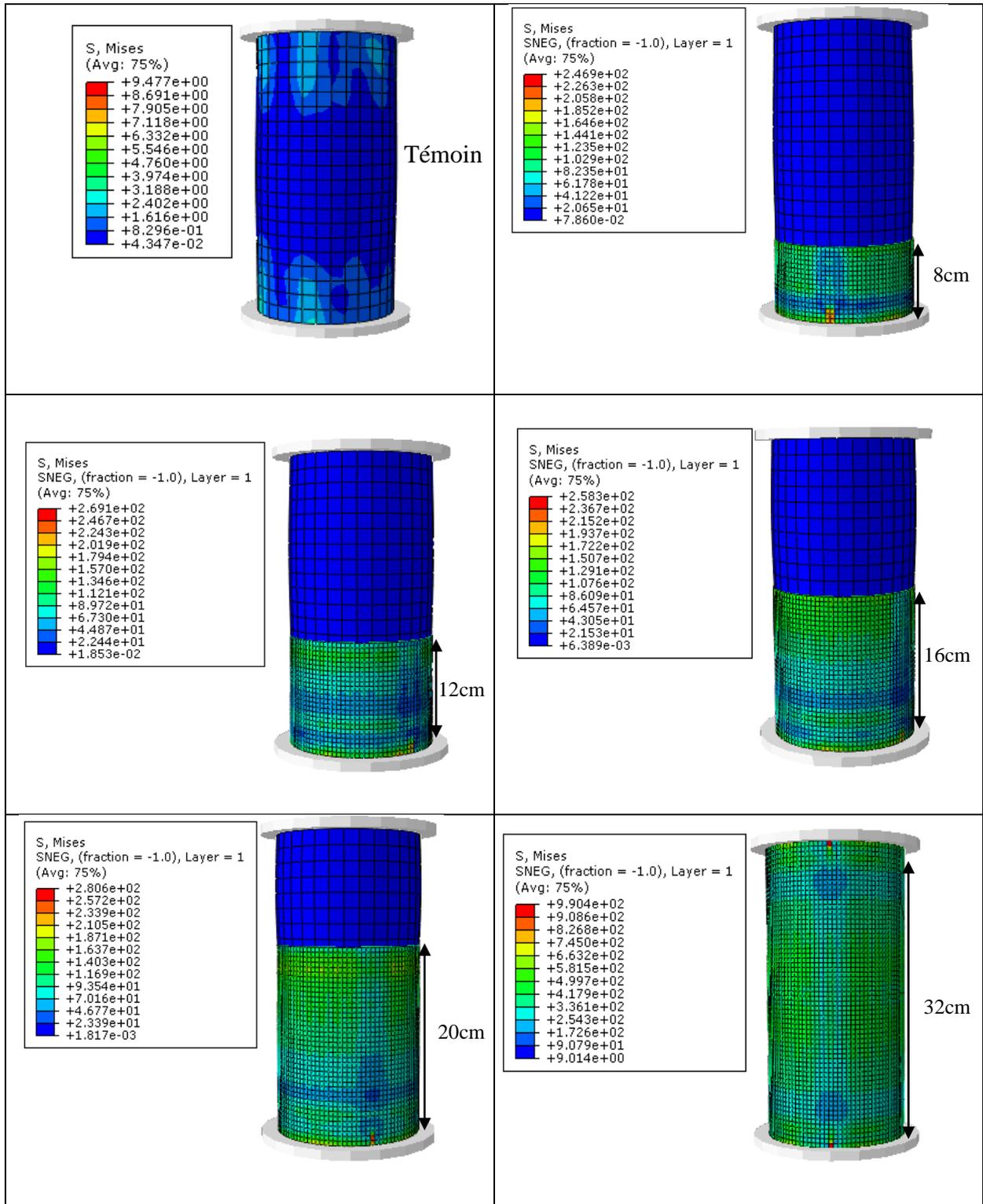


Figure IV.12: Cartographie des contraintes dans les cylindres.

IV.6.2 Champs des dommages

IV.6.2.1 Dommage en compression

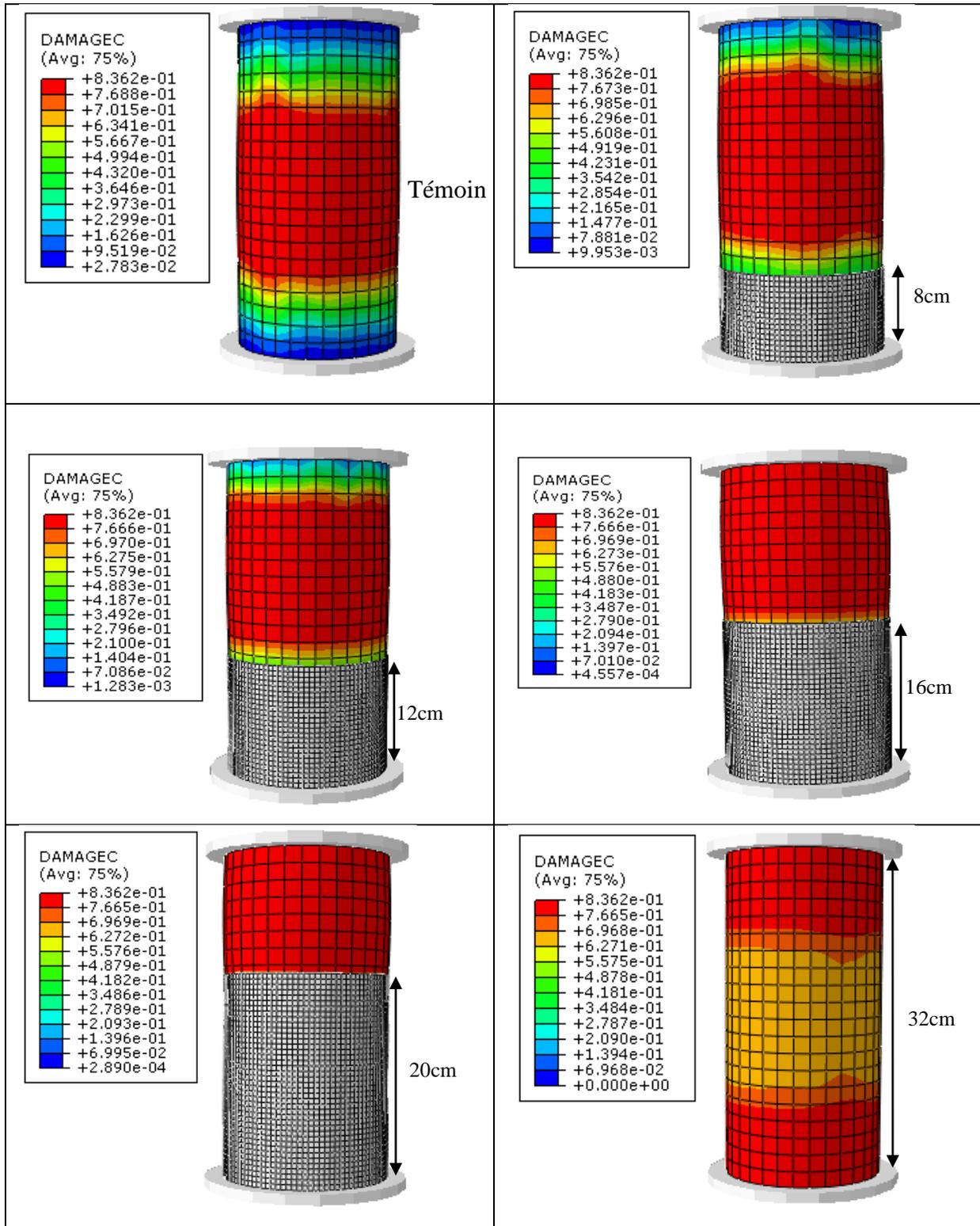


Figure IV.13: Cartographie des dommages en compression dans les cylindres.

IV.6.2.2 Dommages en traction

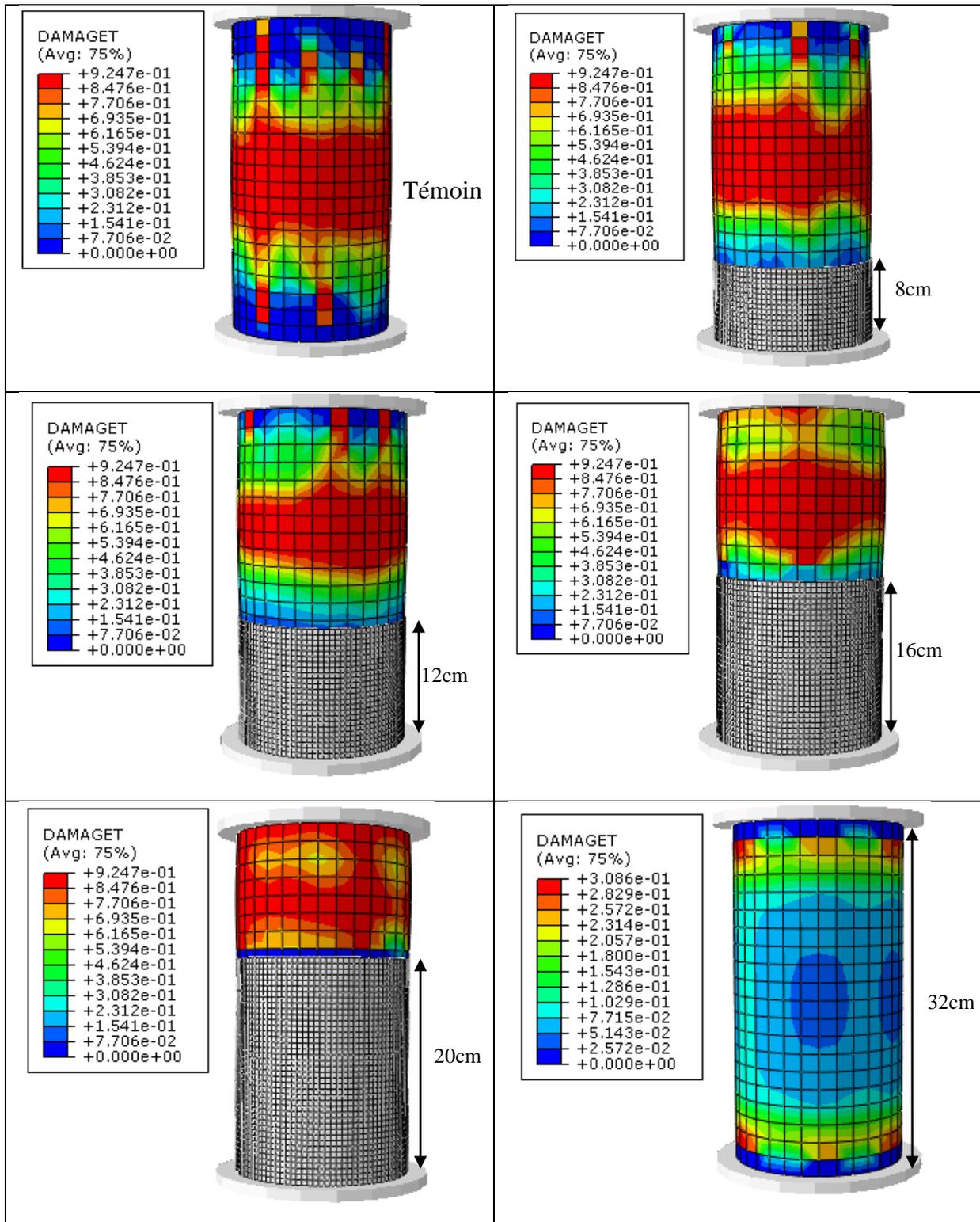


Figure IV.14: Cartographie des dommages en traction dans les cylindres.

IV.6.3 Champs des déformations

IV.6.3.1 Déformations dans les cylindres

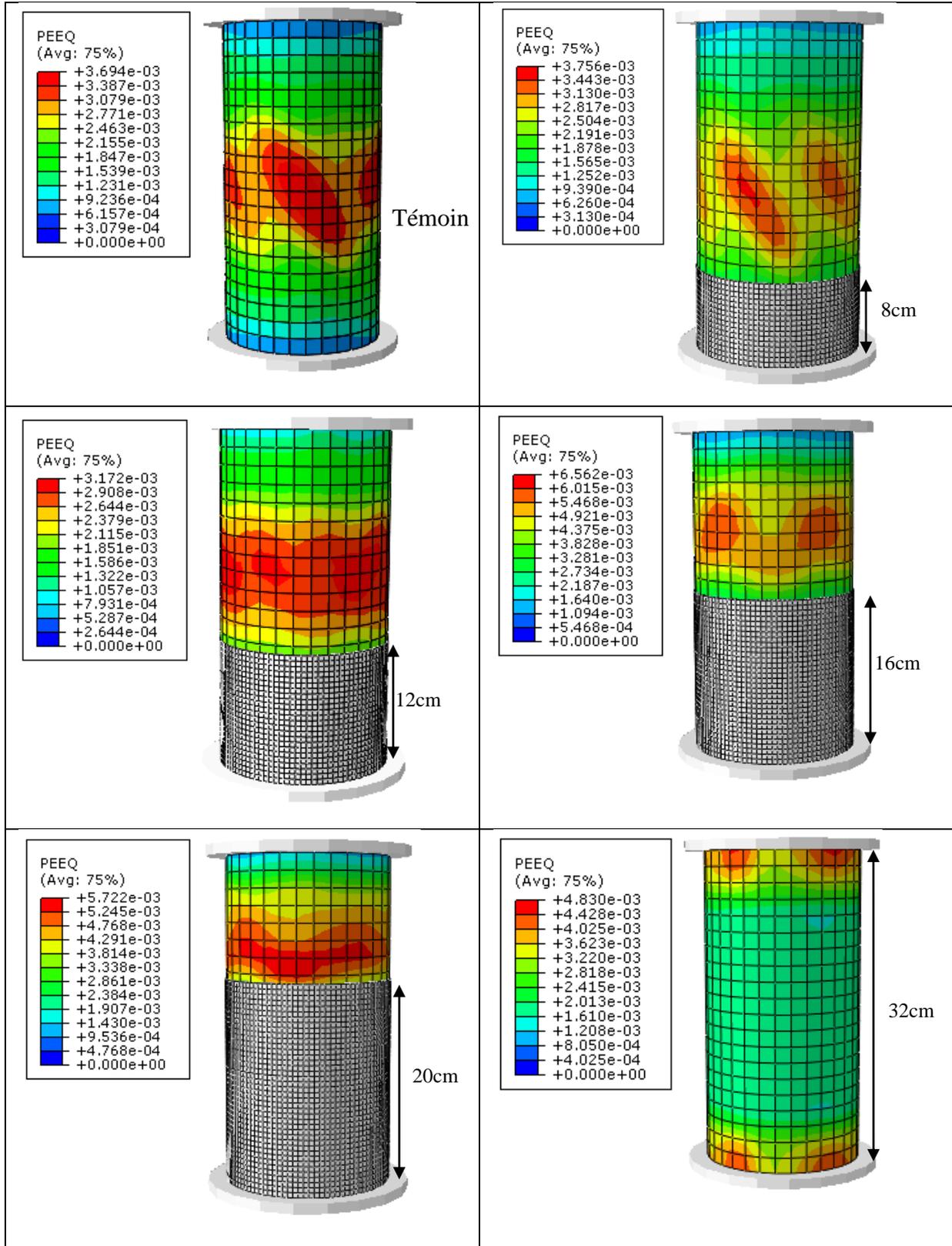


Figure IV.15: Cartographie des déformations dans les cylindres.

IV.6.3.2 Déformations dans les composites

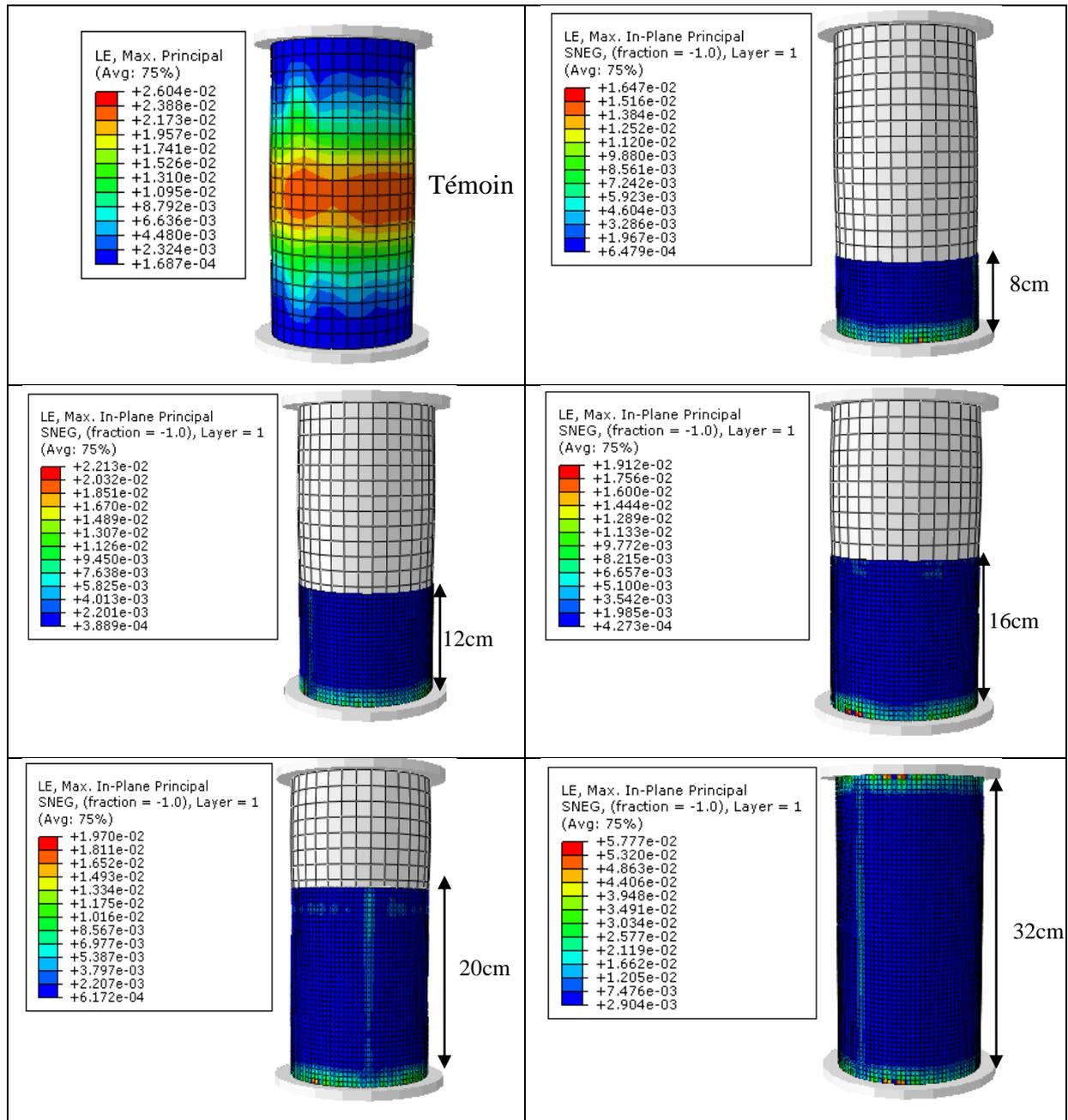


Figure IV.16: Comparaison des déformations dans les composites.

La figure IV.12 illustre l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises dans les cylindres de référence et confiné. L'évolution des champs de contraintes dans le cylindre non confiné est rapide, le spécimen atteint la phase de densification des fissures après un temps de chargement très court, l'élément analysé soumis à une compression uniaxiale connaît des concentrations de contraintes dans la région centrale qui engendrent la formation des fissures macroscopiques qui produisent la rupture de l'élément. Pour le cas des cylindres en béton

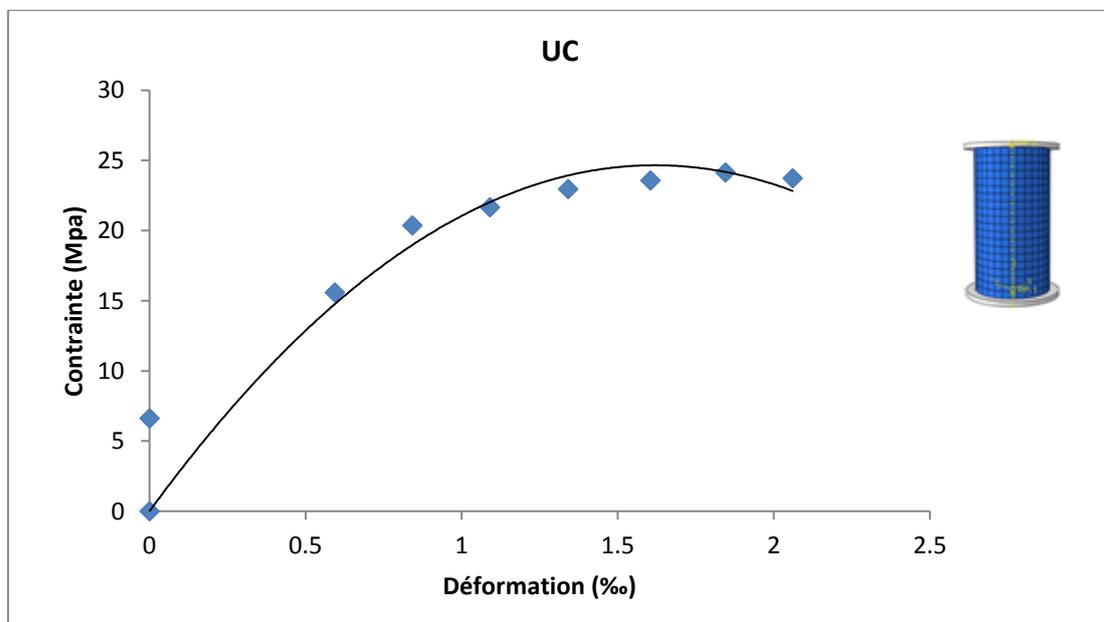
confiné partiellement ou totalement, l’initiation et le développement des fissures est retardé grâce à la mobilisation de la pression latérale de confinement procurée par l’enveloppe composite en GFRP. La rupture de l’élément est produite par une charge plus importante ( $\sigma_{cc} > \sigma_{c0}$ ) en fonction de la hauteur de la zone confinée. Cette rupture est toujours obtenue dans la zone non confinée.

La figure IV.16 illustre l’évolution des déformations dans les cylindres de référence et confinés. Ces déformations se propagent progressivement dans la zone non confinée du cylindre. Les déformations dans les cylindres confinés sont petites comparativement à celles développées dans le cylindre de béton non confiné.

**IV.6.4 Courbes contraintes – déformations et confrontation**

**Tableau IV.4 :** présentation des résultats des essais.

spécimens	x/h	Fc0exp	Fc0sim	Fccexp	Fccsim	Fccexp/fc0	Fccsim/fc0sim
UC	/	/	24.50	24.14	/	/	/
PCC	8	0.25	/	/	26.87	24.93	1.09
	12	0.375	/	/	28.37	26.85	1.15
	16	0.5	/	/	28.31	31.43	1.15
	20	0.625	/	/	28.8	34.93	1.17
FCC	32	1	/	/	32.34	35.44	1.32



**Figure IV.17:** Courbe contrainte – déformation pour le cylindre de référence UC.

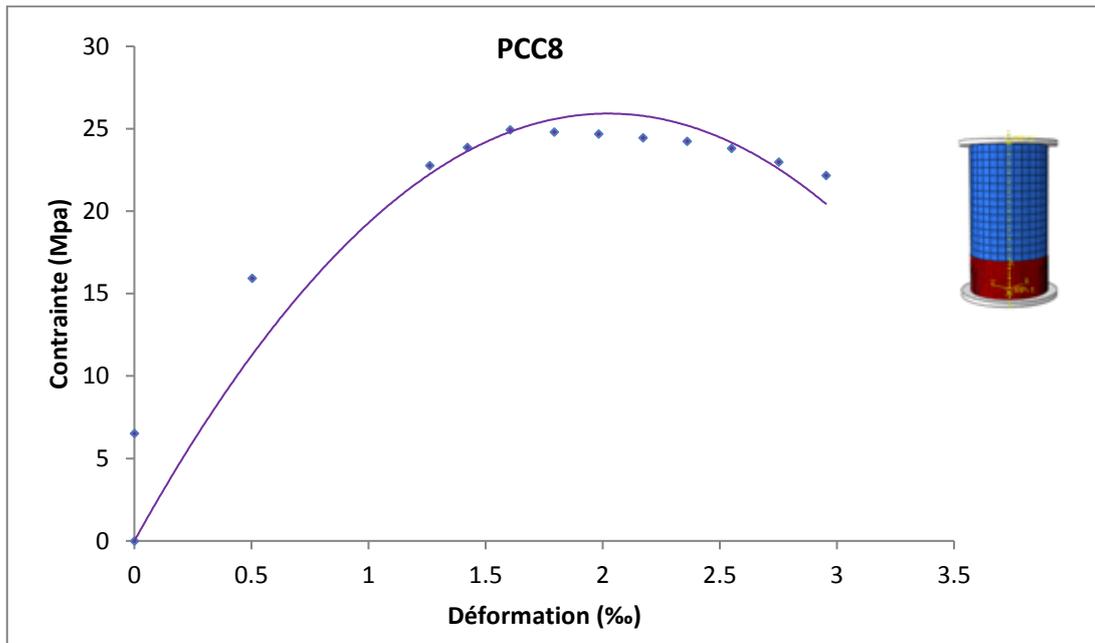


Figure IV.18: Courbe contrainte – déformation pour PCC-8cm.

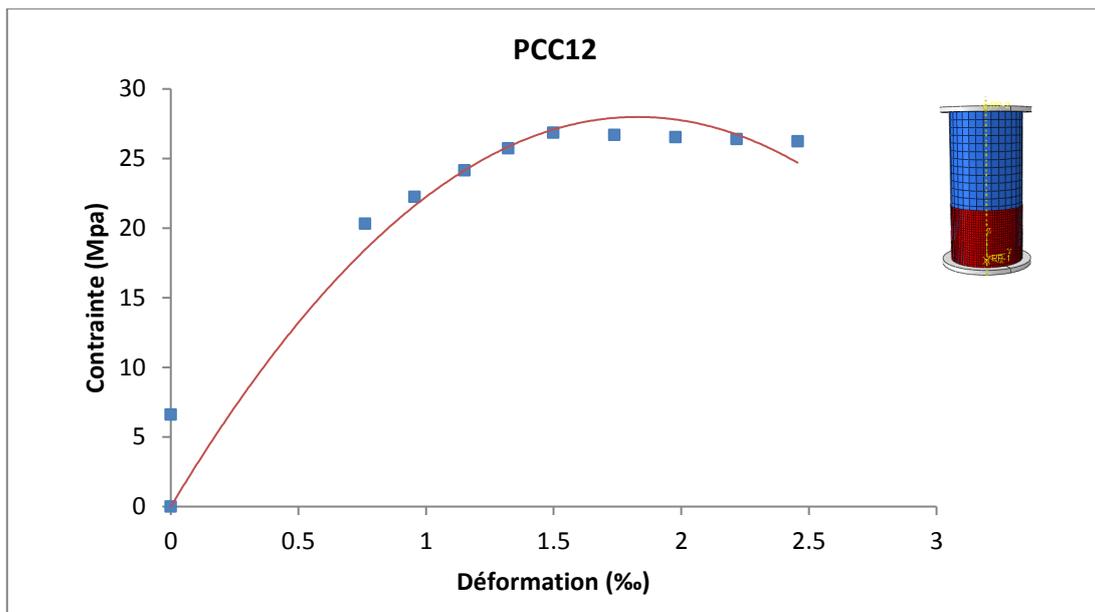


Figure IV.19: Courbe contrainte – déformation pour PCC-12cm.

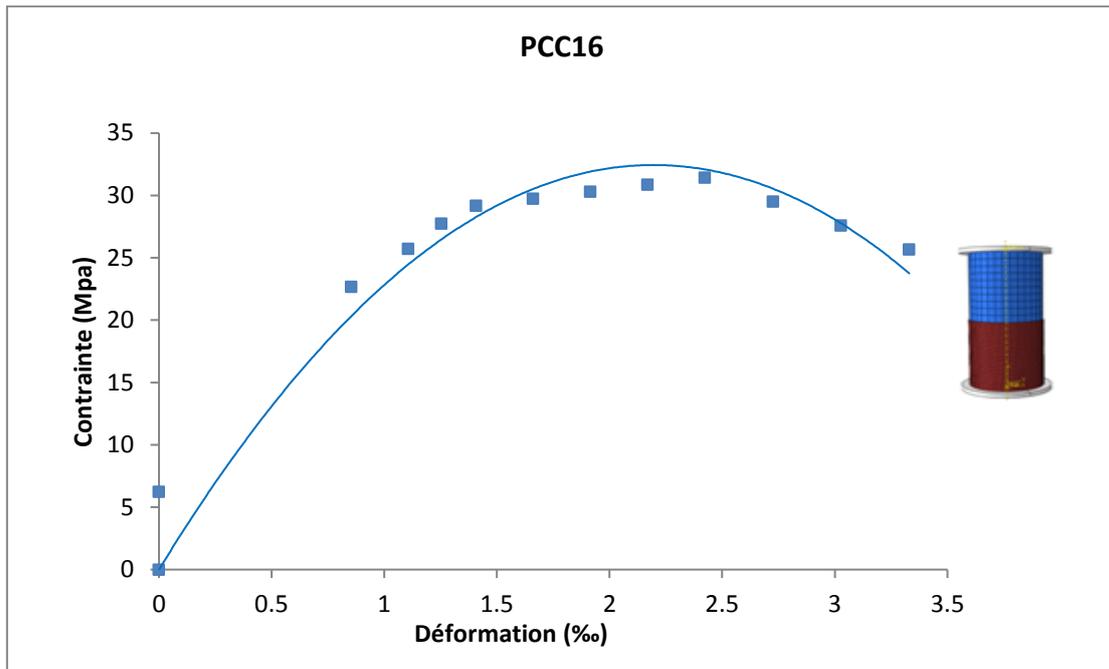


Figure IV.20: Courbe contrainte – déformation pour PCC-16cm.

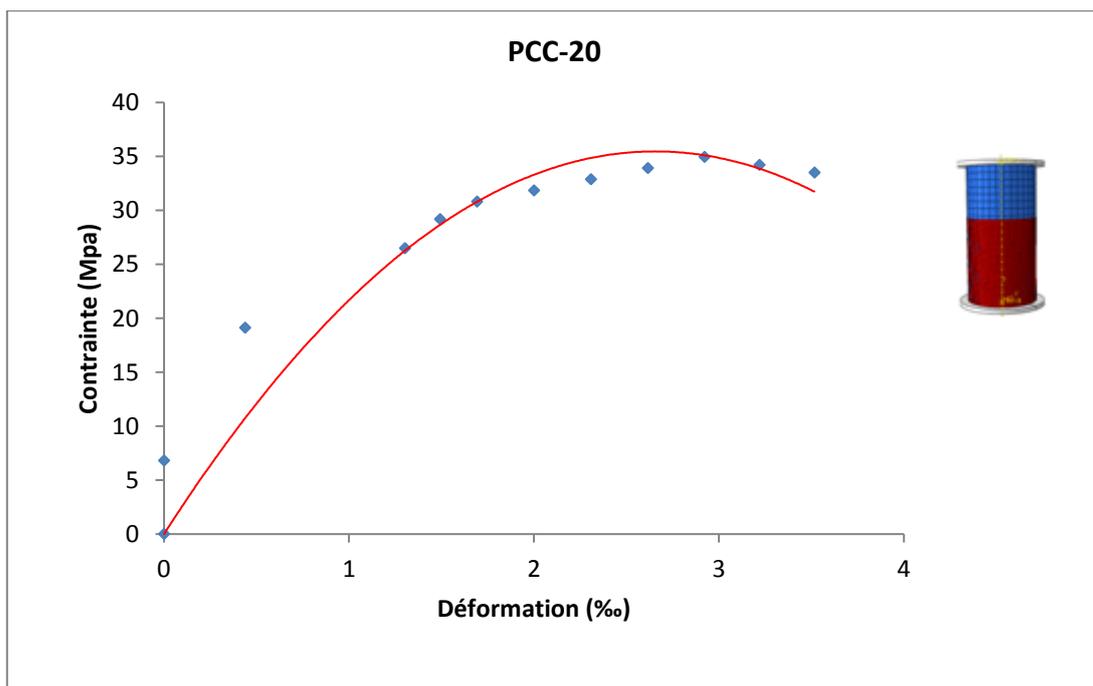


Figure IV.21: Courbe contrainte – déformation pour PCC-20cm.

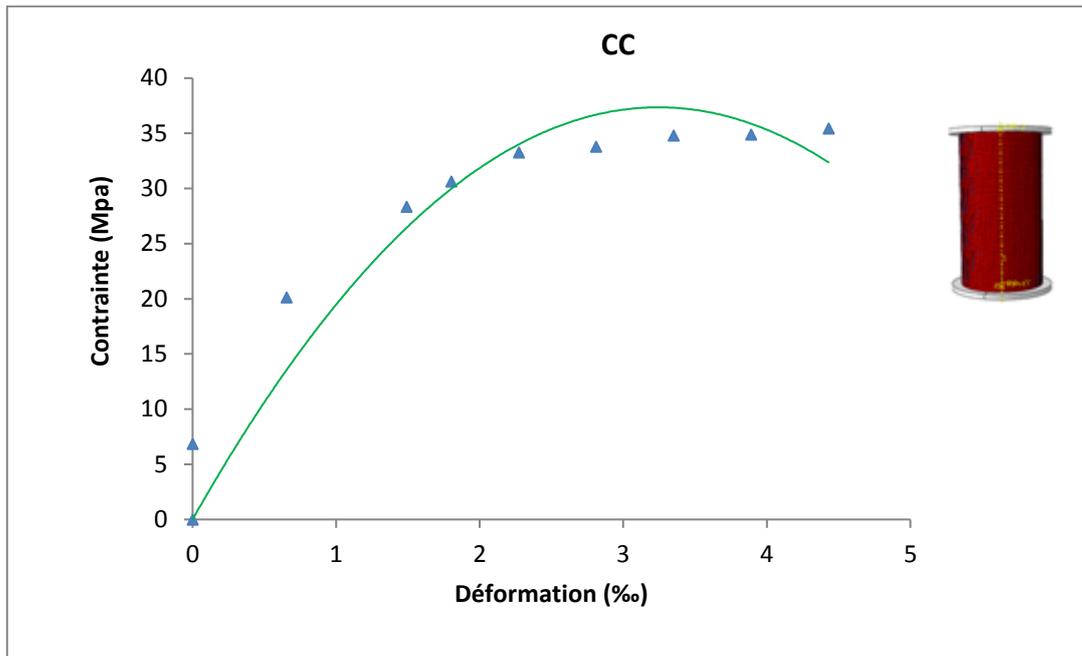


Figure IV.22: Courbe contrainte – déformation CC.

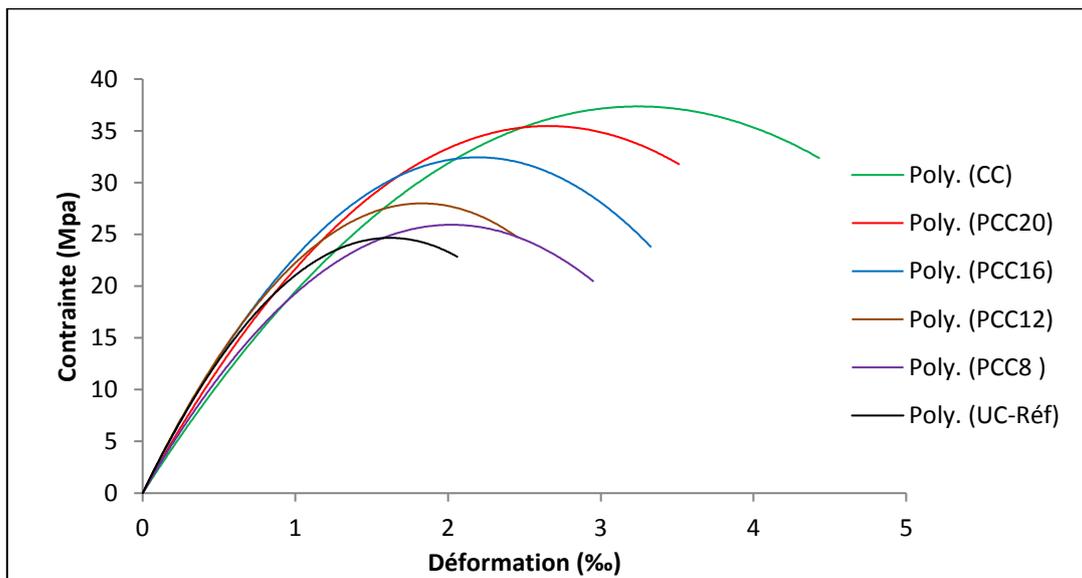


Figure IV.23: Confrontation des courbes contraintes – déformations des spécimens

#### IV.7 Confrontation simulation – expérimentale

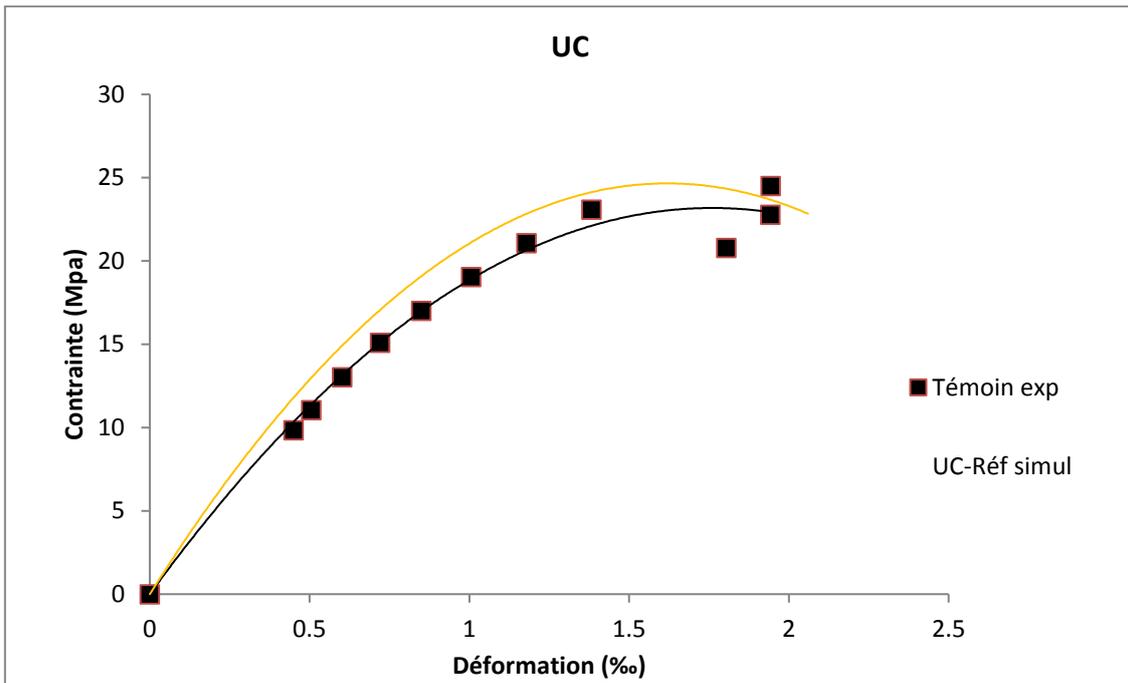


Figure IV.24 : Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes-déformations pour spécimens UC.

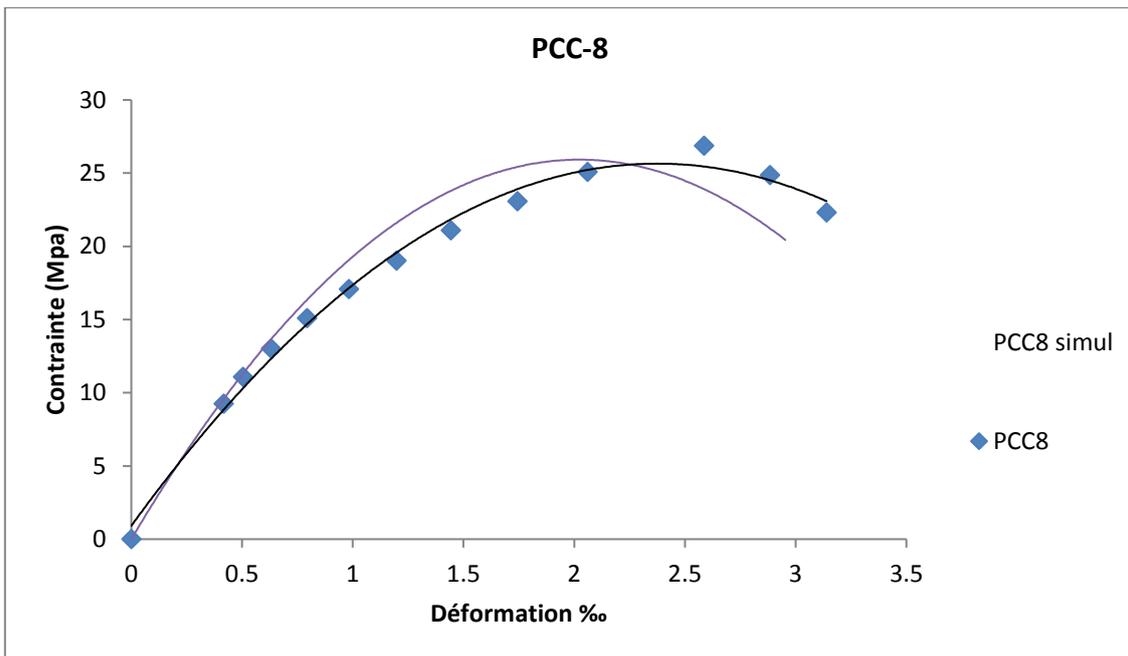
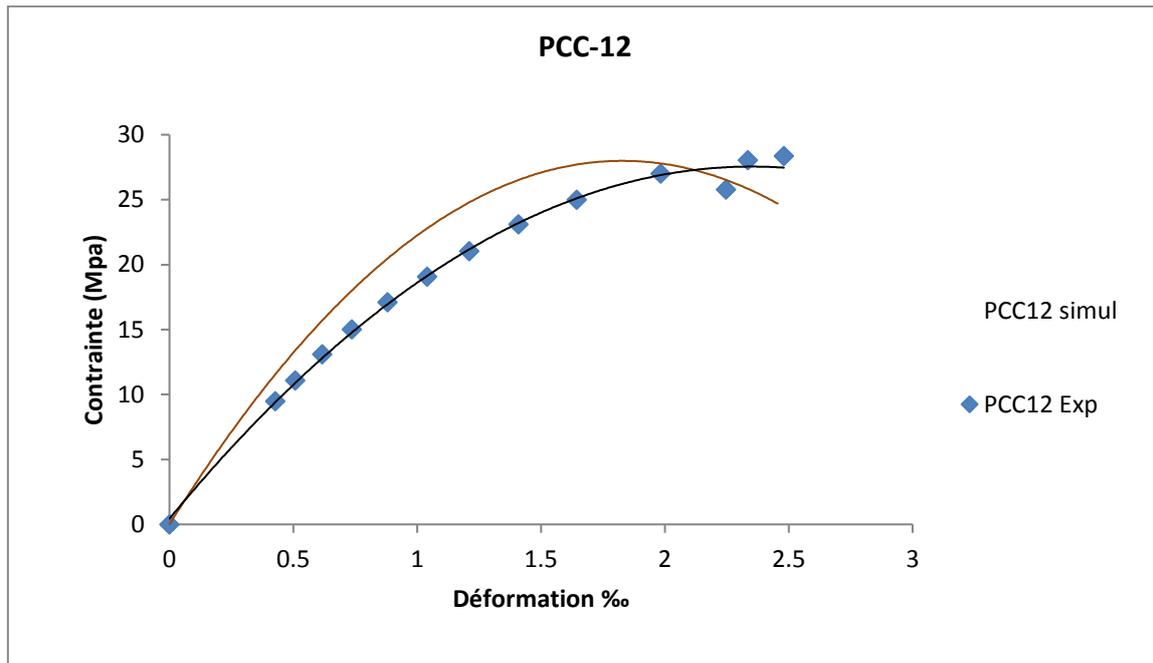
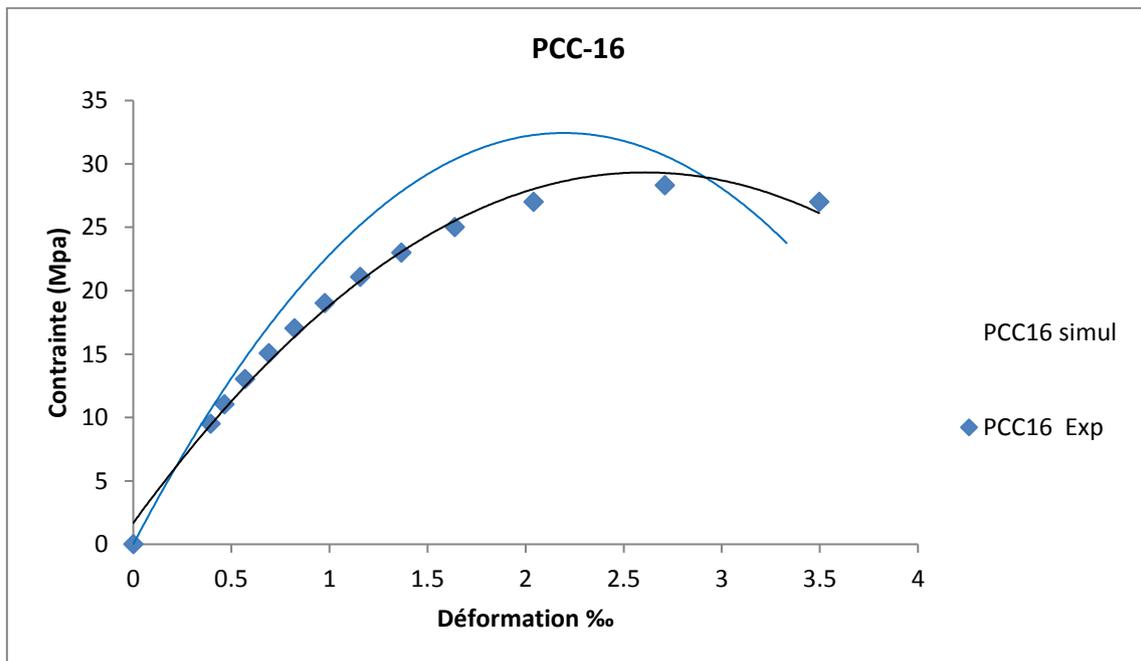


Figure IV.25: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-8cm.



**Figure IV.26:** Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-12cm.



**Figure IV.27:** Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-16cm.

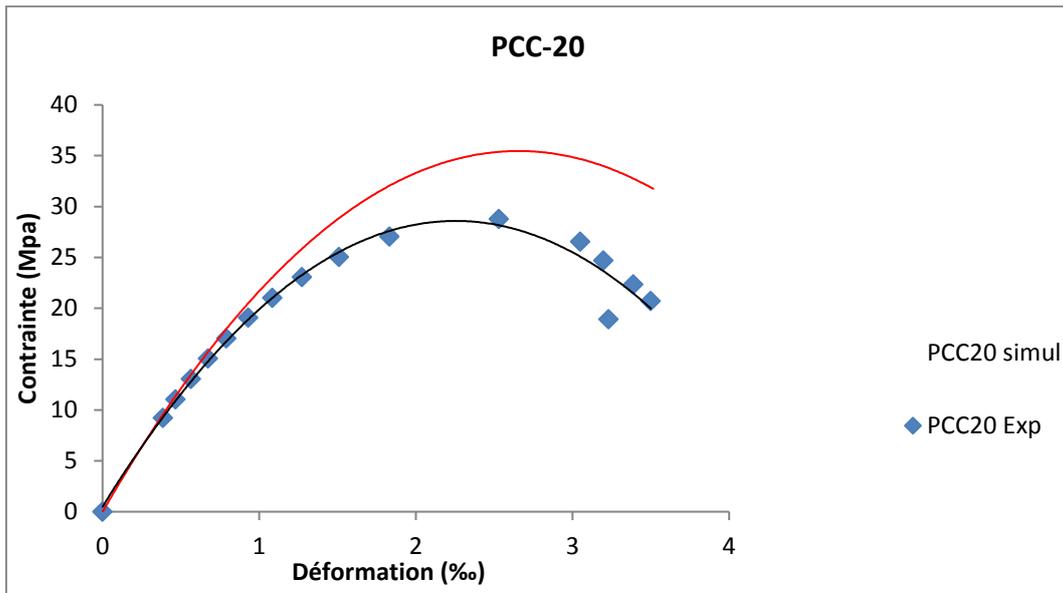


Figure IV.28: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens PCC-20cm.

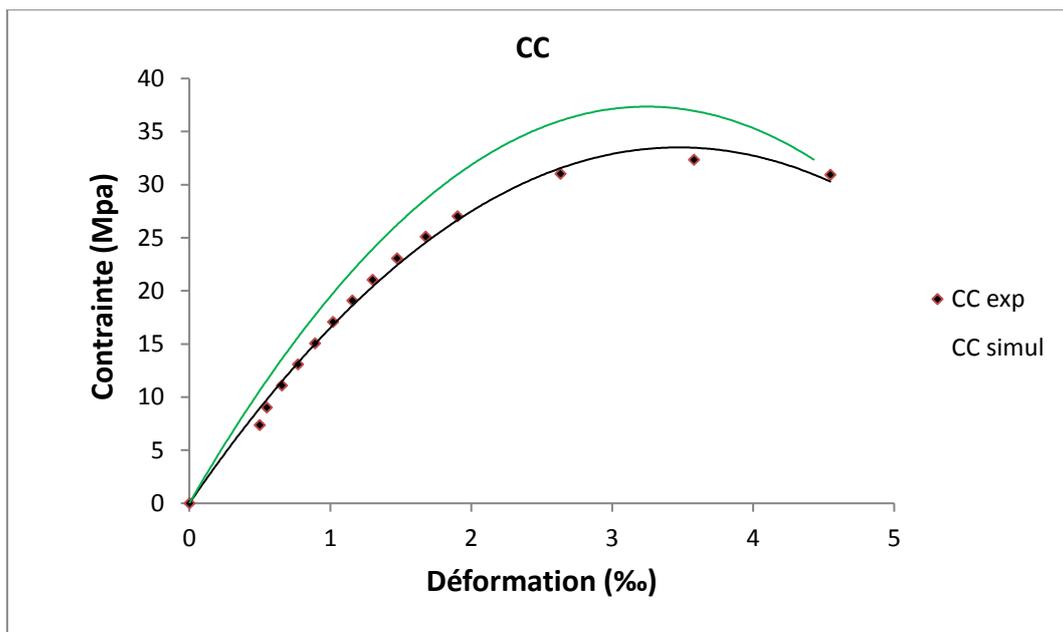


Figure IV.29: Expérimental VS Simulation : Confrontation contraintes- déformations pour spécimens CC.

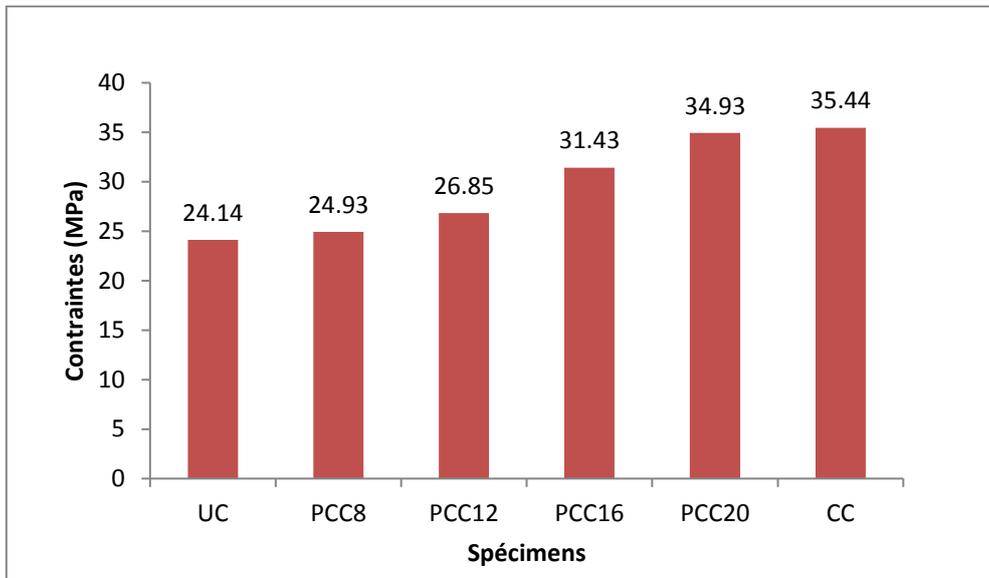


Figure IV.30: Diagrammes en barres des contraintes ultimes.

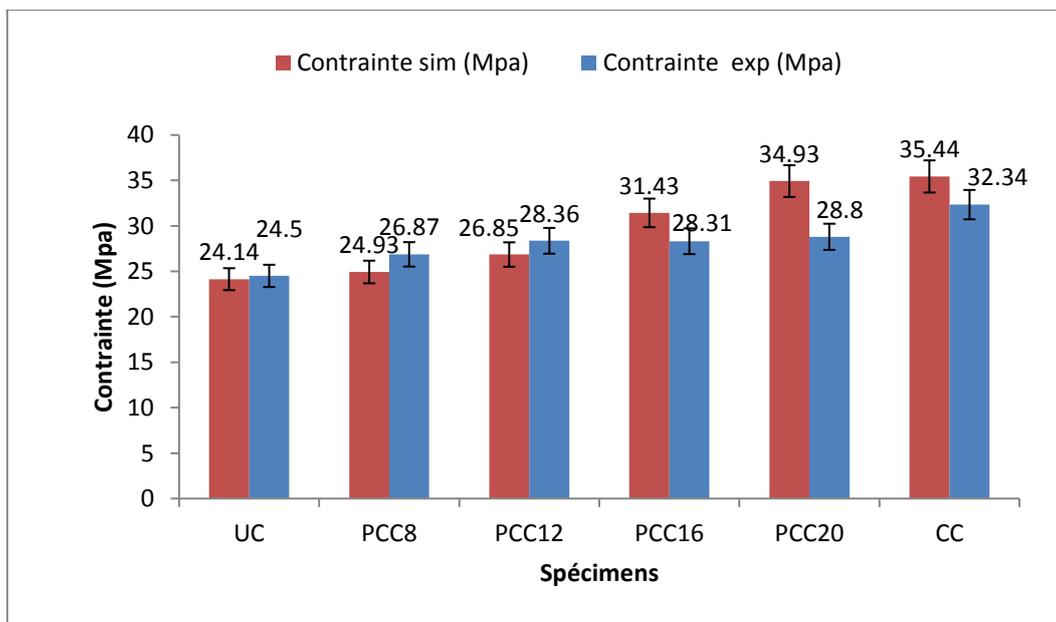


Figure IV.31: Confrontation des valeurs de contraintes : Expérimental VS Simulation.

#### **IV.8 Analyse des résultats et conclusion**

L'analyse des différents résultats donnés par la simulation montre une bonne concordance avec ceux donnés par les essais au laboratoire, telle qu'illustrée par la confrontation des différentes courbes contraintes – déformations. L'erreur commise est inférieure à 10%.

Les différentes cartographies des contraintes, des dommages en compression dans les cylindres, dommages en traction dans les cylindres, déformations dans les cylindres et déformations dans les composites appréhendent d'une manière très proche de la réalité des phénomènes observés dans l'expérimental, plus particulièrement l'endommagement et la rupture des spécimens.

Il serait intéressant de développer un modèle théorique qui transcrira le comportement des cylindres en béton confinés partiellement, tenant compte de la hauteur de la zone confinée.

---

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

---

La revue littéraire des différents travaux de recherches ayant porté sur le confinement de colonne en béton par les FRP composites, nous a permis de constater que la plupart des recherches ont été conduites sur des colonnes complètement confinées par des enveloppées composites. Néanmoins certains travaux ont été conduits sur le confinement partiel en utilisant un collage des cerces ou bandes composites sur le support béton.

Ce travail de recherche consiste à étudier numériquement et expérimentalement l'influence de la hauteur de la zone confinée définie par le rapport  $x/h$  sur la résistance des cylindres en béton soumis à un chargement de compression axiale et sur le mode de rupture.

Les différents résultats illustrés montrent que le confinement partiel influe sur la résistance ultime et la déformation correspondante au pic, en fonction du rapport  $x/h$  qui définit le rapport de la hauteur de la zone confinée sur la hauteur totale du cylindre. Dans le domaine élastique linéaire, nous observons presque le même comportement où les contraintes sont proportionnelles aux déformations, par contre dans la phase élasto-plastique correspondante à la zone d'endommagement jusqu'à la rupture, une influence du confinement partiel et total est observée fonction du rapport  $x/h$ . en effet, le renforcement des zones proches des extrémités, permet d'obtenir un bon confinement. Les spécimens PCC-8 et PCC-12 et PCC-20 ont donnés des résultats satisfaisants de l'ordre respectivement de 9.67%, 15.80% et 17.55%.

Mêmes, le confinement total engendre une augmentation de la résistance de l'ordre de 32% par rapport au spécimen témoin (UC), le confinement partiel peut constituer une alternative au confinement total dans le cas des éléments endommagés localement pour un seuil de résistance souhaitée.

L'analyse des différents résultats donnés par la simulation montre une bonne concordance avec ceux donnés par les essais au laboratoire, telle qu'illustrée par la confrontation des différentes courbes contraintes – déformations. L'erreur commise est inférieure à 10%.

Enfin, ces résultats sont considérés comme préliminaires, car on a utilisé juste une couche de composite pour le confinement des cylindres, à cet effet, en perspectives, il est recommandé :

- de poursuivre le travail en procédant au confinement par plusieurs couches de composites pour valider cette approche surtout pour le cas des colonnes endommagées localement, dans le but, non seulement de restituer et améliorer la résistance mais également assurer l'économie de cette technique de renforcement.
- de développer un modèle théorique qui transcrit le comportement des cylindres en béton confinés partiellement, tenant compte de la hauteur de la zone confinée.

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

- [1] **Jean-Pierre Adam**, “La Construction romaine. Matériaux et techniques ” Sixième édition. Grands Manuel Picard, 2011.
- [2] **A. M. Neville**, “Properties of concrete”; Editions Eyrolles, Paris, 2000
- [3] **Jean-Michel Torrenti**, “BÉTON ”, Encyclopædia Universalis, consulté le 24 décembre 2018.
- [4] **George Dreux, Jean Festa**, “nouveau guide du béton et de ses constituants”, Edition eyrolles 1998.
- [5] **Baraka Abdelhak** ; support de cour béton armé I ; centre universitaire de Béchar ; Département de Génie civil et d’architecture 2005-2006.
- [6] **Jean-Marie Berthelot**, “Mécanique des Matériaux et Structures Composites” Le Mans, France.
- [7] Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages .CGS.1992.
- [8] **Joseph Abou Zeid**, “Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé” Avril 2016.
- [9] **Benzaid Riad**, “Contribution à l’étude des matériaux composite dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton” Université de Constantine; thèse doctorat 2010.
- [10] **Rochdi El Houssain**, “ Contribution à l’analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composite” université de Lyon 1 ; thèse de doctorat 2004.
- [11] **Marie-Josée Houde**, “Modélisation de poutres en béton armé endommagées par chargement cycliques. Comportement en flexion et en cisaillement ”. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l’Université Laval. Département de génie civil, faculté des sciences et de génie, université Laval. QUÉBEC mars 2007.
- [12] **Nawy E.G**, “Prestressed Concrete, a Fundamental Approach”. 4th Edition, Prentice Hall, P939, 2003.
- [13] **Madouni .Lyli**, “Simulation numérique des éléments en béton confinés par des grilles métalliques ” thèse de master LMD en génie civil, Université de Tizi ousou, Année 2011.
- [14] **Kheloui. F**, “Modélisation du comportement à la fatigue des éléments de construction en béton de fibres” thèse de doctoral en génie civil, Université de Tizi ousou, Année 2012.
- [15] **Chafika Ali Ahmed**, “Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation” Thèse de Doctorat, Université Tizi ousou, Année 2016.
- [16] **Youssef et al**, “stress-strain model for concrete confined by FRP composites” Composites: Part B, Vol. 38, pp. 614-628. 2007.

- [17] **F. Bentayeb, K. Ait tahar, A. Chateauneuf.** “New technique for reinforcement of concrete columns confined by embedded composite grid” *Revue Construction and Building Materials*, ed. ELSEVIER, 22 1624–1633; 2008.
- [18] **M. Shahawy, A. Mirmiran, T. Bertelsmann.** “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns” *composites: part B*, vol. 31, pp 471-480, 2000.
- [19] **Liang Huang et al.** “Compressive Behavior of Concrete Confined with GFRP Tubes and Steel Spirals” *polymers* 2015, 7, pp 851-875; doi: 10.3390/polym7050851
- [20] **Matthys. S, Toutanji. H, Audenaert. K et Taerwe. L,** “ Axial load behavior of large scale columns confined with fiber–reinforced Polymer composites” *ACI structural journal*, Vol.102 , N° 2 , pp 258-267 . 2005
- [21] **J.F. Berthet, E. Ferrier, P. Hamelin.** (2005) “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A: Experimental study” *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 223-232.
- [22] **Fardis, M.N. et Khalili, H.H.** “FRP-encased concrete as a structural material ” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202, 1982.
- [23] **R, Dupain, R. Lanchon et J.C. Saint-arroman,** “Granulats, sols, ciments et bétons (caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire) “ édition Castelia, 1995.
- [24] **RECUEIL DES NORMES ALGERIENNES “ SECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS“**, IANOR, Décembre 2010.
- [25] **ATILL Souad** “Etude et caractérisation des déchets d’usinage (fibre métallique) et leurs influences sur le comportement mécanique et dégradation chimique des bétons”, *Mémoire de doctorat, Université A.MIRA- BEJAIA*, p94, 2018.
- [26] **Fardis, M.N. et Khalili, H.H.** “FRP-encased concrete as a structural material”, *Magazine Of Concrete Research*, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202, 1982.
- [27] **Zain Saeed H, QaiseruzZaman Khan, Hammad Anis Khan, Rashid Farooq.** “Experimental investigation of stress–strain behavior of CFRP confined Low Strength Concrete (LSC) cylinders. *Construction and Building Materials*”. Volume 104, February 2016, Pages 208–215.
- [28] **HIBBIT, Karlsson& Sorensen, INC.** ABAQUS documentation version 6.14; 2014
- [29] **ABAQUS**, Theory Manual, version 6.12 et 6.14, Karlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ; 2013.
- [30] **Association française de normalisation** “Essai pour béton durci” Norme européenne norme, française NF, Partie 1 confection et conservation des éprouvettes ISSN 0335-3931, Octobre 2001.
- [31] **Hachemi. N et Boussa. A** “Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton” *Mémoire de master*, 2017, p3.

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

---

[32] **Ould El Hacem .Z** “Renforcement du béton par les matériaux composites” Mémoire de master, 2016, p23.

[33] **Chalal .S et Djerroud .N** “Comportement des cylindres en béton confinés totalement ou partiellement” Mémoire de master 2018, p26.