

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE ABEDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



## *Mémoire de fin d'étude*

Pour l'obtention du diplôme de Master en génie civil

Option : Structures

### **Thème**

**Optimisation numérique des paramètres de confinement  
des cylindres en béton par des bandes composites**

**Présenté par :**

**LAKHDARI Loubna**

**MAAMOURI Ghania**

**Encadré par :**

**Mr. SI SALEM Abdelmadjid**

**Promotion 2017/2018**



## REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout, Dieu le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la foi pour accomplir ce travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent, en premier lieu à notre encadreur **Mr Si Salem Abdelmadjid** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, sa modestie, son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour travailler dans les meilleures conditions.*

*Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail de recherche et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail aux plus chers à mon cœur : ma mère **Salima**, mon père **Zahir**, ma très chère grand-mère **Khadîdja**, mon grand-père **Ahmed** ma grande sœur **Imène**, mes adorables frères **Amine** et **Nazim** ainsi que mes cousines et tantes pour leurs soutien et encouragements durant tout mon cursus car c'est grâce à eux que j'ai pu arriver à ce stade, sans oublier mon cher collègue **Mouhand** ainsi que mon binôme **Ghania**.*

*Je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi.*

*A ma famille.*

*A mes amis.*

*A mes collègues.*

*A tous ceux qui me sont chères.*

*Loubna*



## DEDICACES

*Du profond du cœur, je dédie ce modeste travail à ma très chère mère **Tassadit**, mon très cher père **Mohand** que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A la mémoire de mon grand-père **Tahar** et à la mémoire de ma grand-mère **Djida** que dieu le miséricordieux, vous accueille dans son éternel.*

*A mes sœurs **Mina**, **Dida** et **Lila**, mon frère **Lounis**, mon neveu **Rayane** et ma petite nièce **Lina**, sans oublier mon collègue **Nadjib**.*

*A toute ma famille et mes amis.*

*A mon binôme **Loubna**.*

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

*Ghania*



## RESUME

L'utilisation des matériaux composites dans le domaine de génie civil a connu un grand progrès puisqu'ils disposent d'un rapport performances/écologie important par rapport aux matériaux traditionnels, étant de nature plus légère, ces matériaux innovants sont largement utilisés dans le confinement des colonnes en béton pour répondre aux besoins d'amélioration de leurs performances mécaniques. 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 est en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques des composites.

Par conséquent, le présent travail consiste à optimiser et rechercher les paramètres les plus adéquats des bandes composites FRP, permettant d'améliorer la résistance du béton confiné avec le même taux de confinement. A cet effet, une simulation numérique à base des éléments finis est menée à l'aide du logiciel ABAQUS sur des cylindres en béton de dimensions normalisées partiellement confinées par collage externe de bandes composites chargées en compression. Les matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques à savoir : le modèle « *Concrete Damaged Plasticity* » qui permet de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du béton en compression et en traction, couplé avec l'endommagement pour représenter l'évolution des fissures, et un modèle élastique orthotrope pour prédire la réponse des composites.

L'approche proposée est validée par des modèles expérimentaux disponibles dans la littérature. Enfin, les résultats numériques obtenus en termes d'évolution des contraintes et des variables d'endommagement montrent d'une part l'intérêt des composites FRP sur la réponse globale et locale des éléments confinés, et d'autre part des gains remarquables en termes de capacité portante qui sont quantifiés par la confrontation des courbes contrainte-déformation.

**Mots clés :** Optimisation, Confinement, bande FRP, Performances, Simulation numérique, Confrontation.

## ABSTRACT

The use of composite materials in civil engineering field has made an effective progress, since they have an attractive performance to ecology ratio compared to traditional ones. Due to their reduced own weight, these innovative materials are widely used in concrete columns confinement in order to improve mechanical performances. The several techniques and models of confinement by bonded FRP composites available in the scientific literature have confirmed that the lateral confinement pressure is related to the geometric and mechanical characteristics of composites.

In this respect, the present work aims to optimize and to assess the most adequate parameters of the FRP composite stirrups, which allow to improve the ultimate strength of confined concrete with the same confinement rate. Therefore, finite element simulation using ABAQUS software is carried out on standard concrete cylinders partially confined by externally bonding FRP stirrups under compressive loading. The constituent materials are modeled according to numerical models namely: Concrete Damaged Plasticity model which allows to take into account the nonlinear behavior of compressive and strained concrete, coupled with damages to represent the cracks evolution, also, an orthotropic elastic model to predict FRP behavior.

The proposed approach is validated by experimental models available in the literature. Finally, the predicted numerical results in terms of stresses and damage variables highlight in one hand the interest of FRP composites on the global and local response of confined elements, and in other hand, the gains in terms of bearing capacity which are quantified by the confrontation of stress-strain curves.

**Keywords:** Optimization, Confinement, FRP stirrups, Performances, Numerical simulation, Confrontation.

# Table des matières

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Principales notations

**Introduction générale** ..... 1

## **Chapitre I : Revue sur les matériaux béton et composites**

I.1. Introduction ..... 4

I.2. Matériau béton ..... 4

I.2.1. Historique et utilisation du béton ..... 5

I.2.2. Composition et formulation ..... 5

I.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques ..... 7

I.2.3.1 Caractéristiques physiques (masse volumique) ..... 7

I.2.3.2 Caractéristiques mécaniques ..... 7

I.2.4 Modélisation du béton ..... 9

I.3. Matériaux composites ..... 11

I.3.1. Constituants (Renforts et Matrices) ..... 12

I.3.2. Comportement mécanique (Caractéristiques) ..... 16

I.3.3. Utilisation des Composites en GC ..... 17

I.3.4. Modélisation des composites ..... 19

I.3.4.1 matrice de rigidité et de souplesse ..... 19

I.3.4.2 modèle en série et en parallèle ..... 20

I.4. Conclusion ..... 21

## **Chapitre II : Etat de l'art sur le confinement des structures**

II.1. Introduction ..... 23

II.2. Nécessité de confinement ..... 23

II.2.1 Démarche expérimentale du collage des composites sur le béton.....	24
II.2.2 Comportement du béton confiné.....	25
II.2.3 Mode de rupture du béton confiné.....	27
II.3. Revue sur les techniques de confinement.....	28
II.4.Synthèse des modèles de confinement.....	33
II.5. Paramètres influençant sur le confinement.....	35
II.6. Conclusion.....	38

### **Chapitre III : Simulation et paramètres d'étude**

III.1. Introduction.....	41
III.2. Présentation du logiciel.....	41
III.3. Démarches et étapes de simulation.....	43
III.3.1. Dimension et géométrie.....	43
III.3.2. Sections et assemblage.....	44
III.3.3. Maillage et MEF.....	45
III.3.4. Gestion du contact Béton- composite.....	47
III.3.5. Chargement et conditions aux limites.....	48
III.3.6. Gestion des résultats : STEP et JOB.....	48
III.4 Modélisation du comportement des matériaux.....	49
III.4.1. Modèle non linéaire pour béton.....	49
III.4.1.1. Le modèle Concrete Damaged Plasticity.....	50
III.4.1.2. Couplage plasticité-endommagement.....	53
III.4.1.3. Identification des paramètres du modèle.....	53
III.4.2. Modèle élastique orthotrope pour les FRP.....	54
III.4.2.1. Paramètre du modèle.....	55
III.4.2.2. Critère de rupture des composites.....	55
III.5. Modèles et variantes de l'étude.....	56
III.5.1. Caractéristiques géométriques des bandes.....	56
III.5.2. Caractéristiques mécanique des bandes.....	57
III.6. Conclusion.....	58

## Chapitre IV : Présentation des résultats et discussion

IV.1. Introduction .....	61
IV.2. Validation du modèle EF proposé.....	61
IV.3. Influence de la géométrie des bandes FRP .....	62
IV.3.1. Espacement des bandes .....	62
IV.3.1.1. Cartographies des contraintes .....	62
IV.3.1.2. Cartographies des endommagements .....	64
IV.3.1.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	66
IV.3.2. Epaisseur des bandes .....	67
IV.3.2.1. Cartographies des contraintes .....	67
IV.3.2.2. Cartographies des endommagements .....	68
IV.3.2.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	69
IV.3.3. Largeur des bandes .....	71
IV.3.3.1. Cartographies des contraintes .....	71
IV.3.3.2. Cartographies des endommagements .....	72
IV.3.3.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	73
IV.4. Influence des caractéristiques mécaniques des bandes .....	76
IV.4.1. Modules de Young longitudinal des bandes.....	76
IV.4.1.1. Cartographie des contraintes.....	76
IV.4.1.2. Cartographie des endommagements .....	76
IV.4.1.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	77
IV.4.2. Modules de Young transversal des bandes.....	78
IV.4.2.1. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	78
IV.4.3. Résistance à la traction des bandes dans la direction des fibres.....	79
IV.4.3.1. Cartographies des contraintes .....	79
IV.4.3.2. Cartographies des endommagements .....	80
IV.4.3.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ).....	81
IV.4.4. Résistance à la traction des bandes dans la direction transversales ( $Y_t$ ).....	82
IV.4.4.1. Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) .....	82
IV.5. Conclusion .....	83
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>85</b>

## Références bibliographiques

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Schématisation des constituants du béton .....	4
<b>Figure I.2.</b> Les différents constituants du béton destiné à la construction .....	7
<b>Figure I.3.</b> Essai de compression uni axiale .....	8
<b>Figure I.4.</b> Comportement du béton à la compression .....	8
<b>Figure I.5.</b> Comportement du béton en compression selon SARGIN .....	10
<b>Figure I.6.</b> Comportement local du béton en traction selon MAZARS .....	10
<b>Figure I.7.</b> Différents constituants d'un matériau composite.....	12
<b>Figure I.8.</b> Le mat de la fibre.....	13
<b>Figure I.9.</b> La forme roving de la fibre.....	13
<b>Figure I.10.</b> Organigramme de différentes familles de renfort .....	14
<b>Figure I.11.</b> Organigramme illustrant les différentes familles de matrice .....	16
<b>Figure I.12.</b> Renforcement des dalles et poutres par des matériaux composites.....	18
<b>Figure I.13.</b> Exemple de renforcement de colonnes par des matériaux composites .....	18
<b>Figure I.14.</b> Couche de matériau composite orthotrope .....	19
<b>Figure I.15.</b> Pli d'un matériau composite orthotrope .....	19
<b>Figure II.1.</b> Procédure de la mise en œuvre des feuilles en composites .....	25
<b>Figure II.2.</b> Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné .....	26
<b>Figure II.3.</b> Effet de la pression de confinement sur le comportement .....	26
<b>Figure II.4.</b> Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP .....	27
<b>Figure II.5.</b> Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée.....	27
<b>Figure II.6.</b> Modes de rupture des spécimens .....	29
<b>Figure II.7.</b> Effet de confinement sur le comportement du béton .....	30
<b>Figure II.8.</b> Dimensions géométriques de la grille composite utilisée.....	31
<b>Figure II.9.</b> Courbes contraintes-déformations des cylindres en béton armé.....	31
<b>Figure II.10.</b> Segments circulaires en béton.....	32
<b>Figure II.11.</b> Changement de section de la colonne .....	32
<b>Figure II.12.</b> Modes de rupture des colonnes confinées avec CFRP .....	33
<b>Figure II.13.</b> Effet de la géométrie des colonnes confinées avec CFRP .....	36
<b>Figure II.14.</b> Effet de l'élancement sur les colonnes confinées avec CFRP .....	36

<b>Figure II.15.</b> Confinement partiel hélicoïdal avec CFRP .....	37
<b>Figure II.16.</b> Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal .....	38
<b>Figure III.1.</b> Présentation de l'interface ABAQUS .....	42
<b>Figure III.2.</b> Modélisation des géométries des éléments .....	44
<b>Figure III.3.</b> L'assemblage des éléments (cylindre-bande FRP) .....	45
<b>Figure III.4.</b> Maillages adoptés lors des simulations numériques des éléments .....	46
<b>Figure III.5.</b> Courbes contrainte-déformation pour les 3 configurations de maillage .....	47
<b>Figure III.6.</b> Modélisation du contact : Béton-Composite et Béton-Disc .....	47
<b>Figure III.7.</b> Conditions aux limites du module chargement .....	48
<b>Figure III.8.</b> Le module STEP et JOB .....	49
<b>Figure III.9.</b> Comportement du béton soumis à une compression uni axiale. ....	50
<b>Figure III.10.</b> Comportement du béton soumis à une traction uni axiale. ....	51
<b>Figure III.11.</b> Pli d'un matériau composite orthotrope .....	54
<b>Figure IV.1.</b> Validation du modèle élément fini proposé pour chaque cas de figure .....	61
<b>Figure IV.2.</b> Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des espacements .....	63
<b>Figure IV.3.</b> Evolution des dommages pour le cylindre : variation des espacements.....	65
<b>Figure IV.4.</b> Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : espacement 5 cerces.....	66
<b>Figure IV.5.</b> Confrontation des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : espacement 3 cerces.....	66
<b>Figure IV.6.</b> Histogramme des contraintes en fonction des espacements des cerces .....	67
<b>Figure IV.7.</b> Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des épaisseurs .....	68
<b>Figure IV.8.</b> Evolution des dommages dans le cylindre : variation des épaisseurs .....	69
<b>Figure IV.9.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : épaisseur 5cerces.....	69
<b>Figure IV.10.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : épaisseur 3cerces.....	70
<b>Figure IV.11.</b> Histogramme des contraintes : épaisseurs des cerces.....	70
<b>Figure IV.12.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : 3CE2, 3CE4, 5CE1et 5CE2. ....	71
<b>Figure IV.13.</b> Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des largeurs.....	72
<b>Figure IV.14.</b> Evolution des dommages dans le cylindre : variation des largeurs.....	73
<b>Figure IV.15.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : largeur 5cerces .....	73
<b>Figure IV.16.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma - \varepsilon$ ) : largeur 3cerces .....	74
<b>Figure IV.17.</b> Histogramme des contraintes : Largeurs des bandes.....	74
<b>Figure IV.18.</b> Evolution des contraintes : variation du module de Young longitudinal .....	76

<b>Figure IV.19.</b> Evolution des dommages : variation du module de Young longitudinal. ....	76
<b>Figure IV.20.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : module de Young longitudinal.....	77
<b>Figure IV.21.</b> Histogramme des contraintes : Module longitudinal.....	77
<b>Figure IV.22.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : module de Young transversal.....	78
<b>Figure IV.23.</b> Histogramme des contraintes: module transversal .....	78
<b>Figure IV.24.</b> Evolution des contraintes : Résistance à la traction des FRP (longitudinale) .	79
<b>Figure IV.25.</b> Evolution des dommages : résistance à la traction des bandes .....	80
<b>Figure IV. 26.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : Résistance à la traction FRP.....	81
<b>Figure IV.27.</b> Histogramme des contraintes : résistance à la traction du FRP longitudinal	81
<b>Figure IV.28.</b> Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : Résistance transversale des FRP .....	82
<b>Figure IV.29.</b> Histogramme des contraintes : Variation Résistance transversale des FRP ..	82

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Propriétés mécaniques et physiques typiques des composites .....	16
<b>Tableau II.1.</b> Synthèse des modèles du béton confiné.....	34
<b>Tableau III.1.</b> Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.....	52
<b>Tableau III.2.</b> Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton. ....	53
<b>Tableau III.3.</b> Paramètres du modèle numérique.....	55
<b>Tableau III.4.</b> Configuration pour les variations de l'espacement des cerces .....	56
<b>Tableau III.5.</b> Largeur des bandes .....	57
<b>Tableau III.6.</b> Variation des caractéristiques géométriques .....	58
<b>Tableau III.7.</b> Variation des caractéristiques mécaniques .....	58
<b>Tableau IV.1.</b> Tableau représentatif des différents apports en résistance dû à l'Influence des caractéristiques géométriques des bandes FRP. ....	75
<b>Tableau IV.2.</b> Tableau représentatif des différents apports en résistance dû à l'Influence des caractéristiques mécaniques des bandes FRP .....	83

## Principales Notations

$f_{cj}$	La résistance à la compression du béton à j jours.
$f_{c28}$	La résistance à la compression du béton à 28 jours.
$f_{tj}$	La résistance caractéristique du béton à la traction a j jours.
$f_{cc}$	Résistance à la compression du béton confiné.
$f_{c0}$	Résistance à la compression du béton non confiné.
$f_l$	Pression de confinement latérale.
$t_{frp}$	Épaisseur du FRP.
$f_{frp}$	Résistance à la traction du FRP.
$E_{frp}$	Module d'élasticité du FRP.
$L$	Largeur de la bande en FRP.
$S$	Surface du cylindre
$D$	Diamètre du cylindre en béton.
$h$	Hauteur du cylindre
$\varepsilon_{cc}$	Déformation axiale maximale du béton confiné.
$\varepsilon_{c0}$	Déformation axiale maximale du béton non confiné.
$P$	Pression de confinement active.
$E_1, E_2$	Modules d'élasticité du tissu de verre.
$\nu_1, \nu_2$	Coefficients de Poisson du tissu de verre.
$G_{12}$	Module de cisaillement du tissu de verre.
$\nu_{frp}$	Coefficient de Poisson du FRP.
$E$	Module de Young instantané du béton
$\psi$	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
$a_f$	Rapport entre contrainte bi-axiale/uni-axiale du béton.

$a_c$	Paramètre pilotant la courbe de compression de béton avant le pic
$b_c$	Paramètre pilotant la courbe de compression après le pic.
$a_t$	Paramètre pilotant la courbe de traction avant le pic
$b_t$	Paramètre pilotant la courbe de traction après le pic
$d_t$	Variables d'endommagement de traction.
$d_c$	Variables d'endommagement en compression.
$f_c$	Force de compression du béton.
$\rho_f$	Fraction volumique des bandes composites.
$A_f$	Section du composite.
$\tau_{\max}$	Contrainte de cisaillement dans la bande en FRP, due à la contrainte de traction.
$\frac{f_l}{f_{c0}}$	Rapport de confinement.
$\frac{f_{cc}}{f_{c0}}$	Rapport de résistance.
<b>FRP</b>	Polymère Renforcé de Fibres.
<b>GFRP</b>	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre).
<b>PRFV</b>	Polymère Renforcé de Fibres de verre.
<b>PRFC</b>	Polymère Renforcé de Fibres de carbone
<b>PRFA</b>	Polymère Renforcé de Fibres d'Aramide

INTRODUCTION  
GÉNÉRALE

Le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction le plus utilisé dans les ouvrages de génie civil, il a mérité sa place par sa simplicité de fabrication, sa facilité de mise en place et ses performances mécaniques. Outre, le béton armé avec l'idée d'introduire des barres en acier à l'intérieur est apparu pour pallier aux problèmes de faible résistance en traction du béton. Dans le génie civil, un ouvrage est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne, toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers.

L'approche la plus évoquée pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton afin de pallier à leurs dégradations est le collage externe de matériaux composites sur les faces susceptibles à la rupture. Les premières recherches sur l'application de ces nouveaux matériaux destinée aux ouvrages de génie civil, plus particulièrement aux poteaux en béton datent de 1980, très répandus dans la nature légère et performante, ils constituent un renfort intéressant offrant au béton une meilleure résistance à la fatigue, à la corrosion et des propriétés mécaniques les plus élevées possibles [11].

Le confinement des poteaux (colonnes) par collage de matériaux composites est souvent réalisé par application d'une enveloppe entière avec des polymères renforcés de fibres FRP. Il existe néanmoins des travaux effectués sur le confinement partiel de colonnes, afin d'améliorer davantage les performances du béton confiné tout en associant économie et écologie. Dans cette optique, l'objectif assigné par ce travail de recherche est d'optimiser les paramètres de confinement des cylindres en béton par des bandes composites avec le même taux de confinement pour la reprise de l'effort axial développé dans un essai de compression. L'optimisation vise à évaluer la meilleure combinaison de ces variables qui donnerait le gain souhaité en résistance à la compression. Les principaux objectifs de ce travail sont résumés comme suit :

- ❖ Mettre en évidence l'effet du confinement partiel du béton par bandes FRP ;
- ❖ Développer et valider un modèle élément fini non linéaire capable de prédire la réponse des cylindres confinés chargés en compression ;
- ❖ Optimisation des paramètres de confinement à savoir : caractéristiques géométriques des bandes FRP (largeur, épaisseur et espacement) et caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et module de rigidité).

Pour répondre à la problématique posée, nous avons scindé le mémoire en deux grandes parties présentant chacune un aspect bien défini de la thématique étudiée qui porte sur les paramètres de confinement par collage de matériaux composites sur le béton.

La première partie est une **synthèse bibliographique** composée de deux chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est une **revue sur les matériaux** béton et composites : dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique qui fait l'état de l'art des différentes connaissances concernant les matériaux composites ainsi que leur domaine d'application et l'intérêt qu'ils procurent au matériau béton.
- ❖ Le deuxième chapitre fait l'objet de **l'état de l'art sur le confinement des structures** : ce chapitre est consacré aux méthodes d'application des composites et le comportement du béton confiné et non confiné ; accompagné d'une revue de littérature et les différents paramètres influençant sur le confinement.

La deuxième partie est consacrée pour l'optimisation numérique, elle comporte aussi deux chapitres comme suit :

- ❖ Le troisième chapitre « **Simulation et paramètres d'étude** » est totalement dédié à la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS. Il donne un aperçu sur les modules utilisés : de la génération de la géométrie jusqu'au lancement du calcul. Les principales étapes de la simulation et les variantes de l'étude considérées sont aussi présentées.
- ❖ Le dernier chapitre « **Présentation des résultats et discussion** » présente les résultats de la simulation numérique sous forme de cartographies, courbes contrainte déformation qui décrivent le comportement du béton confiné et non confiné. Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce confinement en terme de résistance.

Enfin, ce travail est ponctué par une conclusion générale où sont rappelés les principaux résultats obtenus dans cette étude. En guise de perspectives, quelques propositions sont listées pour de futures recherches.

# CHAPITRE I

*REVUE SUR LES MATERIAUX  
(BETON ET COMPOSITES)*

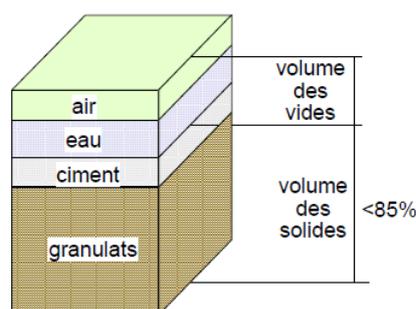
## I.1 Introduction

Le béton est le matériau de base le plus utilisé dans le génie civil depuis plus d'un siècle. Il peut se dégrader et perdre une part de ses propriétés sous l'influence de causes multiples qui peuvent être liées à sa qualité originale ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un diagnostic nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné.

Par conséquent, cette étude bibliographique fait l'état de l'art des différents éléments nécessaires à ce travail, à travers une synthèse détaillée sur les bétons et les matériaux composites. Ainsi, nous présentons leurs principales caractéristiques mécaniques intrinsèques et leurs lois de comportement. Le présent chapitre débute par un aperçu historique du béton. Ensuite, nous présentons sa composition et sa formulation ainsi que sa modélisation en compression et en traction, par ailleurs les différentes utilisations et applications des matériaux composites en génie civil.

## I.2 Matériau béton

Le béton se compose de granulats (sables, graviers, cailloux) collés entre eux par un liant hydraulique, lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il fait prise, puis durcit progressivement. Un béton hydraulique est constitué : d'une pâte pure (ciment + eau) ; d'un mélange granulaire et éventuellement de produit additionnel (adjuvants, additions minérales).



**Figure I.1.** Schématisation des constituants du béton.

On désigne habituellement sous le vocable :

- De matrice ou de mortier : le mélange (liant + eau + sable).
- De squelette solide ou de squelette granulaire : le mélange des granulats.

### **I.2.1 Historique et utilisation du béton**

Le béton est un matériau de construction qui existait depuis 7000 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. En 1928 **Eugène Freyssinet** [3] a inventé le béton précontraint pas fils adhérents. Dans les années 1980 les bétons à haute performance ont été fabriqués aux Etat – Unis et au Japon dont la résistance à la compression atteint 100 MPa. En laboratoire, on obtient des résistances supérieures à 600 Mpa [1].

A partir du milieu du 19<sup>ème</sup> siècle , le ciment est non seulement un liant ou, plus exactement, la base de différentes liants ( mortiers pour les éléments secs de la construction (pierres de tailles, briques) mais surtout la clés d'un matériau nouveau qui va ouvrir des perspectives immenses au bâtiments et aux travaux publics : le béton depuis cette époque, son histoire celle de l'amélioration de ses techniques de la fabrication et de mise en œuvre est indissociable de l'évolution de l'architecture.

### **I .2.2 Composition et formulation**

**Liant hydraulique** : des poudres finement broyées qui avec le contact d'eau font prise et durcissent sous des processus physico-chimique complexes.

**Le ciment** : est un liant hydraulique obtenu par cuisson (à 1450°C) et broyage d'un mélange de calcaire et d'argile, s'hydratant en présence d'eau pour former une pate 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.

**Les granulats** : Les granulats sont des matériaux pierreux de petites dimensions, produit par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent 80% du poids total du béton. Ils sont composés de sable (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient

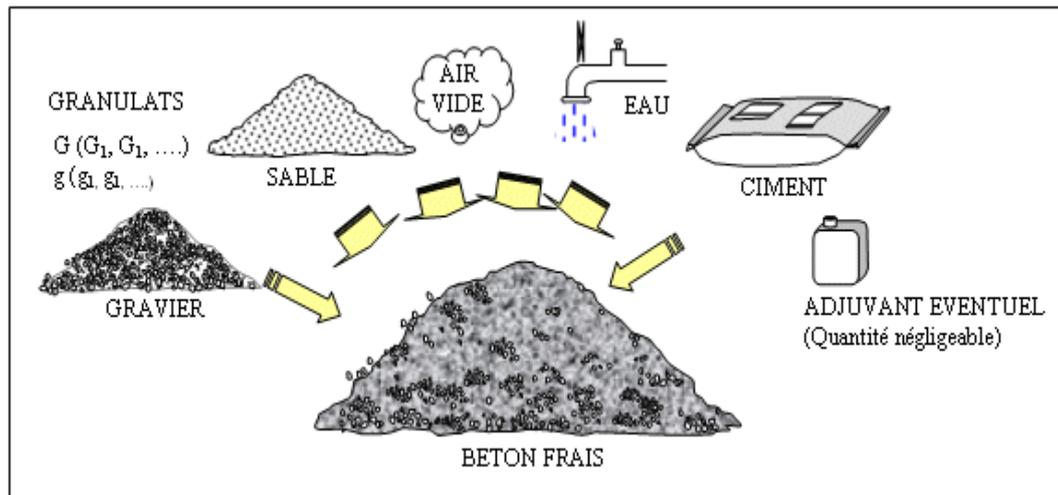
utilisés dans le béton. Il y a deux intérêts d'utiliser des granulats dans le béton à savoir : le côté économique : dimension de la quantité de liant (ciment et addition) ; et le côté technique : limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment).

**Les additions minérales (ultrafines) :** sont des particules de faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre 10% du poids de ciment, améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leur propriétés physico-chimique (cendres volantes, laitier, fillers...). Les fumées de silice, ou micro silices, sont les plus utilisées, ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre 10 µm.

**L'eau :** de façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de béton armé ou précontraint.

**Les adjuvants :** sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton, les principaux adjuvants sont :

- **les plastifiants :** Ils permettent d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide. A maniabilité donnée, ils offrent, d'une part la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton. La résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. La dureté d'actions de ces adjuvants est de 1 à 3 heures.
- **les retardateurs de prise du ciment :** qui prolongent la durée de vie du béton frais. Ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur des grandes distances ou la mise en place par pompage, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprise de bétonnage.
- **les accélérateurs de prise ou de durcissement :** qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance au béton durci.
- **les entraîneurs d'air :** qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux efforts de gels et dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène. Le volume d'air occlus doit être de l'ordre de 6% de celui du béton durci.



**Figure I.2.** Les différents constituants du béton destiné à la construction

Le béton résulte d'un mélange de ciment, d'eau, de granulats et d'éventuels adjuvants. La formulation doit répondre aux caractéristiques attendues.

On peut influencer sur les propriétés des bétons courants en travaillant leur formulation : le dosage en ciment et en eau, la taille des granulats le type d'adjuvant ...une fois déterminées les caractéristiques attendues, la méthode des abaques de Dreux permettra, une fois posés des postulats simples, de déterminer la composition du béton. [4]

La formulation de la composition des bétons se fait en général d'après la méthode de (**Dreux Gorisse**) basée sur l'analyse granulométrique des différentes fractions de granulats. [5]

### I.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques

#### I.2.3.1 Caractéristiques physiques (masse volumique)

- La masse volumique béton à granulats courants (normal)  $\rightarrow 2200 \div 2400 \text{ kg/m}^3$
- La masse volumique béton à granulats légers  $\rightarrow 700 \div 1500 \text{ kg/m}^3$
- La masse volumique béton à granulats lourds  $\rightarrow 3500 \div 4000 \text{ kg/m}^3$

#### I.2.3.2 Caractéristiques mécaniques

##### ➤ Résistance à la compression

Le béton est un matériau qui présente une bonne résistance à la compression, pour cela ce matériau est définie par la valeur de sa résistance à la compression à 28 jours ; elle est notée  $f_{c28}$  est choisie en fonction : des conditions de fabrication du béton et de la classe du ciment utilisé et de son dosage en  $\text{m}^3$ .

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (Résistance à la compression, module d'élasticité  $E$  et le coefficient de poisson) et la loi de comportement du béton. Cet essai s'effectue sur des éprouvettes normalisées, de forme cylindrique de hauteur  $H=32\text{cm}$  et de diamètre  $d=16\text{cm}$ . La charge de rupture  $F$  est la force maximale enregistrée au cours de l'essai.

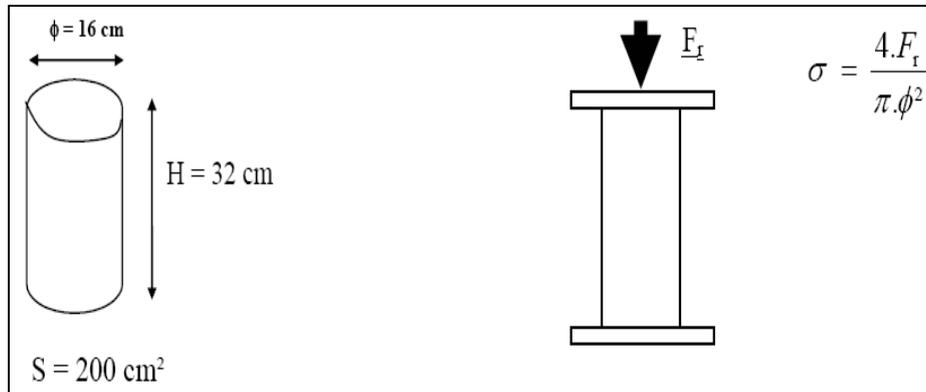


Figure I.3. Essai de compression uni axiale

Le comportement du béton en compression uni-axiale est donné sous forme d'une courbe

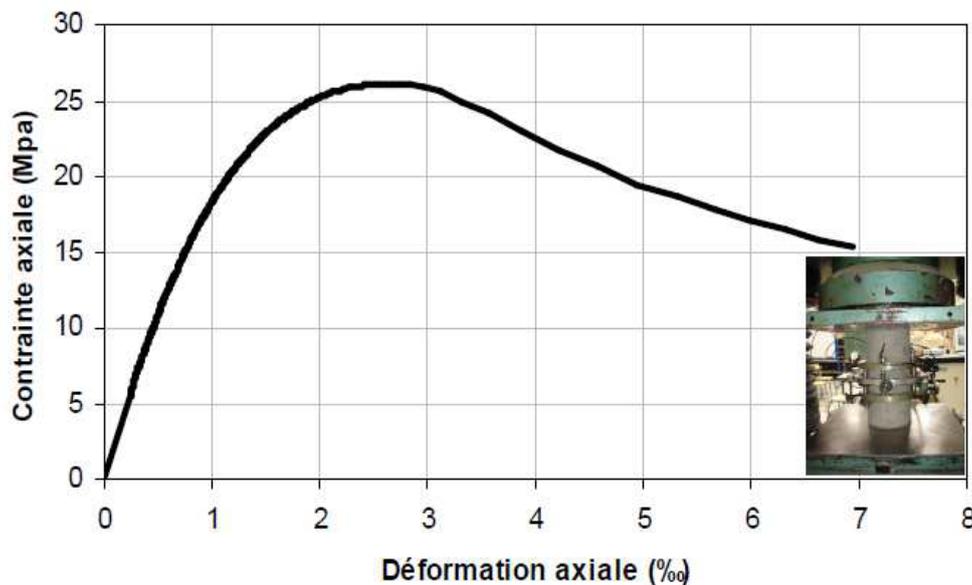


Figure I.4. Comportement du béton à la compression [6]

Evaluation de la résistance à la compression avec l'âge du béton :

✓ Pour des résistances  $f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$ .

$$f_{c_j} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} f_{c28} \quad \text{Si } j \leq 28j \dots\dots\dots (I.1)$$

$$f_{cj} = f_{c28} \quad \text{Si } j > 28j \dots\dots\dots (I.2)$$

✓ Pour des résistances  $f_{c28} > 40$  MPa.

$$f_{cj} = \frac{j}{1,4 + 0,95j} f_{c28} \quad \text{Si } j \leq 28j \dots\dots\dots (I.3)$$

$$f_{cj} = f_{c28} \quad \text{Si } j > 28j \dots\dots\dots (I.4)$$

$f_{cj}$  : La résistance à la compression à **j** jour.

$f_{c28}$  : La résistance à la compression à **28** jour ; On appelle aussi la résistance caractéristique du béton.

➤ **Résistance à la traction**

La mesure directe de la résistance à la traction par un essai de traction axiale étant délicate on a recours à deux modes opératoires différents :

- ✓ 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  $f_{tj}$ , est conventionnellement définie par les relations :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj} \quad \text{Si } f_{c28} \leq 60 \dots\dots\dots (I.5)$$

$$f_{tj} = 0,275f_{cj} \quad \text{Si } f_{c28} > 60 \text{ MPa} \dots\dots\dots (I.6)$$

**I.2.4. Modélisation du béton**

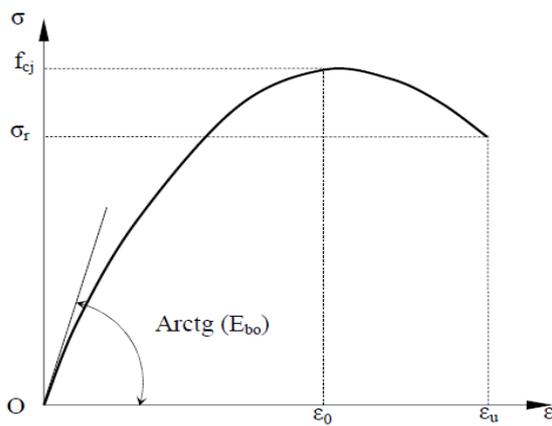
➤ **Comportement du béton en compression**

Pour décrire le comportement réel du béton en compression, **Sargin [7]** a développé un modèle élastique non linéaire qui est décrit par; l'allure générale de la courbe contrainte déformation est donnée par le diagramme représenté à la **Figure (I.5)**. La contrainte est donnée par la relation suivante :

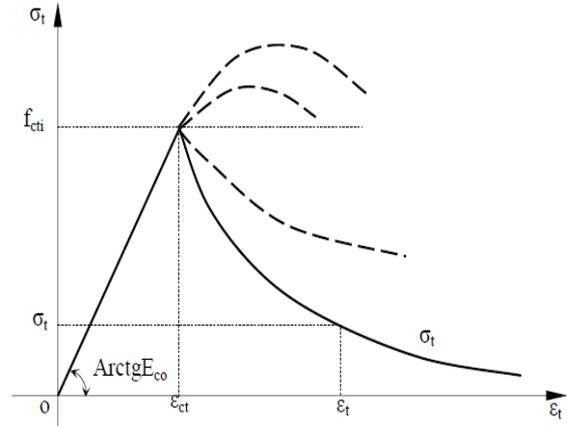
$$\sigma = f_{cj} \frac{K_b \bar{\varepsilon} + (K'_b - 1)\bar{\varepsilon}^{-2}}{1 + (K_b - 2)\bar{\varepsilon} + K'_b \bar{\varepsilon}^{-2}} \dots\dots\dots (I.7)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_r} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{et} \quad K_b = \frac{E_{b0} \varepsilon_0}{f_{cj}} \dots \dots \dots (I.8)$$

Avec :  $K_b$  et  $K_b'$  sont des paramètres ajustant la partie ascendante la branche décroissante de la courbe respectivement. En général, pour un béton normal, on peut prendre :  $K_b' = K_b - 1$



**Figure I.5.** Comportement du béton en compression selon **SARGIN [7]**



**Figure I.6.** Comportement local du béton en traction selon **MAZARS [8]**

➤ **Comportement du béton en traction**

Le béton a une résistance très faible en traction par rapport à celle en compression. Le dépassement de cette résistance provoque l'apparition de fissures. Les essais classiques utilisés pour la détermination de la résistance à la traction du béton, donnent généralement des résultats très dispersés et qui présentent le béton comme ayant un comportement fragile vis à vis de la traction. La résistance du béton à la traction est mesurée, soit par des essais de traction directe, soit indirectement par des essais de fendage ou de flexion.

Les lois de comportement intrinsèque du béton en traction constituent une approche du comportement du béton tendu tel qu'il est constaté expérimentalement. En littérature, on trouve beaucoup de propositions relatives à ce sujet. Parmi ces propositions on peut citer :

La loi de comportement développée par **Mazars [8]**, basée sur la théorie de l'endommagement, **relation (I.9)**. Elle présente l'avantage d'ajuster la courbe décroissante avec deux paramètres  $A_t$  et  $B_t$ , **Figure (I.6)**.

$$\sigma_t = E_{c0} \left\{ \varepsilon_{ct} (1 - A_t) + \frac{A_t \varepsilon_m}{e^{B_t(\varepsilon_m - \varepsilon_{ct})}} \right\} \quad \text{si } \varepsilon_m \geq \varepsilon_{ct} \dots\dots\dots (I.9)$$

Les coefficients  $A_t$  et  $B_t$  permettent de moduler la forme de la courbe post-pic. [6]

### I.3. Matériaux composites

Un matériau composite est formé d'un mélange d'au moins deux composantes, différentes par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les performances globales sont supérieures à celles des éléments qui le constituent. Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. [9]

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

- 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 de désavantages sont associés aux matériaux composites :

- Coût important du passage matériau métallique à matériau composite, prenant en compte le coût 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 ...
- Dispersion plus importante, induisant un surcoût des campagnes de qualification matériaux due aux nombres de répétitions d'essais imposées.

On distingue deux types de composites : les composites grandes diffusions et les composites grandes performances

#### ➤ Grande diffusion

Ce type de matériaux offre des avantages essentiels prenant par exemple : l'optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes, aussi on peut citer la simplicité du principe d'élaboration du matériau. [9]

### ➤ Haute performance

Les matériaux composites à haute performances présentent des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un cout unitaire important, ce type de matériau est utilisé plus souvent en aéronautique et dans le spatial. [9]

#### I.3.1. Constituants (Renforts et Matrices)

Le composite est constitué de matrice (phase continue) et de renfort (phase discontinue) :

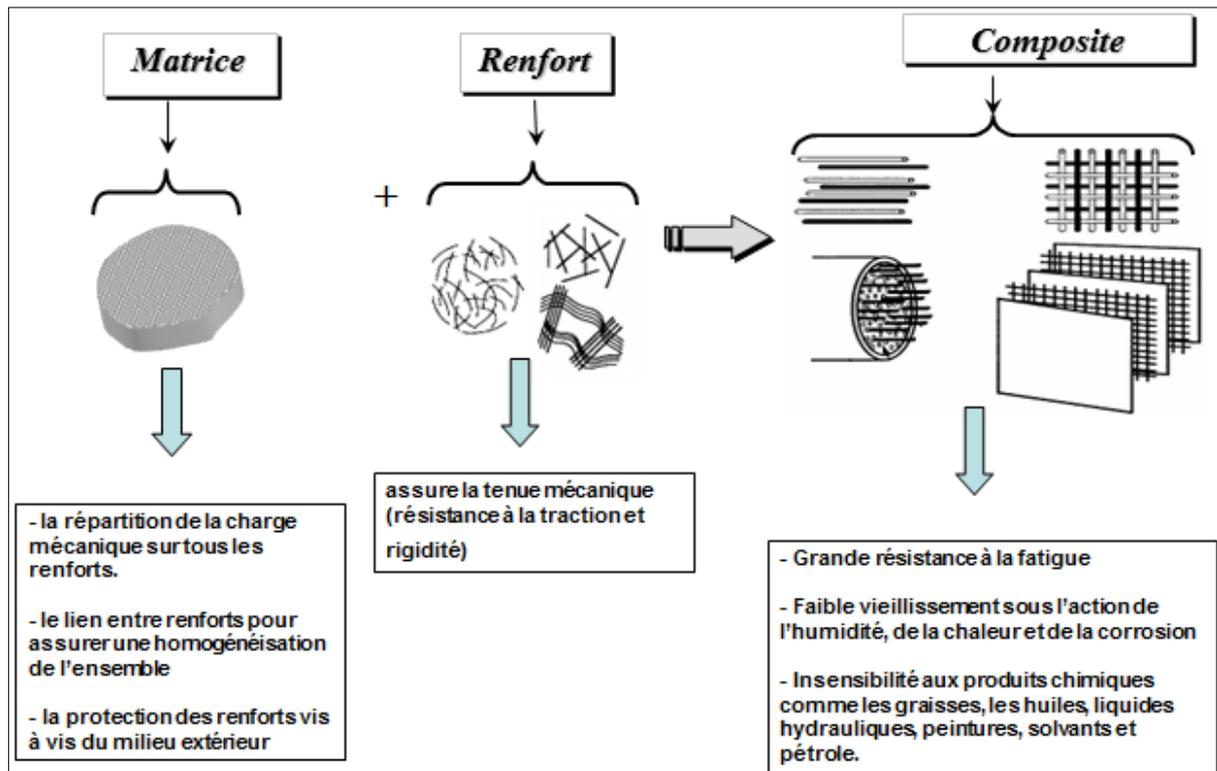


Figure I.7. Différents constituants d'un matériau composite [9]

#### a) Les renforts

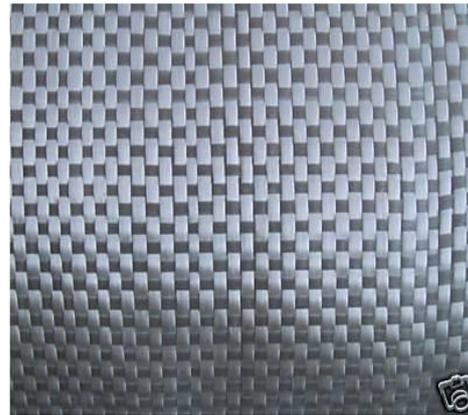
Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites ils se présentent souvent sous forme filamentaire. Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : le carbone, le verre et l'aramide.

Les renforts fibres se présentent sous formes différentes :

- Sous forme de roving : c'est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissu : ce tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.
- Sous forme de mat : c'est un matelas de fils coupés ou continus à ensimage plastique aggloméré par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



**Figure I.8.** Le mat de la fibre ;



**Figure I.9.** La forme roving de la fibre

### ➤ Carbone

Ces fibres sont caractérisées par un haut module d'élasticité (200 à 800 GPA), un allongement ultime de 0,3 à 2,5%, une bonne conductibilité électrique, une résistance à la fatigues et une bonne tenue à l'humidité, par contre ces fibres présentent un mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone et une adhésion difficile avec les résines.

Selon les procédés de fabrication mis en œuvre et aussi selon le taux de carbone que les fibres contiennent on distingue les fibres « à haut module » HM, les fibres « à haute résistance » HR, des fibres « à très haut module » et des fibres intermédiaires. [10]

### ➤ Verre

Ces fibres sont appréciées pour leurs propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation et elles sont moins cher que les fibres de carbone et d'aramide c'est pour cela ce type de fibre est devenu la solution la plus utilisée dans plusieurs application elles ont un module d'élasticité qui varie de 70 à 85 GPA et leur allongement ultime varie de 2 à 5%, mais il faut noter que ces fibre sont sensible à l'humidité qui veut dire elles vieillissent au contact de l'eau.

➤ **Aramide**

Les fibres d'aramide à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de Kevlar, nom commercial de la fibre.

L'utilisation de ce type de fibre est limitée vu que les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées à l'humidité et aussi aux radiations, compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc à l'impact et à l'abrasion, les fibres d'aramides sont utilisées pour la fabrication du blindage et de produit de friction et de joints et aussi elles se caractérisent par des modules d'élasticité qui varient de 20 à 200 GPa et un allongement ultime de 1,5 à 5%.

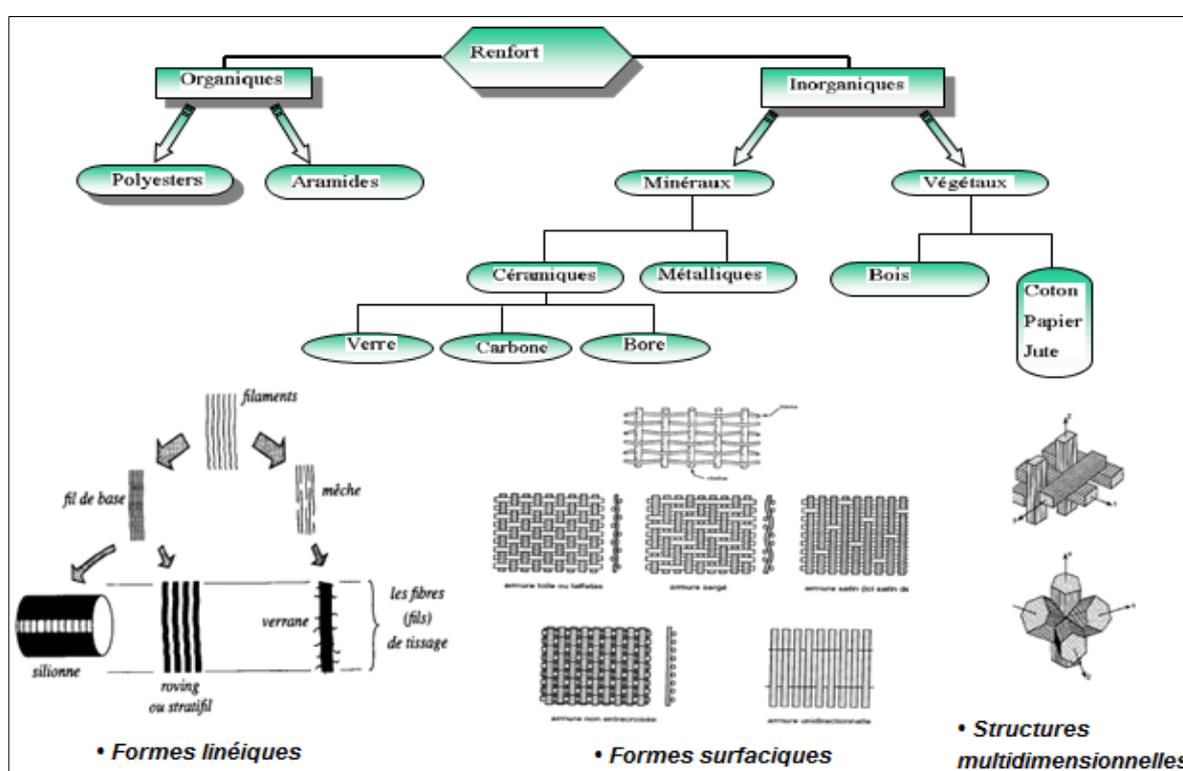


Figure I.10. Organigramme de différentes familles de renfort [11]

**b) Les matrices**

Les matrices sont des matériaux isotropes elles ont pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumiques faibles. [12].

➤ **Matrices thermodurcissables**

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines Thermodurcissables. [13]

➤ **Matrices thermoplastiques**

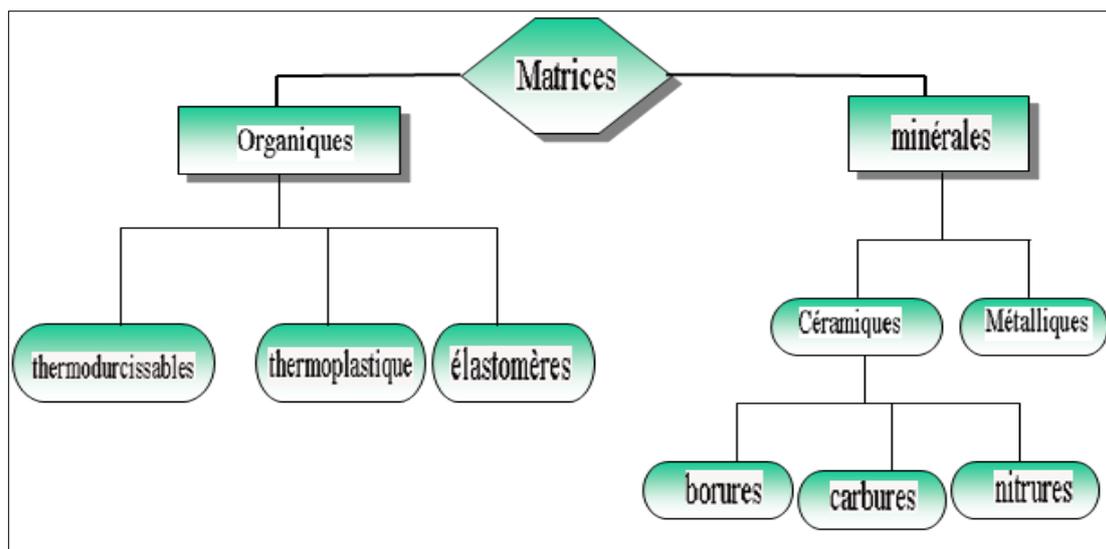
Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. [14]

➤ **Matrices métalliques et céramiques**

Sont utilisées respectivement pour les applications hautes (<500°C) et très hautes températures (>1000°C). Ce type de matrice ne peut être associé qu'à des fibres Sic ou des fibres de carbone. Le cout de fabrication de ces matériaux est très élevé. [15]

➤ **Les Matrices thermostables**

Elles présentent de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à des températures relativement élevées (<300°C) pour des matrices organiques. Elles sont utilisées pour la fabrication de circuits imprimés (matrice bismaleimides) ou pour des pièces aéronautiques.



**Figure I.11.** Organigramme illustrant les différentes familles de matrice [11]

### I.3.2. Comportement mécanique (Caractéristiques)

Les propriétés mécaniques des matériaux composites varient considérablement. Ces propriétés dépendent des fibres contenues dans le composite (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, et du rapport volume-fibre, c'est à dire le ratio du volume des fibres par rapport au volume total du composite. Elles sont aussi affectées par le volume ou la dimension du composite lui-même. [16]

Le tableau suivant résume les propriétés mécaniques de plusieurs **FRP**

**Tableau I.1:** Propriétés mécaniques et physiques typiques des composites «**PRFV**», «**PRFC**» et «**PRFA**» [17]

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg /m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Dans les matériaux composites, les fibres reprennent principalement des efforts dans leur direction. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège. Selon un bulletin de la Fédération Internationale de Béton (**FIB** bulletin 14, 2001[18]), les propriétés mécaniques des matériaux composites sont données par les relations suivantes :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \dots\dots\dots(I.10)$$

$$R_c = R_f V_f + R_m V_m \dots\dots\dots(I.11)$$

Où  $E_c$  est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres,  $E_f$  le module d'Young des fibres,  $E_m$  le module d'Young de la matrice,  $V_f$  la fraction volumique de fibres,  $V_m$  la fraction volumique de la matrice,  $R_c$ ,  $R_f$  et  $R_m$  sont la résistance en traction du matériau composite, des fibres et de la matrice respectivement.

La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice. Le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique). Ils possèdent un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture. Les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique - fragile". [14]

### I.3.3. Utilisation des Composites en GC

L'utilisation des matériaux composites dans les industries de la construction et du génie civil présente de nombreuses opportunités, ils offrent des performances supérieures aux matériaux traditionnellement utilisés tel que l'acier par exemple notamment en terme de rigidité, de résistance à la traction, à la fatigue et à la corrosion.

D'une manière générale, les matériaux composites du type polymère renforcé de fibres «**PRF**» présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé tels que poutre, poteau, dalle ou mur. [19]

**-Les dalles et les poutres** qui sont renforcées en flexion par collage de renforts composites sur la face tendue, et à l'effort tranchant en appliquant le composite sur les faces latérales des éléments.

La procédure de base de renforcement des dalles par **PRF** est de coller des bandes ou des lamelles **PRF** sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées. [20]



Figure I.12. Renforcement des dalles et poutres par des matériaux composites. [21]

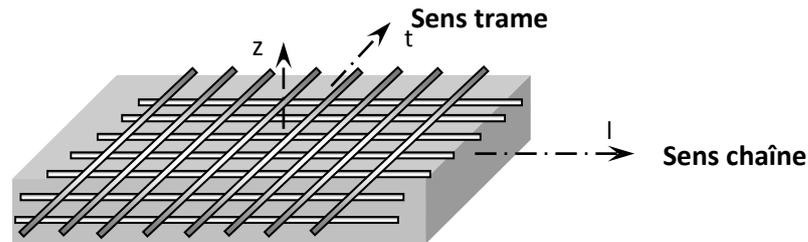
- **Les colonnes** qui sont renforcées par rapport aux efforts axiaux par le collage d'enveloppes de **FRP** sur la circonférence des éléments.



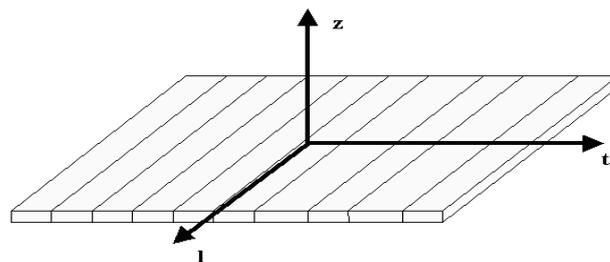
Figure I.13. Exemple de renforcement de colonnes par des matériaux composites [20]

**I.3.4. Modélisation des composites**

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90° : les uns dans le sens des chaînes, les autres dans le sens des trames. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. [9]



**Figure I.14.** Couche de matériau composite orthotrope.



**Figure I.15.** Pli d'un matériau composite orthotrope.

**I.3.4.1 Matrice de rigidité et de souplesse**

La loi de comportement élastique d'un composite orthotrope peut être donnée en fonction des Constantes de rigidité  $C_{ij}$  ou des constantes de souplesse  $S_{ij}$ . La matrice de rigidité s'écrit, après simplification due à la symétrie par rapport à trois plans de symétrie, comme suit:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}$$

Les coefficients de la matrice de souplesse peuvent être obtenus par l'inversion de la matrice de rigidité :  $S = C^{-1}$ .

La loi de Hooke, en utilisant la matrice de rigidité, s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (I.12)$$

En inversant pour avoir la loi de comportement en fonction de la matrice de souplesse, l'équation (I.12) devient :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (I.13)$$

Sachant que  $S_{ij}$  est identique à  $S_{ji}$ , donc le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est caractérisé par neuf coefficients indépendants :

( $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{22}, S_{23}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}$ ). [22]

**I.3.4.2 Modèle en série et en parallèle**

Ce modèle suppose une adhésion parfaite entre la fibre et la matrice et que la loi de Hooke soit vérifié, dans ce modèle l'orientation n'est pas forcément prise en considération. Le modèle série est aussi connu sous le nom de loi des mélanges. Ce modèle est simple et représente la borne supérieure de **Voigt** (1889) [9] en ce qui concerne les modules alors que le modèle de **Reuss** (1929) [9] représente la borne inférieure. Le modèle de **Voigt** fait l'hypothèse de la déformation constante contrairement au modèle de Reuss qui fait l'hypothèse d'une contrainte constante. Ces deux types d'approches sont des approximations qui ne tiennent nullement compte de la morphologie du matériau.

#### **I.4. Conclusion**

La technologie de renforcement ou de réparation par collage externe de Polymère Renforcé de Fibre (**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. Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à présenter et à définir les notions liées au matériau béton et matériaux composites, de présenter leur principaux constituants, les procédés essentiels de leurs mises en forme et de lister leur différents avantages majeurs. Par conséquent, l'objectif assigné dans le deuxième chapitre est de présenter une revue détaillée, sur les techniques de confinement par collage de matériaux composites, ainsi que les modèles proposés dans la littérature scientifique.

# CHAPITRE II

*ETAT DE L'ART SUR LE CONFINEMENT  
DES STRUCTURES*

## **II.1. Introduction**

Afin d'assurer la sécurité et le prolongement de la durée de vie des constructions, l'une des méthodes curatives utilisées est le renforcement des structures en béton. Variées sont ces techniques de renforcement, l'une des premières qui a été utilisée est le collage d'éléments en acier sur les faces exposées aux sollicitations dues aux efforts de chargements [23]. Mais la grande sensibilité de ce matériau à la corrosion, ainsi que son poids élevé a fait que son utilisation présente des inconvénients. De ce fait, les matériaux composites sont alors utilisés comme substitut potentiel à l'acier dans plusieurs domaines du Génie Civil. 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.

A travers ce chapitre, nous allons présenter la nécessité du confinement ainsi que son procédé d'application, suivie d'une revue de la littérature sur les travaux expérimentaux antérieurs portant sur les colonnes confinées avec des matériaux composites. Par la suite, une synthèse détaillée des modèles de confinement a été réalisée tout en listant les paramètres influençant sur le confinement.

## **II.2. Nécessité de confinement**

Les causes conduisant à renforcer les structures sont assez nombreuses, parmi les plus fréquentes on peut citer :

### ➤ **Accroissement des charges qui sollicitent la structure :**

- Changement d'usage de la structure (exemple: bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial).
- Augmentation du niveau d'activité dans la structure (exemple: anciens ponts soumis au trafic actuel).
- Installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

### ➤ **Défauts dans le projet ou dans l'exécution :**

- Armature insuffisante ou mal placée.
- Mauvais matériaux.
- Dimensions insuffisantes des éléments structurels.

### ➤ **Rénovations des structures anciennes :**

- Prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),

- Connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque où une période.
  - Vieillessement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.
- **Changements de la forme de la structure :**
- Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de Calcul.
  - Ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- **Dégâts dans la structure :**
- Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton.
  - Impacts contre la structure.
- **Nécessités d'améliorer les conditions en service :**
- Diminuer les déformations et flèches.
  - Réduire l'intensité des contraintes sur les armatures.
  - Diminuer l'ouverture des fissures.

### **II.2.1 Démarche expérimentale du collage des composites sur le béton**

Il existe deux procédés de fabrication du composite : le système avec une fabrication in-situ et le système préfabriqué.

- **Le système avec une fabrication in-situ**

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces en béton :

-Application de la résine sur la surface du béton suivi de jonction d'un tissu sec qui est appliqué directement sur la résine, finalisé par l'application d'une couche de fermeture.

-Pré-impregnation du tissu, puis son dépôt avant polymérisation sur la surface de béton.

Le procédé de mise en œuvre est présenté sur la **Figure (II.1)**.

- **Le système préfabriqué (plaque préfabriquée) :**

Des lamelles sont préfabriquées et qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant un adhésif. La préparation de la surface du béton est obligatoire, puis la plaque est collée sur le béton.

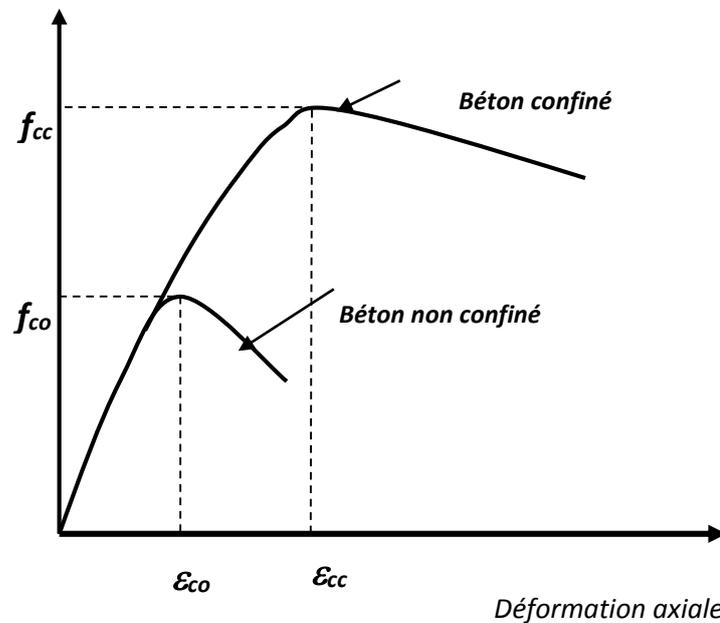


Figure II.1. Procédure de la mise en œuvre des plaques composites [24]

## II.2.2 Comportement du béton confiné

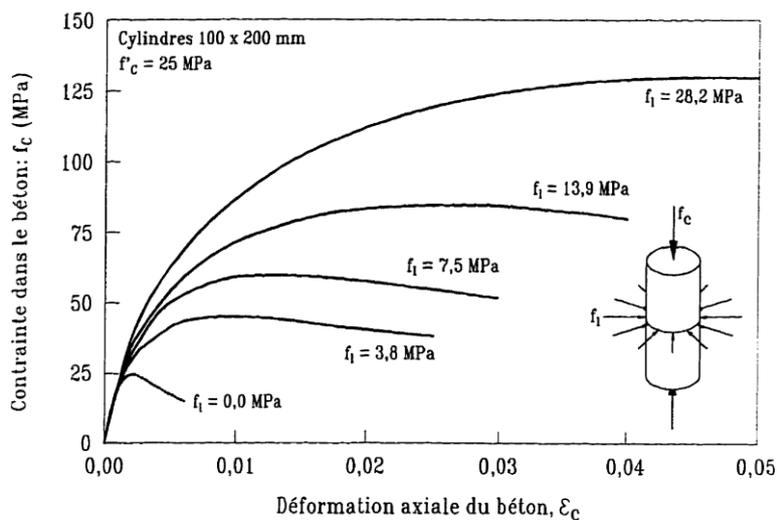
Donc dans le souci essentiel de déterminer un renforcement dans les structures de béton pour augmenter la capacité portante, la déformabilité (ductilité) ou pour améliorer le comportement de l'ouvrage à l'état de service, des recherches expérimentales ne cessent d'être entreprises par des spécialistes dans ce sens. Des différentes techniques de renforcements sont apparues, celle qui fait l'objet de notre étude est la technique de confinement du béton par des matériaux composites.

Le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. Les composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Sous l'action d'une charge de compression axiale, le béton présente une déformation latérale, Cette déformation engendre une fissuration qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement (par collage de composites) de façon à réduire, voir empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité augmentent. **La Figure (II.2)** présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression.



**Figure II.2.** Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné [25]

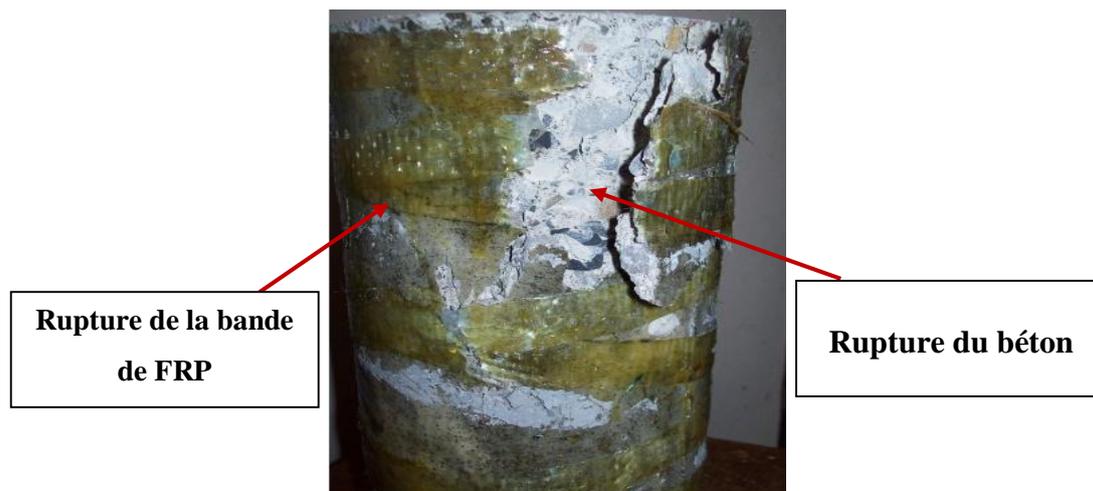
La **Figure (II.3)** montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton. **Richart, Brantzaeg et Brown [26]**, ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.



**Figure II.3.** Effet de la pression de confinement sur le comportement du béton [27]

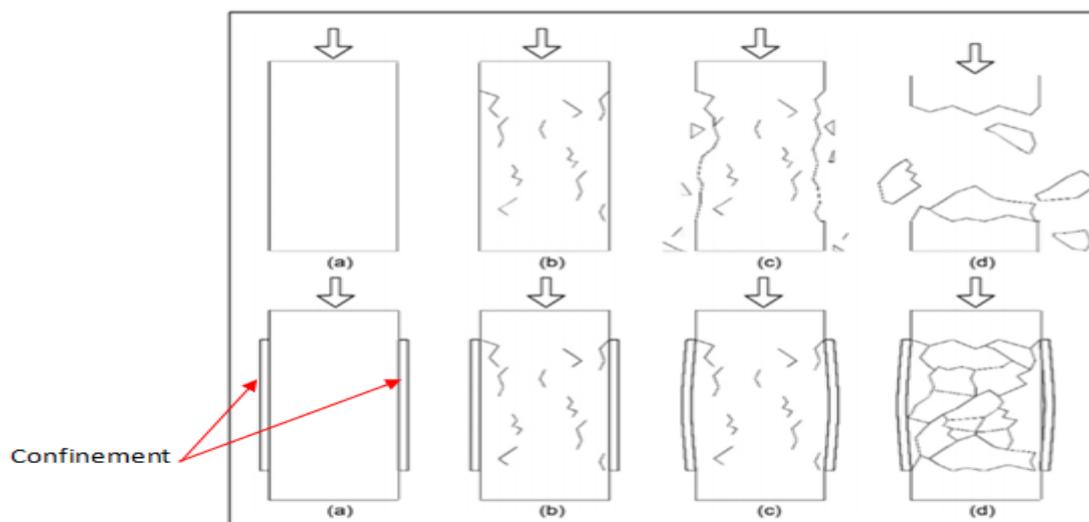
### II.2.3 Mode de rupture du béton confiné

Les structures en béton confinés avec des composites **FRP** présentent un comportement similaire et donc le même mode de rupture, tel que montré sur la **Figure (II.4)** La rupture ainsi produite est brutale à cause de l'énergie emmagasinée par les **FRP** durant le chargement des spécimens. Cette rupture des cylindres confinés a été caractérisée soit par la rupture la matrice béton, ou bien dans le sens longitudinal, des bandes de **FRP**.



**Figure II.4.** Mode de rupture des cylindres confinés avec le **FRP** [28]

Après rupture, le béton fissuré reste retenu à l'intérieur du confinement, 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 (II.5)**.



**Figure II.5.** Evolution des dommages pour des colonnes confinées et non confinées durant le processus de chargement [29]

L'amélioration des résistances des cylindres confinés résulte de la conjugaison des performances mécaniques des matériaux composites. Elle est réalisée grâce au confinement du béton qui se trouve emprisonné à l'intérieur des bandes composites, qui confèrent au cylindre en béton une énergie de rupture très importante.

### II.3. Revue sur les techniques de confinement

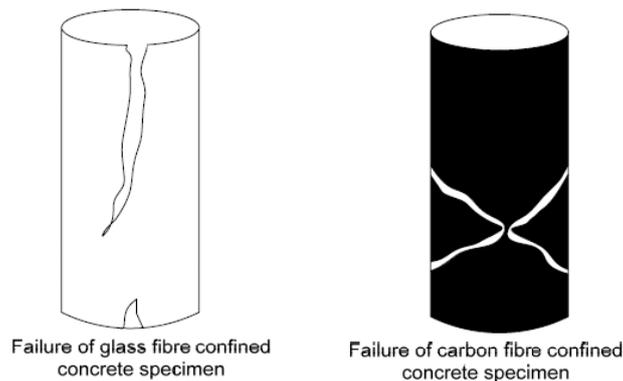
Cette partie présente une revue de littérature des résultats de quelques travaux expérimentaux antérieurs reliés à la réhabilitation et au renforcement de colonnes en béton ou en béton armé, à l'aide d'enveloppes en composite «**PRF**» collées en surface.

Améliorer la capacité et le comportement mécanique en compression des éléments structuraux en béton armé a été toujours le souhait des ingénieurs. L'idée est séduisante et déjà fort ancienne. « Considère » en 1903 [30] réalisa des essais triaxiaux sur des cylindres de mortier de dimensions  $\varnothing 80 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  et démontra que l'application d'une pression de confinement latérale constante sur des cylindres de mortier pouvait augmenter sensiblement leur résistance à la compression. Il proposa alors une relation permettant de prédire la résistance en compression de mortier confiné, relation qui fut plus tard adaptée au béton par **Richart et al.** (1928) [26]. Ces premiers travaux ont inspiré plusieurs autres chercheurs (**Fardis et Khalili** (1982) [31], **Saafi et al.** (1999)[32], **Fam et Rizkalla** (2001) [33], **Youssef et al.** (2007)[34], **F. Bentayeb, K. Ait Tahar et A. Chateaneuf** (2008) [35], **Benzaid et al.** (2010)[17], **Thong et al.** (2013)[36], **Zain Saeed et al.** (2016)[37], voir d'autres on la forme suivante :

**Fardis et Khalili (1982) [31]**, Ils ont réalisé un confinement avec des enveloppes différentes de tissus de matériaux composites à base de fibres de verre sur des cylindres de dimensions  $\varnothing 76 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$  et  $\varnothing 102 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$  qu'ils ont soumis à des essais de compression uni axiale. Ils notent alors, une amélioration de la résistance à la compression et de la ductilité. Ils s'inspirent des formules de **Richart et al.** (1928). pour établir deux modèles qui permettent d'estimer l'augmentation de la résistance à la compression du béton confiné.

**Saafi et autres (1999) [32]**, Ont conduit des études expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de **CFRP** et de **GFRP**. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression du béton. Trente cylindres de béton (18 tubes en **FRP** remplis du béton et 12 cylindres de béton témoin) ont été examinés. Ils ont constaté que les colonnes renforcées par les tissus en fibres de carbone ou en fibres de verre montrent une croissance significative de la résistance et la ductilité

comparées à celles des spécimens non confinés. Le taux d'accroissement dépend de l'épaisseur du tube, des propriétés mécaniques du tube composite et de la résistance du béton témoin. Le mode de rupture des spécimens composites a été généralement marqué par la rupture du tube de fibre avec l'éclatement le long de la mi-hauteur du spécimen **la Figure (II.6)**. Dans le cas des tubes de fibre de carbone, la rupture était plus soudaine et a été accompagnée de la rupture simultanée du tube composite et de l'écrasement du noyau de béton.

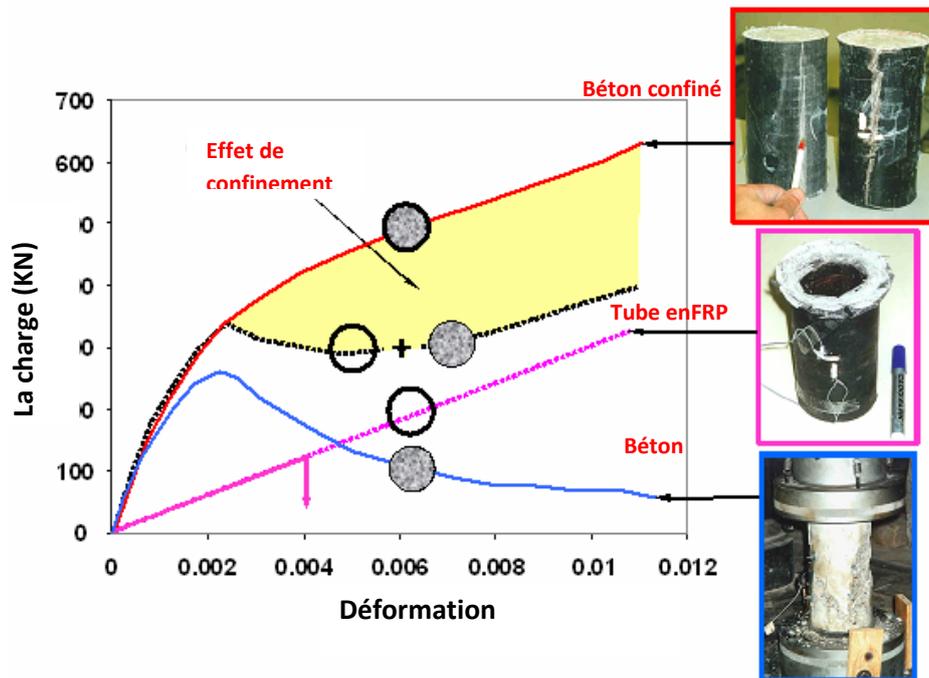


**Figure II.6.** Modes de rupture des spécimens [32]

**Fam et Rizkalla (2001) [33]**, ont examiné 12 cylindres tubulaires hybrides d'un rapport longueur par rapport au diamètre de 2,2 sous la compression axiale. Les essais ont été visés pour étudier les effets de la structure en stratifié, l'effet de la configuration de la section en coupe, effet de l'état de **GFRP** tube/interface béton, effet des tailles de trou et l'effet de l'épaisseur des tubes. La résistance à la compression de béton varie de 37 à 58 MPa.

L'étude a décrit le comportement des tubes de **GFRP** remplis de béton axialement chargés ainsi que l'effets bénéfiques de confinement dans des applications pratiques et des conditions de charge réalistes. Pour évaluer l'effet bénéfique du comportement sur toute la portance des cylindres, le comportement axial mesuré (charge-déformation) a été comparé à celui obtenu par la superposition du comportement axial du tube creux de **GFRP** et du noyau de béton témoin **Figure (II.7)**. L'étude expérimentale a étudié trois aspects :

- Tubes de **GFRP** partiellement remplis avec des trous intérieurs ;
- Tube dans un système de tube;
- Sections composites entières où le tube et le noyau sont collés.



**Figure II.7.** Effet de confinement sur le comportement du béton [33]

**Youssef et al. (2007) [34]** Les auteurs ont réalisé des essais en compression axiale sur des spécimens en béton confiné avec deux matériaux composites différents «PRFC» et «PRFV». Le programme expérimental contenait des spécimens de section rectangulaire et de section carrée (254x 381 mm de section x 762 mm de hauteur et 381 x 381 mm de section x 762 mm de hauteur) et des spécimens de section circulaire ( $\varnothing 406$  x 813 mm et  $\varnothing 152$  x 305 mm).

**F. Bentayeb, K. Ait tahar et A. Chateaneuf (2008) [35]**, ont réalisé une étude expérimentale et numérique d'une nouvelle technique de confinement, en intégrant une grille composite en fibres de verre de maille rectangulaire à l'intérieur de la matrice béton des spécimens cylindriques de dimensions 160 x 320 mm. La grille composite utilisée est faite de mailles avec des tailles alternées dans la direction horizontale de 2 à 3 cm et une épaisseur de 2 mm. Deux paramètres ont été étudiés la classe de béton et les propriétés de la grille. Les paramètres géométriques de la grille sont donnés par la **Figure (II.8)**.

La nouvelle technique proposée pour le confinement des colonnes en béton, apporte un gain en rigidité et résistance, elle présente un avantage certain en évitant l'effondrement brusque sous l'effet de charges accidentelles telles que les séismes. Enfin elle permet d'éviter tout problème d'interface et de détachement du renfort de la structure renforcée.

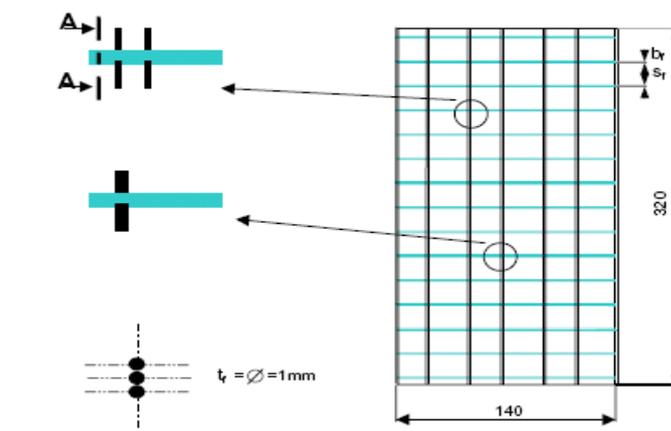


Figure II.8. Dimensions géométriques de la grille composite utilisée [35]

**Benzaid et al. (2010) [17]:** L'étude a porté sur l'effet du confinement par enveloppes en **CFRP**, en considérant différents nombres de plis allant de 1 à 3 plis, sur des cylindres en béton. Les cylindres en béton armés ont été confectionnés en introduisant 4 HA12 comme armatures longitudinales et  $3\phi 8$  mm comme armatures transversales avec un espacement de 140 mm. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité en fonction de l'augmentation du nombre de plis de **CFRP**.

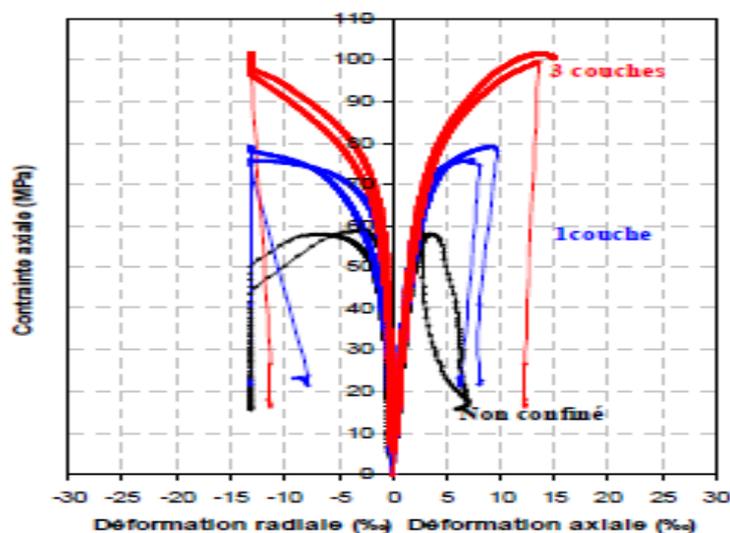


Figure II.9. Courbes contraintes-déformations des cylindres [17]

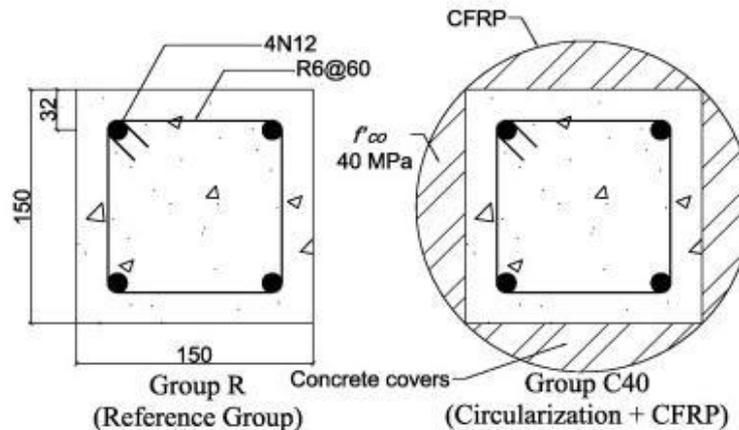
**Thong et al. (2013) [36]:** Ils ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de côté. Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales  $\varnothing 12$ mm et 4 barres transversales lisses  $\varnothing 6$ mm, espacées de 60 mm. Trois valeurs de la résistance caractéristique du béton non confiné sont considérées (40 MPa, 80 MPa et 100 MPa).

Les spécimens sont confinés avec un **CFRP** de 75 mm de largeur présentant une densité de fibres unidirectionnelles de 340 g/m<sup>2</sup>.

La **Figure (II.10)** montre que les colonnes ont été collées à 4 segments circulaires en béton de même résistance caractéristique afin de modifier la forme de la section transversale du carré au cercle, comme indiqué par la **Figure (II.11)**.



**Figure II.10.** Segments circulaires en béton [36]



**Figure II.11.** Changement de section de la colonne [36]

Les colonnes modifiées ont été par la suite enveloppées avec 3 couches de **CFRP**. Une série de spécimens a été soumise à une charge axiale concentrique, tandis que les autres colonnes ont été soumises à une charge excentrée. Les auteurs ont montré que la capacité portante ainsi que la ductilité des différents spécimens testés augmentent significativement. Il a été aussi montré que le **CFRP** avait le même effet de confinement sur les colonnes testées que sur les colonnes circulaires testées.

**Zain Saeed et al. (2016) [37]** : Les auteurs se sont intéressés à l'évaluation de la performance du confinement avec un **CFRP**, à haute résistance, de cylindres en béton présentant de faibles résistances caractéristiques à la compression. Les paramètres considérés dans cette recherche, sont la faible résistance caractéristique du béton non confiné (12,41 MPa et 16,55 MPa) et l'épaisseur de l'enveloppe de **CFRP** (1 et 2 plis). La **figure II.12** montre le mode de rupture des spécimens confinés.



**Figure II.12.** Modes de rupture des colonnes confinées avec **CFRP** [37]

Les résultats obtenus montrent que le confinement avec **CFRP** peut améliorer d'une façon appréciable la résistance et la déformation ultime même de cylindres en béton à faible résistance caractéristique. Il a été constaté que les gains en résistance atteignent 70,9% et 121,81% (pour 1 et 2 plis). Ainsi, les structures en béton qui présentent des déficiences sismiques, peuvent retrouver leurs états d'origine et même survivre à d'autres séismes grâce à l'amélioration de la résistance et de la ductilité obtenue après leur réparation avec des **FRP**.

En conclusion, les travaux cités ci-dessus montrent que, le confinement des éléments en béton ou en béton armé par une enveloppe de **FRP**, augmente leurs résistances ainsi que leurs déformabilité. Ces augmentations sont proportionnelles aux taux de confinement.

#### **II.4. Synthèse des modèles de confinement**

En plus de l'enveloppe composite, on peut trouver dans la littérature spécialisée beaucoup de nouvelles techniques de renforcement et de confinement qui donnent naissance à des modèles théoriques de type résistance ou de type contrainte-déformation.

De nombreuses études ont permis la prédiction de la résistance du béton confiné en se basant sur la formule de **Richart et al [38]** proposée pour des cylindres en béton soumis à une pression hydrostatique, donné par la **relation (II.1)**.

$$f'_{cc} = f'_{c0} + Kf_l \dots\dots\dots (II.1)$$

- $k$  : coefficient en fonction de l'efficacité du confinement, il est ajusté selon les caractéristiques du béton confiné avec **FRP**, dans le but de minimiser la différence entre les valeurs des résistances théorique et expérimentale.
- $f'_{cc}$  et  $f'_{c0}$ : contraintes à la compression du béton confiné et du béton non confiné respectivement.
- $f_l$ : pression latérale de confinement.

Un résumé de certains modèles de résistance et de déformation du béton confiné à base de fibre de verre ou carbone (**GFRP&CFRP** est présenté sur la **Table (II.1)**

**Tableau II.1** : Synthèse des modèles du béton confiné

Auteurs	Résistance du béton	Déformation correspondante
Fardis and Khalili (1982) [31]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = [1 + 4.1(\frac{2f_f t_f}{D \cdot f'_{c0}})]$	$\varepsilon_c = \varepsilon_{c0} + 0.001(\frac{E_f t_f}{D \cdot f'_{c0}})$
Saafi and al (1999) [32]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = [1 + 2.2(\frac{f_l}{f'_{c0}})^{0.84}]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}[1 + (537\varepsilon_f + 2.6)(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1)]$
Youssef et al. (2007) [34]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = [1 + 2.25(\frac{f_l}{f'_{c0}})^{\frac{5}{4}}]$	$\varepsilon_{cc} = 0.003368 + 0.2590(\frac{f'_l}{f'_{c0}})(\frac{f_f}{E_f})$
F. Bentayeb, et al (2008) [35]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = [0.75 + 2.5(\frac{\varphi_1 \varphi_2}{f'_{c0}} f_f)]$	$\varepsilon_c = \varepsilon_0 [1.3 + 6.3(\frac{\varphi_1 \varphi_2 f_l}{f_0})]$
Benzaid et al. (2010) [17]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = [1 + 1.6(\frac{f_l}{f'_{c0}})]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} [(2 + 5.48)(\frac{f'_l}{f'_{c0}})]$

Unité en **MPa**.  $\varphi_1 \varphi_2, t_f$  et  $D$  les paramètres géométriques des modèles en (**mm**).

## II.5. Paramètres influençant sur le confinement par des FRP

Plusieurs recherches ont été effectuées afin de déterminer les différents paramètres influençant sur le confinement tel que les paramètres géométriques à savoir : l'espacement, épaisseur et largeur des bandes en **FRP** ; le diamètre, la section et l'enlacement des cylindres les paramètres mécaniques : résistance du béton, module et résistance à la traction des **FRP**

**Benzaid et al [17]** ont réalisés une étude complète du comportement axial et radial résultant de l'effet du confinement total procuré par une enveloppe en matériau composite à base de fibres de carbone «**PRFC**» en fonction de la quantité de confinement (nombre de plis de l'enveloppe), du rapport de renforcement qui est le rapport de la surface des fibres sur la surface du béton, de la résistance en compression du béton, ainsi que la forme de la section, l'élancement géométrique et le degré d'endommagement des colonnes en béton armé.

- Effet du nombre de couches «**PRF**»
- Effet de la résistance du béton non confiné
- Effet de la géométrie de la section confinée
- Effet du diamètre des cylindres
- Effet de l'élancement géométrique
- Effet de l'endommagement initial du béton





Figure II.13. Effet de la géométrie des colonnes confinées avec CFRP [17]



Figure II.14. Effet de l'élancement sur les colonnes confinées avec CFRP [17]

Les auteurs ont constatés que :

1. Les spécimens endommagés puis renforcés avec 3 couches de **PRFC** se comportaient d'une manière tout à fait comparable que des spécimens similaires non endommagés initialement. Comparé aux spécimens de références (non confinés-non endommagés), le confinement avec des « **PRFC** » est très efficaces pour tous les spécimens quel que soit leurs degré d'endommagement initial ;
2. Pour la même série de béton, la variation de l'élancement n'affecte pas l'efficacité du confinement que ce soit pour les spécimens de sections circulaires ou de sections carrées ;
3. Pour chaque taux de confinement, élancement géométrique  $L/D$  et rapport de section transversale, des gains en termes de résistance à la compression et en déformations des spécimens confinés avec des matériaux composites « **PRF** » sont enregistrés ;
4. Les spécimens de sections circulaires en comparaison avec ceux de sections carrées : l'augmentation de la rigidité du confinement entraîne à la fois une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité des spécimens confinés avec des matériaux composites «**PRF**» par rapport aux spécimens non confinés.

**Ali Ahmed [28]** a proposée une étude qui consiste en le collage de 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.

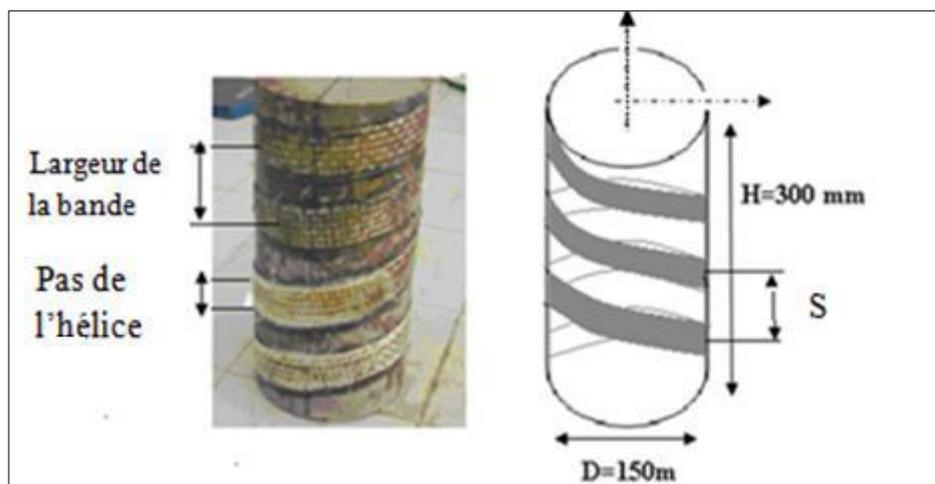


Figure II.15. Confinement partiel hélicoïdal avec CFRP [28]

- **Effet de la largeur de la bande de GFRP**

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 3 spires et des largeurs de 4cm, 3cm et 2cm respectivement.



**Figure II.16.** Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal [28]

- **Effet du pas de l'hélice**

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.

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différentes causes qui nous ont conduit à utiliser des renforts afin de réhabiliter des structures en Génie civil par confinement avec des matériaux composites ainsi que leurs mode d'application, il nous a permis de connaitre le comportement du béton confiné ainsi que son mode de rupture. A travers, la revue de littérature effectuée sur les modèles de confinement qui s'accordent sur l'augmentation de la pression du confinement

entraîne à la fois une augmentation de la résistance et de la ductilité des spécimens confinés, nous avons pu lister les différents paramètres influençant sur le confinement.

Ceci nous a conduits à orienter notre travail vers une optimisation des paramètres des bandes composites dans le confinement partiel à travers une simulation numérique à base des éléments finis. On se propose de déterminer les paramètres les plus adéquats permettant à la fois d'améliorer les performances mécaniques des cylindres confinés.

# CHAPITRE III

*SIMULATION ET PARAMETRES  
D'ETUDE*

### **III.1. Introduction**

La simulation et l'analyse numérique sont devenues quasi nécessaires dans le domaine de la recherche, elles couvrent des places importantes dans les différents secteurs publics (constructeur automobile, aéronautique, spatial, génie civil ....) Vu qu'elles ont un impact direct sur la qualité et le temps, elles sont apparues dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés.

La difficulté de la simulation numérique c'est de créer un modèle se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, condition aux limites), l'étude ne sera validée qu'à partir d'essais mécaniques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation. On dispose actuellement d'une large gamme de logiciels qui constituent des alliés précieux pour le calcul et la conception optimale des structures dans le respect des réglementations techniques et normes de la construction, parmi ces logiciels basés sur la méthode des éléments finis le code de calcul ABAQUS [40].

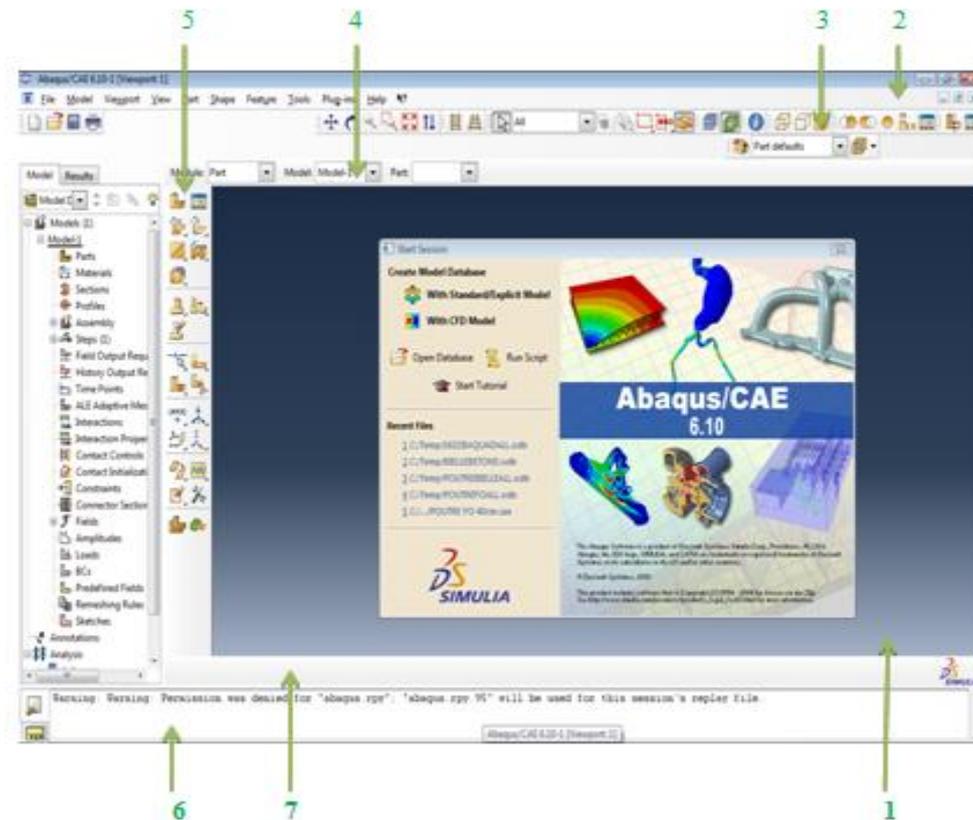
Dans ce chapitre, nous allons présenter d'une part le logiciel ABAQUS et son fonctionnement, et d'autre part on présentera les différentes étapes menées pour la modélisation des cylindres confinés chargés en compression jusqu'à la rupture. En s'inspirant des travaux de recherche antérieurs [31-37], le 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. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement des cylindres confinés sont également présentées.

### **III.2. Présentation du logiciel**

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Il a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) [39]. 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 ». [40]

Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Pour la résolution des analyses, il existe deux modules à savoir : ABAQUS/Standard et

ABAQUS/Explicit. Le premier 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. Le second utilise 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 III.1.** Présentation de l'interface ABAQUS

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, etc.).
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.
7. Enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

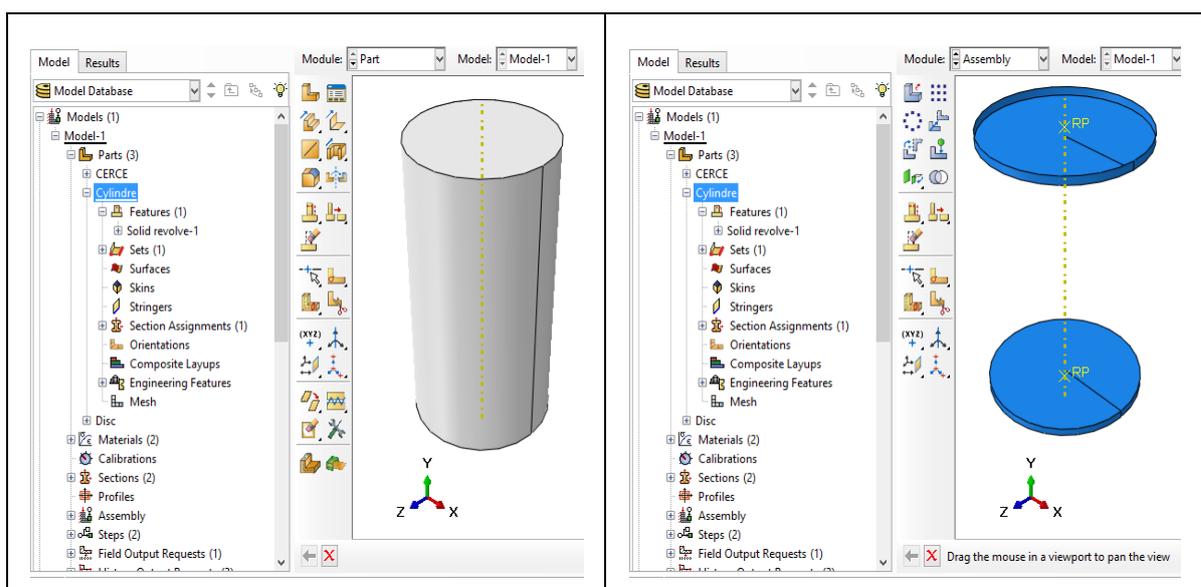
### III.3. Démarches et étapes de simulation

La modélisation complète d'une structure ou d'un élément de structure s'effectue après un passage successif sur les neuf modules de ABAQUS à savoir : les modules **part**, **sketch**, **property**, **assembly**, **step**, **interaction**, **load**, **mesh**, **job** et **visualisation**).

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

#### III.3.1. Dimension et géométrie

Un cylindre plein déformable a été modélisé selon la norme **NFP18-406 [42]** avec un diamètre de 16cm et une hauteur de 32cm. De même, une cerce de largeur variable entre « 2 à 4 cm » et deux disques rigides d'un diamètre de 20cm ont été modélisés. Le cylindre plein et les cerces générés sont par la suite assignés par leurs matériaux correspondant à savoir : le béton et les matériaux composites (**FRP**), les deux éléments ont été assemblés supposant une liaison parfaite pour tous les éléments modélisés.



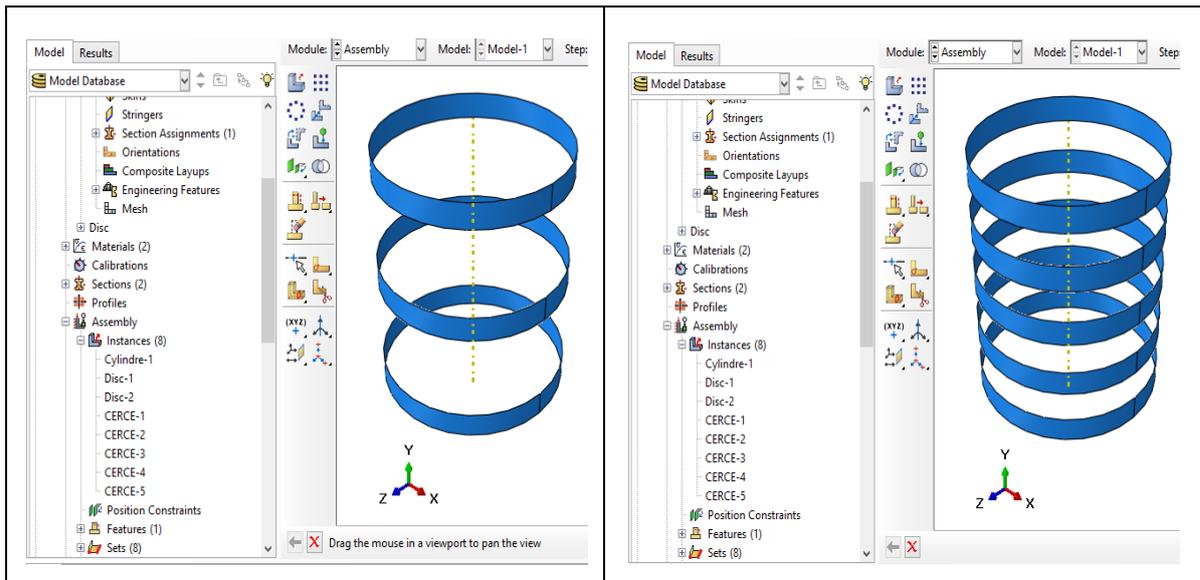


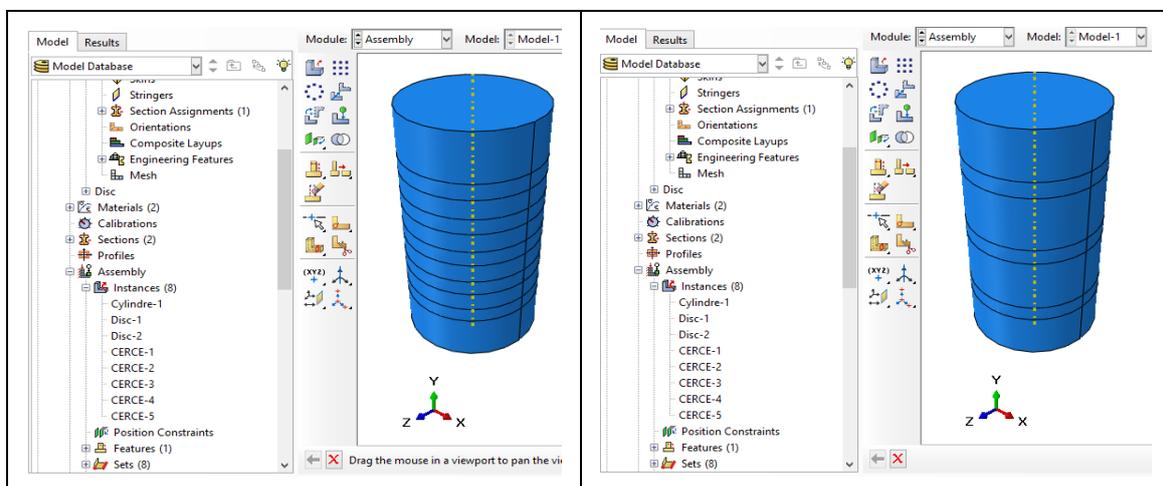
Figure III.2. Modélisation des géométries des éléments

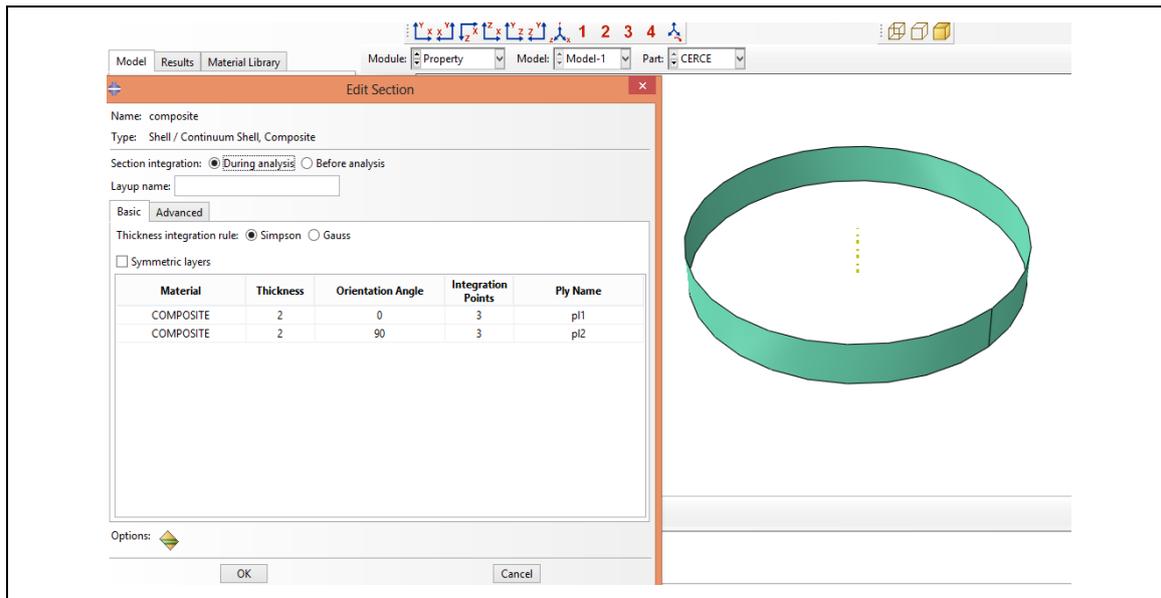
### III.3.2. Sections et assemblage

Les caractéristiques géométriques des cylindres modélisés sont illustrées sur la **Figure (III.3)**. Toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés mécaniques des différents matériaux constitutifs sont soigneusement et séparément introduites pour chaque élément, (béton, composite) afin de prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément finis proposé.

La géométrie des différents éléments que l'on souhaite simuler se définit toujours selon la démarche suivante :

- Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue.
- Le développer en 3D.
- Rajouter les détails manquants (chanfreins...).





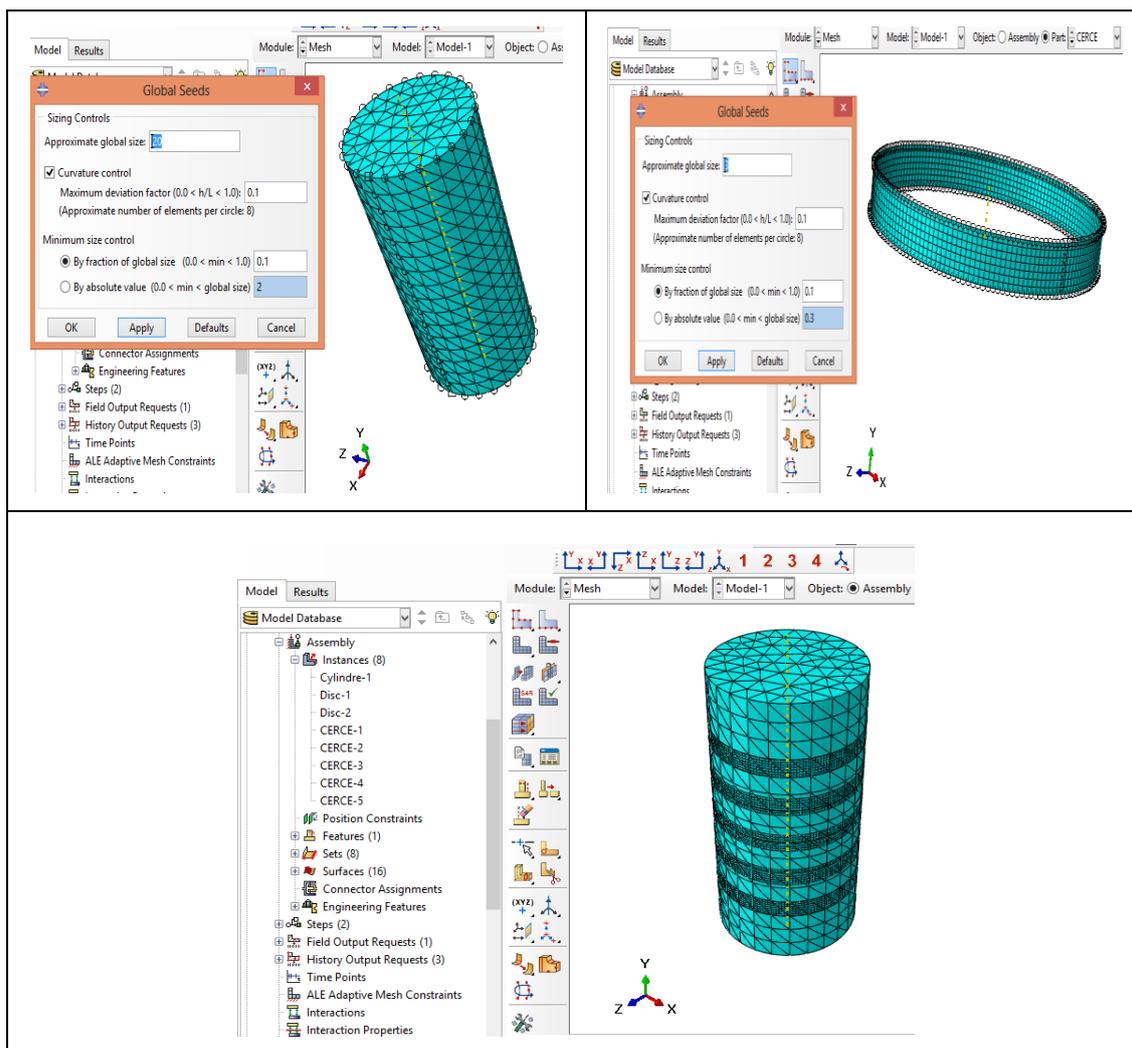
**Figure III.3.** L'assemblage des éléments (cylindre-bande FRP)

**Assemblage du cylindre et des cerces :** dans cette partie le choix des variantes d'étude s'impose, à cet effet des assemblages ont été réalisés dans le sens d'avoir un model optimal de béton confiné par des bandes en **FRP**.

### III.3.3. Maillage et MEF

L'étape principale, pour aboutir à des résultats numériques cohérents, consiste à adopter un maillage raffiné seulement dans les zones susceptibles de développer des phénomènes significatifs, le reste de la structure est alors maillée plus grossièrement. Les résultats numériques sont influencés par l'utilisation d'éléments de même taille. De plus, la densité de notre maillage doit être optimale, afin de réduire autant que possible, la taille du problème et le temps d'exécution

Le cylindre confiné, représenté par la **Figure (III.4)**, est maillé avec des éléments à 3 dimensions qui sont des éléments tétraédriques de 20 mm de côté, présentant huit nœuds ayant chacun 3 degrés de liberté. Tandis que les bandes en **FRP** sont maillées avec des éléments surfaciques quadrilatéraux de 3 mm de côté, présentant quatre nœuds ayant 8 degrés de liberté.



**Figure III.4.** Maillages adoptés lors des simulations numériques des éléments

Une étude de sensibilité du maillage est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. A cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation d'un cylindre soumis à un chargement axial jusqu'à la rupture, l'étude est réalisée avec des éléments finis tétraédriques de dimensions variées à savoir : 30 mm, 25 mm et 20 mm.

La **Figure (III.5)** montre les contraintes des cylindres en compression obtenu à travers l'évolution du chargement extérieur appliqué en (MPa) en fonction de la déformation jusqu'à la rupture pour les variantes de dimensions des éléments finis considérées. On constate que les variantes considérées convergent pratiquement vers la même réponse, qui commence à se stabiliser pour une dimension d'élément fini de 20mm, ce qui explique le choix du maillage adopté.

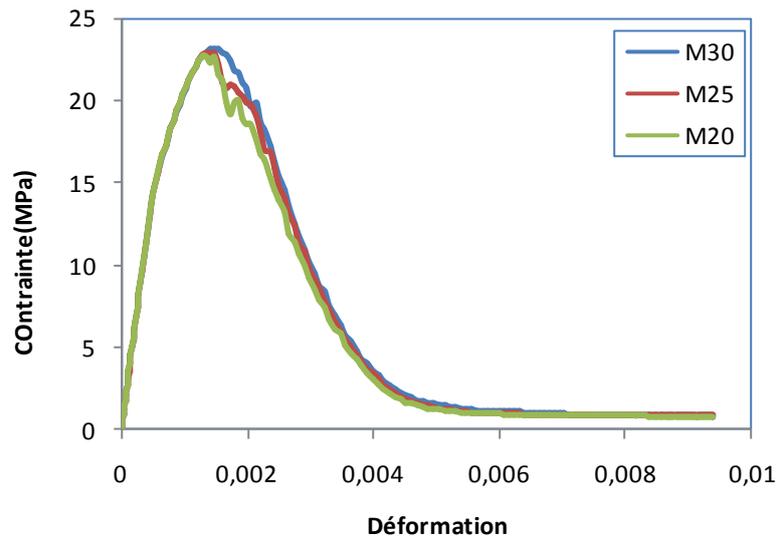


Figure III.5. Courbes contrainte-déformation pour les 3 configurations de maillage

### III.3.4. Gestion du contact Béton- composite

L'objectif du choix du contact est d'identifier les situations et les types de contact pour que les lois physiques correctes puissent être appliquées afin de mieux se rapprocher de la réponse exacte des éléments étudiés. Un contact se fait généralement entre un corps rigide et la pièce déformable et s'effectue entre deux surfaces qui appartiennent en général à deux corps différents. La procédure de spécification des interactions est la suivante : Créer les surfaces ; Définir les types de contacts et finalement associer des surfaces avec des types de contact la Figure (III.6), tout en considérant un contact parfait entre tous les éléments.

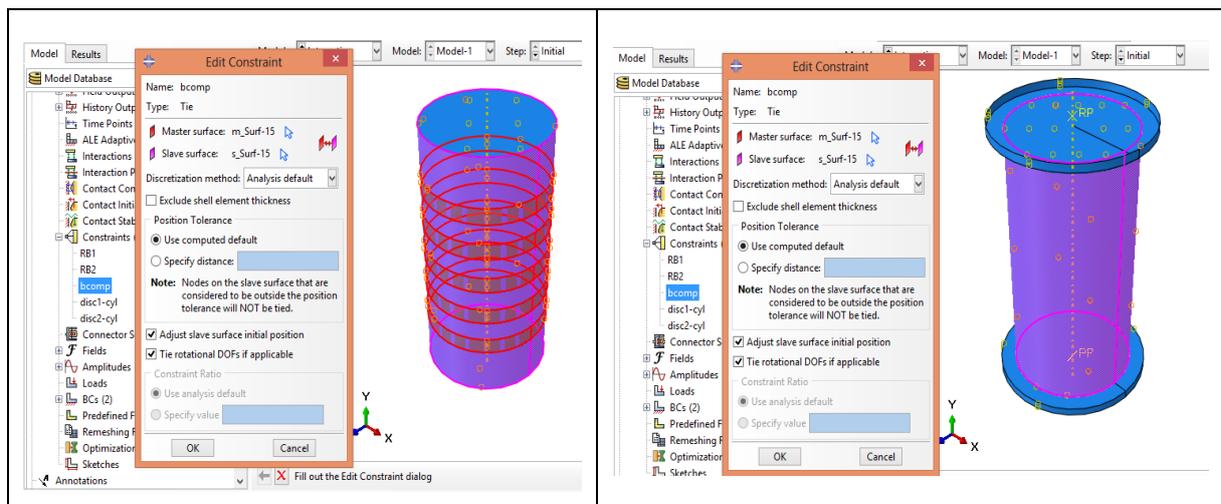


Figure III.6. Modélisation du contact : Béton-Composite et Béton-Disc

### III.3.5. Chargement et conditions aux limites

Les chargements et les conditions aux limites sont dépendants du **STEP** choisit. Dans notre modèle étudié l'axe z du système des coordonnées coïncide avec l'axe du cylindre. Par conséquent, les conditions aux limites considérées sont :

- Une extrémité du cylindre qui correspond à une position  $Y = 0$ , a été encastree. Tous les degrés de liberté sur cette surface ont été bloqués.
- Une charge axiale de compression monotone jusqu'à la rupture a été appliquée sur l'autre surface qui correspond à une position  $Y = 32$  cm.

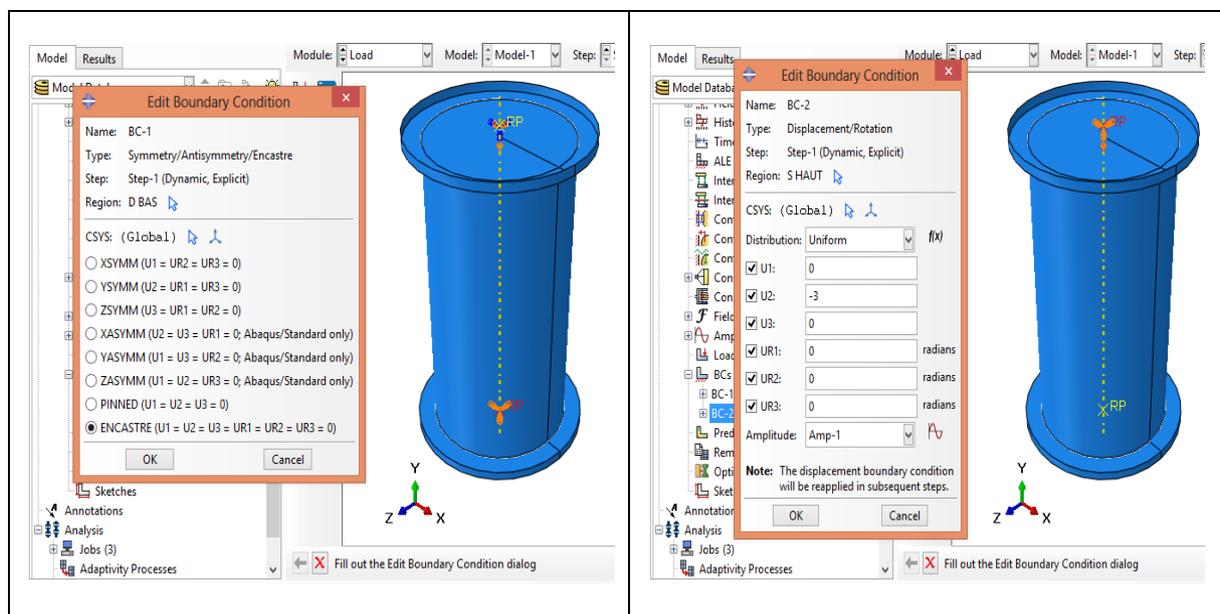


Figure III.7. Conditions aux limites du module chargement.

### III.3.6. Gestion des résultats : STEP et JOB

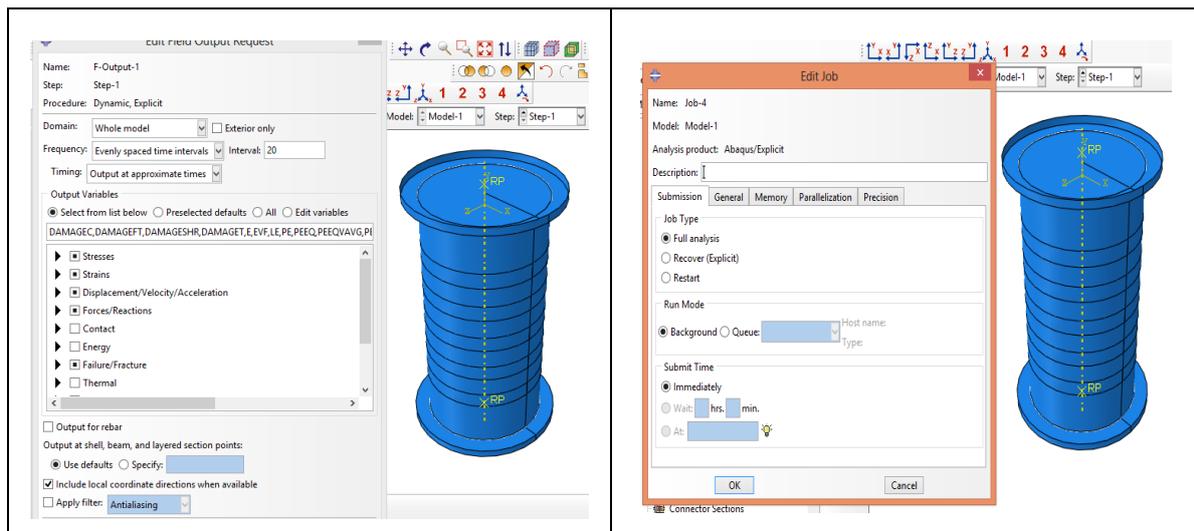
Le module **STEP** permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un **STEP** pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées ; et un **STEP** pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées.

C'est à cette étape qu'on 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. C'est également dans le module **STEP** qu'on précise les sorties désirées. Il y a 2 types de sorties : des sorties de type *champ*

(Field output requests) qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique (history output requests) qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

Le lancement du calcul est classique. Après avoir créé toutes les tâches de définition du modèle, on utilise le module **JOB** pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.



**Figure III.8.** Le module STEP et JOB

### III.4. Modélisation du comportement des matériaux

Pour trouver la réponse globale d'une structure considérée sous sollicitations extérieures, l'utilisation d'un modèle numérique prédictif s'avère être nécessaire. Dans ce contexte, des modèles éléments finis disponibles dans la littérature pour le béton et les matériaux composites sont utilisés séparément sous sollicitations particulières.

#### III.4.1. Modèle non linéaire pour béton

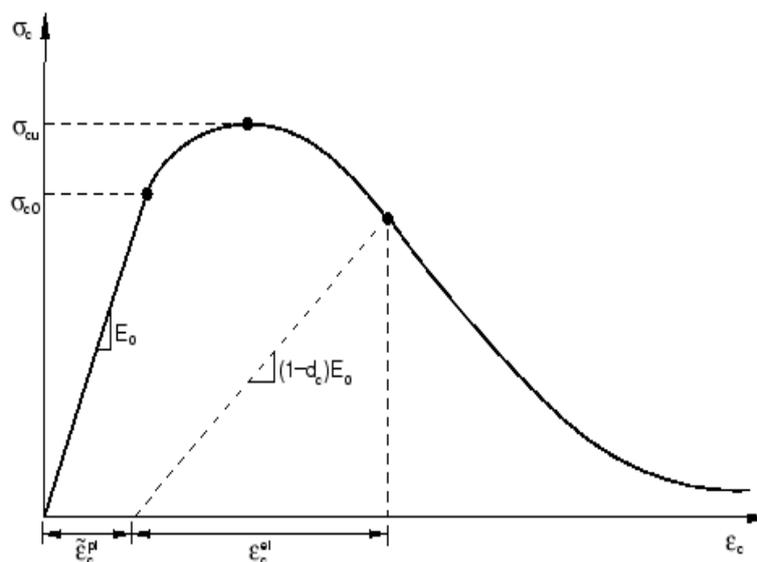
La modélisation du béton est bien moins évidente et son comportement mécanique est très difficile à décrire par les logiciels utilisant la méthode des éléments finis. En effet, le développement de microfissures très rapidement obtenu en traction, génère d'énormes difficultés de convergence de ces logiciels. Le comportement du béton est très fortement hétérogène et la mécanique des milieux continus est un outil relativement mal adapté dans ce cas de figure. Afin de modéliser la réponse ultime des cylindres confinés, notre étude ne pourrait être complète sans une analyse du comportement plastique du béton.

### III.4.1.1. Le modèle Concrete Damaged Plasticity

Le modèle « *Damaged plasticity for concrete and other quasi-brittle materials* » fournit une capacité générale pour la modélisation du béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope endommagé en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique du béton. Le modèle considère deux critères de rupture : La fissuration en traction et le broyage en compression. Ce modèle se réfère à un équivalent de déformations plastiques en traction, et en compression.

#### ➤ Comportement en compression

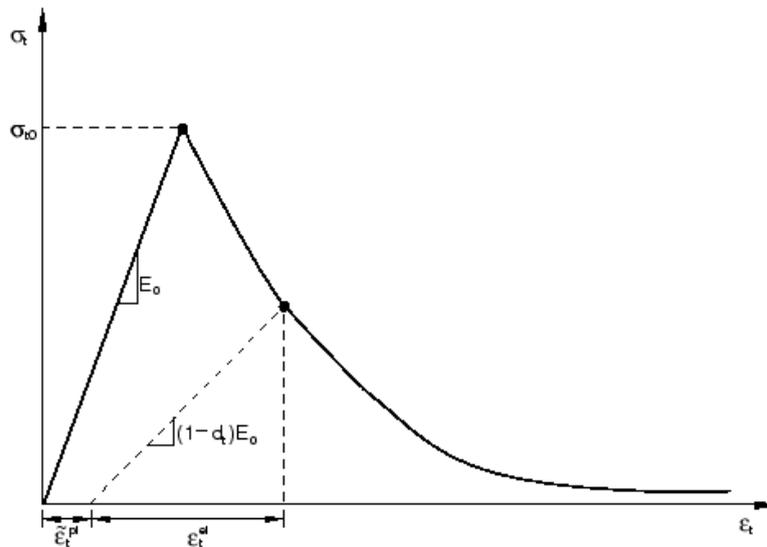
Le béton possède un comportement ductile sous un chargement de compression uni-axiale, la courbe contrainte-déformation **Figure (III.9)** est définie par deux phases : élastique et plastique. Dans la première phase, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique, la deuxième phase est généralement caractérisée par un écrouissage suivi d'adoucissement au-delà de la contrainte de rupture. Le béton contient des microfissures qui commencent à se développer et se propager jusqu'à l'atteinte de la fissuration globale du béton (rupture).



**Figure III.9.** Comportement du béton soumis à une compression uni axiale [41]

➤ Comportement en traction

Le comportement général du béton soumis à une traction uni-axiale est quasi-fragile, sa représentation est donnée sur la **Figure (III.10)**. Cette courbe est linéaire élastique jusqu'à l'atteinte de la valeur de la contrainte ultime. Au-delà de cette contrainte, la direction de propagation des fissures est perpendiculaire à la direction de la contrainte appliquée.



**Figure III.10.** Comportement du béton soumis à une traction uniaxiale [41]

Comme le montre ces figures, lorsque l'échantillon de béton est déchargé de tout point de l'adoucissement, la rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. La dégradation de la rigidité est caractérisée par deux variables d'endommagement qui sont en fonction des déformations plastiques, la température et variables prédéfinies :

$$d_t = d_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \theta, f_i), \quad (0 \leq d_t \leq 1)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), \quad (0 \leq d_c \leq 1) \dots \dots \dots (III. 1)$$

Les variables d'endommagement peuvent prendre des valeurs de 0 ce qui représente un matériau sain (rigidité initiale) et 1 ce qui représente l'endommagement totale du matériau (une perte totale de rigidité). Pour décrire le caractère irréversible des déformations  $\mathcal{E}^P$ , la théorie de la plasticité est utilisée. La partition de la déformation totale est effectuée en une partie élastique et une partie plastique.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{pl} \dots \dots \dots (III. 2)$$

Dans le cadre d'une théorie de petite déformation, le tenseur de déformation  $\varepsilon_{ij}$  est obtenu à partir du premier gradient du champ de déplacement  $u = (u_x, u_y, u_z)$  tel que :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{III.3}$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1-d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \tag{III.4}$$

Avec  $D_0^{el}$  est la matrice de raideur élastique, et  $D^{el} = (1-d)D_0^{el}$  représente la matrice de raideur après endommagement,  $\sigma$  est le tenseur de contrainte effective. L'utilisation du principe de la contrainte effective conduit à une relation liant la contrainte réelle à la contrainte effective. Avec  $E_c$  et  $\sigma_c$  sont le module de Young instantané et la contrainte maximale en compression

**Tableau III.1** : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.

Noms	Equations
Contraintes effectives en Traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$
Contrainte post élastique : Partie écrouis en compression	$\sigma_{c(2)} = \frac{E_c \frac{\varepsilon_c}{f_c} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2}{1 + (E_c \frac{\varepsilon_{c1}}{f_c} - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} f_c$
Contrainte post élastique : Partie adoucissante en compression	$\sigma_{c(3)} = \left( \frac{2 + \gamma_c f_c \varepsilon_{c1}}{2 f_c} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\gamma_c \varepsilon_c^2}{2 \varepsilon_{c1}} \right)^{-1}$
Contrainte post élastique en traction	$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = \left[ 1 + (c_1 w / w_c)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2}$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

### III.4.1.2. Couplage plasticité-endommagement

Le modèle béton « Concrete Damaged Plasticity » intégré dans le code ABAQUS [40] permet de gérer les problèmes de plasticité couplés à l'endommagement du béton qui est un matériau qui appartient à la famille des matériaux quasi-fragile.

Pour des charges relativement faibles, le béton reste dans le domaine élastique, c'est-à-dire que les déformations sont les résultats des mouvements quasi réversibles d'atomes. Pour des sollicitations plus importantes, la rupture a lieu rapidement d'où le caractère fragile de ce matériau. C'est le phénomène de la décohérence pâte-grains qui donne alors lieu à des déformations permanentes et de ruptures. Des glissements apparaissent dans les cristaux des grains, contribuant eux aussi à la déformation permanente qui se produit à volume constant [2]. Le comportement fragile du béton disparaît lorsque la pression de confinement est suffisamment importante pour empêcher la propagation des fissures. La rupture dépend alors de la consolidation et de l'affaiblissement de la structure microporeuse [43].

### III.4.1.3. Identification des paramètres du modèle

Les paramètres principaux à définir soigneusement sont : la loi 'contrainte-déformation (puisque cette dernière permet de calculer les valeurs d'écroutissage) qui ne doit pas poser de problème d'intégration numérique et l'utilisation des énergies de fissuration, qui offrent à l'algorithme du modèle une bonne capacité de convergence [44]. Les paramètres du modèle pour les différentes substitutions considérées sont représentés dans le **Tableau (III.2)**

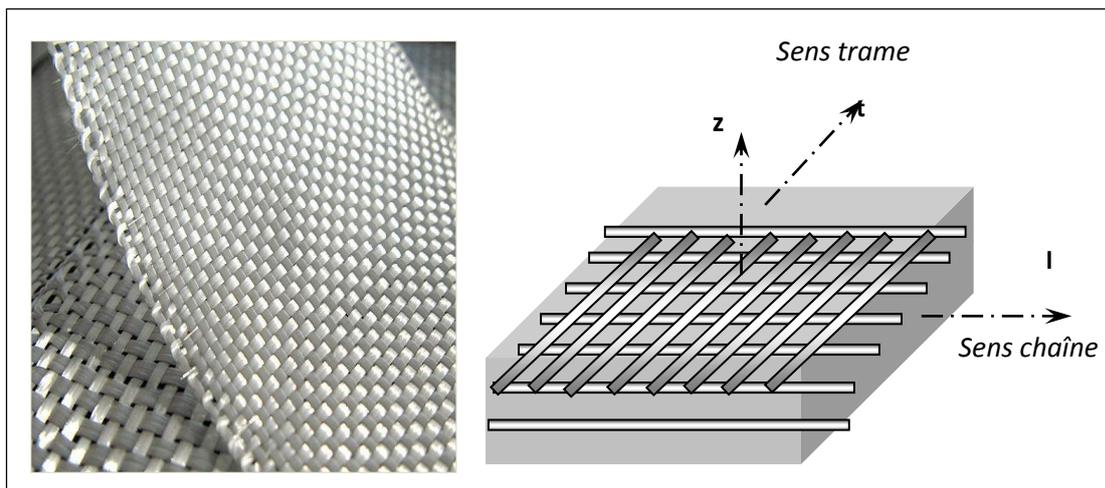
**Tableau III.2 :** Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton.

Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
$f_c$ (MPa)	25	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.3f_c$ (MPa)	7.5	Contrainte élastique en compression
$\varepsilon_{c1}$ (‰)	2,2	Déformation au pic en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06f_c$ (MPa)	2.1	Contrainte maximale en traction
$\varepsilon_{tm}$ (‰)	1,2	Déformation correspondante à $f_{t0}$
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (MPa)	32164.19	Module de Young instantané
$w_c$ (µm)	180	L'ouverture maximale des fissures

$\nu$	0.19	Coefficient de poisson
$\psi$	32°	Angle de dilatation
$a_f$	1.16	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale
$a_e$	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

### III.4.2. Modèle élastique orthotrope pour les FRP

La présente section permet de présenter le comportement élastique des matériaux orthotropes utilisés dans notre étude. Les matériaux composites ont un comportement particulier, ceci est dû essentiellement à deux facteurs : le premier résulte de son comportement anisotrope dans les couches élémentaires et le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches. .



**Figure III.11.** Pli d'un matériau composite orthotrope [14]

Les composites orthotropes, à l'image des tissus **FRP** de la **Figure (III.11)** sont des composites dont le renfort est généralement constitué de fils unidirectionnels croisés à 90°. Les symétries orthogonales, deux à deux des plans font que ces matériaux se comportent, du point de vue élastique, comme les matériaux orthotropes. D'une manière générale, l'architecture classique du tissu **FRP** à fibres longues confère au matériau trois axes orthogonaux de symétrie.

### III.4.2.1. Paramètre du modèle

Le tissu composite utilisé dans notre étude est constitué d'un ensemble de filaments unidirectionnel croisé à  $90^\circ$ , il possède trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux. Son comportement orthotrope dans l'hypothèse des contraintes planes est décrit en introduisant les constantes de rigidité dans les directions principales données par le **Tableau III.3**.

**Tableau III.3** : Paramètres du modèle numérique des composites FRP

Paramètres	Valeur	Dénotation
$E_1$ (MPa)	72000	Module de Young longitudinal
$E_2$ (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 (MPa)
$X_c$ (MPa)	910	Résistance longitudinale en compression (MPa)
$Y_t$ (MPa)	35	Résistance transversale en traction (MPa)
$Y_c$ (MPa)	110	Résistance transversale en compression (MPa)
$S$ (MPa)	70	Contrainte de cisaillement maximale (MPa)

### III.4.2.2. Critère de rupture des composites

Les critères de rupture interactifs permettent d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des composites. La ruine des matériaux composites n'est pas initiée par un unique mécanisme d'endommagement élémentaire, mais elle est la conséquence de l'accumulation de plusieurs modes de dégradation [45].

Dans notre étude, le critère interactif de **Hill-Tsai** [46] est utilisé, puisque les critères de la contrainte maximale et de la déformation maximale ne prennent pas en compte les interactions entre les contraintes principales et les déformations principales et supposent que les mécanismes élémentaires de la rupture sont des phénomènes indépendants.

Ce critère est surtout utilisé pour les composites à fibres continues unidirectionnelles, il suppose que le point qui correspond à :  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y, \sigma_{12} = 0$  est sur la surface de rupture. Il y a donc ruine du matériau lorsque les contraintes normales  $\sigma_{11}$  et  $\sigma_{22}$  atteignent la tension ultime transversale. L'état limite de contraintes n'est pas atteint tant que l'inégalité est vérifiée.

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{X_{LT}}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots (III.5)$$

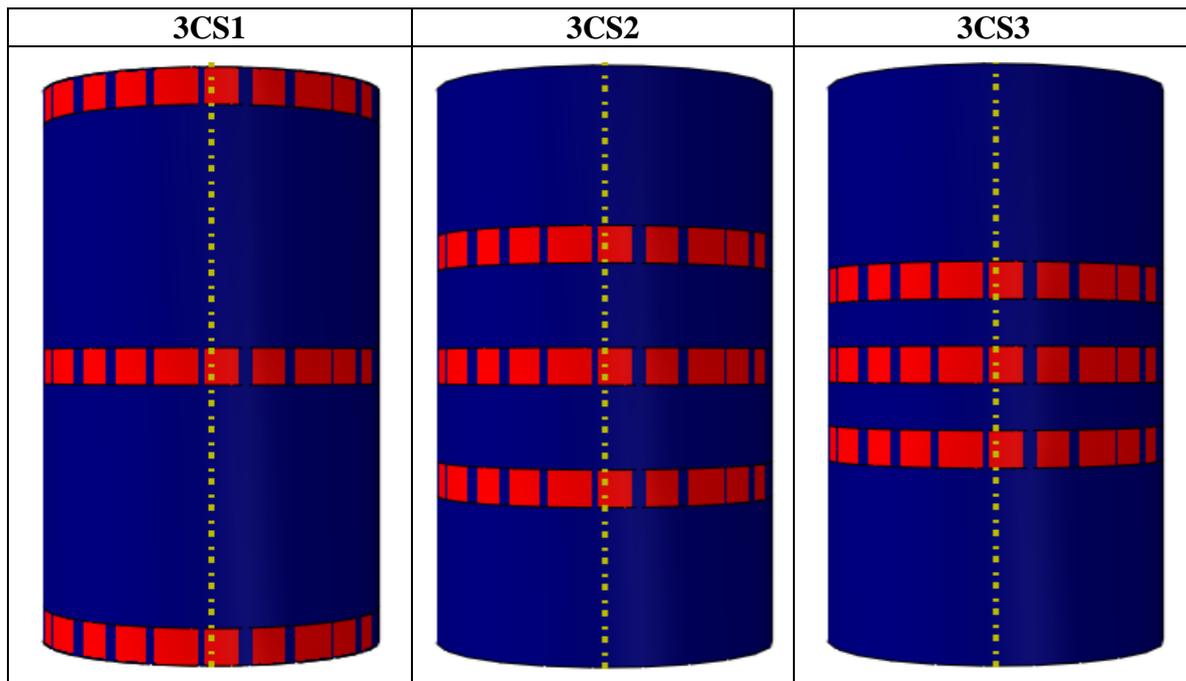
**III.5. Modèles et variantes de l'étude**

Dans le but d'optimiser les paramètres des bandes composites utilisées pour le confinement partiel des éprouvettes en béton, une étude paramétrique reliée à la variation de chacun de ces derniers, à travers une simulation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS présenté dans les sections ci-dessous. Plusieurs variantes de configuration sont considérées pour des différents taux de confinement à travers le nombre de cerces utilisés à savoir :

**III.5.1. Caractéristiques géométriques des bandes**

- ✓ Espacement entre les cerces ;
- ✓ Largeur des cerces ;
- ✓ Epaisseur des cerces.

**Tableau. III.4 :** Configuration pour les variations de l'espacement des cerces



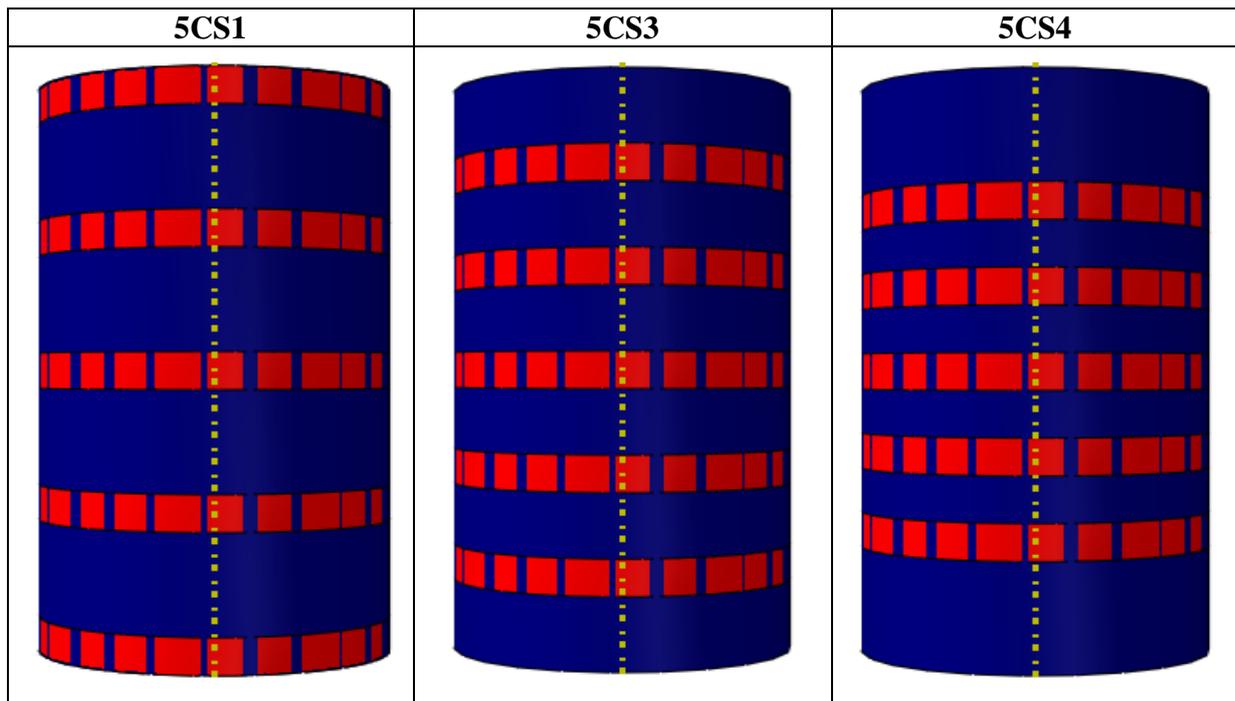
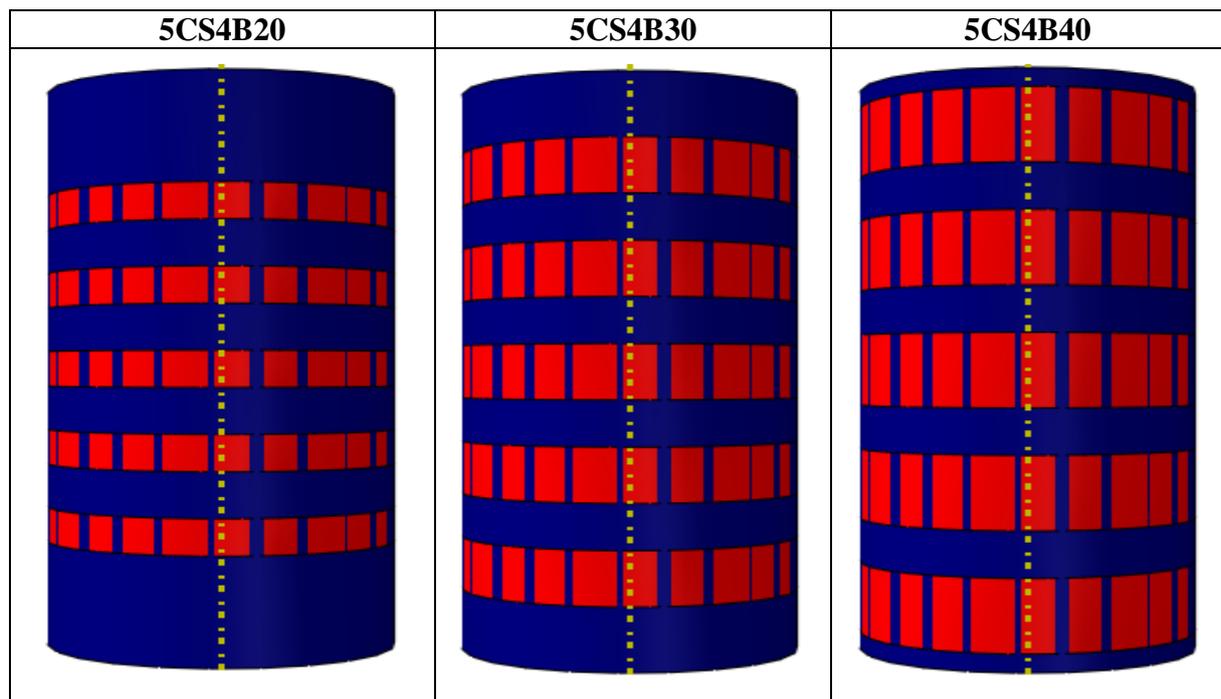


Tableau. III.5 : Largeur des bandes



### III.5.2. Caractéristiques mécaniques des bandes

- ✓ Modules de Young longitudinal des cerces ;
- ✓ Modules de Young transversal des cerces ;
- ✓ Résistance à la traction dans le sens longitudinal des cerces ;
- ✓ Résistance à la traction dans le sens transversal des cerces.

**Tableau. III.6 :** Variation des caractéristiques géométriques des bandes FRP

Variantes d'étude	Cylindre (cm)	Nb de cerce	Largueur de bande (mm)	Epaisseur (mm)	Espacement (mm)		
3CS1	16*32	3	20	1	130		
3CS2					45		
3CS3					25		
5CS1		5			1	55	
5CS2						45	
5CS3						35	
5CS4				5	2	25	
5CS4E1*					3		
5CS4E2					4		
5CS4E3					5		25
5CS4E4							
5CS4E4B1							
5CS4E4B2	30						
5CS4E4B3	40						

\*La même épaisseur pour la variante 3cerces.

**Tableau. III.7 :** Variation des caractéristiques mécaniques des bandes FRP

Variante d'étude	Variation des modules de Young des FRP				Variation de la résistance à la traction des FRP			
	Longitudinale (MPa)		Transversale (MPa)		Longitudinale (MPa)		Transversale (MPa)	
5CS4E1B20	ML1	64800	MT1	12240	Xt1	1800	Yt1	30
	ML2	72000	MT2	13600	Xt2	1900	Yt2	35
	ML3	79200	MT3	14960	Xt3	2000	Yt3	40

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer nos modèles. Il nous a permis de simuler le comportement non linéaire des cylindres en béton confinés partiellement avec des bandes composites en FRP sous chargement axial de compression. Les matériaux constitutifs sont modélisés à travers des modèles numériques intégrés dans code ABAQUS à savoir :

- Un modèle élasto-plastique pour le béton permettant d'évaluer la réponse ultime et de représenter l'évolution des endommagements pour définir le mode de rupture des spécimens considérés ;
- Un modèle élastique orthotrope pour les composites avec le critère de rupture de Hill Tsai. Enfin, les différentes configurations de confinement permettant l'optimisation des paramètres géométriques et mécaniques des bandes FRP sont présentées.

# CHAPITRE IV

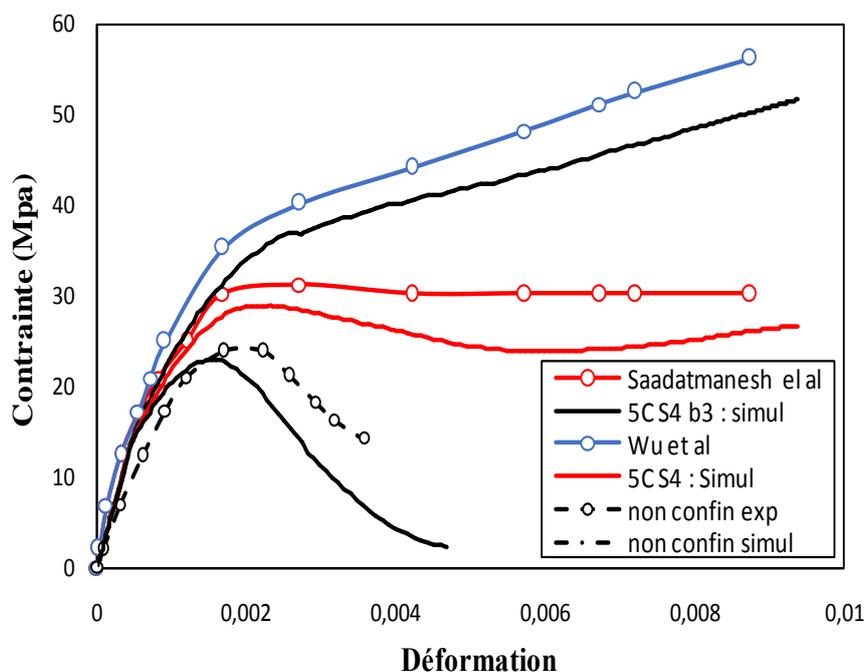
*PRESENTATION DES RESULTATS ET  
DISCUSSION*

### IV.1. Introduction

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique des cylindres en béton confinés par collage partiel de bandes composites **FRP**. Une étude numérique validée par des travaux disponibles dans la littérature est réalisée en utilisant le code ABAQUS. Les résultats de la simulation en termes d'évolution des contraintes, des déformations et d'évolution des variables d'endommagement des différents spécimens sont présentés et discutés, sous forme de graphiques contrainte déformation et de cartographies. Les gains en termes de capacité portante sont aussi quantifiés par la confrontation des courbes contrainte-déformation, ceci nous permet de mettre en valeur l'apport de l'approche proposée.

### IV.2. Validation du modèle EF proposé

Afin de vérifier la fiabilité de la procédure numérique, une confrontation des résultats obtenus avec ceux des essais tirés de la revue de littérature déjà menée dans les chapitres précédents est réalisée, nous confrontons nos prévisions quantitatives numériques en termes de courbes contrainte-déformation avec les observations expérimentales pour les trois cas de figures principaux de notre travail à savoir : béton non confiné, béton confiné avec un taux modéré et béton confiné avec un taux élevé, comme le montre **la Figure (IV.1)**.



**Figure IV.1.** Validation du modèle élément fini proposé pour chaque cas de figure

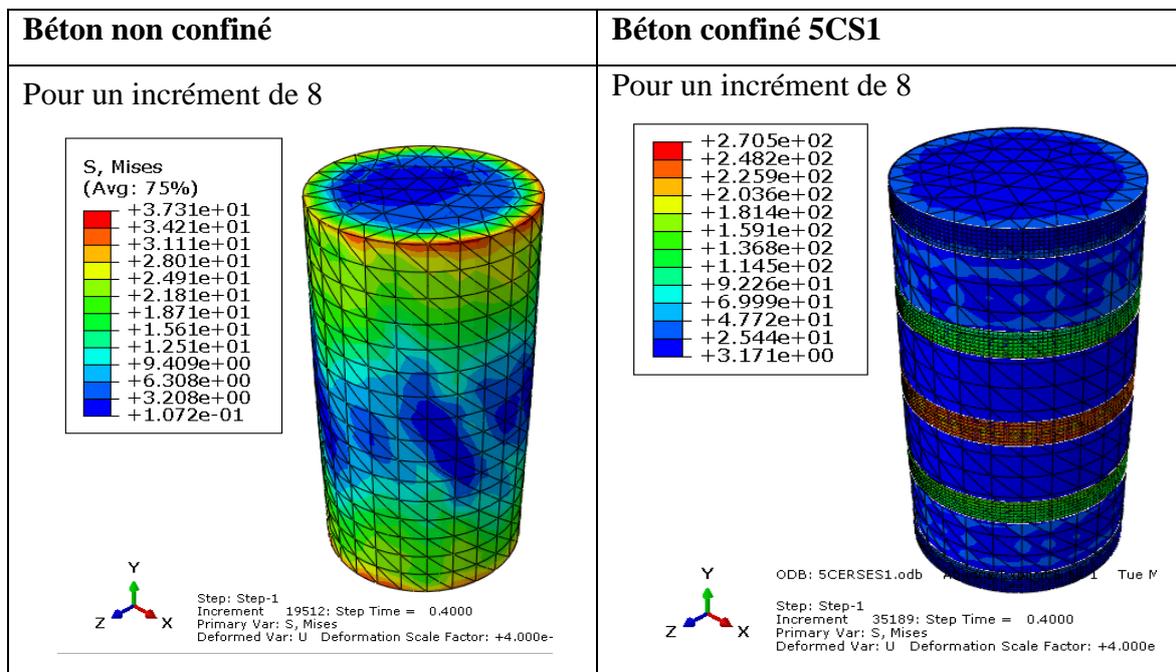
Une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux en termes du comportement global des cylindres sous chargement de compression est observée pour tous les cas considérés. Une amélioration très nette en termes de capacité portantes due à l'effet du confinement est aussi remarquée. Les contraintes maximales données par essais sont légèrement plus élevées comparativement à celles prédites par les simulations numériques.

Pour le cylindre non confiné, la contrainte maximale prédite par la simulation est de 22,69 MPa, cependant **Ali Ahmed [28]** a obtenue par les essais pour des éprouvettes de géométrie similaires, une contrainte de l'ordre de 24 MPa. D'autre part, **Saadatmanesh [47]** et **Wu [48]** pour un confinement partiel avec des taux de confinement semblable à ceux considérés dans les simulations à savoir : confinement modérés et élevés ont évaluées des contraintes de l'ordre de 30 et 60 MPa respectivement. Numériquement ces contraintes sont de 28,38 et 62,74 MPa. La différence entre le modèle numérique et les analyses expérimentales est inférieure à (<5%), ce qui est beaucoup moins que la dispersion expérimentale normale.

### IV.3. Influence de la géométrie des bandes FRP

#### IV.3.1. Espacement des bandes

##### IV.3.1.1. Cartographies des contraintes



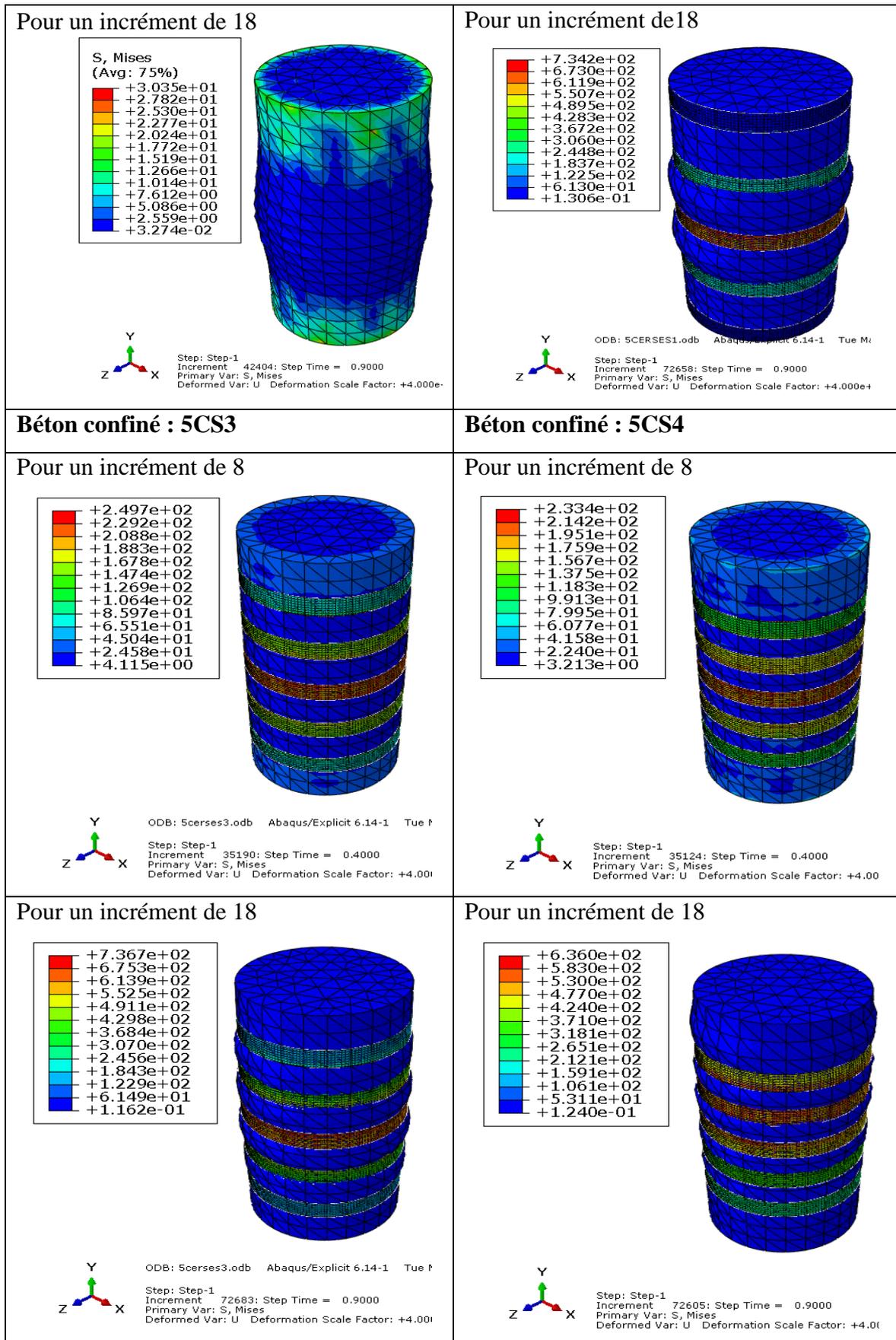
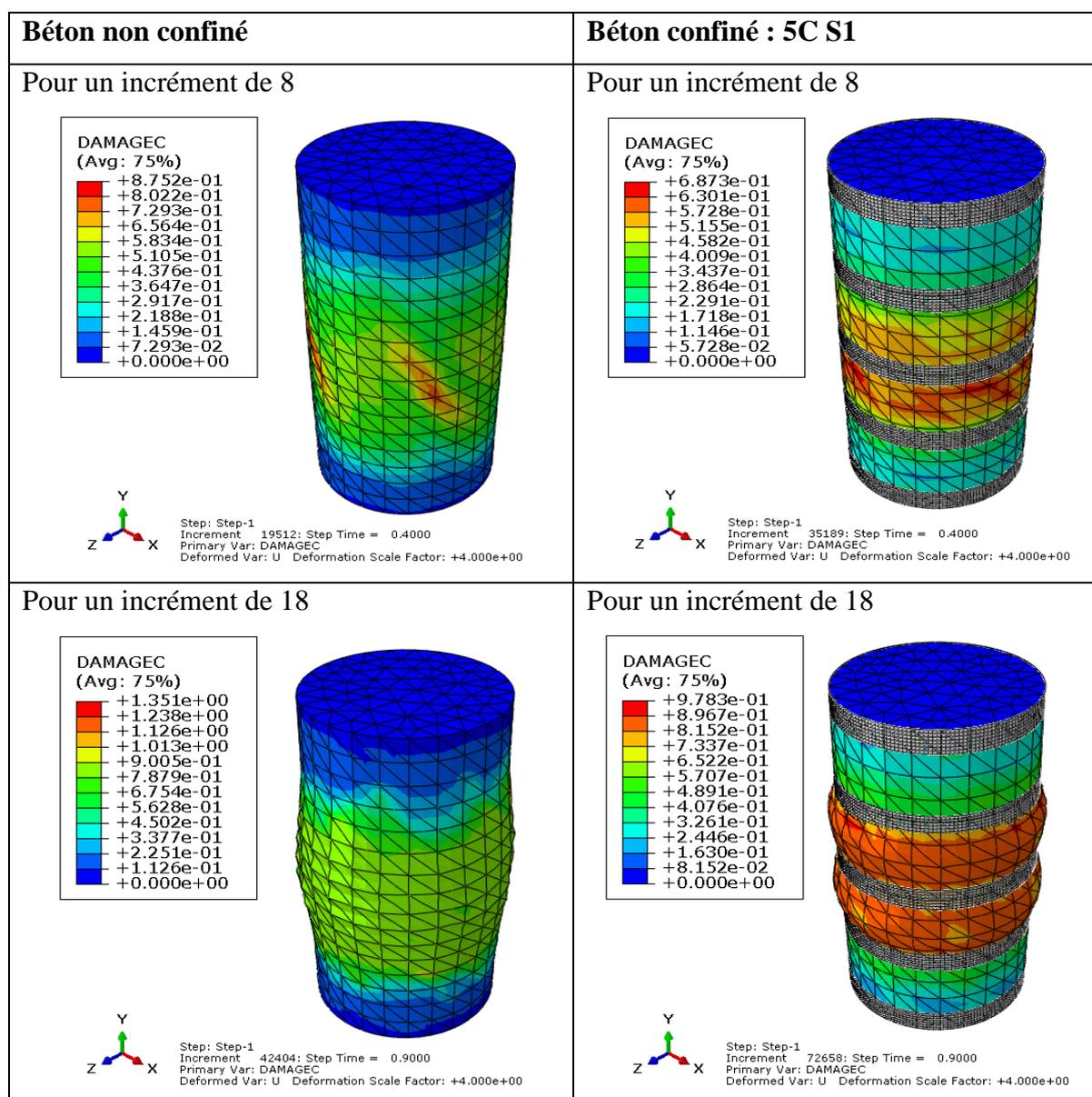


Figure IV.2. Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des espacements

La Figure (IV.2) illustre l'évolution de la distribution des contraintes dans les cylindres témoin et confinés avec 5 cerces et 3 cerces, on observe que l'évolution du champs de contrainte dans le cylindre non confiné est rapide, l'élément atteint la phase de densification des fissures après un temps de chargement très court, l'élément analysé soumis à un effort axial connaît des concentration de champs de contraintes dans la région centrale engendrant l'ouverture des fissures , qui donnera par la suite la rupture de l'élément.

Par contre on remarque que ces contraintes sont légèrement limitées par la présence des cerces. L'évolution des contraintes des cylindres confinés avec un taux élevés (5 cerces) est très lente, comparativement à ceux confinés avec un taux modérés (03 cerces).

### IV.3.1.2. Cartographies des endommagements



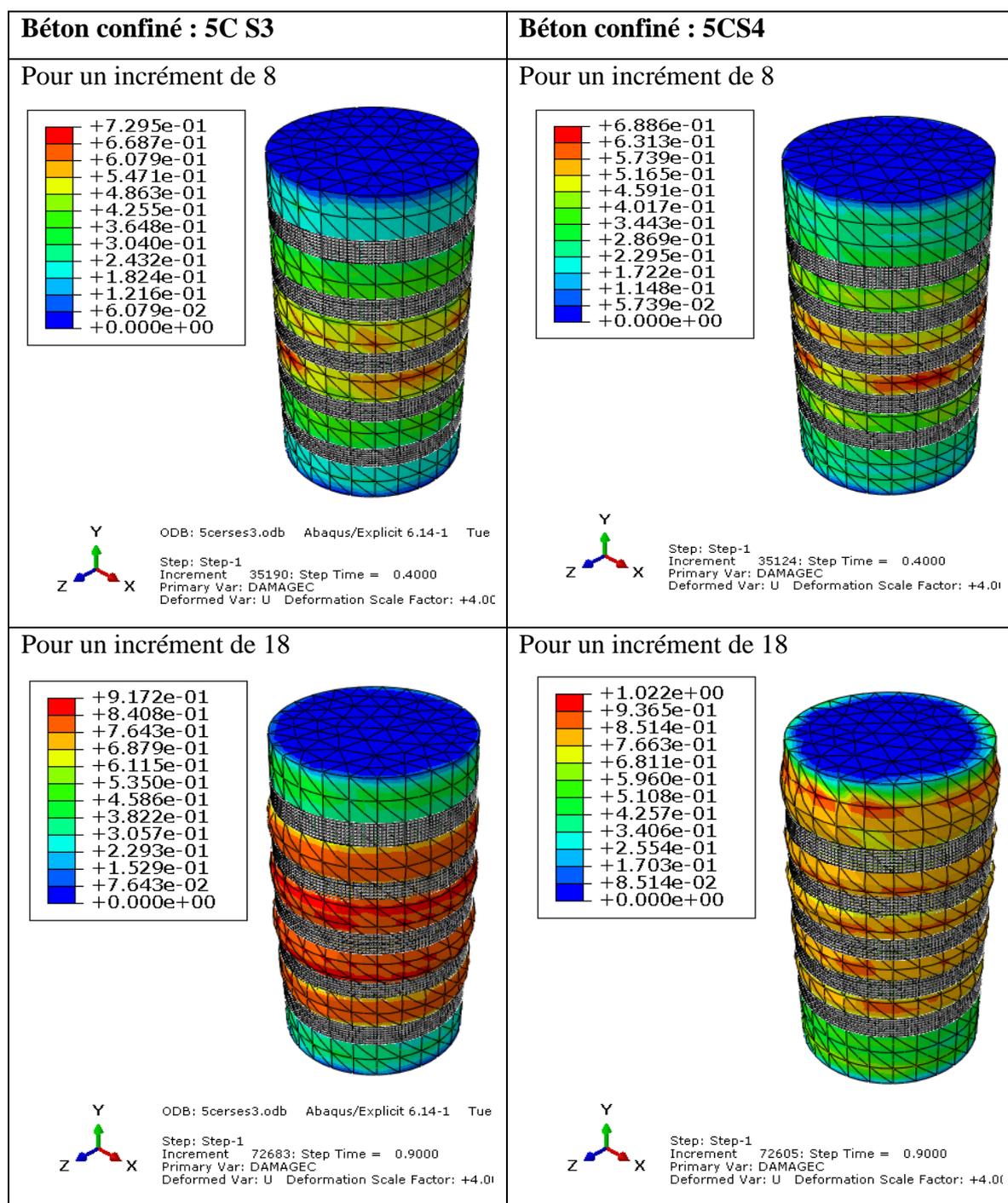
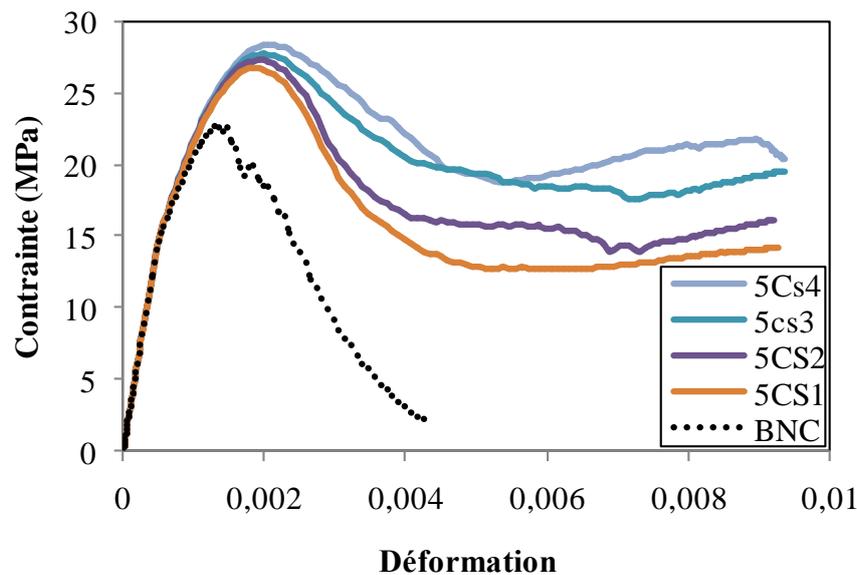
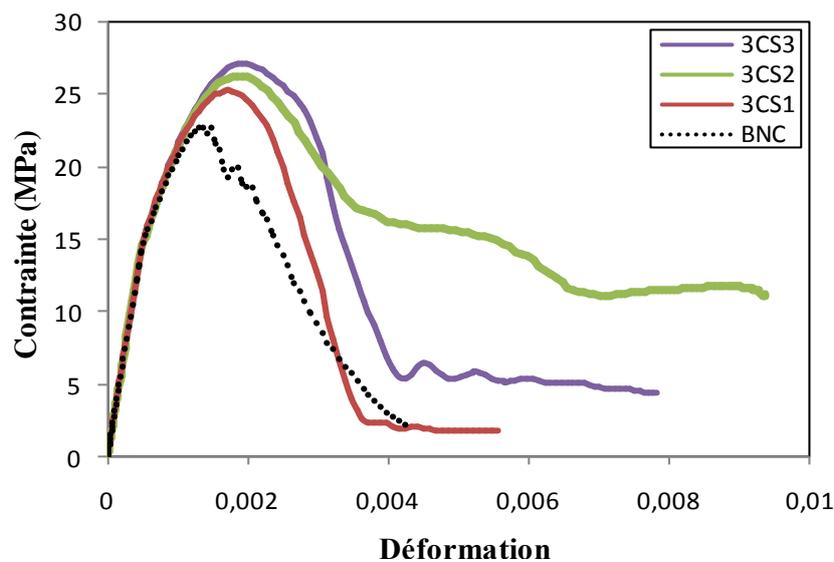


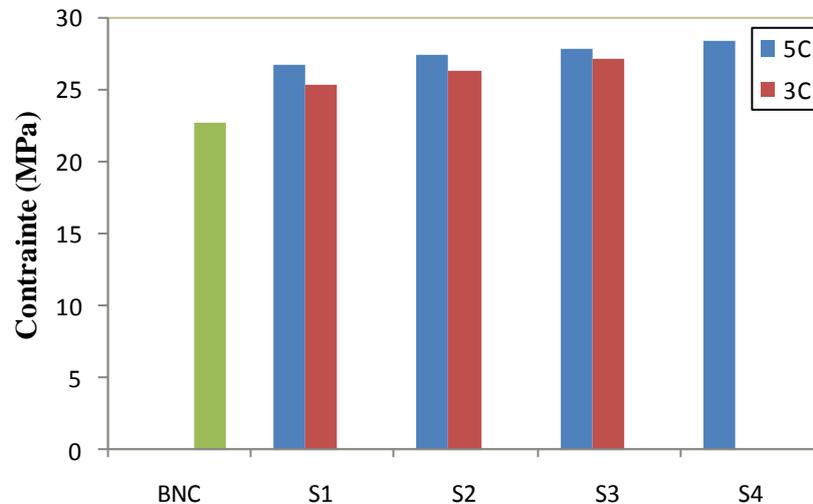
Figure IV.3. Evolution des dommages dans les cylindres : variation des espacements

La Figure (IV.3) illustre l'état d'endommagement des cylindres témoin et confinés. Sous le même taux de chargement, le cylindre témoin connaît un endommagement plus important qui se propage sur toute la hauteur du cylindre comparativement aux cylindres confinés. La diminution des espacements des bandes est accompagnée par une diminution des dommages, ceci peut être expliqué, par l'augmentation de la résistance du béton confiné.

IV.3.1.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )Figure IV.4. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) : espacement 5 cercesFigure IV.5. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) : espacement 3 cerces

La confrontation des courbes contraintes – déformations obtenues par la simulation numérique pour les cylindres non confinés et confinés, montre clairement que le béton confiné 5CS1 atteint une résistance de 26,74 MPa ; on la comparant avec la résistance du béton non confiné qui est de 22,69 MPa ce qui fait un apport en terme de résistance de 17,84%. Par contre le modèle confiné avec 5CS4 il atteint une résistance de 28,38 MPa avec un apport de 25,07%. D'autre part, La figure IV. 5 montre l'augmentation de la résistance du spécimen 3CS1 jusqu'à 25,24 MPa avec un apport en résistance de 11,54 % le cylindre 3CS3 atteint une résistance de 27,12 MPa avec un apport en résistance de 19,84%.

MPa. Voir la **Figure (IV.6)** qui montre les histogrammes des résistances maximales des différents spécimens simulés.

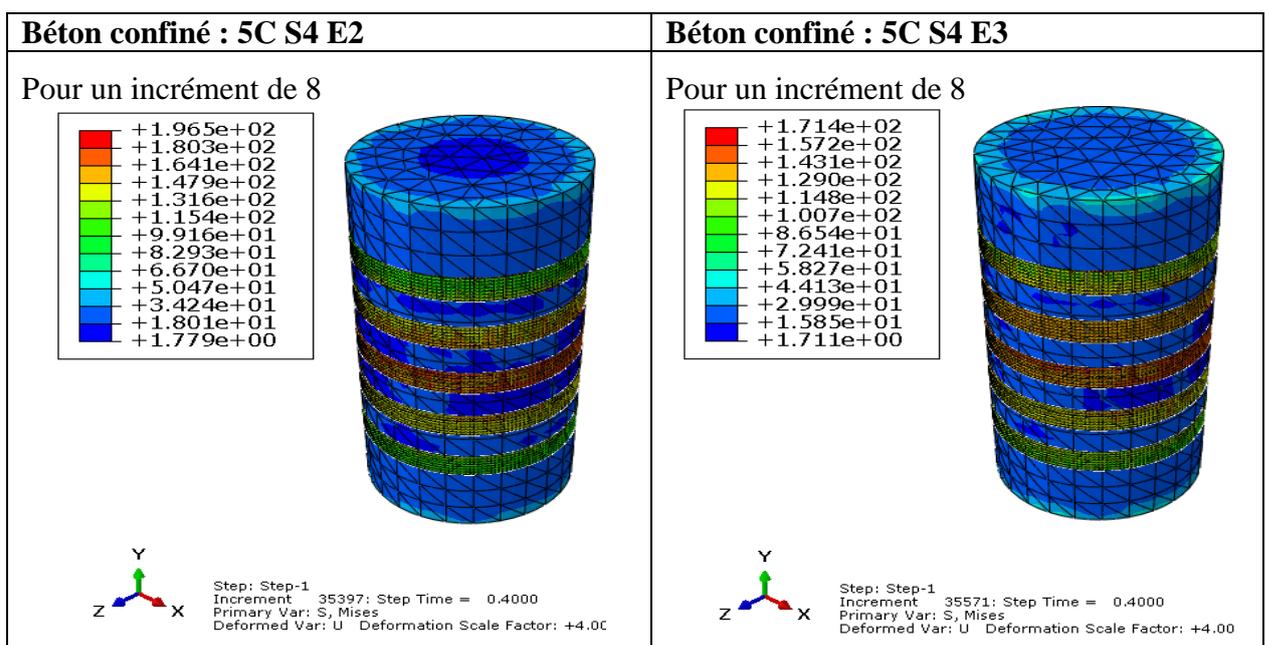


**Figure IV.6.** Histogramme des contraintes en fonction des espacements des cerces

La comparaison des résultats de cette première série de simulation montre que la position optimale des cerces conditionnée par leur espacement permet d’améliorer la résistance du béton confiné sans modifier son comportement mécanique (le comportement adoucissant du béton confiné et non confiné). Par conséquent, l’espacement des cerces est proportionnellement lié à la capacité portante des cylindres confinés.

### IV.3.2. Epaisseur des bandes

#### IV.3.2.1. Cartographies des contraintes



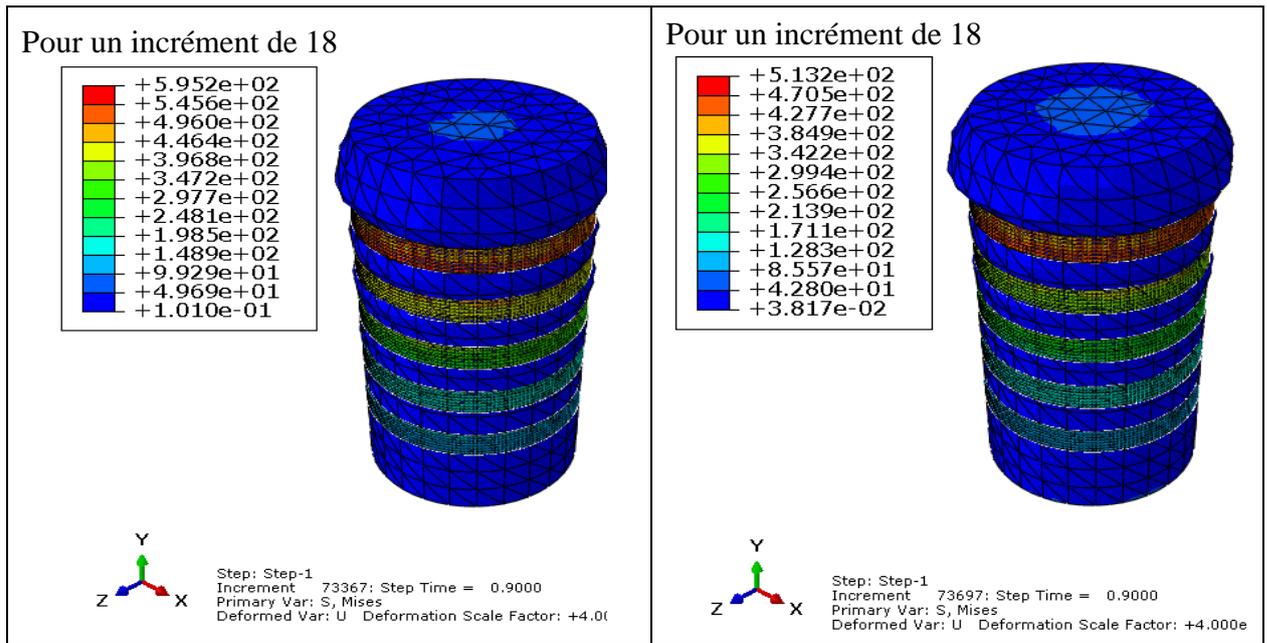
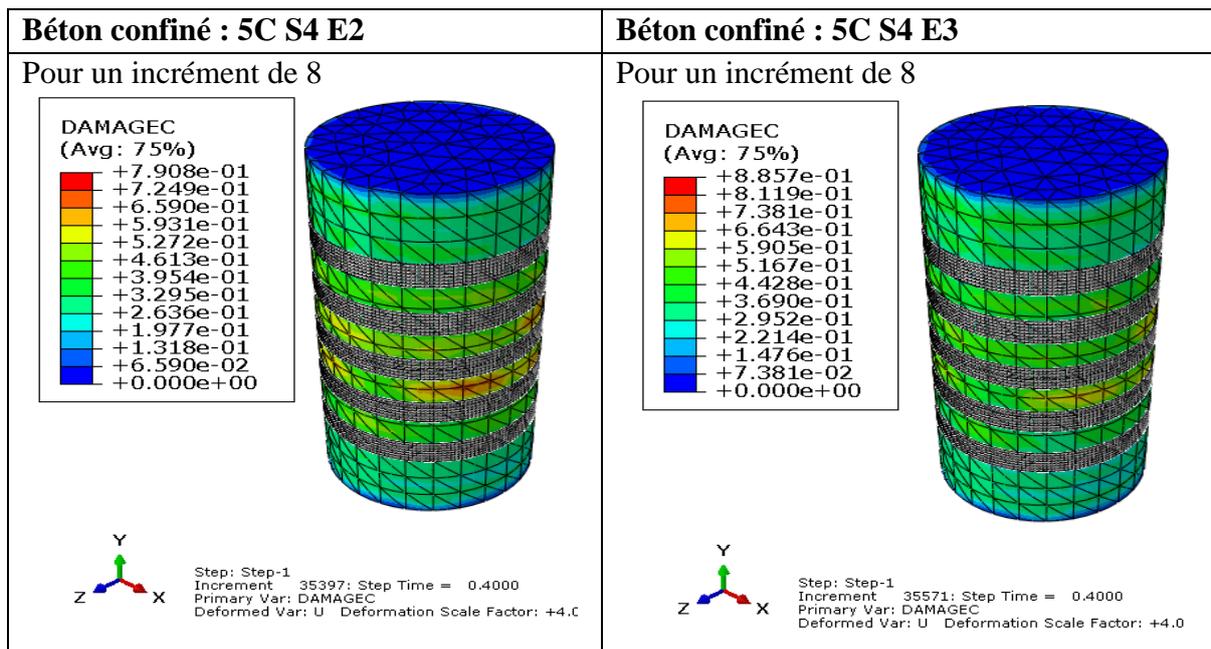


Figure IV.7. Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des épaisseurs

Pour un incrément de charge qui est égale à 8, les champs de contrainte des spécimens confinés avec des bandes composites d'épaisseurs différentes ( $E_2=3\text{mm}$  ;  $E_3=4\text{mm}$ ) se concentrent dans la partie centrale du cylindre. Mais pour l'incrément 18 les champs de contrainte pour les deux spécimens se présentent dans la partie supérieure.

La présence de l'enveloppe composite avec plusieurs empilements permet à la fois d'empêcher la propagation de ces contraintes et de les réduire dans la zone centrale.

### IV.3.2.2. Cartographies des endommagements



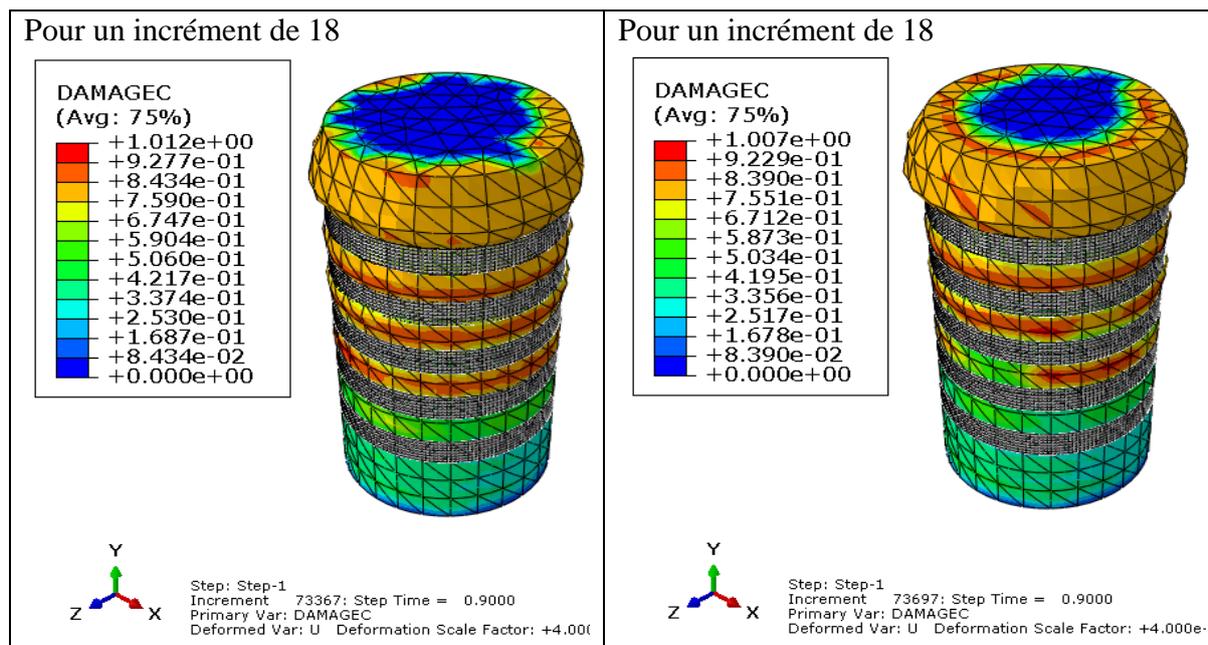


Figure IV.8. Evolution des dommages dans le cylindre : variation des épaisseurs

Les dommages de compression sont concentrés dans la partie supérieure du cylindre confiné on voit bien qu’au niveau des points par lesquels passent les bandes en composite, les déformations de traction sont empêchées laissant place à des déformations de compression qui se propagent de la surface du cylindre vers le haut ce qui le cas contraire du béton non confiné ou la quasi-totalité du cylindre représente des déformations de traction.

### IV.3.2.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )

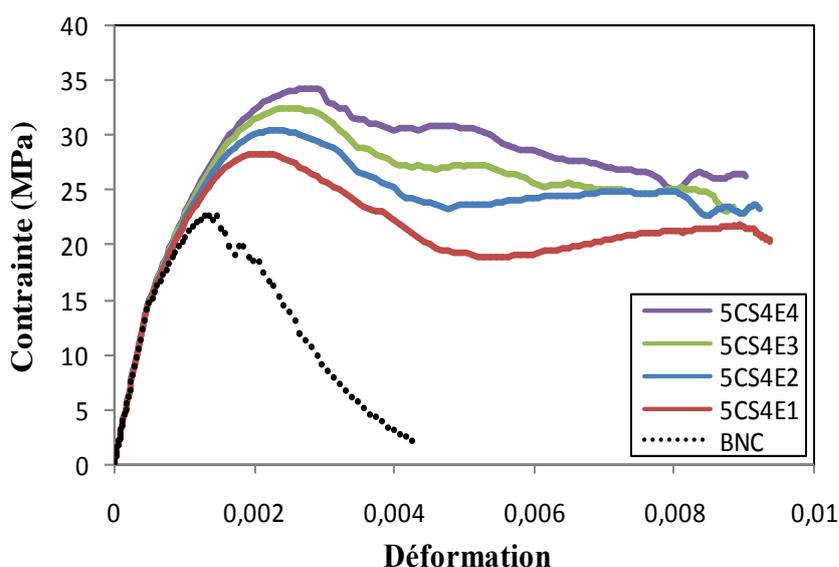


Figure IV. 9. Confrontations des courbes ( $\sigma-\epsilon$ ) : épaisseur 5cerces

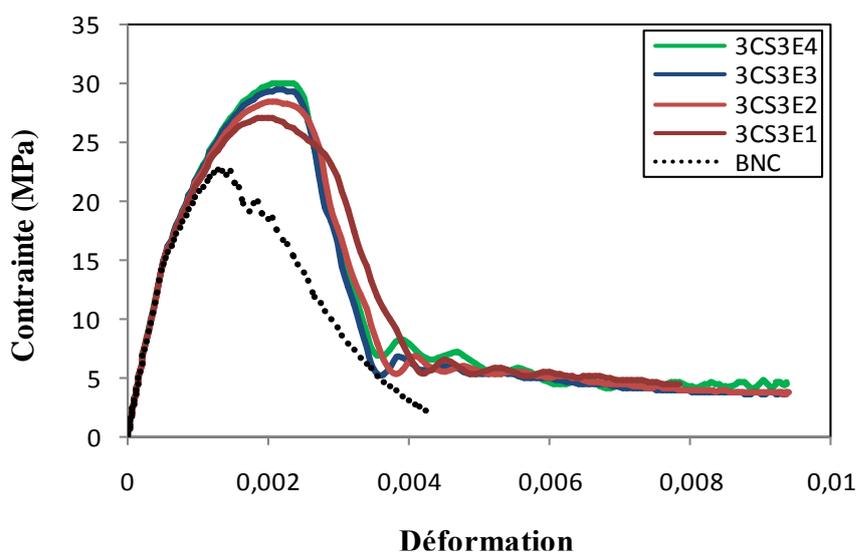


Figure IV.10. Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : épaisseur 3cerces

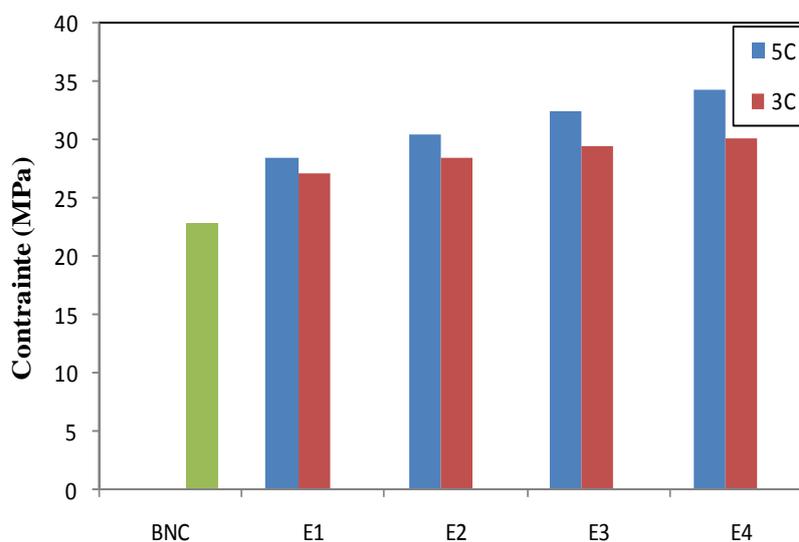


Figure IV.11. Histogramme des contraintes : épaisseurs des cerces

Les résultats numériques ont montré une augmentation de résistance de 50,99% pour le spécimen (béton confiné avec 5CS4E4) et une augmentation de 43,10% pour le 5CS4E3 qui atteint une résistance de 32,47 MPa ; par contre le modèle 5CS4E1 atteint une résistance de 28,38 MPa avec un apport de 25,07%.

D'après la comparaison entre la résistance du béton non confiné qui est de 22,69 MPa et la résistance du béton confiné avec 3CS3E2 qui est de 28,45 MPa on voit que l'apport en résistance augmente jusqu'à 25,38%, aussi le spécimen 3CS3E4 représente une résistance de 30,09 MPa voir un apport de 32,61 %.

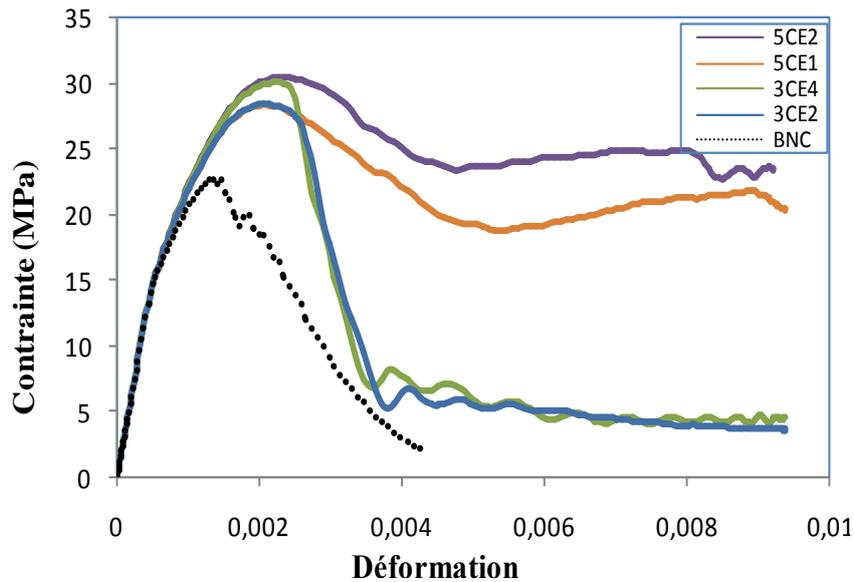
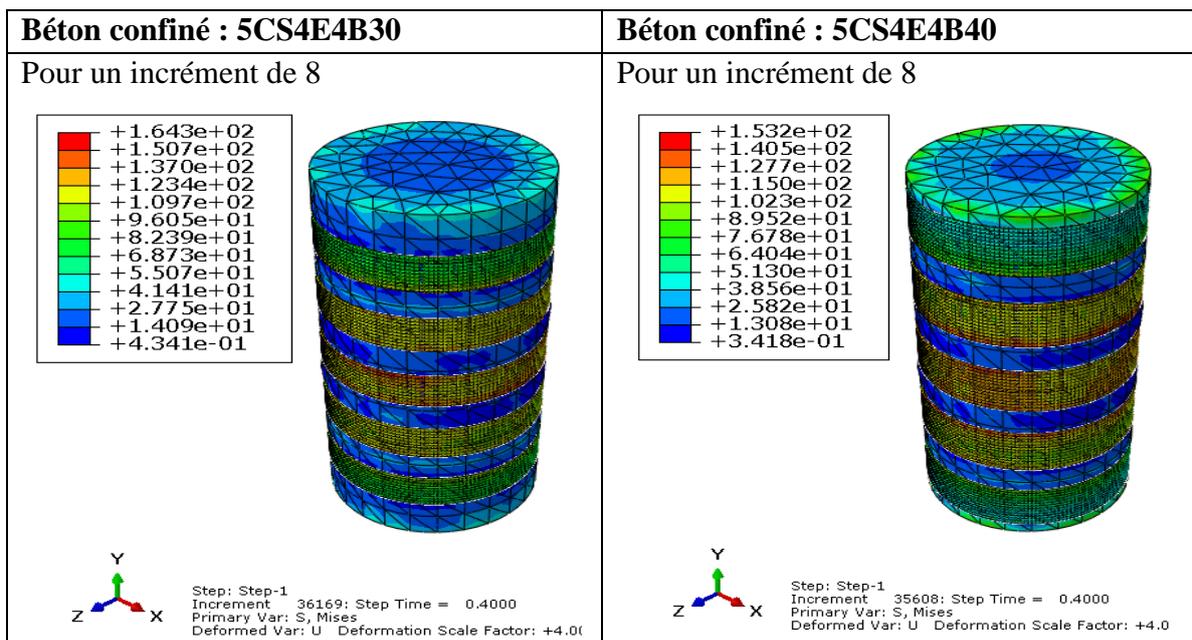


Figure IV. 12. Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : 3CE2, 3CE4, 5CE1 et 5CE2.

Comme le montre les courbes des **Figures (IV. 10) ; Figure (IV. 11)** et la **Figure (IV. 12)** la variation de l'épaisseur des cerces (empilement des bandes) conduit à une amélioration de la résistance du béton confiné sans avoir modifier au comportement mécanique c'est-à-dire le double confinement de la zone centrale peut conduire à des résultats meilleurs que de rajouter des cerces ce qui est l'exemple des modèles 5CE2 et 3CE4 qui présentent presque une même valeur de résistance (30,09MPa et 30 ,50MPa).

### IV.3.3. Largeur des bandes

#### IV.3.3.1. Cartographies des contraintes



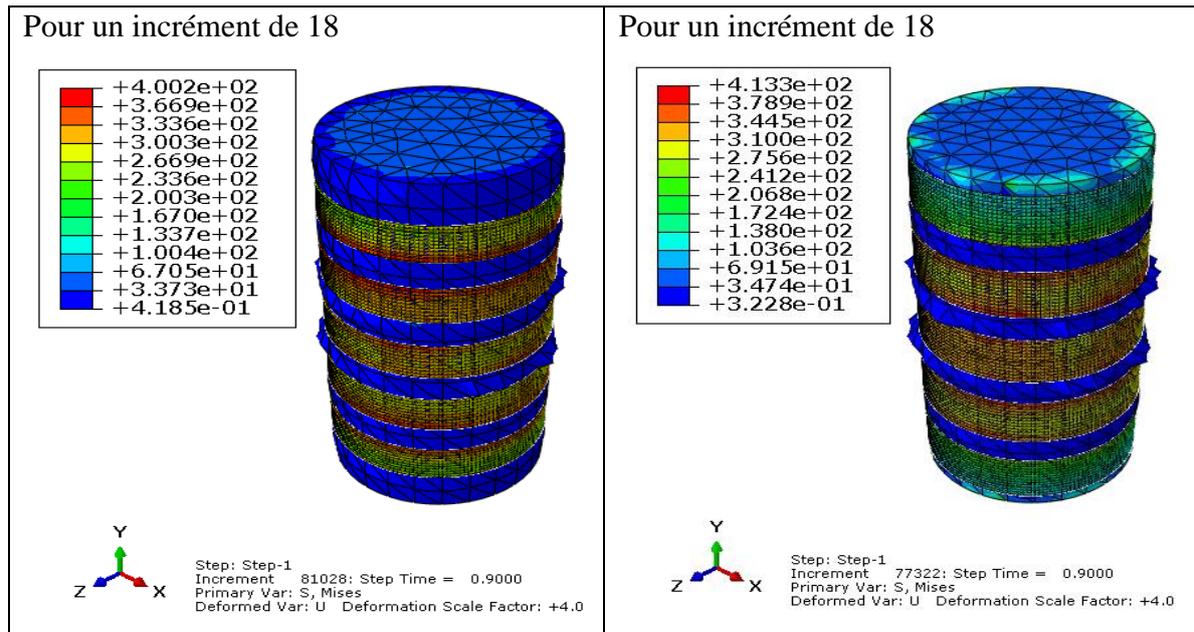
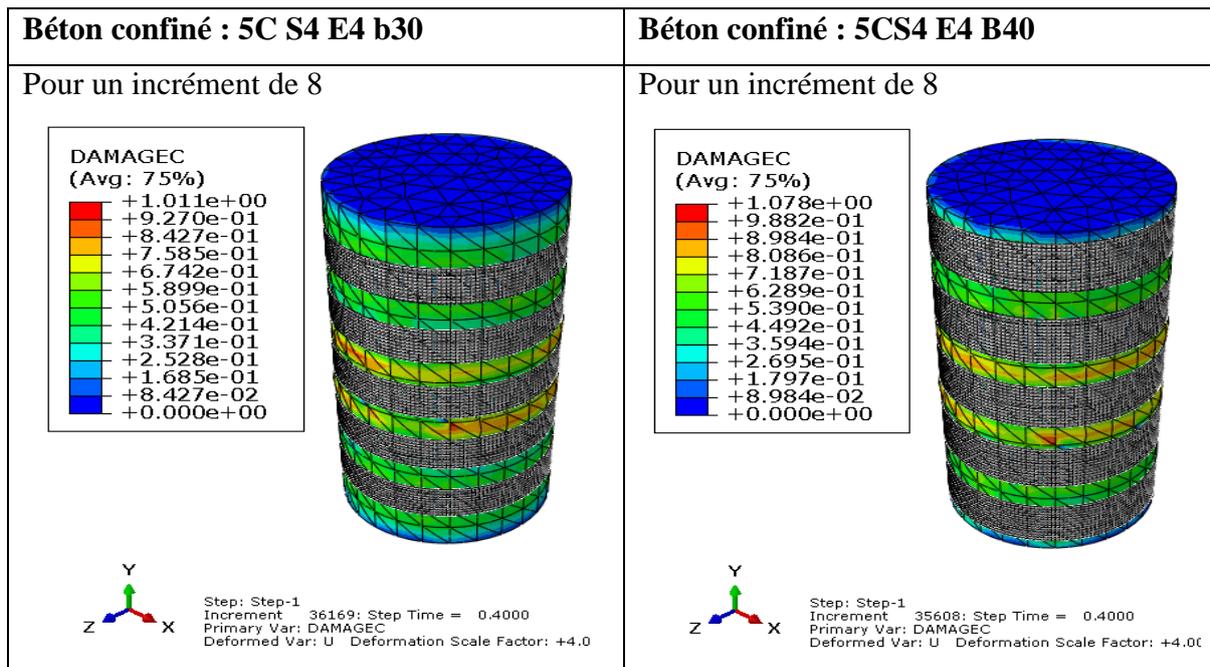


Figure IV.13. Evolution des contraintes dans le cylindre : variation des largeurs

Une évolution significative du champ des contraintes dans les deux spécimens considérés (Confiné avec une largeur de 30 et 40 mm) est entraînée par l'évolution du chargement extérieur appliqué. Le champ de contrainte apparait en premier lieu dans la partie centrale du cylindre avec une vitesse de propagation largement réduite vu que les bandes en composite présentent un certain de seuil de résistance.

IV.3.3.2. Cartographies des endommagements



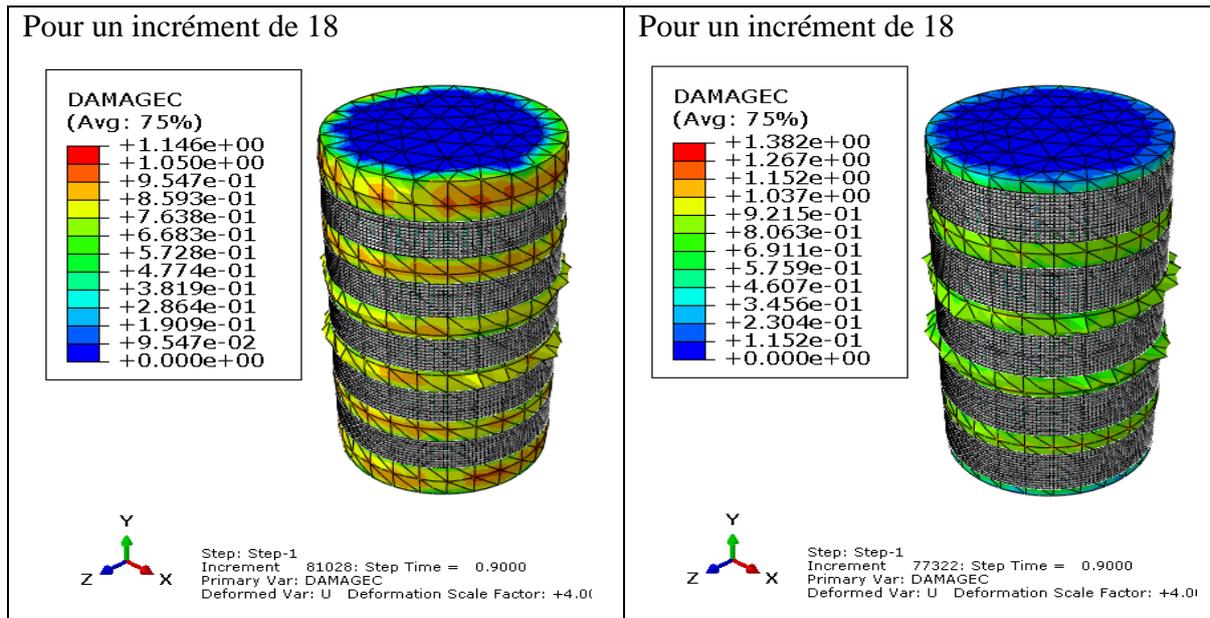


Figure IV.14. Evolution des dommages dans le cylindre : variation des largeurs

La Figure (IV.14) illustre l'état d'endommagement des cylindre confiné avec des largeurs différentes des bandes ; On relève que le cylindre confiné avec des bandes d'une largeur de 30mm présente un endommagement remarquable par rapport au cylindre confiné avec des bandes de 40mm , en effet l'augmentations de la largeur des cerces a permis de réduire considérablement l'évolution des variables d'endommagement. La largeur des bandes est accompagnée par une diminution des dommages, ceci explique l'augmentation de la résistance du béton confiné avec un taux élevé.

IV.3.3.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )

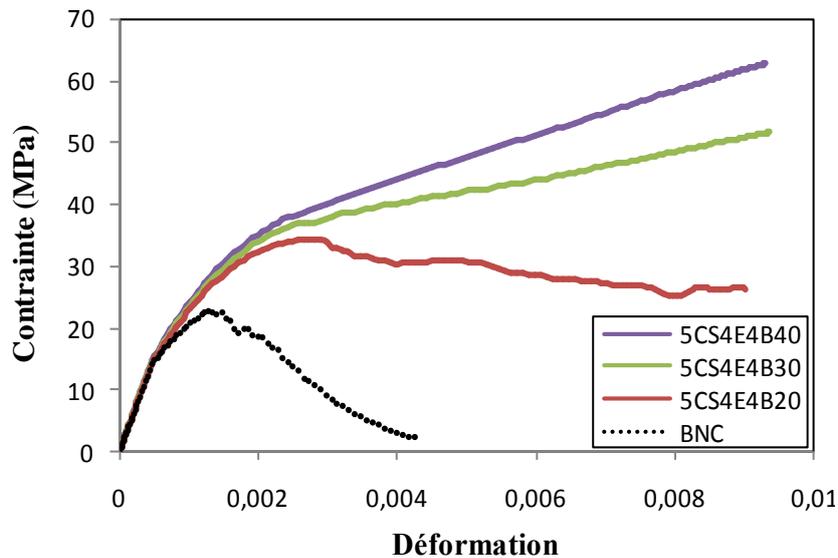


Figure IV.15. Confrontations des courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) : largeur 5cerces

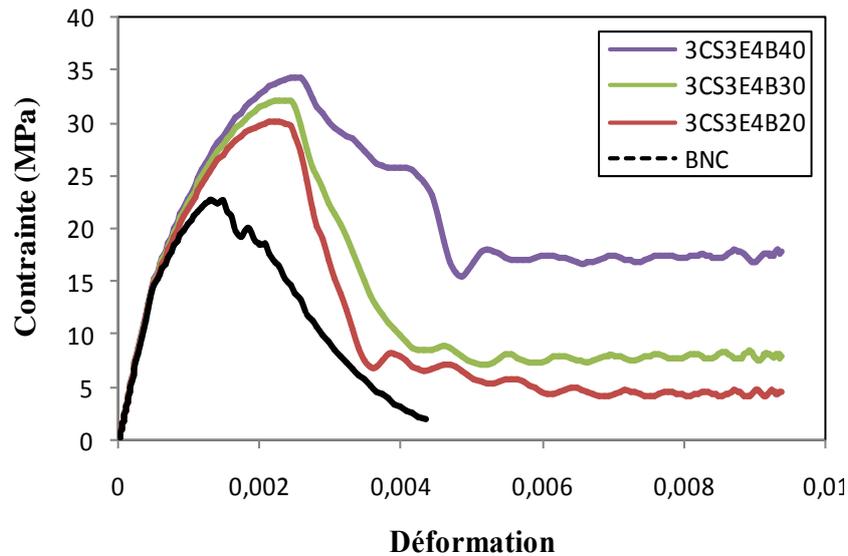


Figure IV.16. Confrontations des courbes ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) : largeur 3cerces

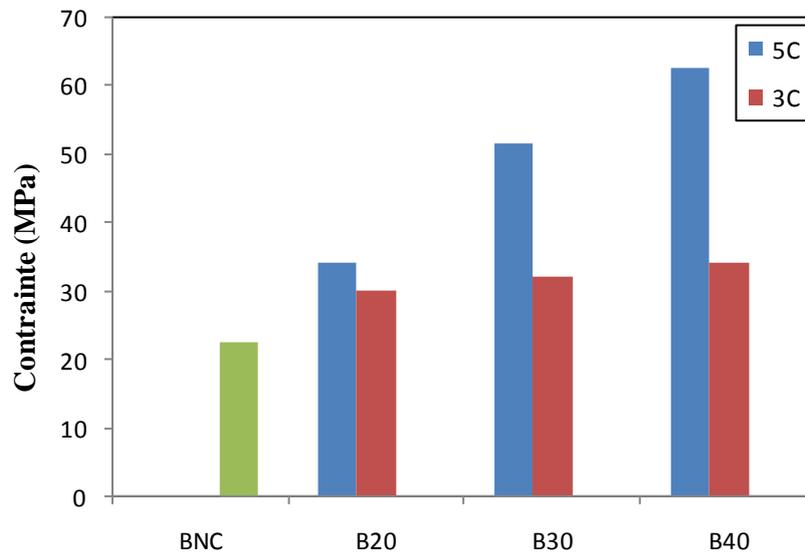


Figure IV.17. Histogramme des contraintes : Largeurs des bandes

L'analyse des résultats montre clairement l'amélioration en termes de résistance à la compression des cylindres confinés par des bandes FRP comparativement au cylindre de référence en béton non confiné. Le cylindre confiné avec 5bandes d'une largeur de 40mm (5CS4E4B40) présente une résistance maximale de 62,74 MPa avec un apport qui dépasse 176% ; Par contre le modèle 5CS4EB30 atteint une résistance de 51,65 MPa avec un apport de 127,63%. Le cylindre confiné avec 3cerces présente des valeurs de résistance minimale par rapport au cylindre confiné avec 5cerces par exemple le 3CS3B2 sa résistance maximale est de 32,14MPa et le 3CS3B3 atteint une résistance de 34, 31MPa.

La comparaison des résultats de cette série montre que l'augmentation de la largeur des cerces permet d'augmenter le taux de confinement ce qui conduit à un passage d'un comportement adoucissant vers un comportement ductile du béton confiné ; avec une amélioration très nette de la contrainte de rupture.

Les différents résultats obtenus par les analyses numériques à base des éléments finis pour les différentes variantes d'étude en termes de contrainte et d'apport en résistance, sont récapitulés dans le **Tableau IV.1** suivant:

**Tableau IV.1** : Tableau représentatif des apports en résistance dû à l'influence des caractéristiques géométriques des bandes **FRP**

Cylindre	Contrainte au pic (MPa)		Contrainte de rupture (MPa)		Apport en résistance (%)
	Non confiné	confiné	Non confiné	Confiné	
5CS1	22,69	26,74	2,01	14,20	17,84
5CS2		27,31		16,09	20,36
5CS3		27,72		19,60	22,16
5CS4		28,38		20,38	25,07
5CE1	22,69	28,38	2,01	20,38	25,07
5CE2		30,50		23,37	34,42
5CE3		32,47		23,17	43,10
5CE4		34,26		26,32	50,99
5CB1	22,69	34,26	2,01	26,32	50,99
5CB2		36,70		51,65	127,63
5CB3		38,14		62,74	176,51
3CS1	22,69	25,24	2,01	1,85	11,54
3CS2		26,22		11,23	15,55
3CS3		27,12		4,42	19,52
3CE1	22,69	27,12	2,01	4,42	19,52
3CE2		28,45		3,71	25,38
3CE3		29,44		3,71	29,74
3CE4		30,09		4,60	32,61
3CB1	22,69	30,09	2,01	4,60	32,61
3CB2		32,14		7,85	41,64
3CB3		34,31		17,81	51,21

IV.4. Influence des caractéristiques mécaniques des bandes

IV.4.1. Modules de Young longitudinal des bandes

IV.4.1.1. Cartographie des contraintes

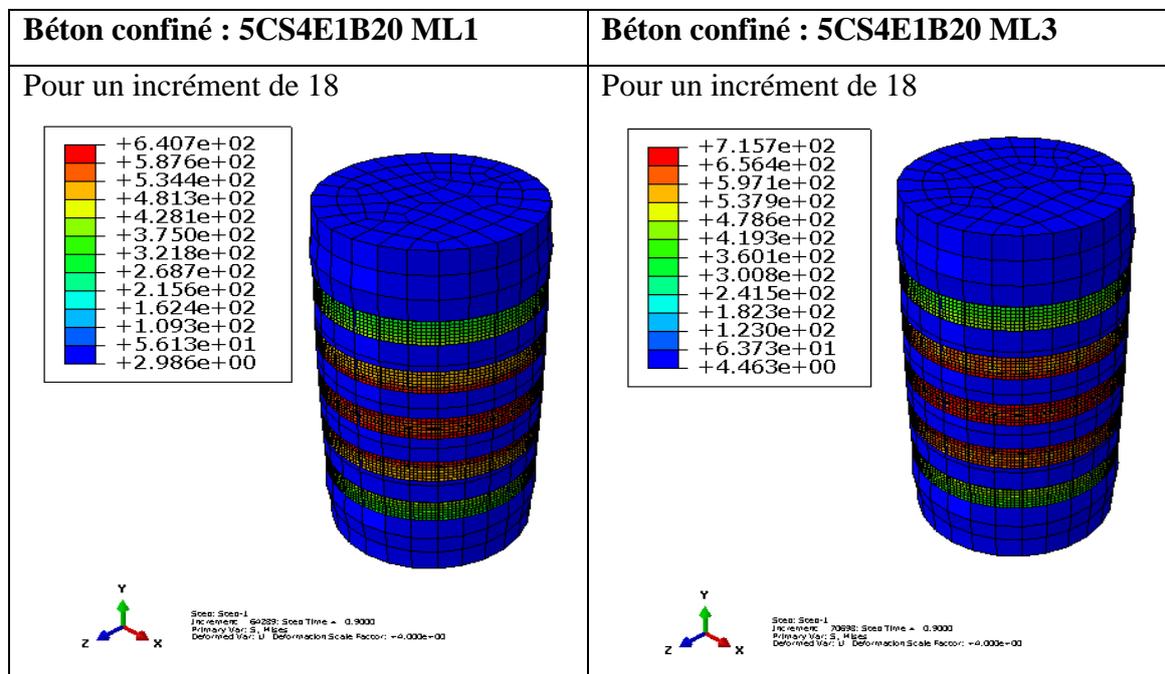


Figure IV.18. Evolution des contraintes : variation du module de Young longitudinal.

IV.4.1.2. Cartographie des endommagements

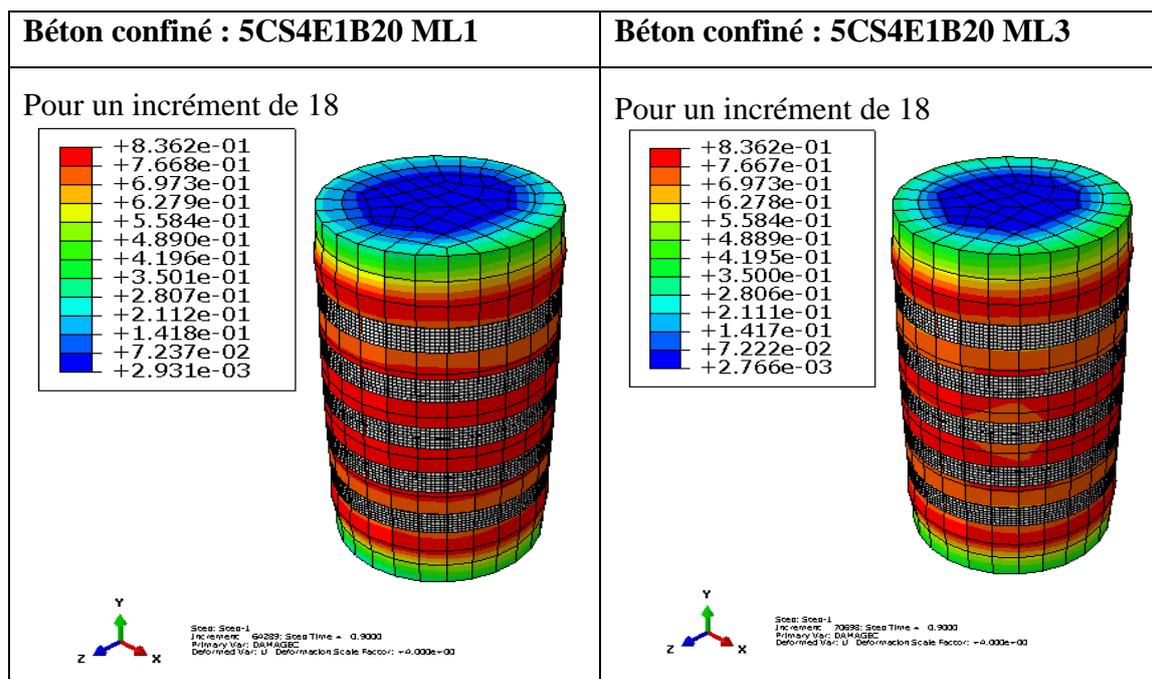
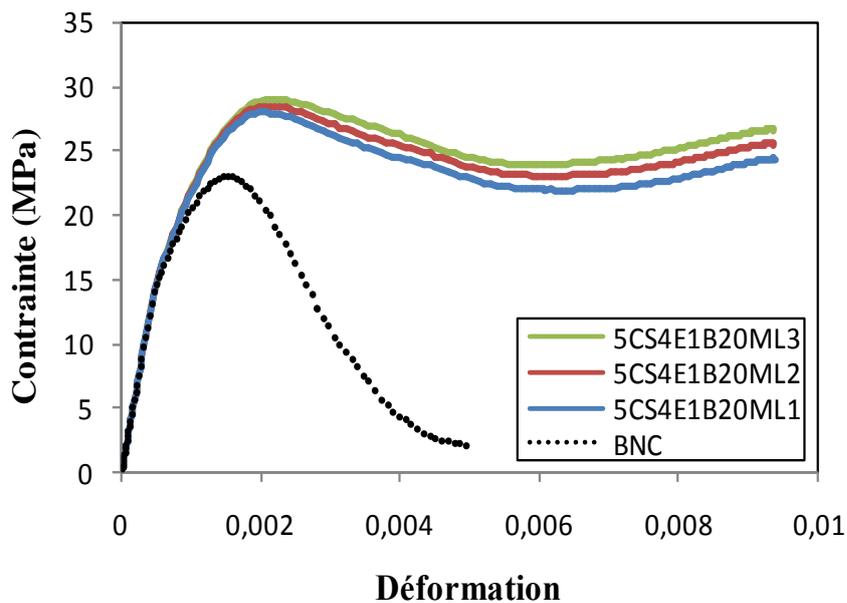


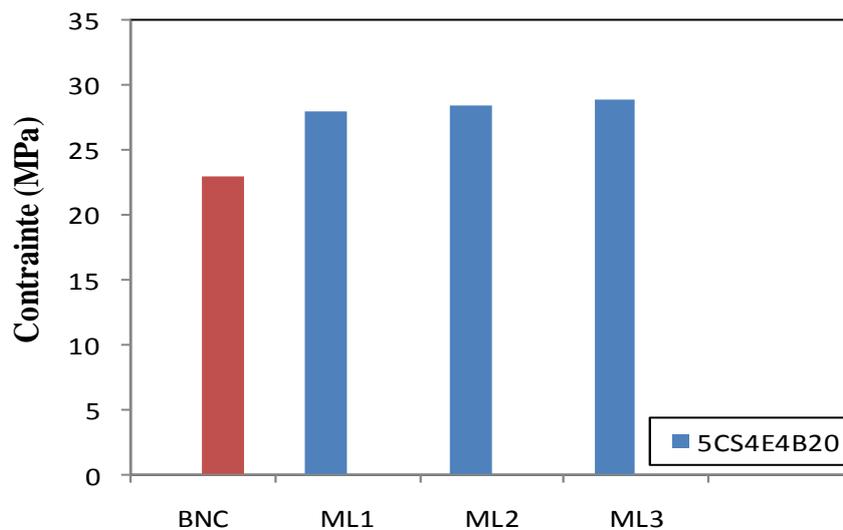
Figure IV.19. Evolution des dommages : variation du module de Young longitudinal

Les cartographies des figures ci-dessus montrent la distribution des champs de contraintes dans les différents spécimens considérés ; on remarque que pour les deux cylindres confinés avec des bandes en composite de module de Young longitudinal différent les champs de contrainte ont connu une même distribution. La **Figure (IV.19)** montre clairement une absence d'effet du module au niveau des dommages pour les deux spécimens considérés.

**IV.4.1.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )**



**Figure IV. 20.** Confrontations des courbes ( $\sigma-\epsilon$ ) : module de Young longitudinal

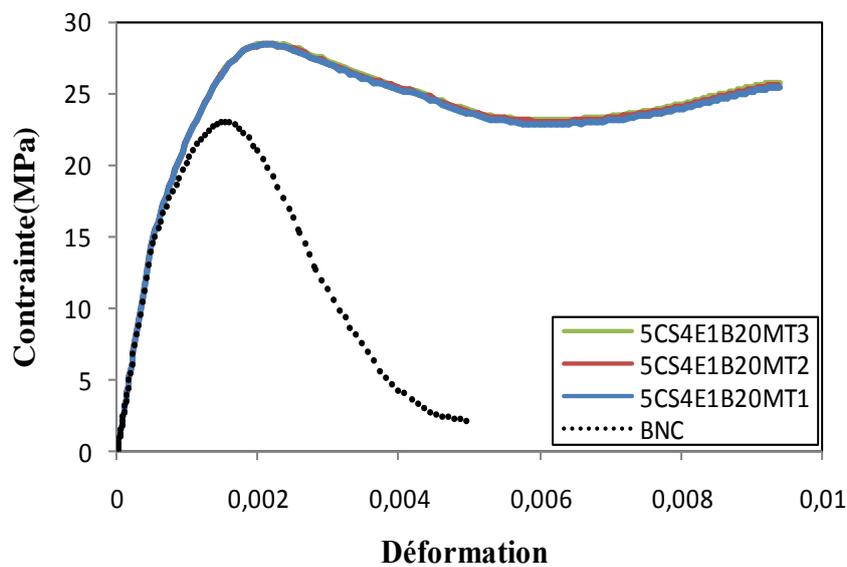


**Figure IV.21.** Histogramme des contraintes : Module longitudinal

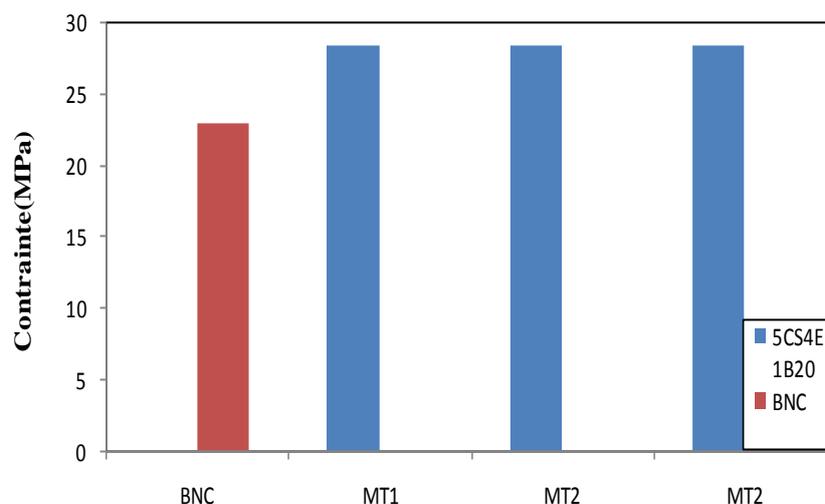
Les courbes de la **Figure (IV.20)** nous montrent que la variation du module de Young longitudinal n'a pas d'effet sur la résistance du béton. Le béton confiné avec 5CS4E1B20 avec un module de Young longitudinal qui est égal 64800MPa a une résistance de 27,95MPa et un apport de 23,18% et aussi le spécimen 5CS4E1B20ML3 (ML3=79200 MPa) présente une résistance de 26,54MPa et un apport en résistance de 27,54%.

#### IV.4.2. Modules de Young transversal des bandes

##### IV.4.2.1. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )



**Figure IV. 22.** Confrontations des courbes ( $\sigma-\epsilon$ ) : module de Young transversal



**Figure IV.23.** Histogramme des contraintes : Module transversal

Les différents résultats obtenus par les analyses numériques à base des éléments finis pour les différentes variantes d'étude montrent que la variation du module de Young transversal n'a pas d'effet sur la résistance, vu que la résistance du béton confiné avec 5CS4E1MT est de l'ordre de 28,39MPa et la résistance du modèle 5CS4E1B20MT3 est de 28,47 MPa.

### IV.4.3. Résistance à la traction des bandes dans la direction des fibres

#### IV.4.3.1. Cartographies des contraintes

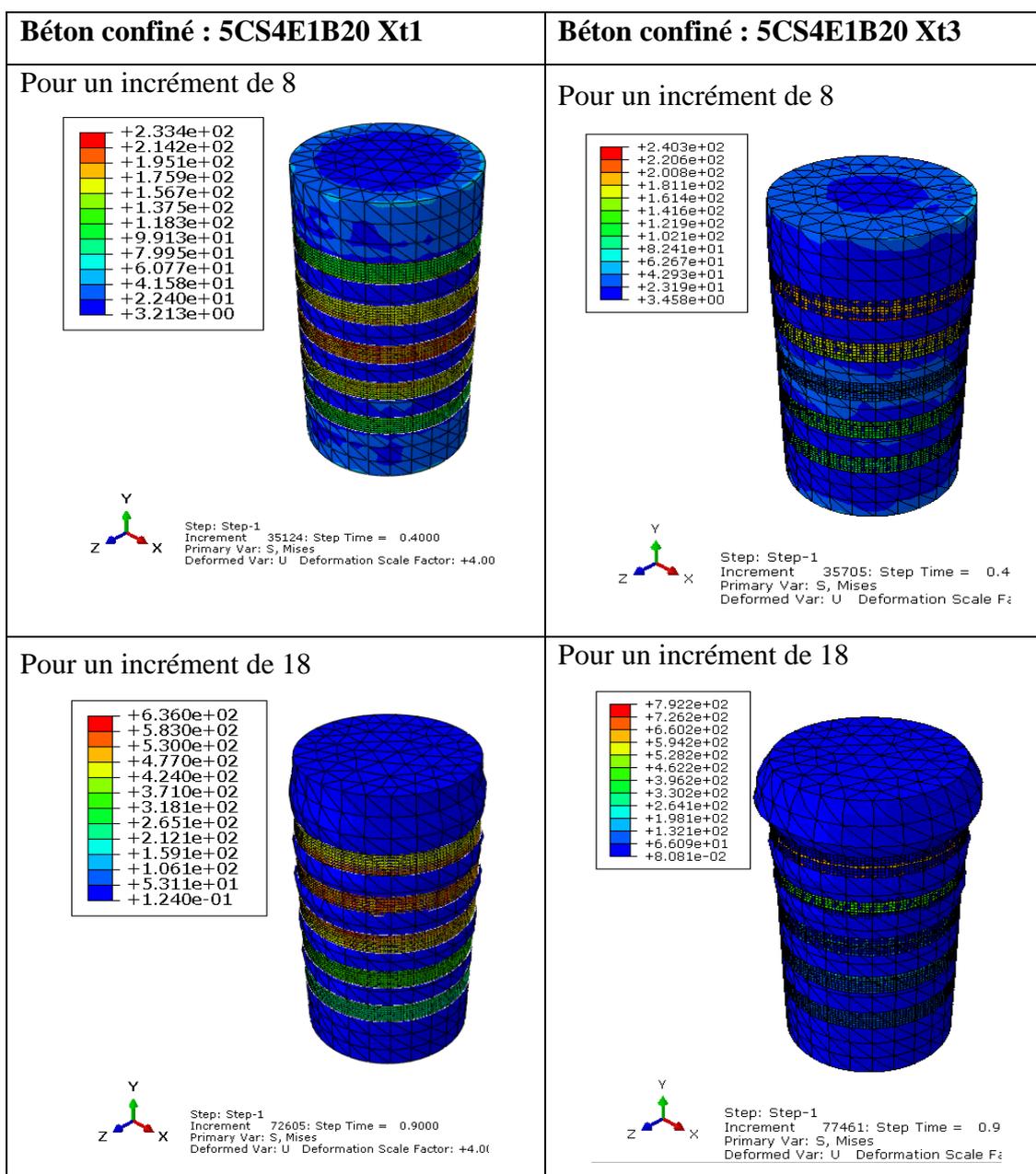


Figure IV.24. Evolution des contraintes : Résistance à la traction des FRP (longitudinale)

IV.4.3.2. Cartographies des endommagements

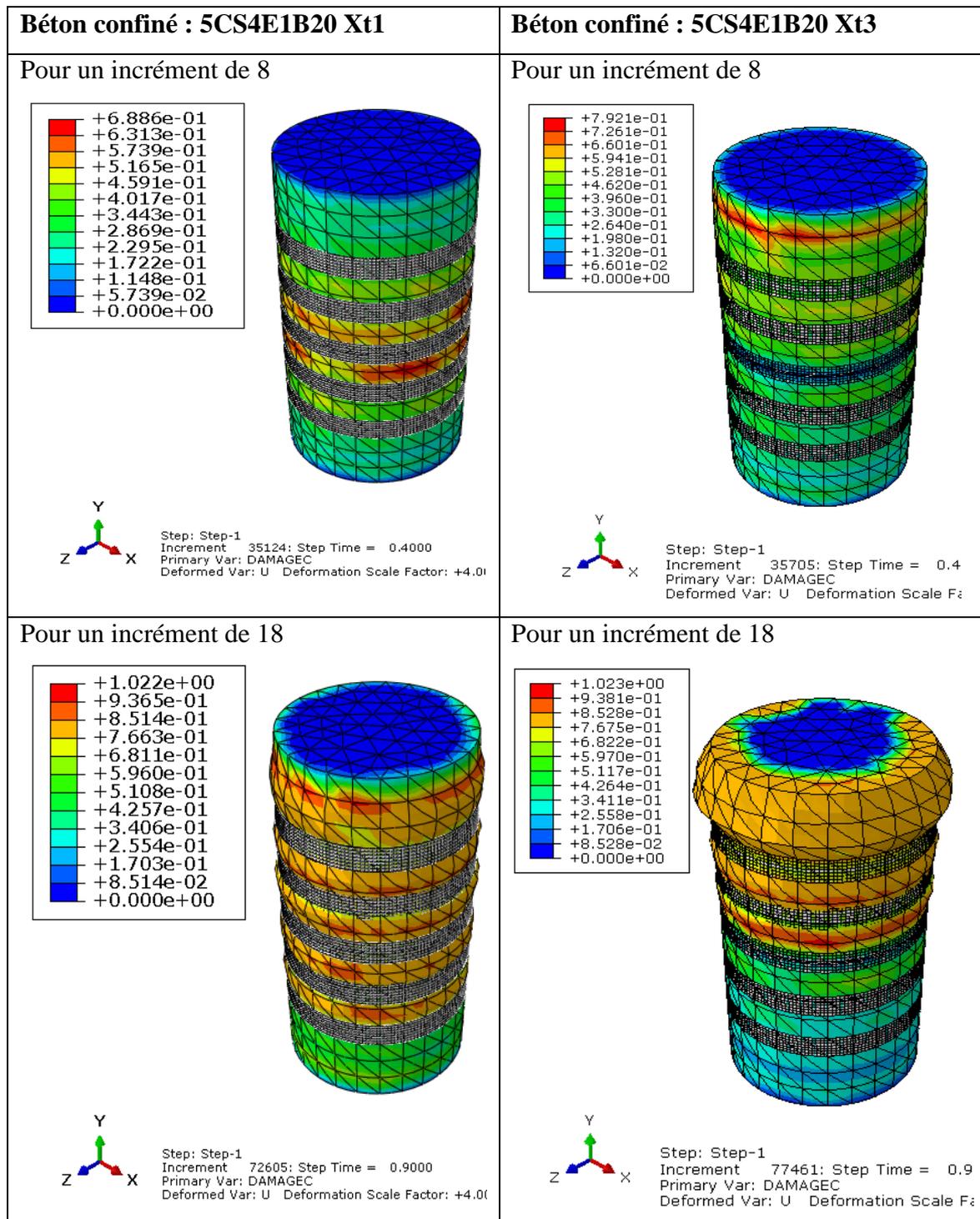


Figure IV.25. Evolution des dommages pour le cylindre : variation de résistance à la traction des bandes dans la direction des fibres

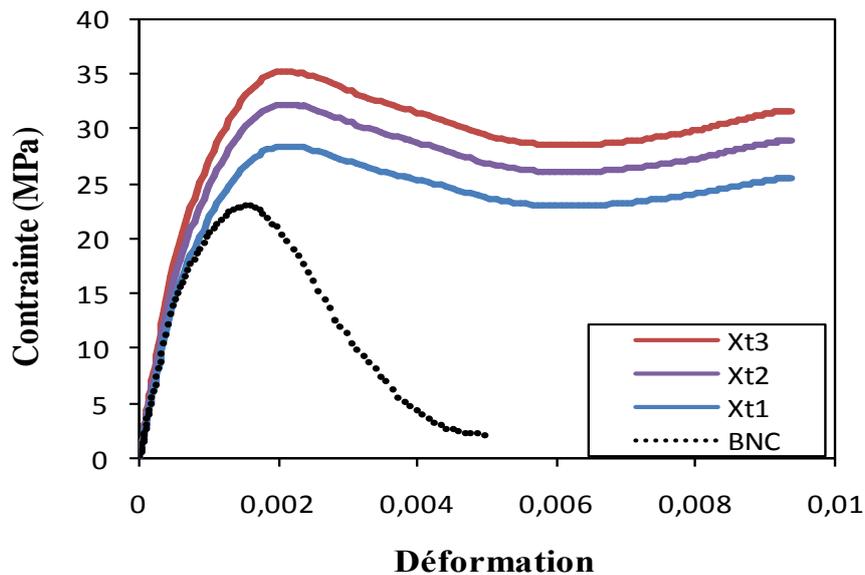
IV.4.3.3. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )

Figure IV. 26. Confrontations des courbes ( $\sigma-\epsilon$ ) : Résistance à la traction longitudinale **FRP**

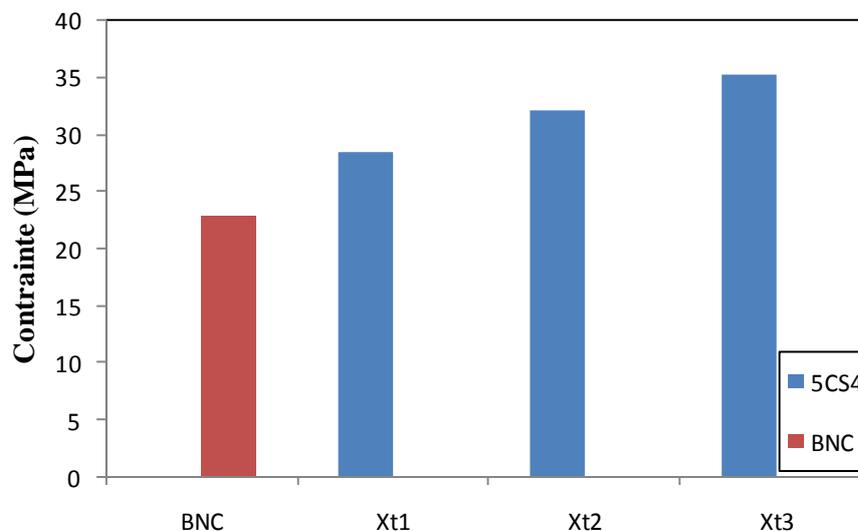


Figure IV.27. Histogramme des contraintes du béton confiné avec 5 cerces: variation de la résistance à la traction du **FRP** longitudinal

L'analyse de ces résultats nous renseigne qu'avec l'augmentation de la résistance à la traction longitudinale du **FRP** ; l'apport du confinement ainsi que la résistance à la compression augmente, cependant le comportement du cylindre devient plus ductile. Le spécimen 5CS4Xt1 présente une résistance de 28,45 MPa soit un apport de 25,38% ; Le 5CS4Xt3 a une résistance de 35,28 MPa et présente un apport en résistance de l'ordre de 55,48%.

## IV.4.4. Résistance à la traction des bandes dans la direction transversales (Yt)

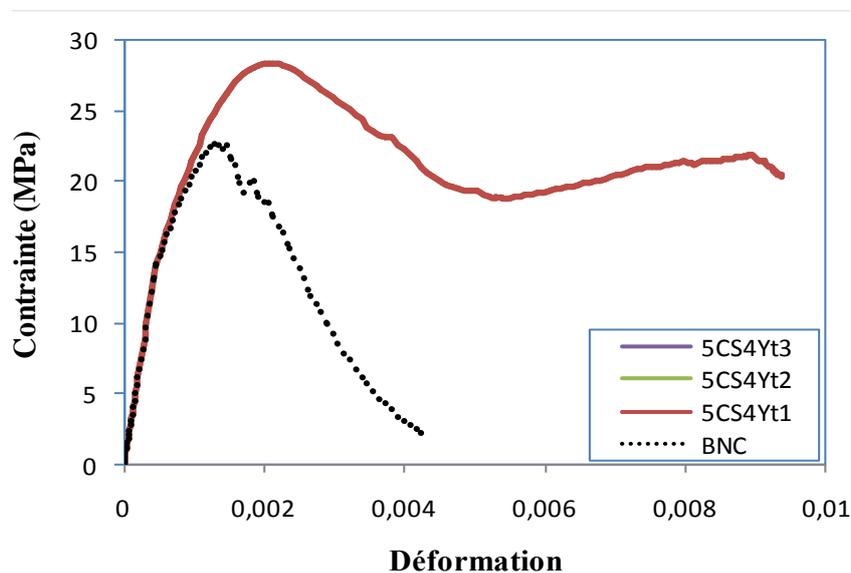
IV.4.4.1. Confrontation des courbes ( $\sigma - \epsilon$ )

Figure IV.28. Confrontations des courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) : Résistance transversale des FRP

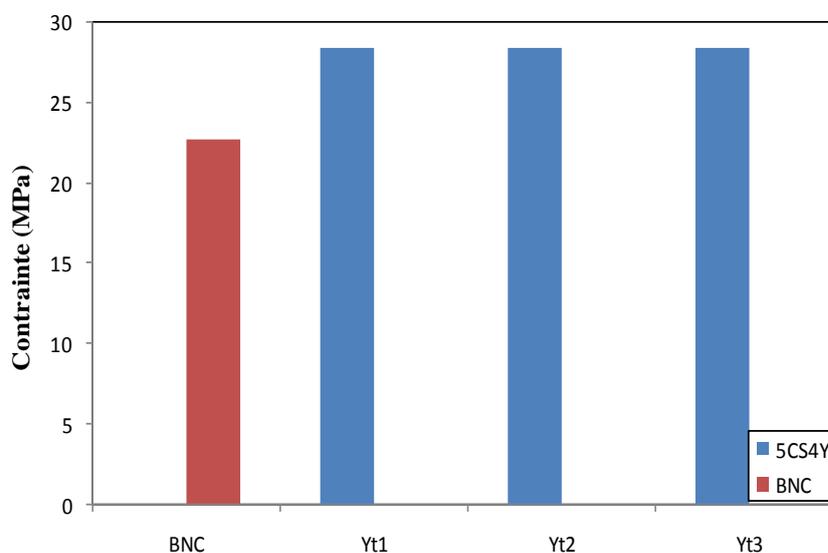


Figure IV.29. Histogramme des contraintes : Variation Résistance transversale des FRP

La confrontation des résultats numériques montre que la variation de la résistance à la traction du **FRP** dans la direction transversale (Yt) n'influe pas sur le modèle vu que les trois variantes de l'étude présentent une même résistance à la compression qui est de l'ordre de 28,38 MPa.

**Tableau IV.2 :** Tableau représentatif des différents apports en résistance dû à l'Influence des caractéristiques mécaniques des bandes **FRP**

Spécimens	Contrainte au pic (MPa)		Contrainte de rupture (MPa)		Apport en résistance (%)
	Non confiné	confiné	Non confiné	Confiné	
5CML1	22,69	27,95	2,01	24,30	23,18
5CML2		28,45		25,46	25,38
5CML3		28,94		26,54	27,54
5CXt1	22,69	28,45	2,01	25,46	25,38
5CXt2		32,25		28,86	42,13
5CXt3		35,28		31,57	55,48

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats prédits par la simulation numérique permettant de déduire les paramètres influençant la capacité portante, ainsi que le passage d'un mode de rupture fragile à un mode de rupture ductile des cylindres confinés partiellement avec collage de bandes **FRP**.

L'analyse des différents résultats montre que le confinement par les matériaux composites engendre un apport considérable en ductilité. Les évolutions des champs de contrainte et de déformation dépendent des paramètres du matériau varié et la confrontation des résultats obtenus par les différentes théories considérées a permis de valider le modèle proposé. Les résultats ont montré que les spécimens étudiées présentent des caractéristiques mécaniques améliorées et ceci grâce à la conjugaison des performances des matériaux composites.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations de service.

Ce travail de recherche mené en utilisant le code de calcul ABAQUS, représente une contribution à l'étude de la réhabilitation, par confinement avec matériaux composites des colonnes en béton. Les objectifs de cette étude étaient d'optimiser les paramètres influençant sur le comportement et la performance des éprouvettes confinées avec des matériaux composites « PRF » à savoir : largeur, épaisseur, résistance en traction et module de rigidité des bandes composites ainsi que leur espacement.

Les différents résultats obtenus dans ce travail de recherche, en termes de variation de la contrainte en fonction de la déformation axiale selon les différentes configurations et la visualisation des cartographies d'évolution des contraintes et des endommagements nous ont permis de formuler les conclusions suivantes :

- ❖ Le confinement par collage de matériaux composites permet d'améliorer considérablement la résistance et la ductilité du béton sous chargement de compression.
- ❖ La variation de l'espacement des bandes composites permet d'améliorer la résistance du béton confiné, sans modifier son comportement mécanique.
- ❖ L'augmentation de la largeur des cerces permet d'augmenter le taux de confinement, ce qui conduit à un passage d'un comportement (fragile) adoucissant vers comportement ductile du béton confiné, avec une amélioration très nette de la contrainte de rupture.
- ❖ La variation des espacements et des épaisseurs qui permet de tenir compte des empilements des bandes permet d'améliorer la résistance et la ductilité du béton confiné, sans modifier son comportement mécanique.
- ❖ La variation du module d'Young longitudinal et transversal n'a aucun effet sur le comportement des matériaux composites.
- ❖ La variation de la résistance à la traction longitudinale des FRP qui figure dans tous les modèles de confinement présente un effet remarquable sur la résistance, ductilité et comportement du béton confiné.

Les différents résultats obtenus sont très encourageants, toutefois, des études complémentaires devraient être réalisées pour confirmer et améliorer ces résultats. Par conséquent, pour la suite du travail, nous proposons les perspectives suivantes :

- ❖ Prendre en compte l'élanement géométrique des éléments Longueur / Diamètre ;
- ❖ Tenir compte de la résistance à la compression du béton non confiné ;
- ❖ Utiliser d'autres formes géométriques des éléments confinés (sections carrées) ;
- ❖ Intégrer dans les simulations numériques des modèles de glissement, pour tenir compte de l'adhérence entre le béton et les composites ;
- ❖ Conduire des essais mécaniques pour pouvoir valider par ses propres résultats les simulations.

RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Jean-Pierre Adam** ; « La Construction romaine. Matériaux et techniques ». Sixième édition. Grands manuels picards, 2011.
- [2] **Adam et Neville .M** ; « Propriétés des bétons ». Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [3] **E. Freyssinet**, « Progrès pratiques des méthodes de traitement mécanique des bétons », Deuxième Congrès de l'Association internationale des ponts et charpentes, octobre 1936.
- [4] **Olivier Gagliardini**, « Cours de Béton Armé IUP GCI3 option OS», IUP Génie Civil et Infrastructures, UJF-Grenoble, Année 2004/05.
- [5] **Moussaoui Boualem**, « apport du confinement du béton sur le comportement des éléments de structure au flambement », Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, p66, juin 2011
- [6] **Oubraham C**, « simulation du comportement instantané et différé d'une zone fléchie en béton armé » ; Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] **Sargin. M** « stress-strain relationships for concrete and the analysis on the Structural concrete section», Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1971.
- [8] **Mazars J.** «Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non-linéaire et à la rupture du béton de structure», Thèse de docteur d'état Université Pierre et Marie Curie (paris VI), France, 1984.
- [9] **Berthelot, J.M.**, Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures. Livre, éditions : Lavoisier, 2005.
- [10] **Chatain, M** Matériaux composites, « présentation générale», AM 5000, Technique de l'Ingénieur, traité plastiques et composites, Vol.AM 6, 2001.
- [11] **Madouni Lyliya** ; « simulation numérique des éléments en bétons confinés par des grilles métalliques» Mémoire de Master ; p 26 Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [12] **Raphaëlle Sadone** ; « Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement », thèse de Doctorat, 12 décembre 2011.
- [13] **Charewicz A. et Daniel I.M.** « Damage Mechanisms and accumulation in graphite epoxy laminates ». Composite Materials fatigue and fracture», ASTM STP 907, pp. 274-297, 1986.
- [14] **Abdelmadjid Si Salem** ; « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

- [15] **Mayes JS, Hansen AC.** « Composite laminate failure analysis using multi continuum theory», *Comp Sci Technol*, 64, pp 379–394, 2004.
- [16] **Carolin, A.** « Carbone fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements». Doctorate Thesis, Lulea University of technology, 178p, 2003.
- [17] **Jiang T, Teng JG.** Analysis-oriented stress–strain models for FRP-confined concrete. *Engineering Structures* ; 2968–86, 2007.
- [18] **K. Saidani** « Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine » Thèse de Doctorat, L’université de Tizi Ouzou, 2013.
- [19] **Ait Taleb Souad** «Simulation numérique d’un cylindre en béton confiné hélicoïdalement par des bande en FRP ». Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, juillet 2012.
- [20] **Mufti; A.A; Erki; M.A. and Jaeger; L.G.** «Advanced Composite Materials with Application to Bridges », Canadian society for civil engineering, 297 p, 1991.
- [21] **El Houssain Rochdi** « contribution a l’analyse du comportement mécanique de Dalles en béton armé renforcées par matériaux composites» Thèse de Doctorat, université Claude Bernard - Lyon 1, 2004.
- [22] **Rafic Younes** « Matériaux Composites » polycopie de cours Master Mécanique, Lebanese University · Faculty of Engineering , 2010.
- [23] **Houhou, N.** « Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique». Thèse de Doctorat, Structures et Matériaux“ de l’Université Paris-Est, 2012.
- [24] **Foo, S., Naumoski, N. ET Saatciolou, M.** «Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d’atténuation des risques pour les immeubles canadiens», Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civil, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux, N° du Catalogue : D 82-73/2002F-IN ; 2001.
- [25] **Sheikh, S.A. et Uzumeri, S.M.** «Strength and ductility of tied concrete columns», *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102, 1980.
- [26] **Richart, F.E., Brandtzaeg, A. Et Brown, R.L.** «A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses», University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Bulletin no 185, 104 p.1928.
- [27] **Young Q., Qin Q, Zheng D.** «analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concrete hybrid structure». *Composite structure*, 57221-226, 2002.

- [28] **Chafika Ali Ahmed**, «Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation», Thèse de Doctorat, Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [29] **Mazzucco G., Salomoni V.A , Majorana C.E, Pellegrino C, Ceccato C.** «Numerical investigation of concrete columns with external FRP jackets subjected to axial loads». *Construction and Building Materials* 111 590–599. 2016.
- [30] **Considere A.** « Experimental researches on reinforced concrete». Translated and Arranged by Leon S. Moisseiff, New York, McGraw. 1903.
- [31] **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.
- [32] **SAAFI, M.; TOUTANJI, A. H.; and Li, Z.;** « Behaviour of Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Polymer Tubes», *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, Jul.-Aug., 500-509 pp, 1999.
- [33] **FAM, A. Z., ET RIZKALLA, S. H.,** « Behavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes» *ACI structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp 280-289; 2001.
- [34] **Youssef, M.N., Feng M.Q., et Mosallam A.S.** « stress-strain model for concrete confined by FRP composites» *Composites: Part B*, Vol. 38, pp. 614-628. 2007.
- [35] **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.
- [36] **Thong M. Pham, Le V. Doan, Muhammad N.S. Hadi.** «Strengthening square reinforced concrete columns by circularisation and FRP confinement. *Construction and Building Materials*». Volume 49, December 2013, Pages 490–499.
- [37] **Zain Saeed H, Qaiseruz Zaman 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.
- [38] **F.J. De Caso y Basalo et al** « Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement » *Construction and Building Materials* 32 55–65; 2012.
- [39] **HIBBIT, Karlsson & Sorensen, INC.** ABAQUS documentation version 6.14 ; 2014
- [40] **ABAQUS**, Theory Manual, version 6.12 et 6.14, Karlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ; 2013.

[41] **J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller and E. Onate** « A plastic-damage model for concrete» International Journal Solids Structures 25(3), 299-326; 1989.

[42] **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.

[43] **Lemaitre J., Chaboche J. L.** Mécanique des matériaux solides, Paris: Dunod, 544p. 2001

[44] **F. TAOUCHE, K. AIT TAHAR., HANNACHI N E.** « Behavior of reinforced concrete beams by confined oblique rods» Applied Mechanics and Materials Vol. 146 pp 27-38, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1662-9795; 2012.

[45] **Vizuzte, J.M.** « Techniques et systèmes de renfort des structures en béton», Proceedings of the Third ST Workshop, Session IV: Technology 2, Chamonix, 25-28 January 2000, edited by Laeger, H. and Prodon, S., pp.151-158. 2000.

[46] **Tsai. W. HA S.S., Miyano Y., Tay T.E,** «Strength & Life of Composites», edition Aero & Astro, Stanford, USA, 2009.

[47] **H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and M. W.** «LiStrength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps ACI STRUCTURAL», JOURNALV. 91, No. 4 July-August 1994.

[48] **G. Wu et al.** «Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites Construction and Building Materials »20 134–148, 2006.

## **RESUME**

L'utilisation des matériaux composites dans le domaine de génie civil a connu un grand progrès puisqu'ils disposent d'un rapport performances/écologie important par rapport aux matériaux traditionnels, étant de nature plus légère, ces matériaux innovants sont largement utilisés dans le confinement des colonnes en béton pour répondre aux besoins d'amélioration de leurs performances mécaniques. 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 est en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques des composites.

Par conséquent, le présent travail consiste à optimiser et rechercher les paramètres les plus adéquats des bandes composites FRP, permettant d'améliorer la résistance du béton confiné avec le même taux de confinement. A cet effet, une simulation numérique à base des éléments finis est menée à l'aide du logiciel ABAQUS sur des cylindres en béton de dimensions normalisées partiellement confinées par collage externe de bandes composites chargées en compression. Les matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques à savoir : le modèle « *Concrete Damaged Plasticity* » qui permet de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du béton en compression et en traction, couplé avec l'endommagement pour représenter l'évolution des fissures, et un modèle élastique orthotrope pour prédire la réponse des composites.

L'approche proposée est validée par des modèles expérimentaux disponibles dans la littérature. Enfin, les résultats numériques obtenus en termes d'évolution des contraintes et des variables d'endommagement montrent d'une part l'intérêt des composites FRP sur la réponse globale et locale des éléments confinés, et d'autre part des gains remarquables en termes de capacité portante qui sont quantifiés par la confrontation des courbes contrainte-déformation.

**Mots clés :** Optimisation, Confinement, bande FRP, Performances, Simulation numérique, Confrontation.

## **ABSTRACT**

The use of composite materials in civil engineering field has made an effective progress, since they have an attractive performance to ecology ratio compared to traditional ones. Due to their reduced own weight, these innovative materials are widely used in concrete columns confinement in order to improve mechanical performances. The several techniques and models of confinement by bonded FRP composites available in the scientific literature have confirmed that the lateral confinement pressure is related to the geometric and mechanical characteristics of composites.

In this respect, the present work aims to optimize and to assess the most adequate parameters of the FRP composite stirrups, which allow to improve the ultimate strength of confined concrete with the same confinement rate. Therefore, finite element simulation using ABAQUS software is carried out on standard concrete cylinders partially confined by externally bonding FRP stirrups under compressive loading. The constituent materials are modeled according to numerical models namely: Concrete Damaged Plasticity model which allows to take into account the nonlinear behavior of compressive and strained concrete, coupled with damages to represent the cracks evolution, also, an orthotropic elastic model to predict FRP behavior.

The proposed approach is validated by experimental models available in the literature. Finally, the predicted numerical results in terms of stresses and damage variables highlight in one hand the interest of FRP composites on the global and local response of confined elements, and in other hand, the gains in terms of bearing capacity which are quantified by the confrontation of stress-strain curves.

**Keywords:** Optimization, Confinement, FRP stirrups, Performances, Numerical simulation, Confrontation.