

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou**



Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie civil



## **Mémoire de Fin d'Etude**

Master Académique en Génie civil

Spécialité : Structure

### **Thème**

---

*Simulation numérique de  
cylindres en béton, confinés avec  
un tissu à base de fibres de verre.*

---

**Réalisé par :**  
M.FAREZ Mohamed

**Proposé et dirigé par :**

- Mme. KHELOUI Fatma
- M. ALMANSBA Madjid
- M.DEHMOUS Hocine

**Membres de Jury :**

- |                    |       |           |
|--------------------|-------|-----------|
| • M. BOUKAIS Saïd  | UMMTO | Président |
| • M. KHELIL Nassim | UMMTO | Examineur |

*Promotion 2021-2022*

# REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie le bon Dieu tout puissant qui m'a donné force, courage et patience pour élaborer, préparer, et présenter ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma parfaite considération à mon promoteur, **M. DEHMOUS Hocine** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, sa modestie, sa sympathie, et son soutien durant toute la période de réalisation de mon travail de recherche et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.

Je remercie vivement **M. ALMANSBA Madjid** et **M. OULD-OUALI Mohand** et les doctorants **M. BOUDEDJA Amar**, **M. BENCHERIF Mokhtar** et **M. HANNOU Aghilas** d'avoir consacré énormément de leurs temps pour répondre à mes interrogations et me permettant ainsi de résoudre les problèmes rencontrés dans ABAQUS, et je les remercie aussi pour leurs conseils, leurs gentillesse et leur encouragement.

Je tiens à remercier **Mme. KHELOUI Fatma** et le docteur **M. BENCHABEN Tarik**, et le doctorant **M. DJADOUN Toufik** pour leurs aides, leurs orientations et leurs conseils.

Je tiens à remercier mon binôme **Melle. CHERMAK Sara**, qui m'a beaucoup aidé dans ce travail mais malheureusement elle n'a pas pu continuer avec nous.

Je tiens à remercier mes amis **M. AMARA Yanis**, **M. HALICHE Malek**, **Melle. DEHBI Fouzia**, **Melle. HAMLIL Dyhia**, pour leurs aides, leurs soutiens et pour tous les moments passés ensemble tout le long de notre parcours universitaire.

Je remercie aussi **M. BOUKAIS Saïd** et **M. KHELIL Nassim** pour leur soutien moral, conseils et orientations forts appréciés.

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

# *Dédicaces*

JE DEDIE CE TRAVAIL A :

A MES CHERS PARENTS

A MON FRERE

A MES SŒURS

A LA MEMOIRE DE MON DEFUNT GRAND

PERE

ET A TOUTE MA FAMILLE.

# Sommaire

<b>Remerciements.....</b>	<b>I</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>II</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>III</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste d’abréviations.....</b>	<b>VII</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I :

### Matériaux composites

INTRODUCTION .....	3
I.1. Définition d'un matériau composite .....	3
I.1.2. Pourquoi les utilisés ? .....	4
I.1.3. Pour quelle destination ? .....	4
I.2. Avantages et inconvénients.....	4
I.2.1. Intérêt des matériaux composites.....	4
I. 2.2. Inconvénients des matériaux composites.....	5
I.3. Différents types de matériaux composites .....	5
I.3.1. Matériaux composites de grande diffusion .....	5
I.3.2 Matériaux composites de hautes performances .....	5
I.4.Classification des matériaux composites .....	6
I.4.1. Classification suivant la forme des constituants .....	6
I.4.2. Classification suivant la nature des constituants.....	6

I.5. Constituants des Matériaux Composites .....	8
I.5.1. Les renforts .....	8
I.5.1.1. Différents types de renfort .....	8
I.5.1.2. Différentes nature de renfort .....	10
I.5.2. La matrice .....	11
I.5.2.1. Les composites à matrice organique .....	12
I.6. Architecture des Matériaux Composites .....	12
I.6.1. Monocouche .....	12
I.6.2. Stratifiés .....	13
I.6.3. Sandwichs .....	14
I.7. Mise en œuvre des matériaux composites .....	14
I.7.1. Moulage au contact .....	15
I.7.2. Moulage par projection simultanée .....	15
I.7.2. Moulage sous vide .....	16
I.8. Caractéristiques des matériaux composites .....	16
I.9 Domaines d'application .....	17
I.10. Conclusion .....	18

## **Chapitre II :**

### **Confinement du béton**

INTRODUCTION .....	19
II. La technique de renforcement par matériau composite .....	19
II.1. Renforcement des éléments structuraux .....	19
II.1.a. Poteaux : cas de confinement .....	19
II.1.b. Poutres .....	20
II.2. Méthode de confinement .....	21
II.2.a. Stratification directe .....	22
II.2.b. Enroulement filamentaire .....	22

II.2.c. Chemisage par coquille préfabriquée.....	23
II.3. Règlementation parasismique et ductilité.....	24
II.4 Mode de rupture du béton confiné.....	24
II.5. Efficacité du confinement par composite de poteaux en béton armé .....	28
II.6. Comportement du béton non confiné ou confiné .....	29
II.6.a. Comportement uni-axial du béton non confiné en traction et en compression .....	30
II.6.b. Mode de rupture dans un béton confiné en compression uni-axiale .....	30
II.7. Revue de littérature sur quelques travaux antérieurs.....	31
II.8. Conclusion .....	35

## **Chapitre III :**

### **Simulation numérique**

III. Introduction .....	36
III.1 Présentation générale d'ABAQUS .....	36
III.2 Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS .....	37
III.3 Rappel des actions pour créer un modèle Abaqus .....	38
III.4 Modélisation par éléments finis Abaqus CAE .....	40
III.4.1 Dimension et géométrie .....	40
III.4.2 Propriétés et assemblage .....	42
III.4.3 Maillage et modèle élément fini .....	44
III.4.4 Gestion du contact .....	46
III.4.5 Chargement et conditions aux limites .....	48
III.4.6 Gestion des résultats : STEP et JOB .....	48
III.5 Modélisation du comportement des matériaux .....	49
III.5.1 Modèle élasto-plastique endommageable pour le béton .....	49
III.5.1.1 comportement à la compression .....	50

III.5.1.2 Comportement en traction .....	51
III.5.1.3 Comportement cyclique uni-axial .....	52
III.5.2 Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites .....	54
III.5.3 Critère de rupture des composites .....	55
III.5.4 Paramètres des modèles .....	56
III.5.5 Essai de traction du tissu recyclé.....	56
III.6 Les variantes pour le confinement circulaire .....	58
III.7 Conclusion .....	59

## **CHAPITRE IV**

### **RESULTATS & DISCUSSIONS**

IV. Introduction .....	60
IV.1 Validation de l'analyse numérique .....	60
IV.1.1 Confrontation des contraintes en compression .....	60
IV.1.2 Comportement global des cylindres en compression.....	61
IV.2. Notion de Taux de confinement.....	62
IV.3 Résultats du confinement avec cerces .....	62
IV.4. Résultats avec le confinement total et hélicoïdale .....	64
IV.5. Comparaison avec le tissu en polypropylène recyclé .....	67
IV.5.a. Confinement avec cerces : L25 ES 10 .....	68
IV.5.b. Confinement avec cerces : L30 ES 10 .....	69
IV.5.c. Confinement avec cerces : L40 ES 10 .....	71
IV.5.d. Confinement avec cerces : L50 ES 10 .....	72
IV.5.e. Confinement total et hélicoïdale .....	74

IV.6. Optimisation de l'emplacement des bandes .....	76
IV.7. Conclusion .....	81
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>82</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

## Liste des figures

Figure 1.1. Matériau composite.....	4
Figure I.2. Composites souple avec matrice polymère .....	7
Figure I.3. Composites rigides. ....	7
Figure I.4. Composites rigides avec matrice minérale .....	8
Figure I.5. Différentes formes des renforts fibres de verre .....	9
Figure I.6 : Principaux matériaux de renforts.....	10
Figure I.7. Matériau composite Monocouche .....	13
Figure I.8. Matériau composite Stratifiés .....	13
Figure I.9. Matériau composite Sandwichs .....	14
Figure I.10. Procédé de moulage par contact .....	15
Figure I.11. Moulage par projection simultanée. ....	15
Figure 1.12. Moulage sous vide. ....	16
FigureII.1. Poteau circulaire en béton armé confiné par matériaux composites .....	20
FigureII.2. Renforcement d'une dalle par des lamelles en composite PRF, .....	21
FigureII.3. Confinement des poteaux par stratification directe. ....	23
Figure II.4. Confinement des poteaux par enroulement filamentaire .....	23
Figure II.5. Confinement des poteaux par coquille PRF préfabriquée.....	24
Figure II.6. Deux configurations différentes de renforts de voiles .....	24
Figure II.7. Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP. ....	25
Figure II.8. Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée durant le processus de chargement. ....	25
Figure II.9. Mode de rupture d'un cylindre enveloppé par des fibres de carbone. ....	26
Figure II.10 Concept de béton confiné en acier équivalent. ....	26
Figure II.11. Échec typique des spécimens. ....	27

Figure II.12. Confinement partiel hélicoïdal avec GFRP. ....	27
Figure II.13. Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal. ....	28
Figure II.14. Réponse d'éprouvettes en béton non confinée soumise à des chargements de traction uni-axiale (a) et compression uni-axiale (b).....	30
Figure II.15. Photo de la décohésion du béton confiné en fin d'essai.....	31
Figure III.1. Présentation de l'interface ABAQUS. ....	37
Figure III.2. La géométrie du cylindre. ....	41
Figure III.3. La géométrie des disques .....	41
Figure III.4 La géométrie des cerces .....	41
Figure III.5: La géométrie de l'hélice .....	41
Figure III.6: La géométrie de la coque .....	42
Figure III.7: Béton témoin (non confiné). ....	43
Figure III.8: Béton avec ajouts (15PV10SV). ....	43
Figure III.10 : Confinement Partiel Hélicoïdal. ....	43
Figure III.9 : Confinement Partiel Circulaire. ....	43
Figure III.11 : Confinement Totale .....	44
Figure III.12 : Maillages adoptés .....	45
Figure III.13: Courbes contrainte-déformation pour les 5 configurations de maillage.....	46
Figure III.14 : Modélisation du contact : Béton-Disque. ....	36
Figure III.15 : Modélisation du contact : Béton-Composite. ....	36
Figure III.16: Application des conditions aux limites.....	47
Figure III.17: Application du chargement.....	48
Figure III.18 : Le module STEP.....	49
Figure III.19 : Le module JOB. ....	49
Figure III.20 : Réponse du modèle à la compression simple. ....	50

Figure III.21 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale.....	51
Figure III.22 : Cycle uni-axial de chargement (traction-compression-traction). .....	53
Figure III.23: Pli d'un matériau composite orthotrope. ....	55
Figure IV.24 : Courbe de la résistance de traction du tissu recyclé .....	57
Figure IV.1: Histogramme de confrontation des résultats expérimentaux, numériques.....	60
Figure IV.2 : Contrainte-déformation béton témoin et béton ajout.....	61
Figure IV. 3: courbe force-déplacement de la variation de la largeur des cerces. ....	63
Figure IV.4 : Histogramme des contraintes. ....	64
Figure IV.5: Evolution de la distribution des contraintes de Von Mises .....	65
Figure IV.6 : Courbe comparative contraintes - déformations.....	66
Figure IV.7 : Histogramme des contraintes .....	66
Figure IV.8 Evolution de la contrainte de Mises – déplacement max – le degré d'endommagement.....	67
Figure IV.9: Courbe comparative contraintes – déformations.....	68
Figure IV.10 : Histogramme des contraintes. ....	68
Figure IV.11 Evolution de la contrainte.....	69
Figure IV.12 Figure IV.12 : Courbe comparative contraintes - déformations.....	69
Figure IV.13 : Histogramme des contraintes. ....	70
Figure IV.14 Evolution de la contrainte.....	70
Figure IV.15 : Courbe comparative contraintes – déformations.....	71
Figure IV.16 : Histogramme des contraintes. ....	71
Figure IV.17 Evolution de la contrainte.....	72
Figure IV.18: Courbe comparative contraintes – déformations.....	72
Figure IV.19: Histogramme des contraintes. ....	73
Figure IV.20 Evolution de la contrainte.....	73

Figure IV.21: Courbe comparative contraintes - déformations.....	74
Figure IV.22: Histogramme des contraintes. ....	75
Figure IV.23: Evolution des contraintes .....	76
Figure IV.24: Courbe comparative contraintes - déformations.....	77
Figure IV.25: Histogramme des contraintes. ....	78
Figure IV.26: Évolution des contraintes .....	79
Figure IV.27: Évolution des dommages.....	80

## Liste des tableaux

Tableau I.1 quelques compositions de verre E, D et R .....	11
Tableau I.2 avantages et inconvénient de la fibre du verre E, D et R .....	11
Tableau III.1 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton. ....	54
Tableau III.2 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton. ....	56
Tableau III.3 : Caractéristiques de l'essai .....	56
Tableau III.4 : Paramètres du modèle numérique des composites PP .....	57
Tableau III.5: Paramètres du modèle numérique des composites en fibres de verre. ....	57
Tableau III.6: Configuration pour les variations des cerces.....	59
Tableau IV.1 : Valeur du taux de confinement pour chaque configuration du renfort. ....	62
Tableau IV.2 : Configurations de confinement considérées .....	77

## Liste d'abréviations

- fcj** La résistance à la compression du béton à j jours.
- fc28** La résistance à la compression du béton à 28 jours
- ftj** La résistance caractéristique du béton à la traction a j jours.
- fcc** Résistance à la compression du béton confiné.
- fc0** Résistance à la compression du béton non confiné.
- fl** Pression de confinement latérale.
- εcc** Déformation axiale maximale du béton confiné.
- εc0** Déformation axiale maximale du béton non confiné.
- E1, E2** Modules d'élasticité du tissu
- ν12** Coefficients de Poisson du tissu
- G12** Module de cisaillement du tissu de verre.
- E** Module de cisaillement du tissu de verre.
- Ψ** Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
- af** Rapport entre contrainte bi-axiale/uni-axiale du béton.
- dt** Variables d'endommagement de traction.
- dc** Variables d'endommagement en compression.
- fc** Force de compression du béton.
- FRP** Polymère Renforcé de Fibres.
- GFRP** Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre).
- PRFV** Polymère Renforcé de Fibres de verre.
- PRFC** Polymère Renforcé de Fibres de carbone.
- PRFA** Polymère Renforcé de Fibres d'Aramide.
- SMC** (sheet molding compound) est utilisé pour le moulage en compression.
- RTM** moulage par transfert de résine.
- CMC** matériau composite a matrice céramique.

## *Introduction générale*

L'architecture sous toutes ses formes, qu'elle soit liée à l'habitat, à l'industrie, aux structures collectives ou aux infrastructures de transport, représente une source majeure de richesse et une source vitale de bien-être des populations pour un pays. Dans notre pays, en l'occurrence l'Algérie, la grande part des infrastructures sont un héritage colonial.

Dans ce contexte, des efforts de recherche et de développement dans le secteur de la construction se sont concentrés depuis de nombreuses années sur le maintien de niveaux de service acceptables et la sécurité des ouvrages. Les recherches s'articulent autour de plusieurs questions telles que la surveillance, l'auscultation non destructive, l'évaluation structurelle, le recalcul, la réparation et le renforcement. Parmi les nombreuses techniques de réparation existantes, le renforcement d'éléments structuraux par collage de matériaux composites (ou Polymères Renforcés de Fibres -PRF) trouve depuis plus de 30 ans un intérêt grandissant auprès des maîtres d'ouvrage. Ces techniques modernes et rapides à mettre en œuvre profitent de nombreux avantages des matériaux composites, dont l'excellent rapport poids/résistance et l'insensibilité à la corrosion. Appliqués sur les structures en béton armé, ces matériaux agissent comme des armatures externes et permettent de retrouver ou renforcer la charge portante de l'élément réparé.

Notre recherche s'inscrit dans le cadre du renforcement d'un béton à base de déchet de verre, confiné par un tissu composite « Fibre de verre », on se propose d'étudier différents types de confinement de notre spécimen d'étude tels que : Confinement total, confinement partiel en Cerces et confinement partiel Hélicoïdal.

Pour répondre à la problématique posée, nous avons subdivisé le mémoire en deux grandes parties :

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

Le premier chapitre présente les Généralités sur les matériaux composites : dans ce chapitre nous avons défini les matériaux composites, les différents types de matériaux et leurs domaines d'applications.

Le deuxième chapitre « confinement du béton » concerne les techniques de renforcement principalement par confinement et réparation des structures en béton armé à l'aide des matériaux composites.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à la modélisation numérique du comportement mécanique du matériau confectionné. Elle comporte deux chapitres :

## **Introduction générale**

---

Le troisième chapitre « modélisation numérique » 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 « Résultats et discussions » présente les résultats de la simulation numérique sous forme de cartographies, courbes contraintes-déformations et histogrammes qui décrivent le comportement du béton, à base de déchet de verre, confiné et non confiné (de référence). Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce confinement en termes de résistance.

Pour finir, dans la conclusion générale nous avons résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en évidence les points essentiels de cette recherche.

## **Résumé**

Pour améliorer les performances de résistance du béton à base de déchets de verre, un renforcement par des matériaux composites est proposé. La présence de ces matériaux permet d'améliorer la rigidité, s'opposer au développement des déformations et diminuer la vitesse de propagation des fissures.

L'utilisation des matériaux composites dans le confinement des colonnes en béton, pour répondre aux besoins d'amélioration des performances mécaniques, n'est pas nait d'aujourd'hui. Différentes techniques et modèles de confinement, par collage de ces matériaux composites, rapportés dans la littérature scientifique ont confirmés que cette technique génère une pression latérale modifiant ainsi le comportement mécanique du matériau.

L'objectif de cette démarche est d'étudier, par simulation numérique sous Abaqus, le comportement sous compression, des cylindres en béton à base des déchets de verre confinés par des matériaux composites. 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.

Trois types de confinement sont considérés tels que : confinement totale, confinement partiel circulaire et le confinement partiel hélicoïdale. Dans le cas du confinement circulaire, on s'intéressera à la variation des caractéristiques géométriques (largeur, épaisseur et espacement). Les résultats numériques obtenus en termes d'évolution des contraintes et des variables d'endommagement montrent une amélioration en matière de résistance et de ductilité des spécimens étudiés.

## **Mots clés :**

Béton, déchets de verre, confinement, matériaux composites, Analyse numérique.

## **Abstract**

To improve the strength performance of concrete made from waste glass, reinforcement with composite materials is proposed. The presences of these materials improve rigidity, oppose the development of deformations and reduce the propagation of cracks.

The use of composite materials in the containment of concrete columns, to meet the needs of improving mechanical performance, is not born today. Different confinement techniques and models, by bonding these composite materials, reported in the scientific literature have confirmed that this technique generates a lateral pressure thus modifying the mechanical behavior of the material.

The objective of this approach is to study, by numerical simulation with Abaqus, the behavior under compression of concrete cylinders based on glass waste confined by composite materials. The constituent materials are modeled according to numerical models, namely: the "Concrete Damaged Plasticity" model which take into account the disymmetry of the nonlinear behavior of the concrete in compression and in tension, coupled with the damage to represent the evolution of cracks, and an orthotropic elastic model to predict the response of composites.

Three types of confinement are considered such as: total confinement, circular partial confinement and helical partial confinement. In the case of circular confinement, we will be interested in the variation of the geometric characteristics (width, thickness and spacing). The numerical results obtained in terms of stress evolution and damage variables show an improvement in terms of resistance and ductility of the specimens studied.

## ***KEYWORDS***

Concrete, glass waste, confinement, composite materials, Numerical analysis.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

---

L'architecture sous toutes ses formes, qu'elle soit liée à l'habitat, à l'industrie, aux structures collectives ou aux infrastructures de transport, représente une source majeure de richesse et une source vitale de bien-être des populations pour un pays. Dans notre pays, en l'occurrence l'Algérie, la grande part des infrastructures sont un héritage colonial.

Dans ce contexte, des efforts de recherche et de développement dans le secteur de la construction se sont concentrés depuis de nombreuses années sur le maintien de niveaux de service acceptables et la sécurité des ouvrages. Les recherches s'articulent autour de plusieurs questions telles que la surveillance, l'auscultation non destructive, l'évaluation structurelle, le recalcul, la réparation et le renforcement. Parmi les nombreuses techniques de réparation existantes, le renforcement d'éléments structuraux par collage de matériaux composites (ou Polymères Renforcés de Fibres -PRF) trouve depuis plus de 30 ans un intérêt grandissant auprès des maîtres d'ouvrage. Ces techniques modernes et rapides à mettre en œuvre profitent des nombreux avantages des matériaux composites, dont l'excellent rapport poids/résistance et l'insensibilité à la corrosion. Appliqués sur les structures en béton armé, ces matériaux agissent comme des armatures externes et permettent de retrouver ou renforcer la charge portante de l'élément réparé.

Notre recherche s'inscrit dans le cadre du renforcement d'un béton à base de déchet de verre, confiné par un tissu composite »Fibre de verre », on se propose d'étudier différents type de confinement de notre spécimen d'étude tels que : Confinement total, confinement partiel en Cerces et confinement partiel Hélicoïdal

Pour répondre à la problématique posée, nous avons subdivisé le mémoire en deux grandes parties :

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

Le premier chapitre présente les Généralités sur les matériaux composites : dans ce chapitre nous avons défini les matériaux composites, les différents types de matériaux et leurs domaines d'applications.

Le deuxième chapitre « confinement du béton » concerne les techniques de renforcement principalement par confinement et réparation des structures en béton armé à l'aide des matériaux composites.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à la modélisation numérique du comportement mécanique du matériau confectionné. Elle comporte deux chapitres :

## **Introduction générale**

---

Le troisième chapitre « modélisation numérique » 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 « Résultats et discussions » présente les résultats de la simulation numérique sous forme de cartographies, courbes contraintes-déformations et histogrammes qui décrivent le comportement du béton, à base de déchet de verre, confiné et non confiné (de référence). Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce confinement en termes de résistance.

Pour finir, dans la conclusion générale nous avons résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en évidence les points essentiels de cette recherche.

# **Chapitre I**

## **Matériaux composites**

### Introduction

Les matériaux composites sont actuellement très utilisés dans l'industrie et particulièrement dans les domaines aérospatial et aéronautique, où les gains de masse sur structures sont stratégiques. Les matériaux composites sont également très utilisés dans le domaine du sport, du génie civil, du domaine naval, du secteur automobile, du domaine éolien,...

Devant les différents désordres que subit le matériau béton, les chercheurs se sont orientés vers l'utilisation de ces matériaux composites dans plusieurs domaines. L'objectif principal est l'optimisation de cette utilisation pour assurer le rôle pour lequel sont destinés.

Dans le passé, l'approche privilégiée pour résoudre les défaillances des constructions était la démolition et reconstruction, actuellement, une attention particulière est portée sur l'option de renforcement et réparation par ces matériaux composites.

L'association de nouveaux matériaux est le nouveau défi des constructeurs, pour garantir la pérennité des structures, tout en respectant les normes de sécurité et de performances mécaniques de plus en plus sévères.

### I.1. Définition d'un matériau composite [1]

Un matériau composite est un matériau qui est constitué d'au moins deux matériaux de nature différente. Les matériaux composites, appelés souvent composites, sont des matériaux solides et multiphasiques. Ils sont une combinaison de matériaux de composition ou de formes différentes et sont constitués d'au moins deux matériaux immiscibles aux caractéristiques complémentaires : **matrice ou résine + renfort**. La zone de contact entre chacun des matériaux constitue l'interface, dont la qualité est très influente sur les caractéristiques mécaniques et physiques du composite. Le choix des matériaux se fait en fonction des propriétés recherchées.

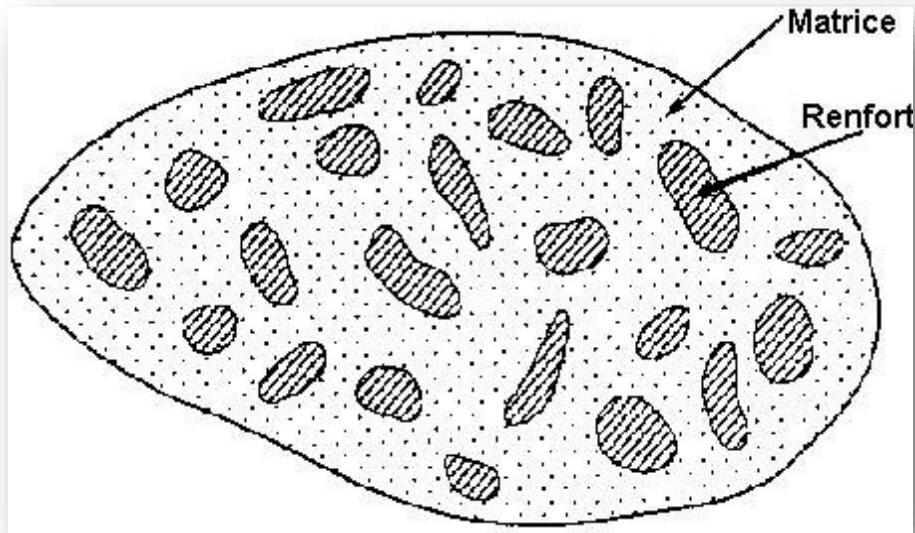


Figure 1.1 matériau composite.

### I.1.3. Pourquoi les utilisés?

Les matériaux composites proposent de nombreux avantages comparés aux matériaux dits traditionnels. Suivant les applications auxquelles ils sont destinés, leurs performances mécaniques et chimiques permettent de répondre à des contraintes techniques plus complexes. Ces matériaux légers peuvent intégrer la technologie et offrir une grande liberté de forme.

### I.1.4. Pour quelle destination?

Ces matériaux offrent de nombreuses perspectives pour l'avenir, dans le domaine du Génie Civil. Ils sont plus abordables, pour la plupart d'entre eux, avec des propriétés mécaniques très intéressantes qui sont donc plus adaptés aux structures. On les retrouve dans plusieurs secteurs : industries automobiles, aéronautiques, électricité, agricoles, navales et autres.

## I.2. Avantages et inconvénients

### I.2.1. Intérêt des matériaux composites [2]

L'utilisation des matériaux composites est générée par leurs principales caractéristiques :

- L'allègement des structures,
- La bonne tenue en fatigue,
- La résistance à la corrosion,
- L'insensibilité aux produits chimiques couramment utilisés dans la mécanique.
- Une meilleure tenue au feu,

Par contre, les matériaux composites vieillissent sous l'action des agents extérieurs tels que l'humidité et la chaleur, et ont une tenue moyenne aux chocs et aux impacts.

### I. 2.2. Inconvénients des matériaux composites

- Vieillessement sous l'action de l'eau et de la température
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques
- Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

### I.3. Différents types de matériaux composites [2]

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

#### I.3.1. Matériaux composites de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : l'optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

#### I.3.2 Matériaux composites de hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- Beaucoup de procédés encore manuels.
- MM, CMC.

### I.4. Classification des matériaux composites [3]

#### I.4.1. Classification suivant la forme des constituants

Suivant la forme des constituants, on distingue les matériaux composites à particules, dans lesquels le renfort se trouve sous forme de particules. Le deuxième type de matériaux est appelé matériaux composites à fibres, dans lesquels le renfort est sous forme de fibres. Ces dernières peuvent être longues ou courtes. L'orientation (disposition) des fibres permet de donner au matériau des propriétés mécaniques selon une direction privilégiée.

En fonction de la forme des constituants les composites sont classés En deux grandes Classes : Les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

- **Composite à particules** : le renfort se trouve sous forme de particules.
- **Composites à fibres** : le renfort se trouve sous forme de fibres, qui à leurs tours se divisent en : *Composites à fibres longues* (Représentés par un ensemble de fibres continues alignées et immergées dans une matrice qui assure leur cohésion, *Composites à fibres courtes* (Le renfort se trouve sous forme de fibres discontinues disposées de façon aléatoire non orientée et *Composites à renfort tissu* (tissu constitué de fils tissés dans deux directions perpendiculaires).

#### I.4.2. Classification suivant la nature des constituants

Suivant la nature de la matrice, on distingue les matériaux composites à matrice organique, à matrice métallique et à matrice minérale.

Les matériaux composites sont recherchés pour la construction dans deux domaines différents: les matériaux d'enveloppe (le second œuvre) et les matériaux structuraux (ossature) chargés de supporter les efforts pour la tenue du bâtiment et son exploitation. On les classe en matériaux composites « souples » d'une part et « rigides » d'autre part. Les composites souples peuvent aussi être des géotextiles ou des géo membranes, matériaux d'interfaces entre le bâtiment, l'habitat etc....

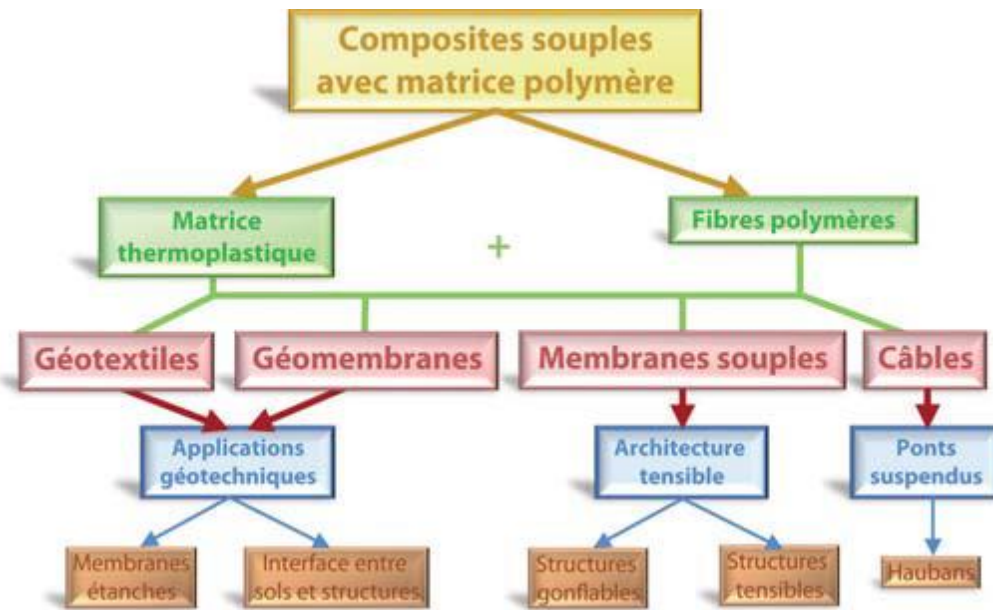


Figure I.2. Composites souple avec matrice polymère.

Les composites rigides sont des matrices thermodurcissables renforcées en général par des charges minérales. Ils permettent de réaliser des « bétons de polymères » ou des revêtements routiers comme les bétons de ville quand ils sont associés à des fibres telles que la fibre carbone-aramide. On réalise avec ces composites des structures que l'on appelle matériaux stratifiés, qui sont des empilements de couches et dont les applications sont la réalisation d'éléments d'enveloppe tels que les panneaux de façade.

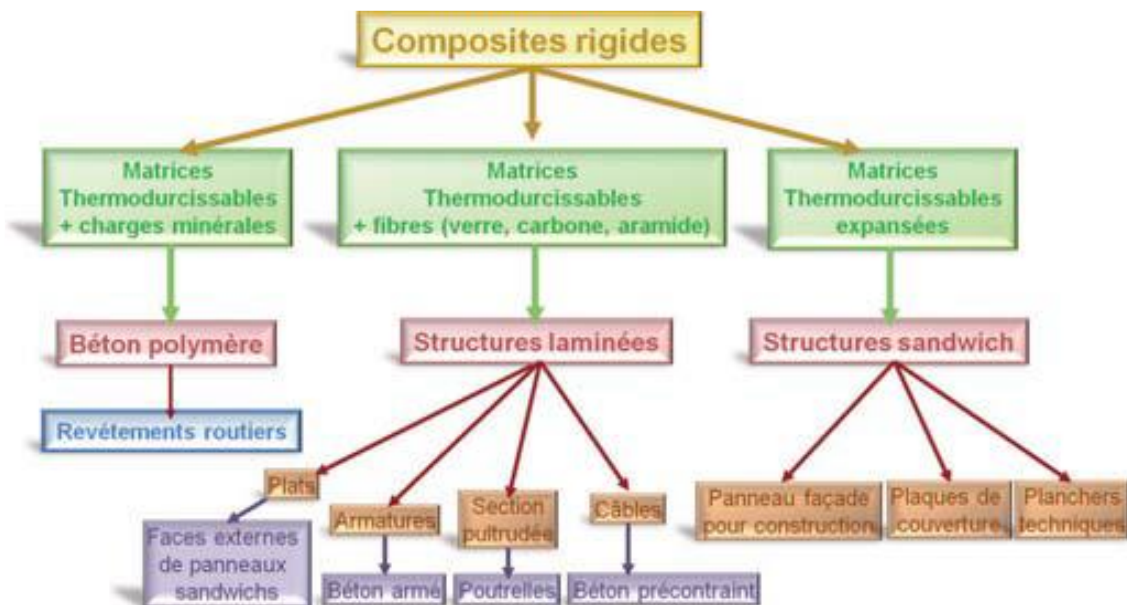


Figure I.3. Composites rigides.

Malgré tous les atouts des matériaux composites, les matrices cimentaires traditionnelles chargées d'ions minéraux restent majoritairement utilisées. Des matrices cimentaires peuvent être utilisées pour la fabrication de matériaux composites en lieu et place des matrices polymères; des fibres de carbone ou des fibres polymères sont utilisées comme charges.

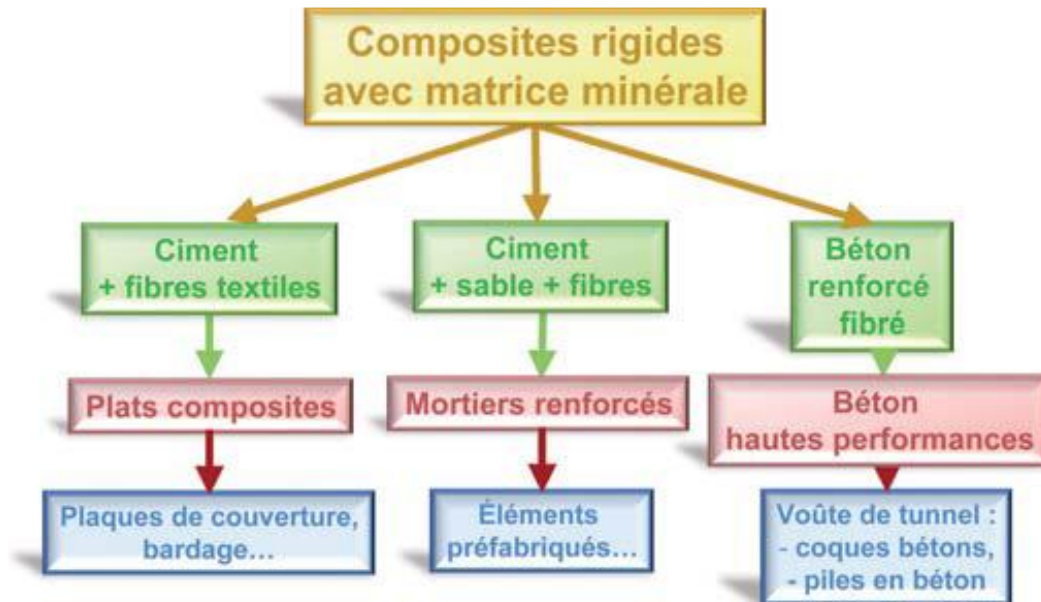


Figure I.4. Composites rigides avec matrice minérale.

## I.5. Constituants des Matériaux Composites

### I.5.1. Les renforts [1]

Le renfort constitue l'ossature de la pièce et assure l'essentiel des propriétés mécaniques. En général, les renforts sont des fibres comme la fibre de verre, la fibre de carbone, la fibre d'aramide ou encore la fibre végétale. Le renfort peut également prendre la forme de particules. Les renforts permettent de rendre le matériau encore plus performant. Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

#### I.5.1.1. Différents types de renfort [1]

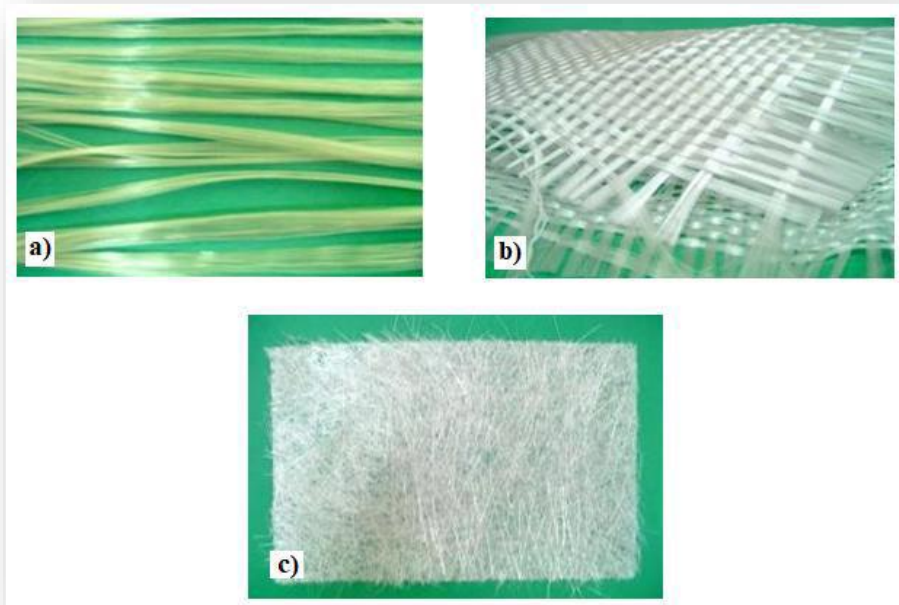
Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m<sup>2</sup>.

- Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



**Figure I.5:** Différentes formes des renforts fibres de verre :  
a) Roving de verre b) Tissu de verre c) Mat de verre

### I.5.1.2. Différentes nature de renfort [1]

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur la figure I.3 qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

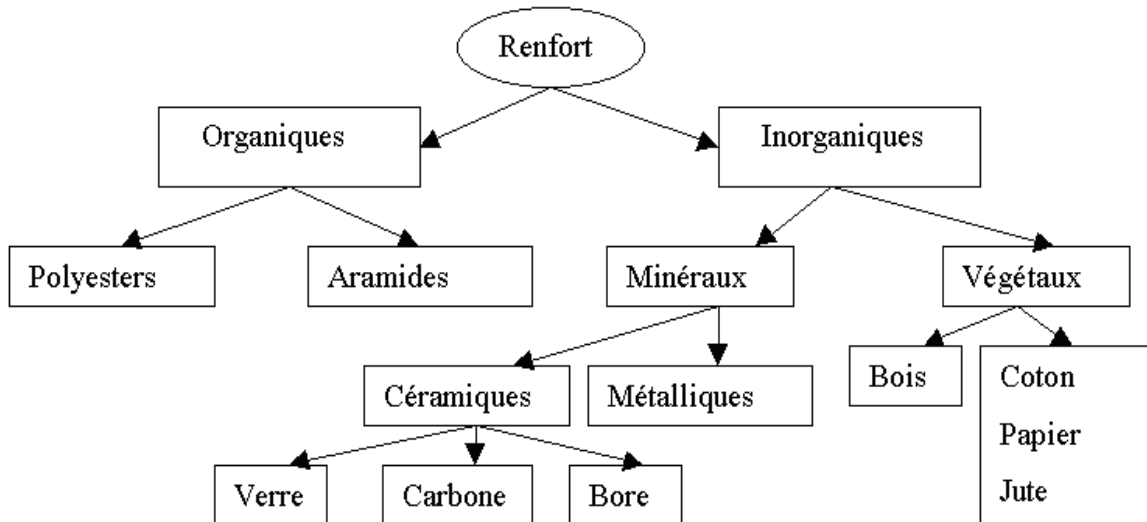


Figure I.6: Principaux matériaux de renforts

La forme la plus utilisée pour les renforts est la forme fibreuse dont les fibres de verre et de carbone, grâce à leurs propriétés, ont connues une très grande exploitation dans l'industrie.

#### ➤ Les fibres de verre

Les fibres de verre constituent le renfort le plus utilisé actuellement pour les composites (dans plus de 95%). Elles offrent pour un prix raisonnable une bonne adhérence, de bonnes propriétés mécaniques (mais inférieures à celles de la fibre carbone) et des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications. Cependant, leurs faibles modules d'élasticité (et leurs densités qui sont supérieure à celle des fibres de carbone) limitent leurs utilisations pour la fabrication des pièces structurales (en aéronautique par exemple). Les fibres de verre sont obtenues à partir de l'oxyde minéral (Silice, Alumine, Chaux, Magnésie, Oxyde de bore,). On distingue plusieurs types :

**Verre E**: à usage général avec de bonnes propriétés électriques.

**Verre D**: bonnes propriétés diélectriques pour l'utilisation en électronique (circuit imprimé).

**Verre C**: bonne résistance chimique, pour les couches superficielles des structures.

**Verre R et S** : haute résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales.

## Chapitre I : Matériaux composites

Les fibres de verre E sont les plus utilisés, le tableau suivant représente quelque composition de verre E, D et R :

**Tableau I.1 :** Quelques compositions de verre E, D et R

Constituants		Composition en masse %		
		E	D	R
Silice	SiO <sub>2</sub>	53 – 54	73 – 74	60
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 – 15,5	-	25
Chaux	CaO	20 – 24	0,5 – 0,6	9
Magnésie	Mg	20 – 24	0,5 – 0,6	6
Oxyde de bore	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5 - 9	22 – 23	-
Fluor	F	0 – 0,7		
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1	0,1- 0,2	-
Oxyde de titane	TiO <sub>2</sub>	< 1	0,1- 0,2	
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	< 1	1,3	
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	< 1	1,5	

On donne certaines caractéristiques des fibres de verre que nous résumons dans le tableau 2

**Tableau I.2 :** Avantages et inconvénient de la fibre du verre E, D et R

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>-bon rapport de performance mécanique/prix</li> <li>- bonne résistance spécifique (rapport résistance à la traction/densité.)</li> <li>-bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimage)</li> <li>-incombustibilité ;</li> <li>-dilatation et conductivité thermiques faibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible module (fragile par rapport à l'aramide et Carbone).</li> <li>- Vieillessement au contact de l'eau (problème pour les navires)</li> </ul>

### I.5.2. La matrice [5]

La matrice est un matériau qui permet d'assurer la tenue chimique et la cohésion du matériau tout en donnant la forme souhaitée au produit final. La matrice entoure et protège le renfort. Lorsque le composite est à matrice organique, cette dernière est appelée résine. Il existe 3 catégories principales de matrices:

### I.5.2.1. Les composites à matrice organique

On retrouve notamment les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les composites à matrice organique se divisent en deux catégories :

- *Composites à grande diffusion* : composites aux performances plus faibles et aux coûts plus abordables. Ils sont utilisés dans plus de 95 % des cas, notamment lors de productions en grande série,
- *Composites à haute performance* : matériaux qui présentent des qualités mécaniques supérieures et qui représentent donc un coût plus important. Ils sont souvent utilisés dans le domaine de l'aéronautique et de la construction.

La matrice est constituée de résine mélangée, pour améliorer ses caractéristiques, à une charge qui facilite aussi la mise en œuvre et diminue le coût de la production. Le mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène, et nous obtenons ainsi un matériau composite formé d'un renfort et d'une matrice.

Le rôle de la matrice est d'assurer le lien entre les fibres et de transmettre les sollicitations.

Elle assure la résistance du matériau dans le sens transverse du renfort, ainsi qu'une protection physico-chimique des fibres contre les agents nocifs de l'environnement. De plus elle conditionne directement la tenue thermique, et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire.

Les résines utilisées doivent être assez déformables et doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Elles doivent également avoir une masse volumique faible de manière à conserver au matériau composite des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

## I.6. Architecture des Matériaux Composites

### I.6.1. Monocouche

- Ils représentent l'élément de base de la structure composite.
- Ils se caractérisent par la forme du renfort: à fibres continues, à fibres courtes, fibres tissés et mat.

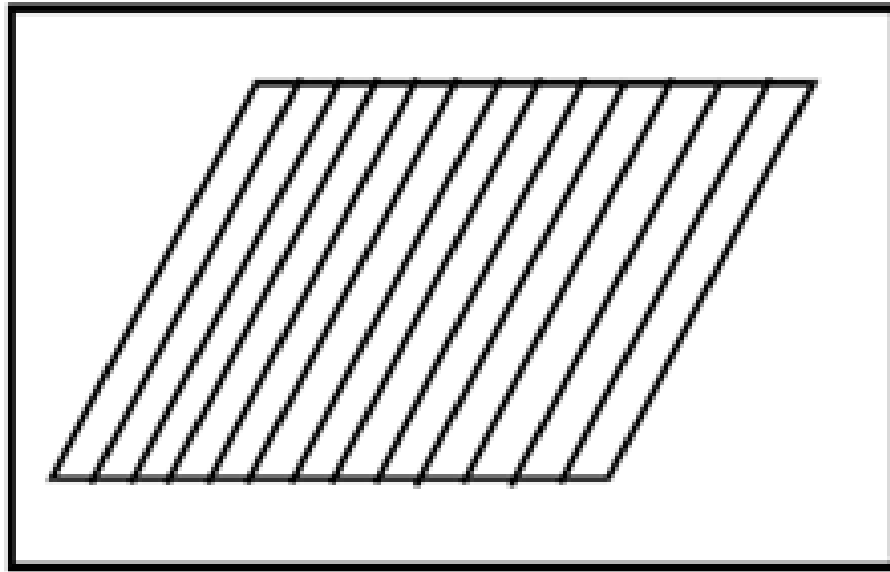


Figure I.7: Matériau composite Monocouche

### I.6.2. Stratifiés

Ils sont constitués de couches successives (plis) de renforts (fils, mat, tissus,...) imprégnés de résines.

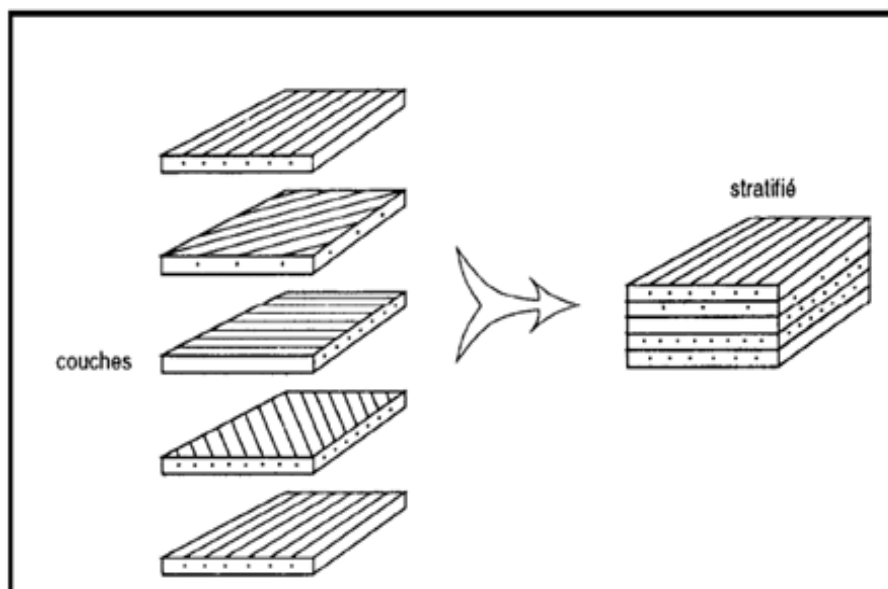


Figure I.8: Matériau composite Stratifiés

### I.6.3. Sandwichs

- Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance.

- Matériaux d'une grande légèreté
- Grande rigidité en flexion et une excellente isolation thermique.

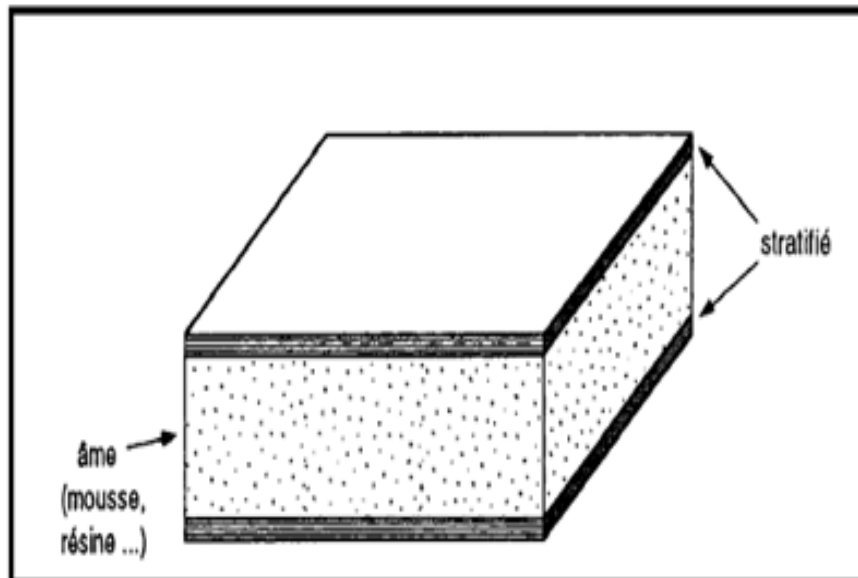


Figure I.9: Matériau composite Sandwichs

### I.7. Mise en œuvre des matériaux composites

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système soit :
  - par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables, par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

### I.7.1. Moulage au contact [6]

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

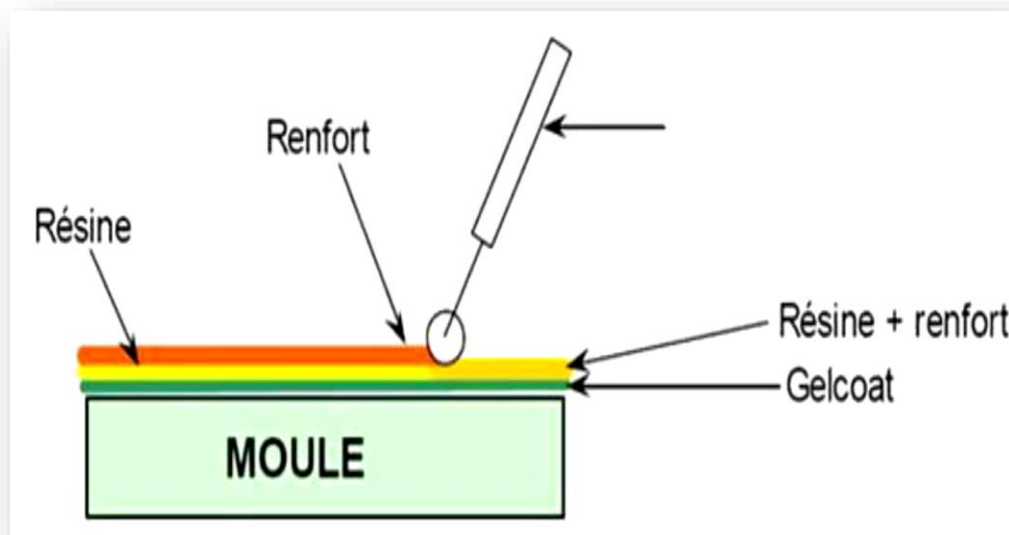


Figure I.10: Procédé de moulage par contact

### I.7.2. Moulage par projection simultanée

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection".

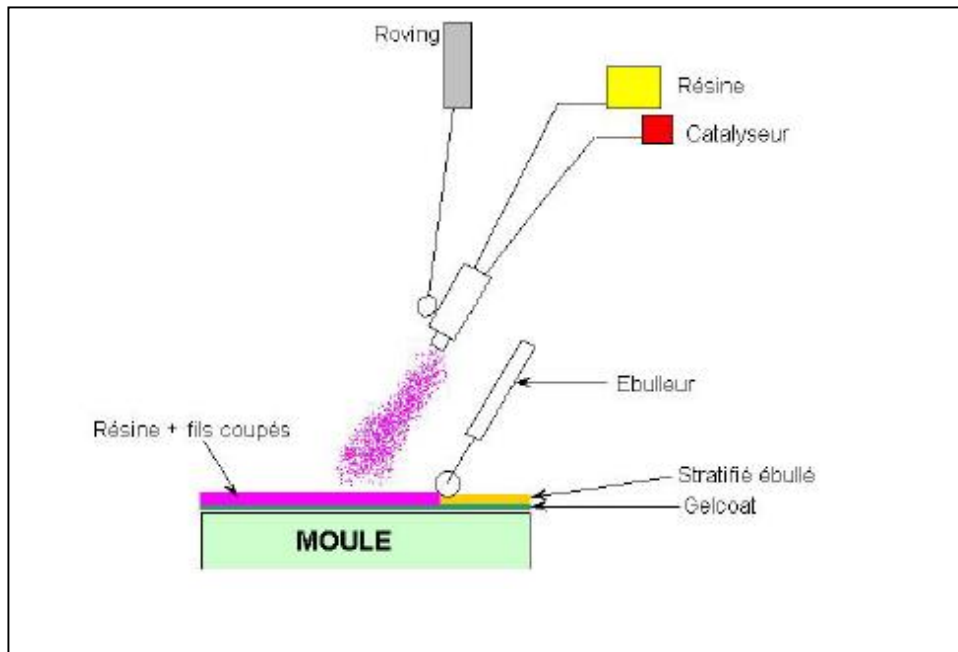


Figure I.11: Moulage par projection simultanée.

### I.7.2. Moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu) est placé à l'intérieur du moule; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

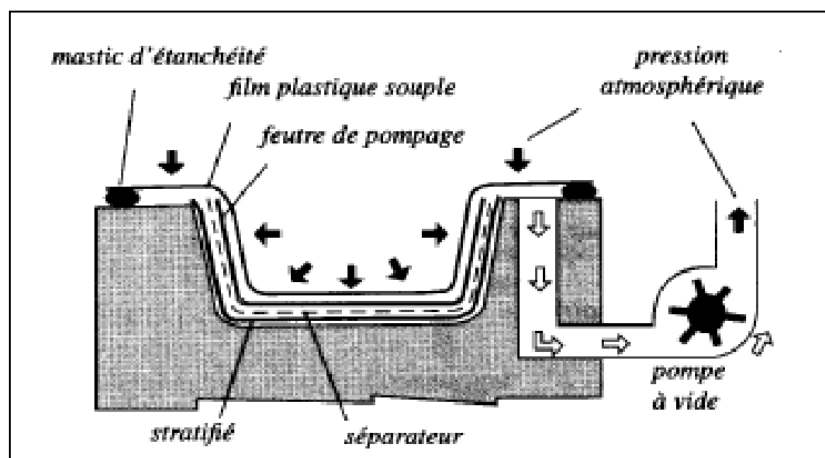


Figure 1.12: Moulage sous vide.

Le moulage au contact et la projection simultanée sont des procédés manuels adaptés à la production en petites séries de pièces, aussi bien en composites de grande diffusion qu'en composites à hautes performances. Il en va de même pour les procédés de fabrication, comme l'enroulement filamentaire et la centrifugation. Ces procédés permettent de réaliser des corps

creux de révolution de grandes dimensions, telles les cuves destinées à l'industrie chimique ou les tuyauteries de centrales électriques. Les produits de grande longueur (poutres, profilés et plaques) sont fabriqués par des procédés d'imprégnation en continu.

### I.8. Caractéristiques des matériaux composites [1]

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Faible masse,
- Bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- Absence de corrosion,
- Absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- Vieillessement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- Inertie à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, Pétroles,),
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- Très forte anisotropie.

### I.9 Domaines d'application [5]

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer d'où leurs domaines d'application :

- Électricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf,)
- Construction navale....

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

### **I.10. Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents éléments relatifs aux composites à savoir les appellations et surtout les propriétés nécessaires pour la suite de ce travail. Dans le chapitre suivant nous présenterons l'utilisation de ces composites dans le domaine du confinement du béton.

# **Chapitre II**

## **Confinement du béton**

### Introduction

Depuis quelques décennies, beaucoup de chercheurs s'orientent vers la technique de confinement par des matériaux composites. L'intérêt est de faire face à des problèmes dont l'ampleur est sans cesse croissante: détérioration rapide des structures, durée de vie utile atteinte, augmentation des charges,... Suite à ces observations, qui laissent présager de sérieux problèmes dans l'avenir, il est primordial de développer des techniques de réhabilitation qui permettront de rendre les structures actuelles plus résistantes, plus efficaces et surtout plus durables. Certaines des techniques proposées, qui sont parmi les plus prometteuses, utilisent des matériaux composites. Ces matériaux de nouvelle génération offrent un rapport performances mécaniques/poids très élevé, une forte résistance aux environnements corrosifs, ainsi qu'une grande facilité de mise en œuvre.

## II. La technique de renforcement par matériau composite

Le renforcement des structures en génie civil a pour but de rendre les éléments structuraux plus résistants, plus rigides et plus stable et d'éviter par conséquent toute rupture brutale. La technique de renforcement par matériaux composites a connu un grand essor puisqu'elle apporte des avantages conséquents: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, tenue au choc et au feu et liberté de formes.

### II.1. Renforcement des éléments structuraux [9]

Le renforcement ou le confinement du béton est une opération qui consiste à trouver une solution au problème de rupture brutale des éléments de structures. Pour mieux étudier le comportement du béton confiné, la littérature propose de contrôler deux paramètres à savoir : la capacité portante (la résistance à la rupture) et la ductilité (déformation ultime). Le confinement de béton par disposition adéquat du renfort a fait l'objet de plusieurs études dont la majorité a montré une augmentation significative de la résistance et surtout de la ductilité.

#### II.1.a. Poteaux : cas de confinement

Actuellement, avec le développement de nouveaux matériaux, le confinement d'une colonne est réalisé par l'enroulement circonférentiel d'un tissu PRF composite (une enveloppe) autour de la colonne. Vu les caractéristiques mécaniques élevées des composites et leur légèreté à la fin de la phase élastique du béton, des fissures apparaissent ce qui provoquera la mobilisation de la pression radiale de confinement. En effet, suite à la différence de rigidité entre le béton et le matériau composite FRP, l'enveloppe développe des contraintes de

## Chapitre II : Confinement du béton

---

compression qui s'opposent aux contraintes radiales de traction dans le béton engendré par la charge axiale. Ceci permet d'augmenter la résistance ultime et la déformation correspondante ainsi que la ductilité de la colonne en béton confinée par FRP. Les causes conduisant à renforcer les structures sont assez nombreuses, parmi ces causes on cite :

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



**Figure II.1:** Poteau circulaire en béton armé confiné par matériaux composites.

### II.1.b. Poutres

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



(a)



(b)

**Figure II.2.** Renforcement d'une dalle par des lamelles en composite PRF [23], [24]

### II.2. Méthode de confinement [9]

Le confinement de colonnes en béton par l'enroulement d'une enveloppe en matériau composite sur la surface de béton permet d'augmenter la résistance à la compression et la déformation ultime en limitant la formation et l'ouverture des fissures. Dans ce type d'élément, le béton résiste à la compression alors que le composite est sollicité par des efforts de tension et de cisaillement.

Cette technique semble être une alternative intéressante aux approches traditionnelles qui consiste à confiner les colonnes avec une enveloppe en béton armé ou en acier. La mise en place d'une enveloppe en béton armé est problématique. De plus, son épaisseur doit être limitée à quelques millimètres, pour éviter d'augmenter fortement le poids de la structure. La mise en place d'un tube d'acier, formé de plaques soudées, laisse un vide entre l'acier et le béton, qui doit être rempli d'une résine époxyde ou d'un coulis de ciment. Le pompage de la résine est l'étape la plus difficile. Après l'installation, des mesures de protection contre la corrosion de l'acier doivent être prises régulièrement.

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

### II.2.a. Stratification directe

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

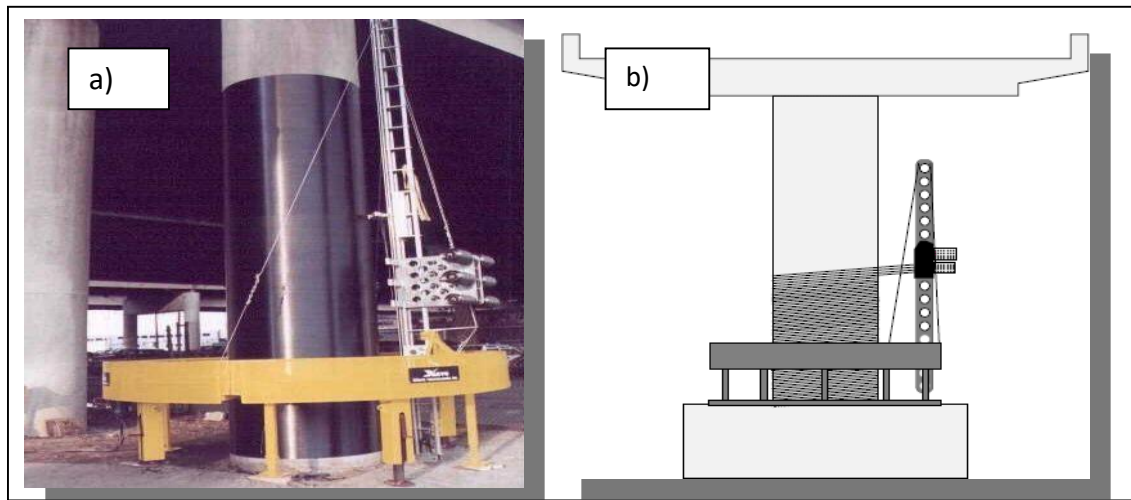


Figure II.3: Confinement des poteaux par stratification directe. [27]

### II.2.b. Enroulement filamentaire

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur.

Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du PRF, l'orientation de la fibre et le control de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. L'idée de confiner le béton par enroulement de fibres continues imprégnées par la résine a été mentionnée pour la première fois par Fardis et Khalili (1981).



**Figure II.4:** Confinement des poteaux par enroulement filamentaire [9].

### II.2.c. Chemisage par coquille préfabriquée

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



**Figure II.5:** Confinement des poteaux par coquille PRF préfabriquée.[9].

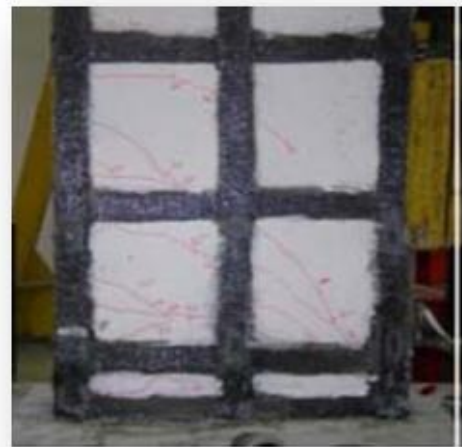
### II.3. Règlements parasismique et ductilité [14]

Lorsqu'un chargement axial est appliqué à un poteau en béton armé, le béton se dilate latéralement, notamment par effet Poisson.

Dans le cas d'un poteau confiné par exemple par un matériau composite, le confinement réduit la dilatation de la section en exerçant une pression latérale, créant ainsi un état de contrainte tridimensionnel dans le béton. Il en résulte une augmentation de la capacité portante et de la ductilité du poteau, puis de l'ensemble de la structure. L'efficacité du confinement par composite PRF associée à sa facilité de réalisation en fait la technique de réhabilitation la plus répandue dans les zones sismiques.



(a)



(b)

Figure II.6 — Deux configurations différentes de renforts de voiles [21], [22]

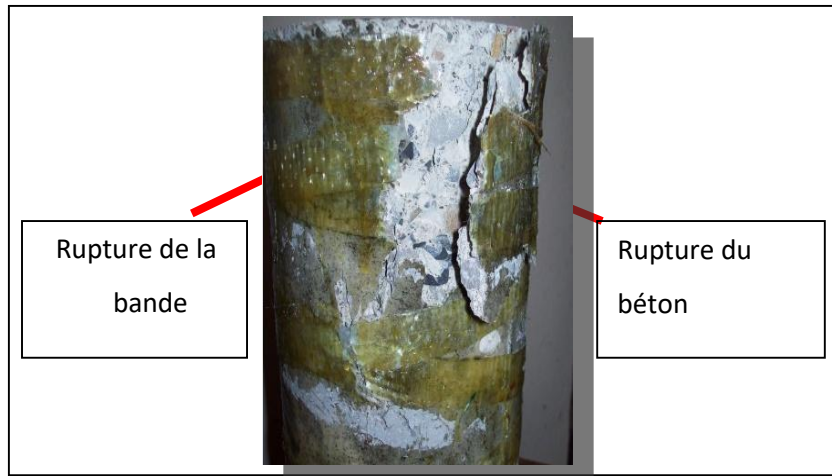
### II.4. Mode de rupture du béton confiné [9]

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

A titre d'exemples, on présente :

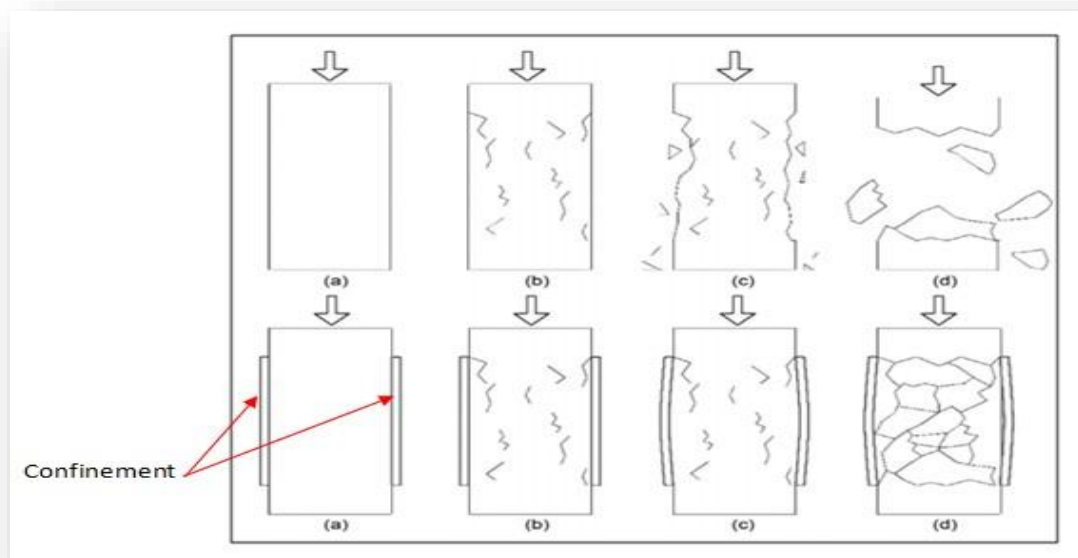
## Chapitre II : Confinement du béton

-la rupture d'un cylindre en béton confiné par des bandes composites FRP disposées hélicoïdalement.



**Figure II.7:** Mode de rupture des cylindres confinés avec le FRP.

Après rupture, l'auteur a remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement hélicoïdal, jusqu'à la rupture totale des bandes composites. C'est le comportement classique d'un béton confiné sous compression axiale, tel que schématisé sur la figure II.8.



**Figure II.8:** Évolution des dommages pour des colonnes confinées et non confinées durant le processus de chargement.

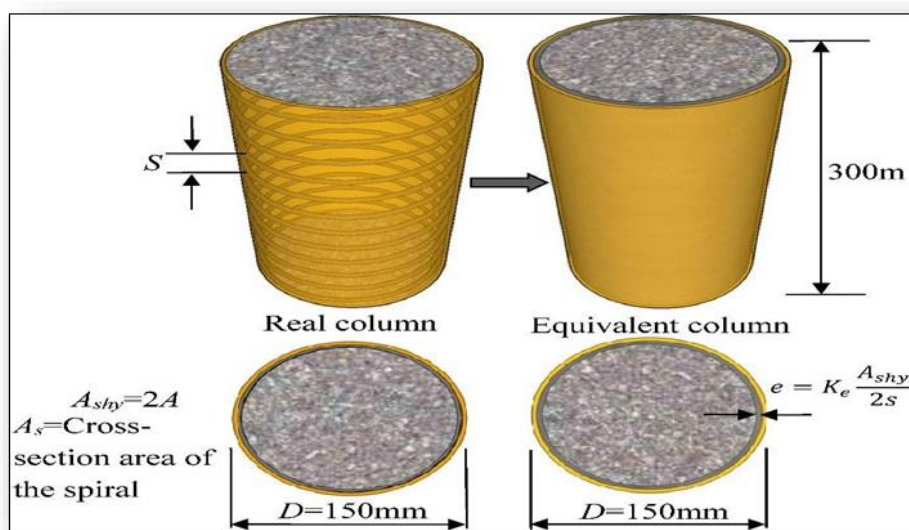
## Chapitre II : Confinement du béton

- Le mode de rupture obtenu par Shahawy et al qui ont réalisé des essais de compression sur un total de 45 éprouvettes cylindriques du béton confiné par fibres de carbone et 10 éprouvettes cylindriques du béton non confiné avec un diamètre de 155mm et une hauteur de 305mm. [9]



**Figure II.9:** Mode de rupture d'un cylindre enveloppé par des fibres de carbone.

- Le mode de rupture obtenu par Liang Huang et al [19] des cylindres en béton confinés par un tube en polymère renforcé de fibre de verre GFRP et un renfort spiral en acier interne SR à la fois, avec la variation dans le nombre des couches de GFRP et les ratios volumétriques de SR. La structure en béton est appelée béton confiné GFRP-SR.[9]



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

## Chapitre II : Confinement du béton

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



Figure II.11: Échec typique des spécimens. [9].

Le mode de rupture obtenu par Ali Ahmed [9] qui a proposé une étude qui consiste à coller des bandes hélicoïdales continues en polymère renforcé de fibres de verre «GFRP» autour de cylindres en béton. Les gains en résistance et en déformation axiale sont alors évalués et analysés en tenant compte de la largeur de la bande de GFRP et du pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre en béton.

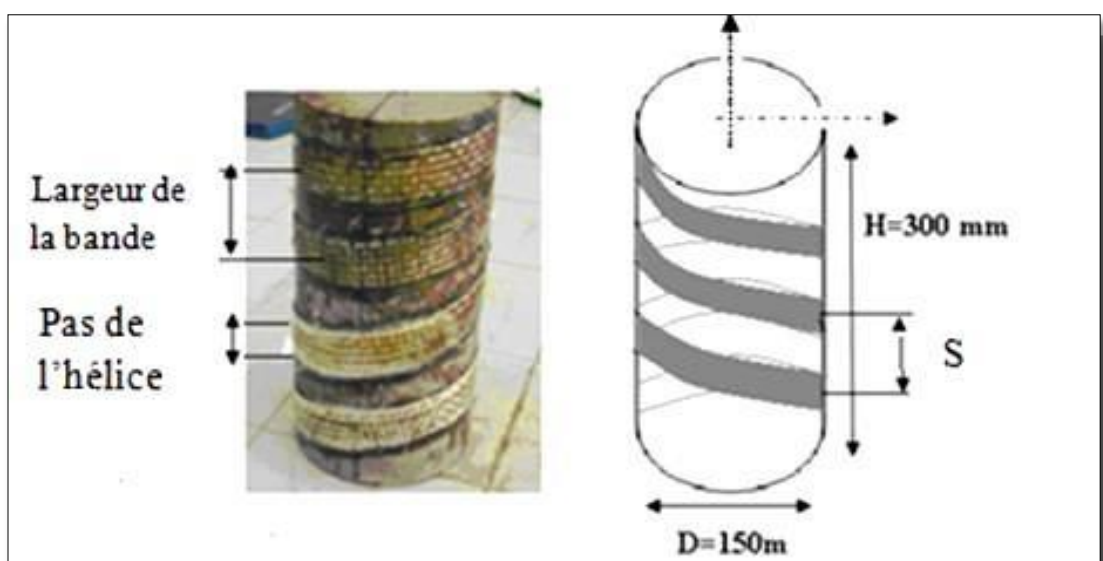


Figure II.12: Confinement partiel hélicoïdal avec GFRP. [9].

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



**Figure II.13:** Variation de la largeur de bande dans le confinement hélicoïdal. [9].

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 sont 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.5. Efficacité du confinement par composite de poteaux en béton armé**

L'analyse synthétique menée par Liu [10] a mis en évidence :

- l'amélioration des performances sismiques des poteaux en béton confinés par composite PRF, notamment, la ductilité, l'énergie dissipée et la capacité en flexion augmentent avec le niveau du confinement ;
- la nécessité d'augmenter le niveau du confinement avec l'intensité de la charge axiale pour obtenir un niveau de ductilité similaire en termes de courbure ;

— la plus grande l'efficacité du confinement de sections circulaires comparée au confinement de sections carrées ;

— le comportement sismique des poteaux confinés par des armatures en acier est différent de celui des poteaux confinés par PRF : les colonnes confinées par PRF ne présentent pratiquement pas de dégradation de leur résistance à la flexion dans la phase de déformation plastique, tandis que les colonnes confinées par armature acier peuvent montrer une branche post-pic descendante dans la courbe moment vers courbure.

Cette différence est encore plus évidente lorsque la charge axiale est plus élevée ;

— une amélioration significative de la résistance en flexion des colonnes confinées soumises à une charge axiale élevée.

Dans la section suivante on présentera les principaux résultats expérimentaux issus de la littérature illustrant le comportement d'éprouvettes de béton non confinées et confinées sous différents chargements.

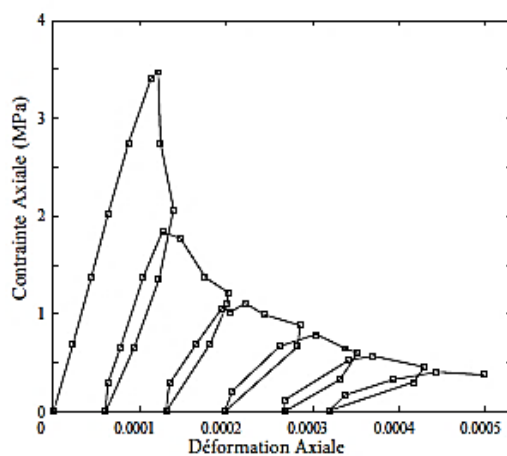
### **II.6. Comportement du béton non confiné ou confiné**

Le béton présente un comportement quasi-fragile, fragile, asymétrique en tension. Ce comportement non linéaire est lié à la formation et au développement de processus de fissuration complexes. Ce processus lui-même est étroitement lié à l'hétérogénéité du béton, qui se compose d'agréments grossiers (granulats), de sable et de ciment, qui sont hydratés après mélange avec de l'eau pour former un coulis hydraté. La pâte de ciment hydratée forme une zone de transition à proximité du granulats. Cette zone de transition a un rapport eau-ciment légèrement plus élevé que le reste des coulis, qui s'avère inférieur au reste des coulis, de sorte que la fissuration se produit le plus souvent dans cette zone de transition ou dans les coulis du ciment hydraté lui-même. Aux charges modérées, la réponse du béton est initialement dominée par ses microfissures dans la zone de transition. Au fur et à mesure que la charge augmentait, les microfissures dans la zone de transition se dilataient et fusionnaient, se développant partiellement dans la pâte de ciment hydraté. Enfin, un ensemble continu de fractures se forme et se déplace à travers la zone de transition, le coulis et éventuellement certains agrégats, ce qui provoque l'effondrement progressif ou soudain du matériau, selon le modèle de fracture résultant. Ces phénomènes de fissuration permettent d'analyser la courbe de réponse à la déformation sous contrainte du béton sous chargement quasi-statique uni-axial, comme décrit ci-dessous. [14]

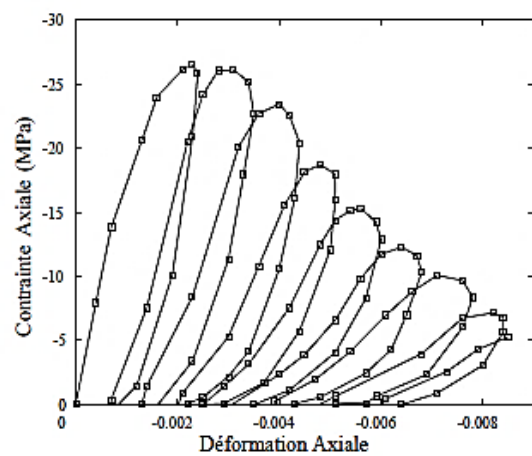
### II.6.a Comportement uni-axial du béton non confiné en traction et en compression :

La figure 1.9 illustre le comportement du béton non confiné sous une sollicitation détraction uni-axiale, deux phases se distinguent : [14]

- Une phase post-pic non linéaire : lors des décharges dans la phase post-pic une perte de raideur et l'apparition de boucles d'hystérésis. Des déformations résiduelles, qu'on qualifie de plastiques.
- Une phase élastique linéaire : quand la contrainte atteint un pic qui se situe à environ 30 % de la résistance en compression du béton.



(a) Traction uni-axiale, résultats expérimentaux de Gopalaratnam et Shah [12].



(b) Compression uni-axiale, résultats expérimentaux de Sinha et al. [13].

**Figure II.14.** Réponse d'éprouvettes en béton non confinée soumise à des chargements de traction uni-axiale (a) et compression uni-axiale (b).

### II.6.b. Mode de rupture dans un béton confiné en compression uni-axiale

Le mode de rupture le plus courant pour le béton confiné par composite PRF correspond à la rupture en traction du composite PRF dans le sens des fibres, le composite étant mis en œuvre avec les fibres orientées perpendiculairement à l'axe du poteau. Le degré de fissuration dans le noyau en béton augmente avec le niveau de confinement.

En arrêtant un essai à un tel niveau de charge (mais avant rupture de l'éprouvette), l'autopsie révèle que les granulats soient détachés et que le noyau a perdu sa cohésion, comportement qui s'intensifie avec le niveau de confinement. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'éprouvette est fortement confinée. Plus le confinement est élevé plus le comportement du noyau en fin d'essai est proche de celui d'un matériau pulvérulent, Berthet [13].



**Figure II.15.**Photo de la décohésion du béton confiné en fin d'essai, (Université Gent, Belgique).

### II.7. Revue de littérature sur quelques travaux antérieurs

Plusieurs travaux expérimentaux ont été réalisés sur des colonnes en béton ou en béton armé, à l'aide d'enveloppes en composite collées en surface. L'intérêt de ces études est d'évaluer le comportement mécanique des éléments structuraux dans le domaine du Génie Civil. L'idée est très ancienne, *Considere* en 1903 réalisa des essais triaxiaux sur des cylindres de mortier de dimensions  $\varnothing 80 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , à l'issue des essais il confirma que l'application d'une pression de confinement latérale constante sur des cylindres de mortier augmenter la résistance à la compression. Il proposa une relation permettant de prédire la résistance en compression de mortier confiné, relation qui fut adaptée quelques années après par *Richart et al.* 1928.

L'idée du renforcement des éléments par confinement fût largement suivie par d'autres recherches pendant des années. *Fardis et Khalili* [REF], 1981, ont réalisé des essais de compression uni-axiale sur des cylindres de béton de  $\varnothing 76 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$  et  $\varnothing 102 \text{ mm} \times 204$ . Quatre types différents de FRP ont été utilisés. Les chercheurs ont constaté que la rupture s'est produite quand la contrainte latérale du béton sous l'action combinée de la charge axiale et de la pression de confinement a atteint la contrainte de rupture du FRP, ils ont également conclu que cette technique rapporte une augmentation non seulement de la résistance de béton mais aussi une amélioration de la ductilité, grâce à l'effet de confinement.

**Priestley et al.** (1992) [29], ont mené une étude sur la possibilité d'utilisation d'un système d'enveloppe composé de matériaux composites à base de fibres de verre «PRFV» collés en surface pour améliorer la performance en flexion et en cisaillement des piles de pont en béton situées dans des régions sismiques. Trois (3) piles sont renforcées au niveau de la zone de rotule plastique avant d'être testées en flexion, alors que les quatre autres piles sont renforcées sur toute leur longueur avant d'être soumis à des essais de flexion en courbure double. Les résultats expérimentaux ont montré que le système de matériaux «PRFG» collés peut empêcher la rupture prématurée par insuffisance de longueur de chevauchement dans la zone de rotule plastique. Ils ont également montré que le système procure une augmentation appréciable de la résistance au cisaillement aux piles et aux colonnes qui présentent des insuffisances en matière de cisaillement.

**Xiao et al.** (1996) [30], propose une étude expérimentale sur modèles réduits. L'étude est proposée pour valider l'efficacité du système composite préfabriqué en «PRFV» comme enveloppe pour colonnes. Les modèles simulent les colonnes d'une autoroute à Washington, qui ont cédées lors du tremblement de terre en 1994. Le système proposé concerne une série de coques cylindriques préfabriquées en composite de fibres de verre «PRFV» et ayant des fentes. Lors de la réhabilitation d'une colonne, les coques sont placées autour de la colonne en séquences et collées ensemble pour former une enveloppe continue. Les modèles soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une force de compression simulant la charge de gravité. Les résultats obtenus confirment que la technique proposée engendre une très bonne reprise des efforts et procure aux éléments une bonne ductilité.

**Mirmiran et Shahawy** (1997) [31] ont réalisé 30 essais sur des éprouvettes cylindriques de dimensions ( $\text{Ø}152,5 \times 305 \text{ mm}$ ) parmi lesquels 24 tubes en «PRFV» remplis de béton et 6 cylindres en béton. La résistance à la compression du béton étudié variait entre 29,6 MPa et 32 MPa, alors que les épaisseurs des enveloppes composites utilisées étaient de 6 plis (1,3 mm), de 10 plis (2,1 mm) et de 14 plis (3 mm). Les tubes en «PRFV» agissent simultanément comme des coffrages, un confinement, des armatures longitudinales et des protecteurs « anti-corrosion » pour le béton. Plusieurs paramètres sont considérés dans ces études: le type de chargement, la section, l'adhérence, et l'orientation des fibres de l'enveloppe composite.

**Haroun et al.** (1997) [32], ont réalisés des essais cycliques sur des colonnes de pont réhabilités à l'aide d'enveloppes en matériau «PRFC» extérieurement collées. Six modèles

réduits à 50 % sont considérés pour évaluer l'efficacité du confinement procuré par le «PRFC». Tous les modèles sont soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une charge de compression axiale constante. Les modèles réhabilités avec des matériaux composites de type «PRFC» développent une ductilité maximale de 6 à 10 avec une courbe d'hystérésis stable. Les résultats montrent également que la rigidité latérale des colonnes n'a pas changé suite à l'ajout de l'enveloppe en «PRFC», et par conséquent, les propriétés cycliques ne changent pas quand on utilise cette méthode de réhabilitation et de renforcement.

**Miyauchi et al.** (1997) [33] entreprennent des essais de compression uni-axiale sur des colonnes en béton renforcées à l'aide de tissus en fibres de carbone (CFS: *carbon fiber sheets*) pour évaluer cette technique de renforcement. Ils tiennent compte de la résistance en compression du béton (30 et 50 MPa), du nombre de couches de CFS (1, 2 et 3 couches) et des dimensions de la colonne ( $\varnothing 100$  mm x 200 mm et  $\varnothing 150$  mm x 300 mm). Les résultats montrent que la résistance en compression du béton renforcé à l'aide des tissus en fibres de carbone augmente linéairement avec le nombre de couches du matériau composite, la déformation axiale correspondant à la contrainte maximale du béton confiné à l'aide de matériaux composites augmente de façon exponentielle avec le nombre de couches de CFS. Sur la base de ces résultats, une relation contrainte déformation pour le béton renforcé est proposée pour effectuer une analyse du comportement mécanique.

**Shahawy et al.** (2000) [26] testent 45 éprouvettes cylindriques confinées avec des polymères renforcés de fibres de carbone et 10 non confinées de dimensions  $\varnothing 152,2$  mm x 305 mm, les paramètres considérés sont la résistance du béton et l'épaisseur de renfort (nombre de plis «PRF»), deux types de bétons ont été utilisés, le premier à une résistance en compression de 20,7 MPa et le deuxième 41,4 MPa. Les éprouvettes de 20,7 MPa de résistance ont été confinées avec 1, 2, 3, 4 et 5 plis de «PRFC», et celles de 41,4 MPa avec 1, 2, 3 et 4 plis de «PRFC». Les résultats ont montré qu'un seul pli de carbone suffit pour bloquer la dilatation du béton, alors que pour celui de 41,4 MPa, même deux plis n'ont pas pu bloquer la dilatation, ce phénomène est lié au rapport de confinement  $f_l / f'_{co}$  qui représente le rapport de la pression de confinement latérale sur la résistance en compression du béton non confiné. Donc, plus le béton à renforcer est résistant et plus la pression latérale de confinement doit être grande pour que le confinement soit efficace, ce qui se traduit par un grand nombre de plis, ou de changement du type de fibres.

**Berthet et al.** (2005) [34] réalisent des essais sur des bétons de 5 classes de résistance différentes, allant du béton ordinaire (25 MPa) au béton à hautes performances BHP (170 MPa). Les éprouvettes cylindriques ont des dimensions de  $\text{Ø}160 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$  pour trois classes et  $\text{Ø}70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  pour les deux autres. Trois classes des bétons ont été choisies pour étudier le confinement du béton dans le cadre de la réhabilitation, et deux autres classes pour les nouvelles constructions avec des poteaux à hautes performances. Les éprouvettes ont été confinées avec des enveloppes composites à base de fibres de carbone ou des fibres de verre allant de 2 à 12 plis de tissus unidirectionnels dont les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, les plis sont dit orientés à  $0^\circ$  (zéro degré).

**Youssef et al.** (2007) [35] développent un modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF». Le modèle est basé sur les résultats d'un programme expérimental incluant des colonnes courtes circulaires ( $\text{Ø} 406 \times 813 \text{ mm}$  et  $\text{Ø}152 \times 305 \text{ mm}$ ), carrées ( $381 \text{ mm} \times 381 \text{ mm} \times 762 \text{ mm}$ ) et rectangulaires ( $254 \text{ mm} \times 381 \text{ mm} \times 762 \text{ mm}$ ) confinées en utilisant deux types de matériaux composites (PRFC et PRFV) avec une vaste gamme de rapport de confinement. Un total de 117 spécimens a été testé sous chargement axial. L'analyse des résultats montrent que la contrainte ultime, la déformation de rupture, les paramètres de l'enveloppe composite et la géométrie de la section sont les facteurs significatifs affectant le comportement contrainte-déformation du béton confiné avec des matériaux composites «PRF».

**Taouche-Kheloui Fatma et al.** (2012), [36] ont réalisés un programme expérimental, dont le but est la proposition d'une nouvelle technique de la reprise de l'effort tranchant dans des poutres en béton armé et de proposer un modèle de comportement propre, qui permet de transcrire le comportement réel à des sollicitations de flexion. Des essais de flexion quatre points ont été réalisés, sur plusieurs séries de poutres de dimensions  $10 \times 20 \times 120 \text{ cm}$ , renforcés de bielles de béton inclinées à  $45^\circ$ , confinées par des grilles métalliques, disposées dans la zone d'influence de l'effort tranchant. L'influence du cisaillement sur le comportement mécanique des poutres est quantifiée.

**Ali ahmed et al.** (2016) [9] une nouvelle technique de confinement des cylindres en béton avec des bandes composites hélicoïdales continues 'GFRP', est proposée dans la recherche. Les gains en résistance à la compression et en ductilité ont été quantifiés et analysés, expérimentalement et théoriquement, en fonction de la largeur de la bande en 'GFRP' et du

pas de l'hélice qu'elle forme en circonférence du cylindre en béton. Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration, à la fois, de la résistance à la compression et de la ductilité des éprouvettes testées. La résistance à la compression du béton est proportionnelle à la largeur de la bande et inversement proportionnelle au pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre.

### **II.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes techniques utilisées pour renforcer ou réparer les structures en béton armé. La technique la plus courante consiste à utiliser des matériaux composites car ils ont d'excellentes propriétés et se sont révélés plus efficaces, fiables et compétitifs. Les expériences menées par les chercheurs jusqu'à présent ont démontré l'intérêt de ces matériaux (Ductilité et résistance, adaptées aux colonnes de différentes géométries, légères, durables, etc....).

# **Chapitre III**

## **Simulation numérique**

### **Introduction**

Ces dernières années, dans les domaines de la recherche industrielle privée ou publique (fabrication automobile, aéronautique, aérospatiale, génie civil, etc.), les techniques de simulation et d'analyse numérique des phénomènes physiques se sont considérablement développées dans le but d'améliorer la productivité industrielle et la vie de tous les consommateurs.

La simulation numérique par éléments finis de problèmes mécaniques est aujourd'hui une réalité scientifique, rendue possible en réduisant l'utilisation de méthodes de correction d'erreurs expérimentales et empiriques plus coûteuses. En conséquence, il y a eu un énorme boom de la conception assistée par ordinateur et des logiciels sur le marché, et leur contribution à la performance et à la productivité est considérable.

Le logiciel peut générer une structure, ses caractéristiques et les caractéristiques du problème étudié, puis prédire le comportement de cette structure (déformation, rupture, plastification...) et enfin traiter ces résultats pour produire des données exploitables et disponibles.

### **III.1 Présentation générale d'ABAQUS**

ABAQUS est un code de calcul par éléments finis (MEF) créé en 1978 par *Hibbit, Karlsson et Sorensen* (HKS). Il est utilisé pour simuler la réponse physique des pièces ou des structures soumises à des chargements mécaniques, thermiques, du contact, de l'impact ou d'autres conditions.

C'est un logiciel très complet permettant de faire des analyses linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. 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 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 (méthode de longueur d'arc). Il peut aussi résoudre implicitement des problèmes dynamiques notamment avec la méthode de Newmark.

Le second utilise une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Cette méthode est encore assez nouvelle dans le domaine du génie civil.

## Chapitre III : Simulation numérique

Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à forte non-linéarité matérielle et est donc particulièrement adaptée pour les matériaux adoucissants. Avec :

- ❖ **Abaqus / CAE** vous pouvez rapidement et efficacement créer, modifier, surveiller, diagnostiquer et visualiser d'analyse avancée
- ❖ **Abaqus / Standard** utilise une technologie de solution idéale pour des événements dynamiques et statiques à faible vitesse où les solutions de stress très précises sont d'une grande importance
- ❖ **Abaqus / Explicit** est un produit d'analyse par éléments finis qui est particulièrement bien adapté pour simuler de brefs événements dynamiques transitoires tels que la résistance aux chocs de l'automobile, et de l'impact balistique.

### III.2 Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS

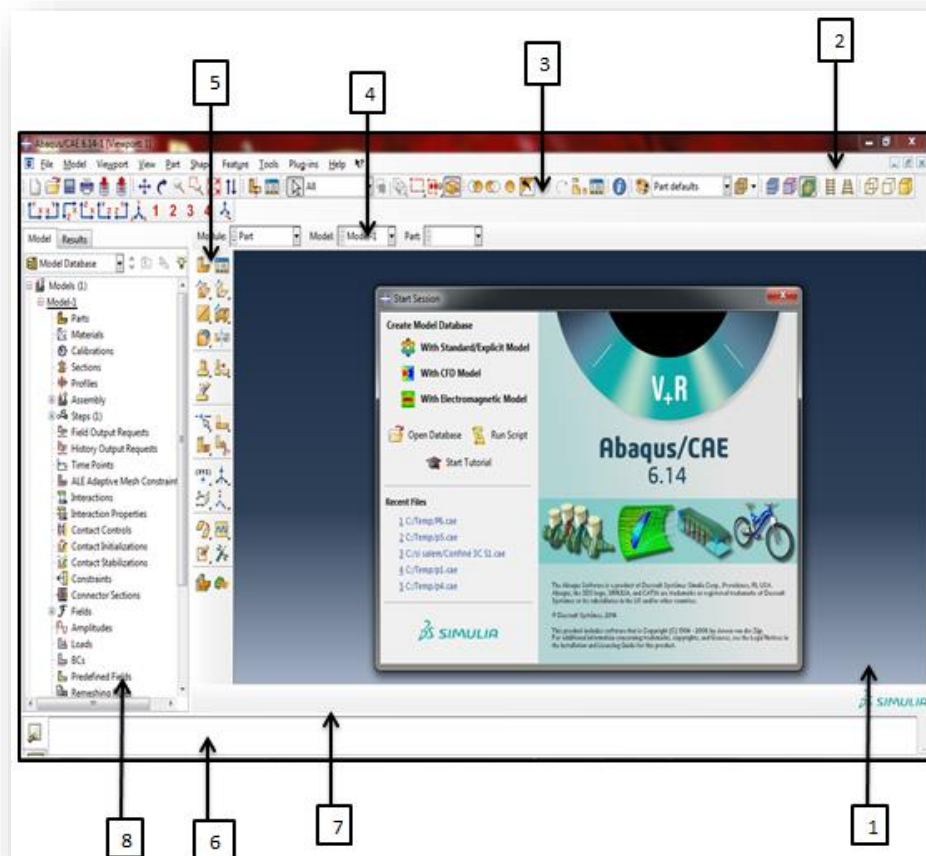






Figure III.1: Présentation de l'interface ABAQUS.

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. 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. 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.
8. Arbre du modèle et résultats.

### III.3 Rappel des actions pour créer un modèle Abaqus

- **Dessiner le modèle** : le module **PART** permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus Cae, soit en les important d'un autre logiciel de dessin. Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle :
  - Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue.
  - Le développer en 3D.
  - Rajouter les détails manquants (chanfreins...).
- **Affecter les propriétés matériau à l'objet** : le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
  - Créer le matériau 
  - Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 
  - Affecter les matériaux aux sections correspondantes 

- **Assembler le modèle** : le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.
  - créer les instances 
  - Les positionner dans le repère général
  -
- **Définir les étapes d'analyse** : 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.
- **Créer les interactions entre les instances**: le module **INTERACTION** permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes, la procédure de spécification des interactions est la suivante :
  - Créer les surfaces
  - Définir les types de contacts
  - Associer des surfaces avec des types de contact
- **Appliquer les conditions aux limites et les chargements** :le module **LOAD** permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions limites soient dépendants des Steps, par exemple une force est appliquée au Step 1 mais inactive au Step 2.
  - Définir les étapes d'application
  - Définir les types de CL et/ou chargement
- **Mailler le modèle**: le module **MESH** contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage
  - Partitionner le modèle.
  - Choisir les techniques de maillage.

- Choisir les types d'éléments.
  - Discrétiser le modèle.
  - Mailler le modèle
- 
- **Créer et soumettre un calcul** : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module **JOB** pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-trait et les résultats demandés.
  - **Visualiser les résultats** : le module **VISUALIZATION** permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

Le module « SKETCH » : ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

### **III.4 Modélisation par éléments finis Abaqus CAE**

#### **III.4.1 Dimension et géométrie [20]**

Les modèles analysés sont composés des cylindres en béton pleins déformables selon la norme NFP18-406[49] avec une hauteur de 32cm et un diamètre de 16cm et de deux disques rigides d'un diamètre de 20 cm. ces cylindres seront confinés avec un tissu de verre de trois manières différentes :

- **Modèle 1** : des cerces de largeur 3 cm et un diamètre de 16 cm avec un espacement de 4 cm.
- **Modèle 2** : une bande sous forme d'une hélice à 4 tours pendant que sa largeur est de 5 cm.
- **Modèle 3** : une coque de diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm.

## Chapitre III : Simulation numérique

Après avoir créé ces pièces, elles seront assignées par leurs matériaux correspondant ensuite assemblés pour avoir les modelés cités précédemment.

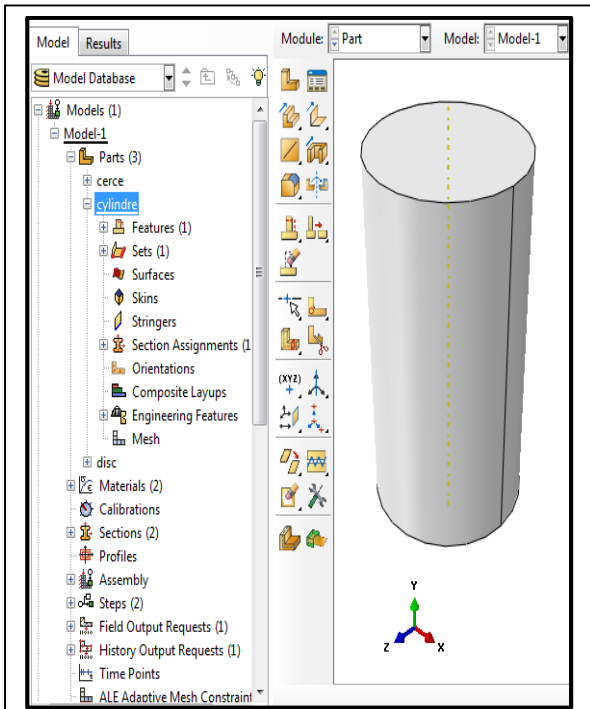


Figure III.2: La géométrie du cylindre.

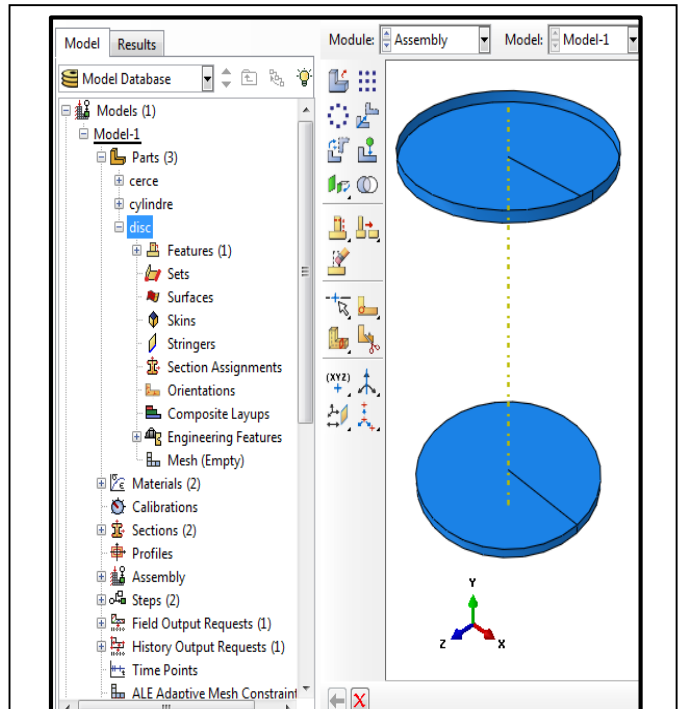


Figure III.3: La géométrie des disques

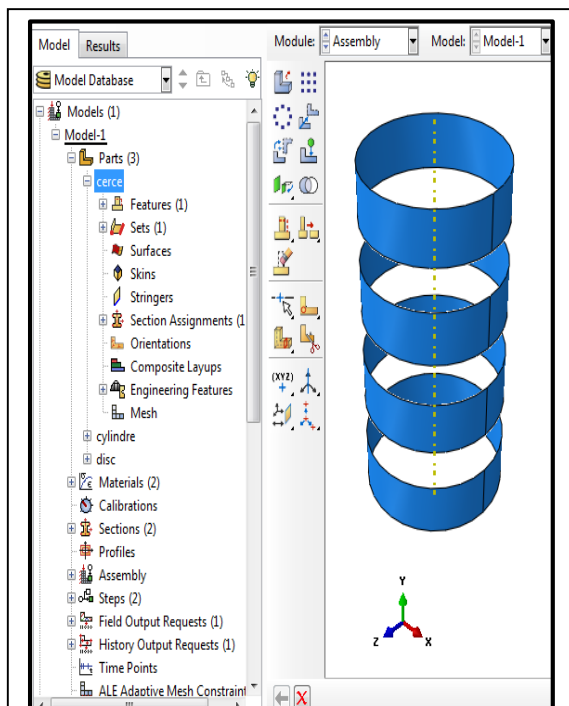


Figure III.4: La géométrie des cerces

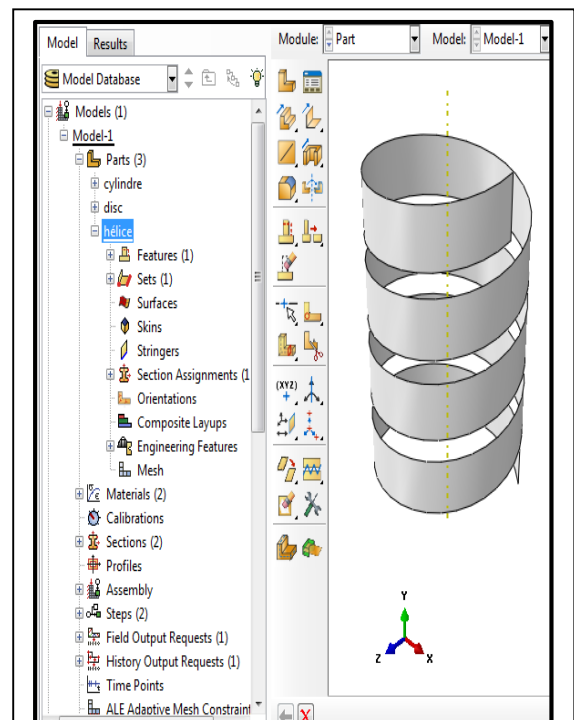
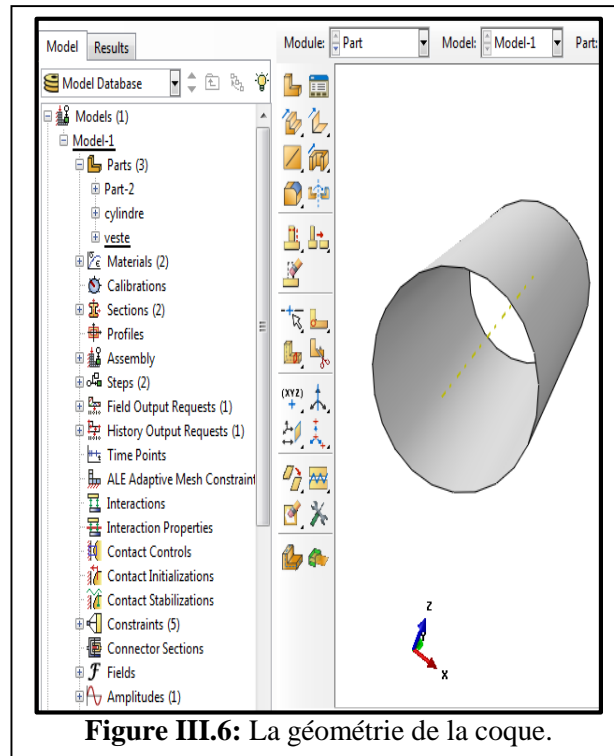


Figure III.5: La géométrie de l'hélice

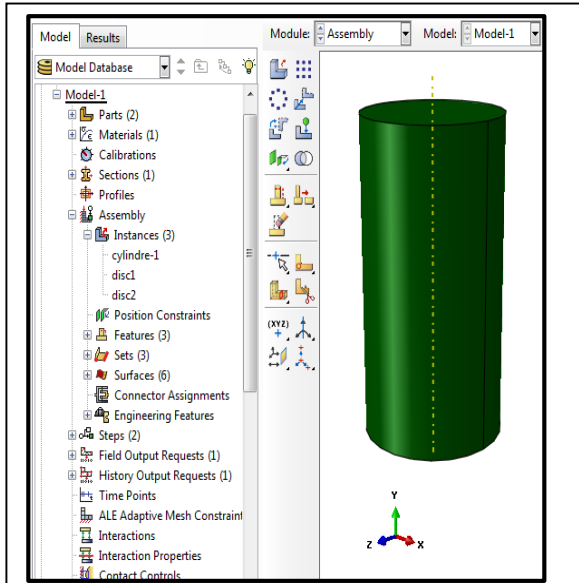


### III.4.2 Propriétés et assemblage

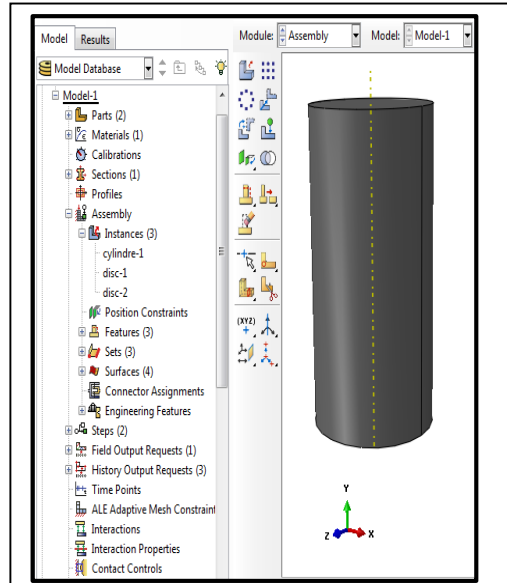
Une fois les pièces créées, elles sont affectées par les matériaux correspondants (béton, composites) dont nous définissons les propriétés dans le module **property**, en précisant les pièces sur lesquelles ces matériaux sont appliqués, pour étudier et valider le modèle d'élément fini proposé en tenant compte de tous paramètres.

- On importe ces pièces dans le module **assembly** pour les assembler dans un même repère global, et cela en supposant une liaison parfaite pour tous les éléments modélisés.

Dans cette partie le choix des variantes d'étude s'impose, les figures si dessous illustrent les différents assemblages :

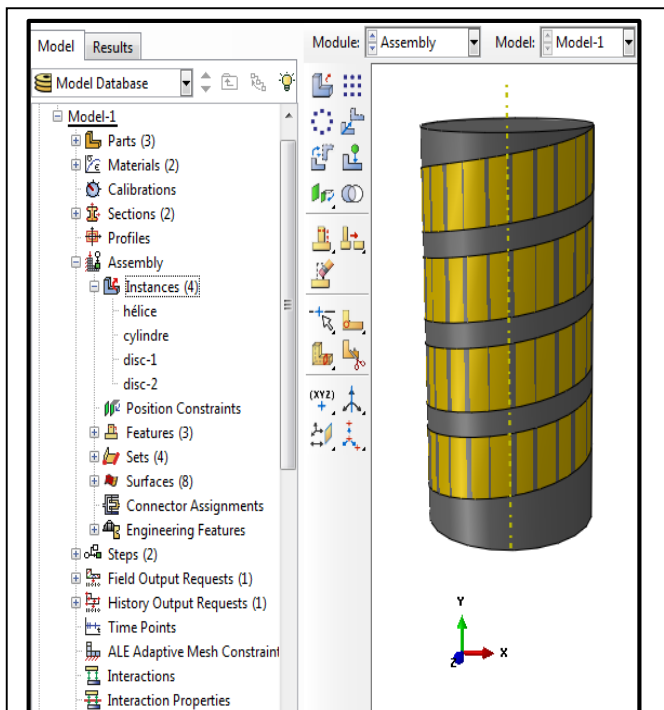


**Figure III.7:** Béton témoin (non confiné).

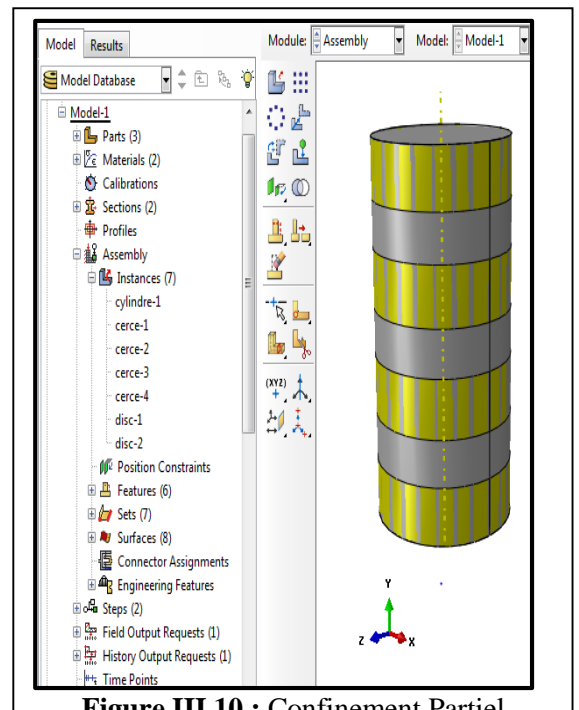


**Figure III.8:** Béton avec ajouts (15PV10SV).

On a confiné le béton avec du tissu verre (FBV) de trois manières différentes comme le montre les figures suivantes:



**Figure III.9 :** Confinement Partiel Hélicoïdal.



**Figure III.10 :** Confinement Partiel Circulaire.

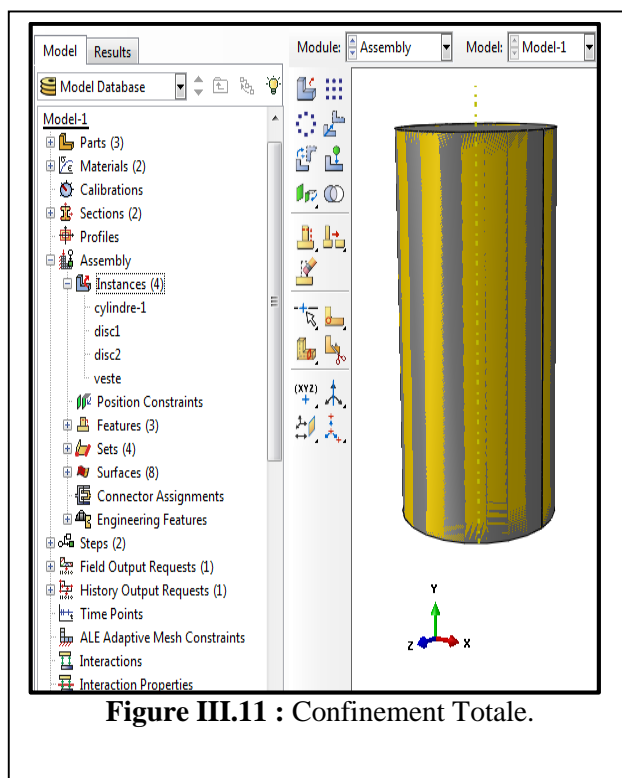


Figure III.11 : Confinement Totale.

### III.4.3 Maillage et modèle élément fini

Dans le module MESH nous intégrons le maillage à notre ensemble. Et pour aboutir à des résultats numériques cohérents on adopte un maillage raffiné seulement dans les zones susceptibles de développer des phénomènes significatifs, le reste de la structure est alors maillée plus grossièrement.

Il est possible de choisir la technique de maillage, le type d'éléments et leur forme (exemple : hexaédriques, cubiques, tétraédrique...), Mais l'utilisation d'éléments de même taille, nous affranchit de l'influence de leur taille sur les résultats numériques. 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 maillage adéquat des différentes pièces constituant notre modèle :

- **Le cylindre de béton** : 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.
- **Le tissu composite** : est maillé avec des éléments surfaciques quadrilatéraux de 10 mm de côté, présentant quatre nœuds ayant 8 degrés de liberté.

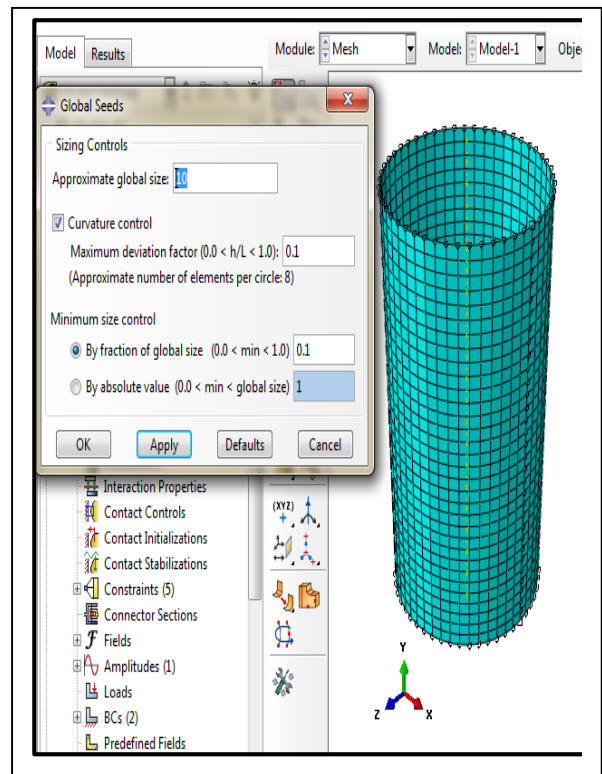
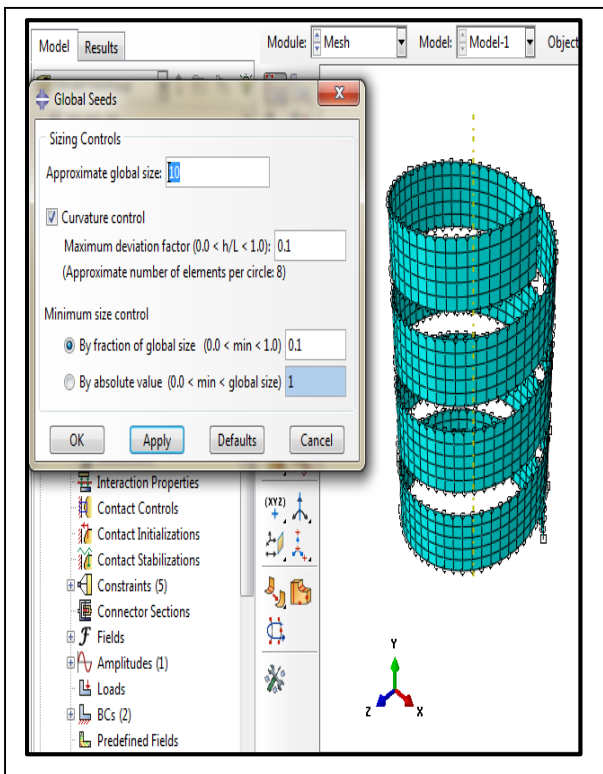
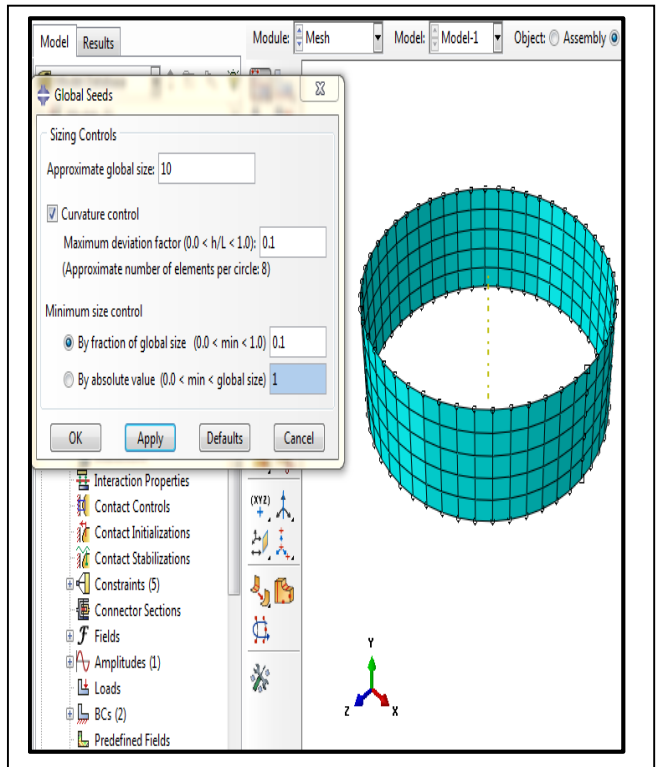
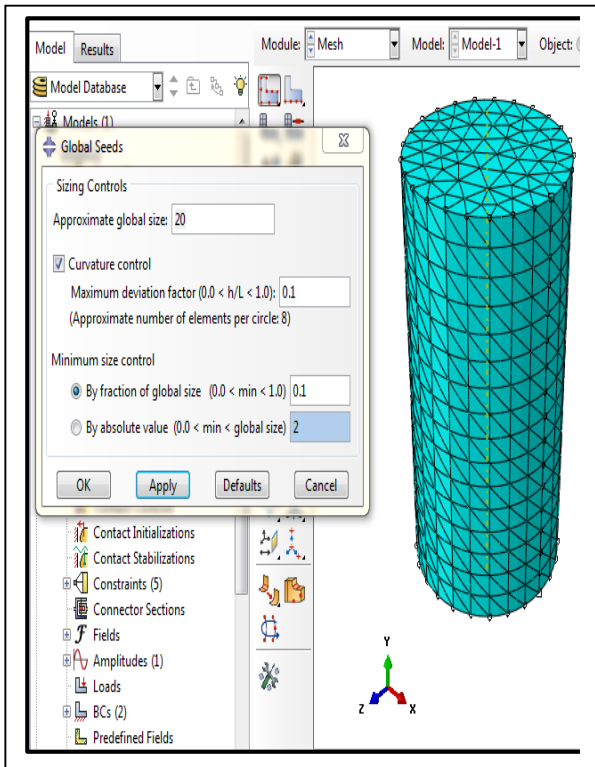


Figure III.12 : Maillages adoptés pour les différents des éléments.

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, 20 mm, 15mm et 10mm.

La Figure III.13 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.

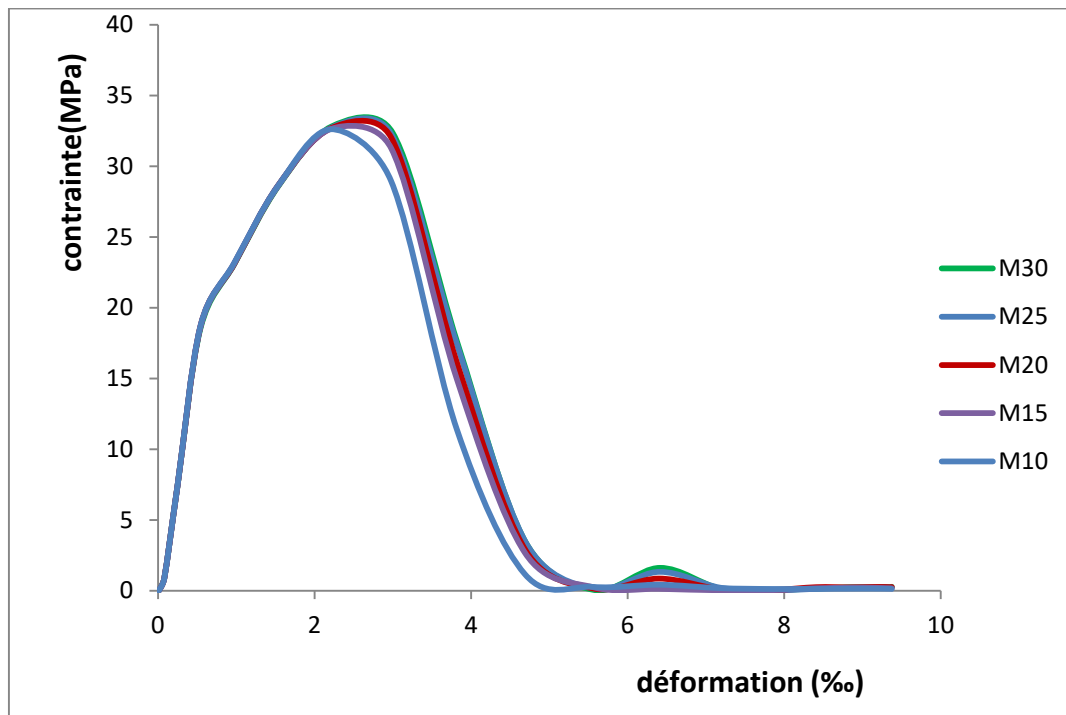


Figure III.13: Courbes contrainte-déformation pour les 5 configurations de maillage.[20]

### III.4.4 Gestion du contact

Dans cette étape nous allons définir le contact entre les différentes pièces et cela se fait par la création des interactions entre celles-ci. 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 : sélectionner les surfaces, puis définir les types de contacts et les associer aux surfaces correspondantes. Nous avons supposé une parfaite adhérence entre les différentes surfaces considérées.

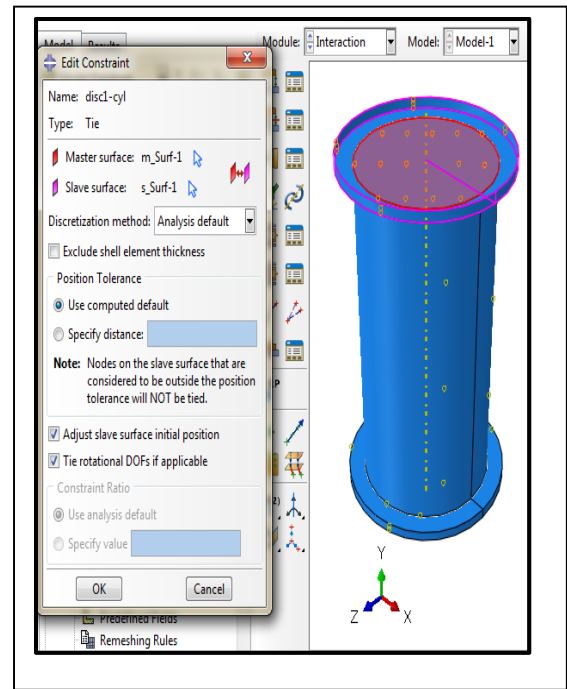
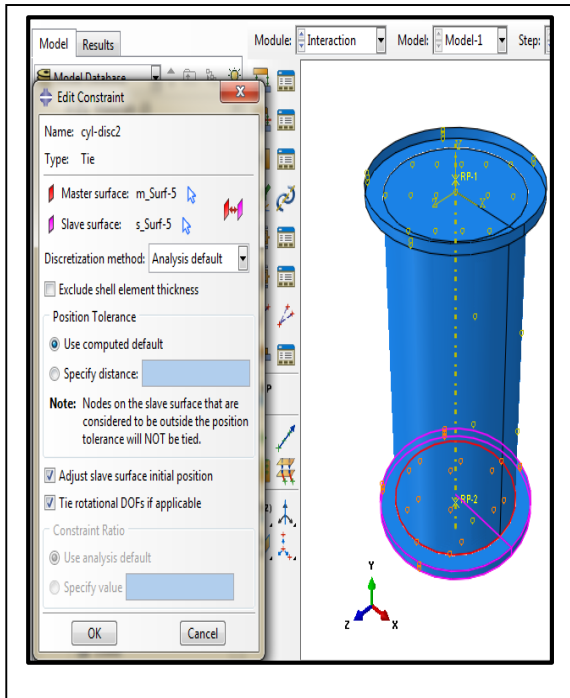


Figure III.14 : Modélisation du contact: Béton-Disque.

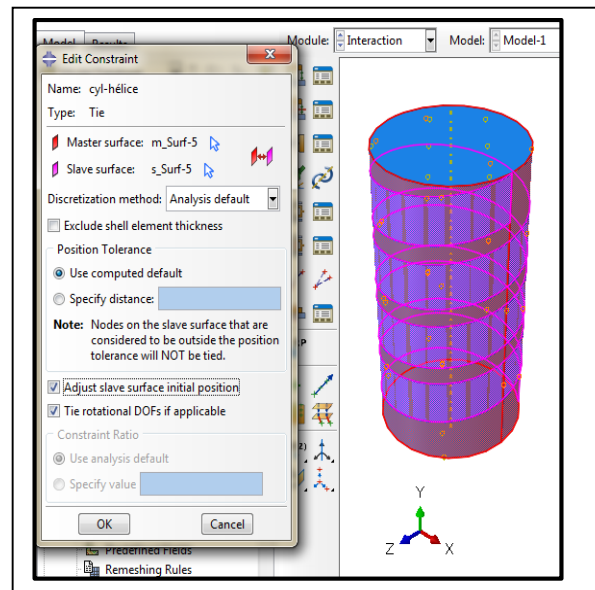
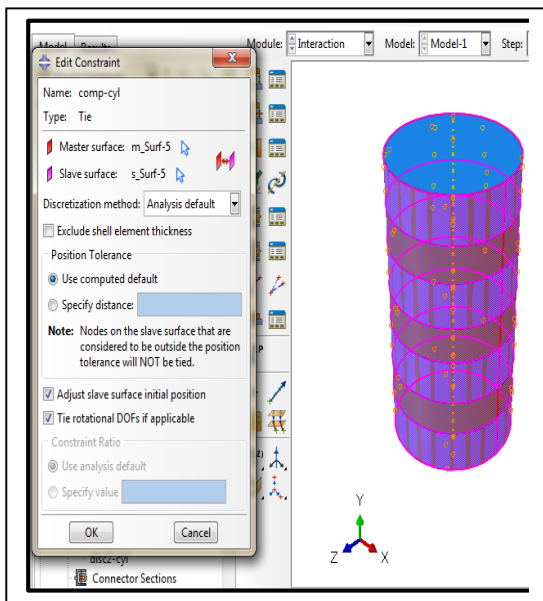
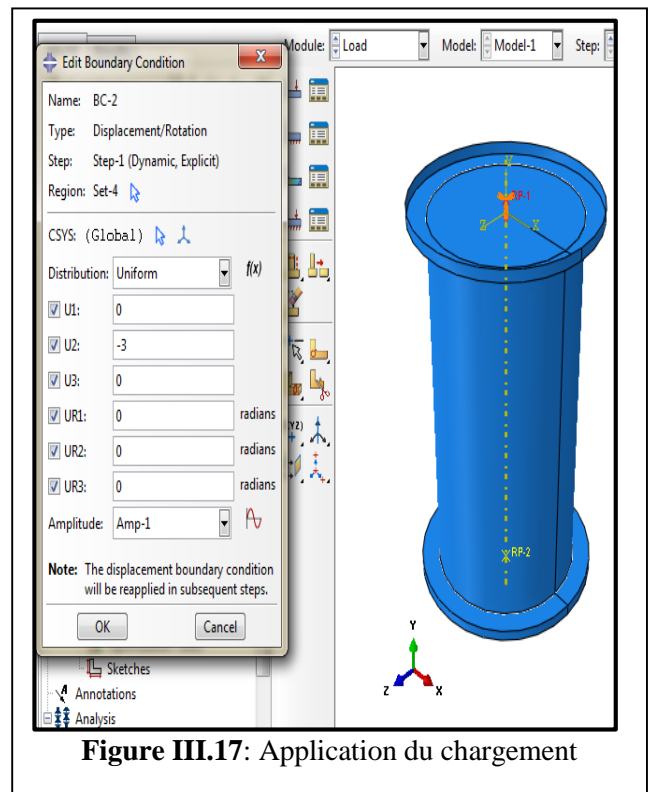
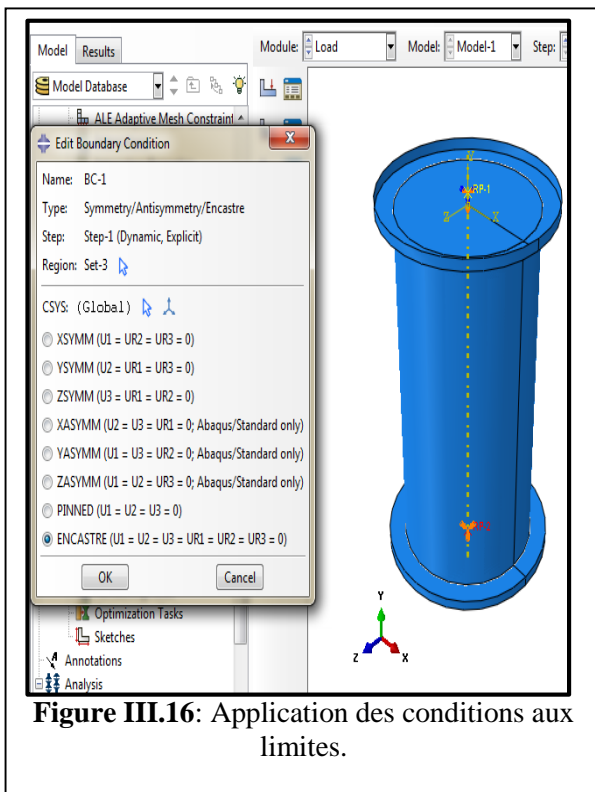


Figure III.15 : Modélisation du contact : Béton-Composite.

### III.4.5 Chargement et conditions aux limites

Comme les essais réalisés au laboratoire et avec des conditions de chargement similaires, pour les introduit On clique sur le module **Load**. Dans notre modèle étudié l'axe y 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.

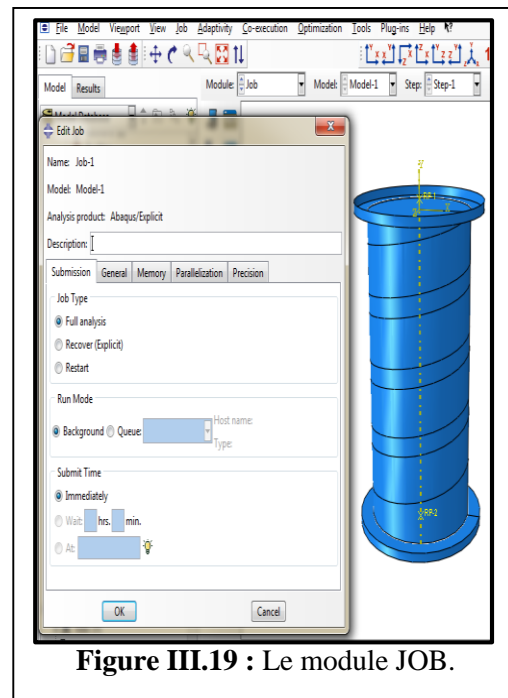
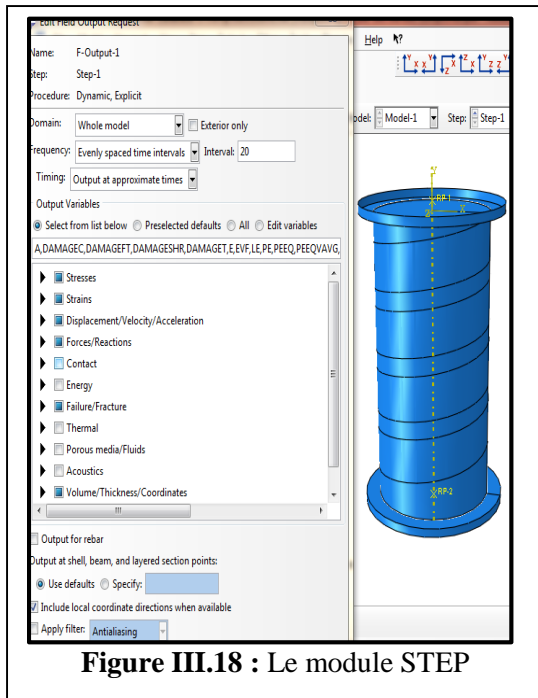


### III.4.6 Gestion des résultats : STEP et JOB

Dans le module « *step* », nous créons une procédure dynamique, explicite, il 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 également dans le module 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.

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.



Une fois que le calcul est terminé, les résultats d'analyse seront affichés par le module visualisation et cela sous forme graphique ou numérique.

### III.5 Modélisation du comportement des matériaux

L'utilisation des modèles éléments finis disponibles dans la littérature est nécessaire pour trouver la réponse réelle de la structure considérée sous des sollicitations extérieures, en se basant sur des données phénoménologiques qui décrivent le comportement des matériaux constituant notre structure (béton et matériaux composites)

#### III.5.1 Modèle élasto-plastique endommageable pour le béton

Le modèle numérique « *Damaged plasticity for concrete and other quasi-brittle materials* » intégré dans le code éléments finis Abaqus permet de décrire le comportement anélastique de béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures, ce modèle est un

modèle de dommages, continu, basé sur la plasticité, pour le béton. Il suppose que les deux principaux mécanismes de défaillance sont la fissuration par traction et le broyage en compression du béton, Ce modèle se réfère à  $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$  en tant que déformations plastiques équivalentes en traction et en compression, respectivement

### III.5.1.1 comportement à la compression

Sous un chargement de compression uni-axiale le béton possède un comportement ductile, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique (partie 1 de la Figure III.20).

Dans le domaine plastique, la réponse est généralement caractérisée par un écrouissage (Partie 2) suivi d'adoucissement (partie 3) 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).

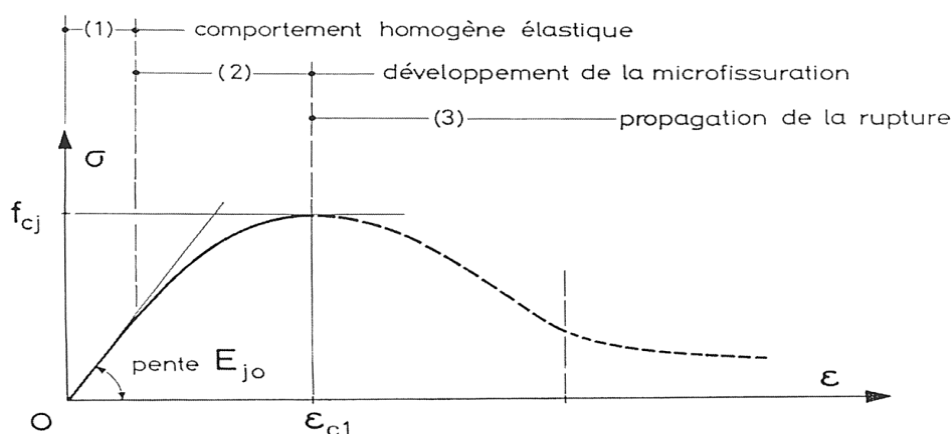


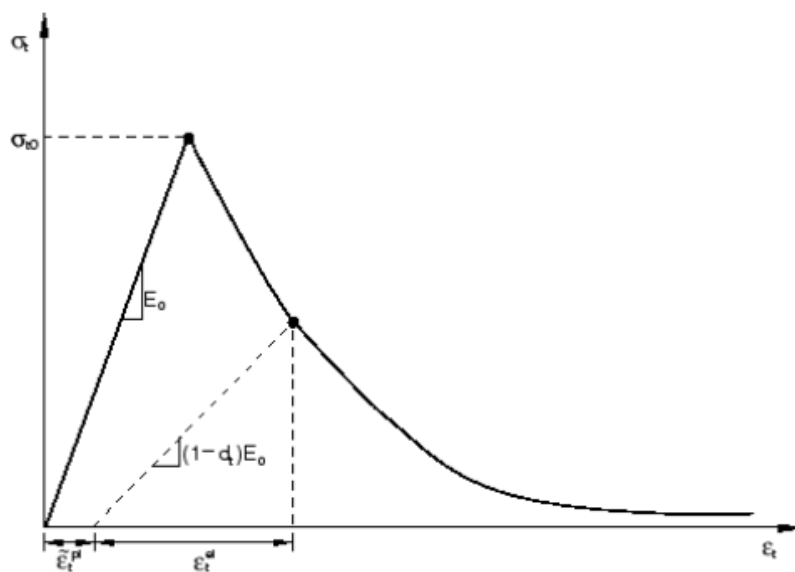
Figure III.20 : Réponse du modèle à la compression simple. [18]

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 [7].

**III.5.1.2 Comportement en traction**

Dans le cas de la traction uni-axiale le comportement général du béton est quasi-fragile, sa représentation est donnée sur la figure III.21 la courbe contrainte-déformation suit une relation linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte de rupture soit atteinte. La contrainte de rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le béton. Au-delà de cette contrainte, la formation de micro fissures est représentée macroscopiquement avec une réponse de ramollissement de contrainte-déformation, qui induit à la localisation des déformations dans le béton.



**Figure III.21 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale. [18]**

Ces figures montrent que, lorsque l'échantillon du béton est déchargé de tout point de l'adoucissement de la direction générale des courbes contrainte-déformation, la réponse de déchargement est affaiblie. La rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. La dégradation de la rigidité élastique est caractérisée par deux variables de dommage d<sub>t</sub> et d<sub>c</sub> qui sont supposées être des fonctions des déformations plastiques, la température est variable prédéfinis:

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

$$d_c = d_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), (0 \leq d_c \leq 1) \tag{III.2}$$

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  $\varepsilon^p$ , la théorie de la plasticité est utilisée. La partition de la déformation totale est effectuée en une partie élastique et une partie plastique.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad \text{III.3}$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

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

Avec :

$D_0^{pl}$ : Rigidité élastique initiale non endommagée du matériau.

$D^{el}$ : Rigidité élastique endommagée.

$d$ : Variable d'endommagement scalaire (ou de dégradation d'énergie).

$\sigma$ : 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  $\sigma_c$ : Module de Young instantané et la contrainte maximale en compression.

#### **III.5.1.3 Comportement cyclique uni-axial**

Dans des conditions de chargement cyclique uni-axial, les mécanismes de dégradation sont assez complexes, impliquant l'ouverture et la fermeture de micro-fissures formées précédemment, ainsi que leur interaction. Expérimentalement, on constate une certaine récupération de la rigidité élastique lorsque la charge change de signe lors d'un test cyclique uni-axial. L'effet de récupération de la rigidité, également appelé « effet unilatéral », est un aspect important du comportement du béton sous chargement cyclique. L'effet est généralement plus prononcé lorsque la charge passe de la tension à la compression, ce qui provoque la fermeture des fissures de traction, ce qui permet de récupérer la rigidité en compression.

Le module élastique sera alors donné par :

$$E = (1 - d) E_0$$



**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.5.2 Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites

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.

Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90°, les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. Les directions selon la chaîne et la trame forment les directions principales (1 et 2) du matériau.

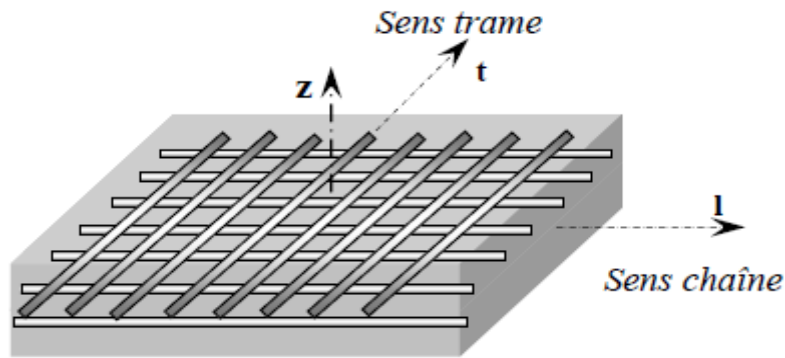


Figure III.23: Pli d'un matériau composite orthotrope. [19]

### III.5.3 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 [7].

Dans notre étude, le critère interactif de *Hill-Tsai* [19] 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.

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

### III.5.4 Paramètres des modèles [20]

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

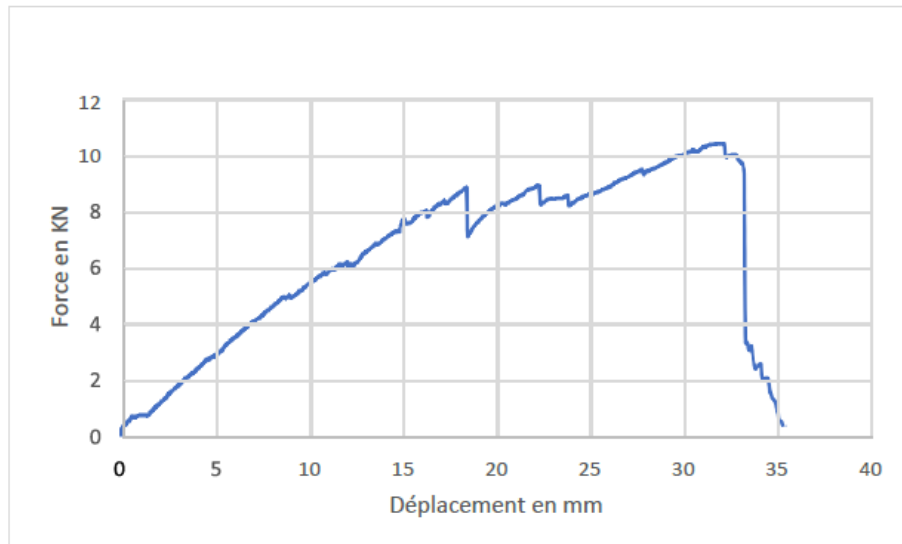
Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
$f_c$ (MPa)	33.68	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.6f_c$ (MPa)	20.208	Contrainte élastique en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06f_c$ (MPa)	2.6208	Contrainte maximale en traction
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (MPa)	36387	Module de Young instantané
$\nu$	0.267	Coefficient de poisson
$\psi$	32°	Angle de dilatation sous compression axiale.
$a_f = \sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1.16	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale
$a_e$	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

### III.5.5 Essai de traction du tissu recyclé

Afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques en traction du tissu recyclé utilisé des essais de traction simple ont été réalisés au sein du laboratoire.

**Tableau III.3 :** Caractéristiques de l'essai

Les propriétés de l'essai de traction	Les valeurs
Vitesse	0.1 kN/s
Température	20
Cellule	200 kN
Échantillon	2/3
Section	Rectangulaire
Largeur	55 mm
Épaisseur	1.5 mm
Longueur	200 mm
Aire	82.5 mm <sup>2</sup>
Résistance	200 MPa
Aire minimale de la section	0.1 mm <sup>2</sup>



**Figure IV.24** : Courbe de la résistance de traction du tissu recyclé.

**Tableau III.4** : Paramètres du modèle numérique des composites PP

Paramètres	Valeur	Dénotation
F(kN)	10.43	Force maximale
L (mm)	36.66	Déplacement
R (MPa)	126.4	Résistance maximale de traction
E <sub>1</sub> (MPa)	86000	Module de Young longitudinal
E <sub>2</sub> (MPa)	86000	Module de Young transversal
$\nu_{12}$	0.22	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
G <sub>12</sub> (MPa)	35200	Module de cisaillement sur le plan transversal

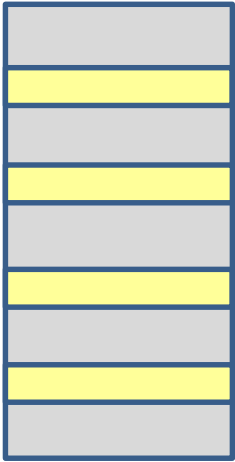
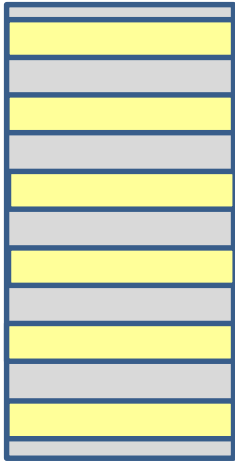
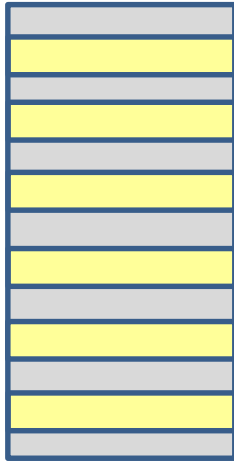
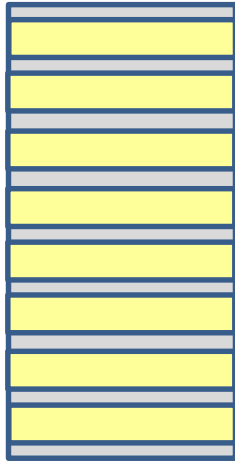
**Tableau III.5**: Paramètres du modèle numérique des composites en fibres de verre.

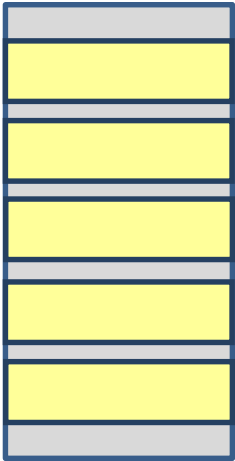
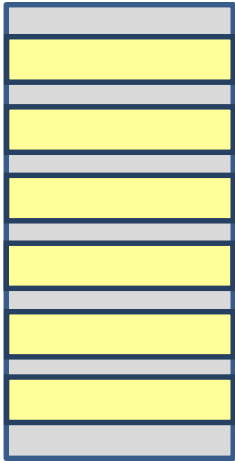
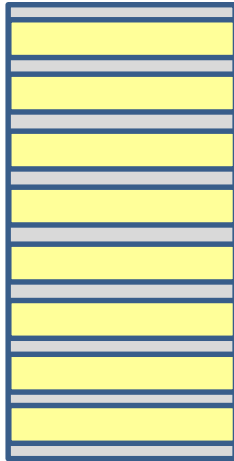
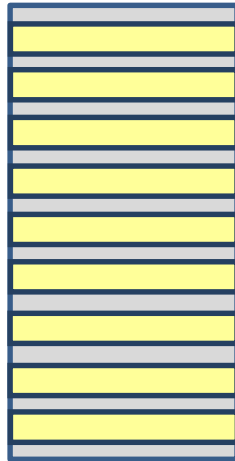
Paramètres	Valeur	Dénotation
E <sub>1</sub> (MPa)	86000	Module de Young longitudinal
E <sub>2</sub> (MPa)	86000	Module de Young transversal
$\nu_{12}$	0.22	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
G <sub>12</sub> (MPa)	35200	Module de cisaillement sur le plan transversal

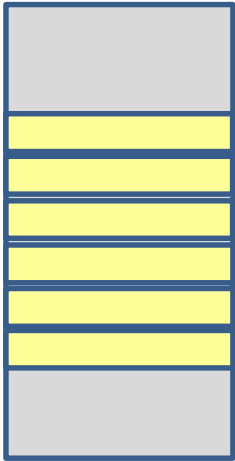
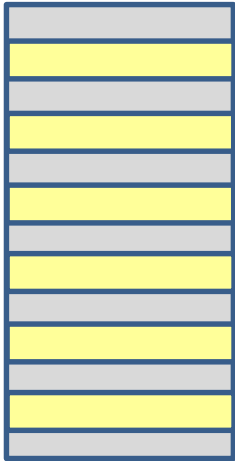
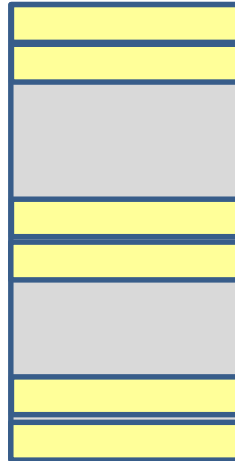
### III.6 Les variantes pour le confinement circulaire

- Largeur des cerces ;
- Espacement entre les cerces ;
- Cerces à différents emplacements.

Tableau III.6: Configuration pour les variations des cerces.

Variation de l'espacement entre les cerces (largeur= 30mm, épaisseur=1mm)			
ES=40mm	ES=30mm	ES=20mm	ES=10mm
			

Variation de la largeur des cerces (espacement=10mm, épaisseur=1mm)			
L=50mm	L=40mm	L=30mm	L=25mm
			

Optimisation de l'emplacement des cerces (Largeur=30mm, épaisseur=1mm)		
L30C	L30ES20	L30ES70
		

Avec :

L30C : Cerces de Largeur 30mm centrées au milieu du spécimen

L30ES20 : Cerces de Largeur 30mm espacées de 20 mm

L30ES70 : Cerces de Largeur 30mm espacées de 70 mm

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les procédures numériques qui nous permettent de simuler le comportement non linéaire de cylindres composites en béton confiné sous chargement axial en compression. Les principales opérations qui permettent la création de la géométrie et des conditions aux limites du modèle et la fonctionnalité du code de calcul Abaqus sont soigneusement résumées. Les matériaux constitutifs sont modélisés par des modèles numériques intégrés au code ABAQUS, à savoir : un modèle élastoplastique pour le béton et un modèle élastique orthotrope pour les matériaux composites.

# **Chapitre IV**

## **Résultats & discussions**

## Introduction

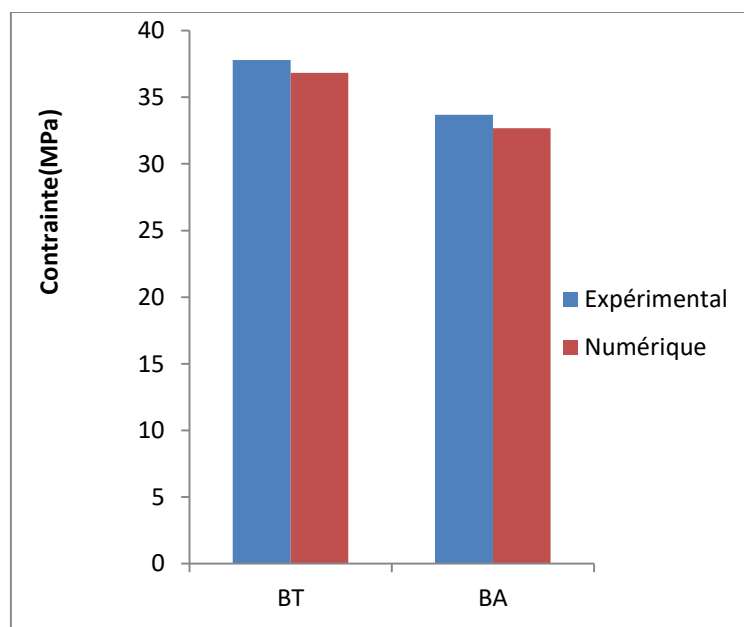
L'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux résultats obtenus et leurs interprétations. Dans un premier temps nous présenterons les résultats de la simulation du confinement de l'éprouvette en béton par un tissu à base de fibres de verre. Différentes configurations seront présentées. Par la suite une comparaison avec des résultats issus de la littérature consacrée au confinement par des tissus de récupération à base de fibre de polypropylène sera présentée. Enfin une optimisation de la position du renfort sera présentée.

### IV.1 Validation de l'analyse numérique

#### IV.1.1 Confrontation des contraintes en compression [20]

Le modèle élément fini, pour le béton témoin et béton avec ajouts, proposé est validé à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux, elles ont pour objectif de valider les apports observés dans les simulations, notamment dans l'analyse des phénomènes observés tels que les paramètres mécaniques intrinsèques (contraintes).

La figure suivante montre un histogramme des résistances maximales du béton témoin (sans ajouts) et du béton avec ajouts de verre obtenue par la simulation numérique et l'analyse expérimentale. [20]



**Figure IV.1:** Histogramme de confrontation des résultats expérimentaux, numériques. [20]

Une bonne concordance, en termes de contrainte est observée entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation numérique à base d'éléments finis. En effet, l'erreur enregistrée

pour le béton témoin (de référence) est de l'ordre de 2.55% et pour le béton avec ajout est de 2.99 % ce qui est fort satisfaisant.[20]

### IV.1.2 Comportement global des cylindres en compression

Une confrontation des courbes contraintes-déformations des différents spécimens d'étude est illustrée sur la figure IV.2. Cette confrontation met en évidence les caractéristiques mécaniques des cylindres témoins et des cylindres avec ajouts de déchets de verre en termes de capacité portante et de ductilité. La figure suivante présente les courbes contrainte-déformation du béton témoin et le béton avec ajout (15% poudre de verre et 10% sable de verre) obtenus par la simulation numérique

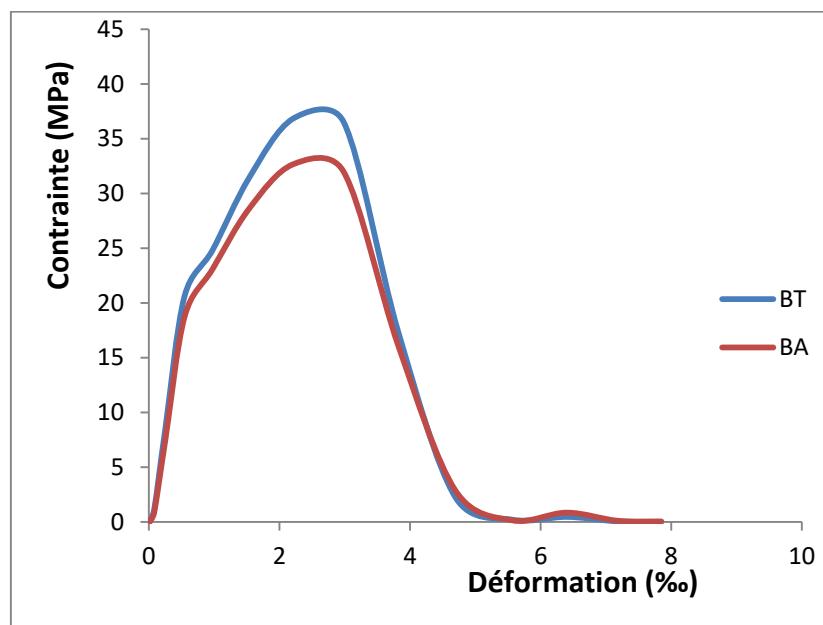


Figure IV.2 : Contrainte-déformation béton témoin et béton ajout. [20]

Les Figures IV.1 et IV.2 montrent qu'en ajoutant les déchets de verre au béton la résistance à la compression diminue légèrement (constat déjà établi par d'autres recherches). A cet effet on propose de reprendre cette chute de résistance par le confinement de ce béton par un tissu composite « Fibre de verre » puis faire la comparaison avec le confinement à l'aide d'un tissu de recyclage.

## IV.2 Notion de Taux de confinement

Pour rappel, le taux de confinement est défini par le rapport de la surface du composite (renfort) sur la surface du béton à confiner. Ce paramètre est très important puisqu'il servira de base pour la comparaison entre les différentes configurations du renfort. Ainsi, nous présentons dans le tableau IV.1 suivant les taux de confinement obtenus pour chaque configuration du renfort.

$$\text{Taux de confinement : } x = \frac{SC}{ST} \times 100$$

Avec :

SC : surface confiné

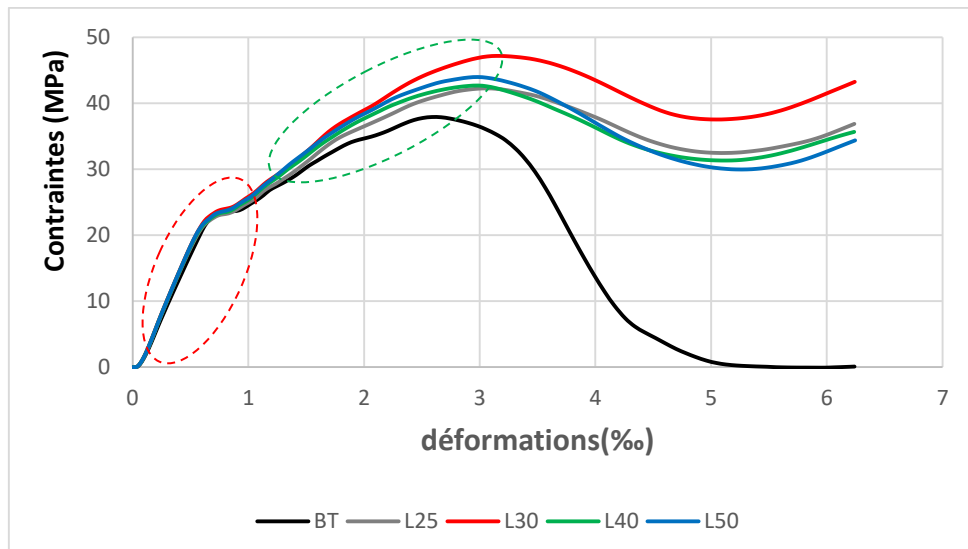
ST : surface totale

**Tableau IV.1** : Valeur du taux de confinement pour chaque configuration du renfort.

Type de confinement	Taux de confinement
L 25 ES 10	70%
L30 ES 10	75%
L40 ES 10	75%
L50 ES 10	78%
Total	100%

## IV.3 Résultats du confinement avec cerces

Dans ce cas, le confinement des éprouvettes en béton s'effectue avec un renfort en tissu sous forme de cerces (voir figure chapitre III). Les résultats de la simulation sont présentés dans la figure ci-dessous sous forme de courbe Contraintes-Déformations. Nous rappelons que dans ce cas, nous faisons varier la largeur de la bande (cerce) avec un espacement de 10 mm.

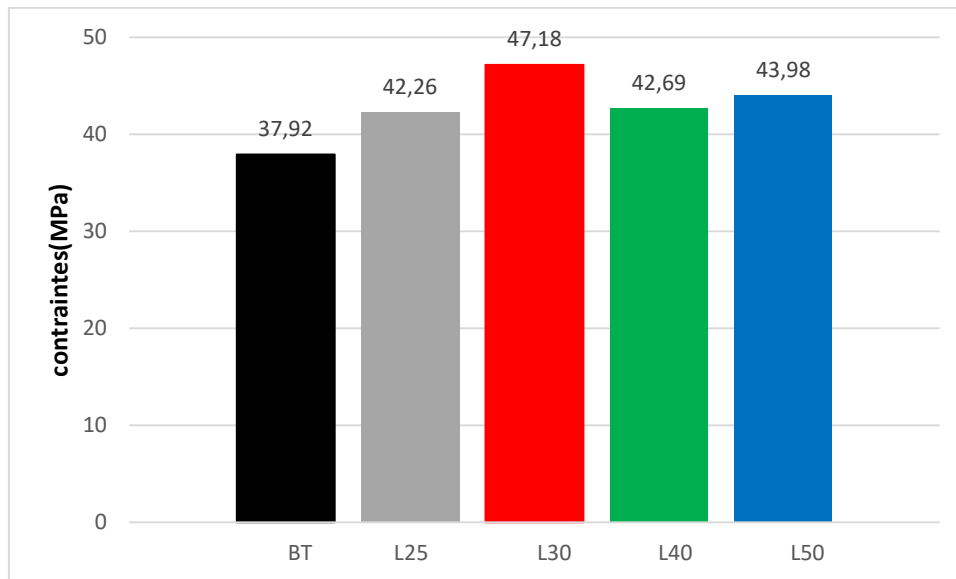


**Figure IV. 3:** courbe force-déplacement de la variation de la largeur des cerces.

A partir de la courbe de la figure IV. 3, nous constatons les points suivants :

- Une phase de comportement identique à celui d'un matériau homogène et élastique, celle-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte et la déformation. Les courbes sont confondues dans cette zone. A la fin de la première zone, il se produit un point de transition qui indique que la fissure du béton a eu lieu. À ce stade, les bandes de composites commencent à développer un effet de confinement.
- Le béton non confiné atteint une contrainte maximale de 37.92Mpa, correspondant à une déformation de l'ordre de 0.85%, au-delà de cette valeur on remarque une chute de la contrainte jusqu'à la rupture par contre les contraintes des cylindres confinés continuent à augmenter au-delà de la valeur maximale du béton non confiné.
- L'analyse des résultats montre clairement l'amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité des cylindres confinés comparativement au cylindre non confiné et cela pour les quatre variations de la largeur.

Sur la figure IV.4, nous présentons l'histogramme de l'évolution de la résistance maximale en fonction de la configuration du renfort. Nous constatons que la configuration du cylindre confiné avec des bandes d'une largeur de 30mm présentant un taux de confinement de 75%, représente la configuration optimale avec un gain de 23% par rapport au béton témoin (non confiné).



**Figure IV.4 :** Histogramme des contraintes.

Afin de comprendre le comportement de l'éprouvette en béton sous les différentes configurations, nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus. La figure IV.5 illustre l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises dans les cylindres témoin et confiné, on observe que l'évolution du champ 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 une compression uni-axiale connaît des concentrations de champs de contraintes dans la région centrale engendrant par la suite l'ouverture des fissures, qui donnera par la suite la rupture de l'élément, comparativement au cylindre confiné, l'évolution des contraintes est lente, en effet on assiste après la phase élastique à une mobilisation du confinement du béton suite à la différence de rigidité entre la matrice béton et fibre de verre.

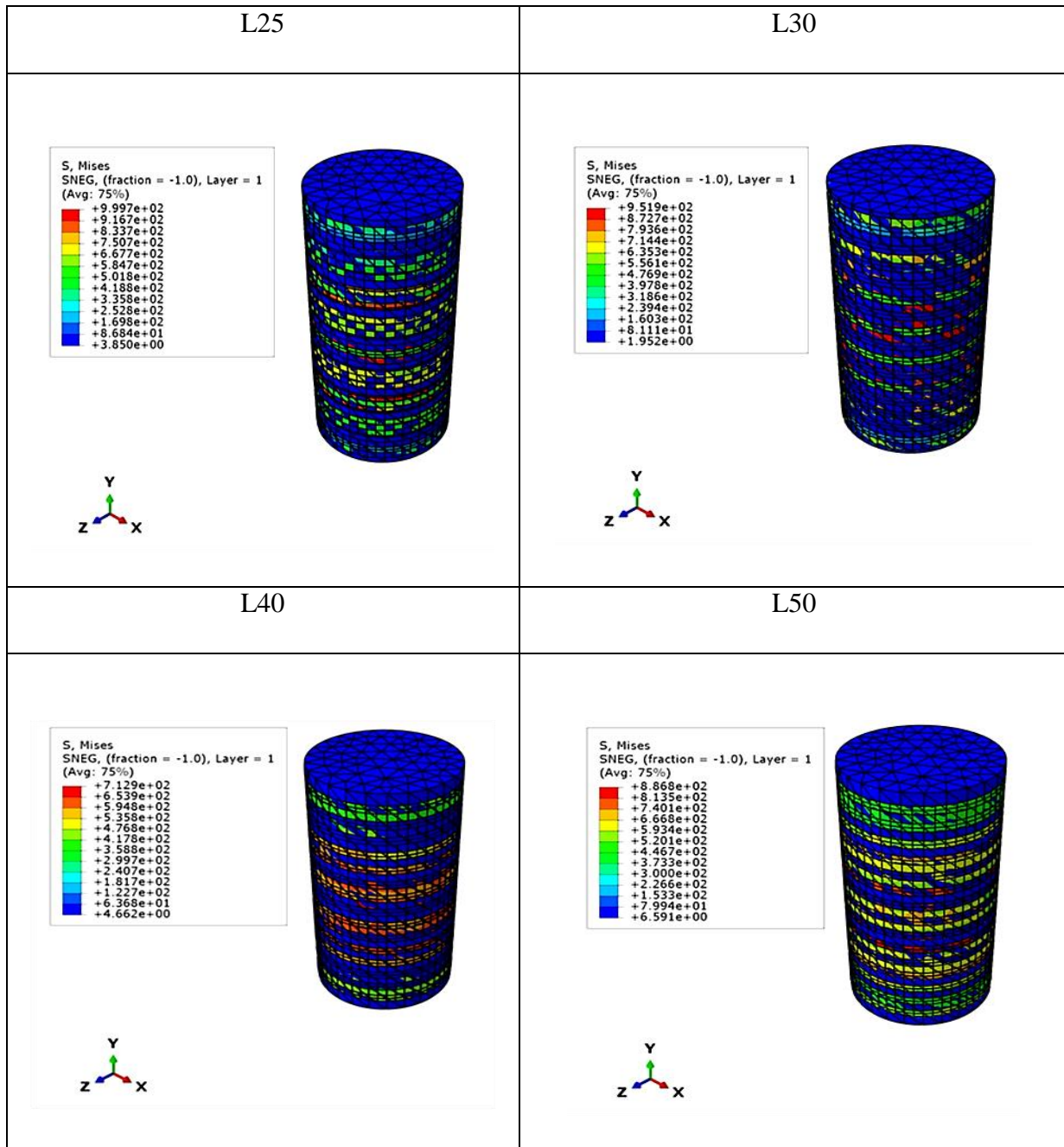


Figure IV.5: Évolution de la distribution des contraintes de Von Mises

#### IV.4 Résultats avec le confinement total et hélicoïdale

Dans ce cas, nous introduisons deux configurations supplémentaires à savoir le confinement total et le confinement hélicoïdal (voir figures- chapitre III). Les résultats de la simulation sont présentés dans la figure IV.6 sous forme de courbe Contraintes-Déformations. Nous constatons que la configuration éprouvette totalement confinée présente en termes de contrainte ultime un gain par rapport au béton témoin estimé à 24%, soit un gain de 1% par rapport au modèle confiné avec cerces L=30mm. Il y a lieu d'indiquer que dans le cas du confinement avec un renfort hélicoïdal il y a une baisse de la résistance limite de l'ordre de 4%.

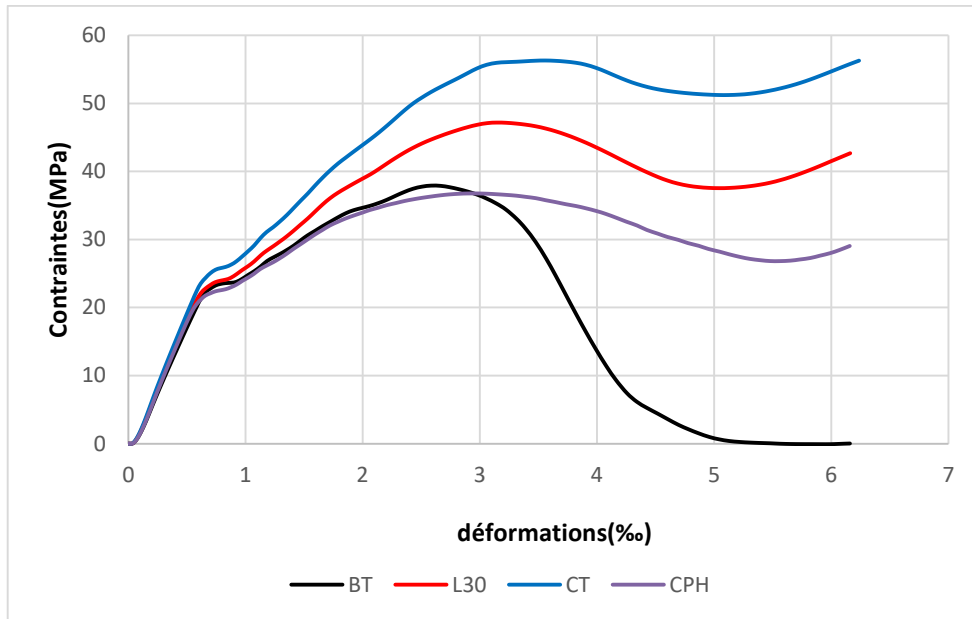


Figure IV.6 : Courbe comparative contraintes - déformations

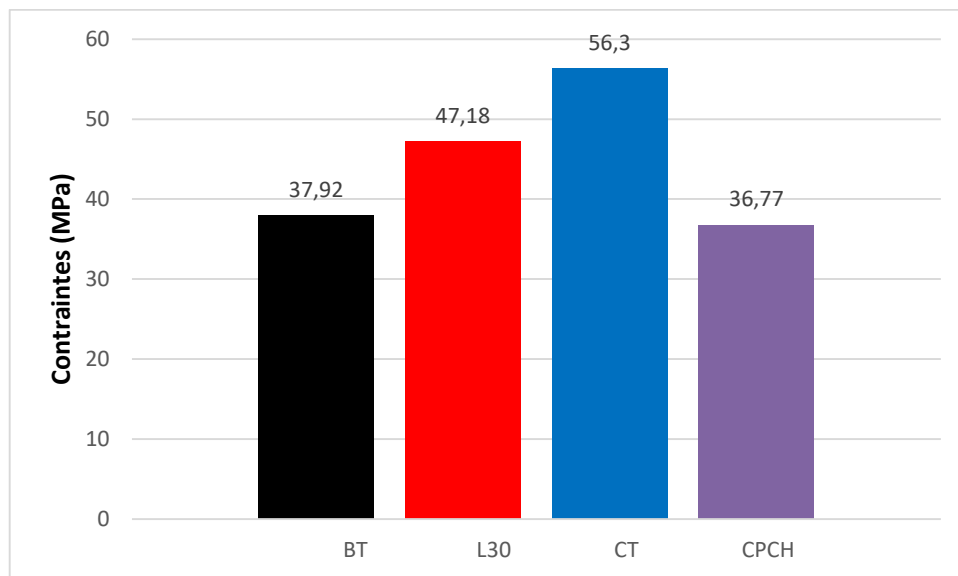
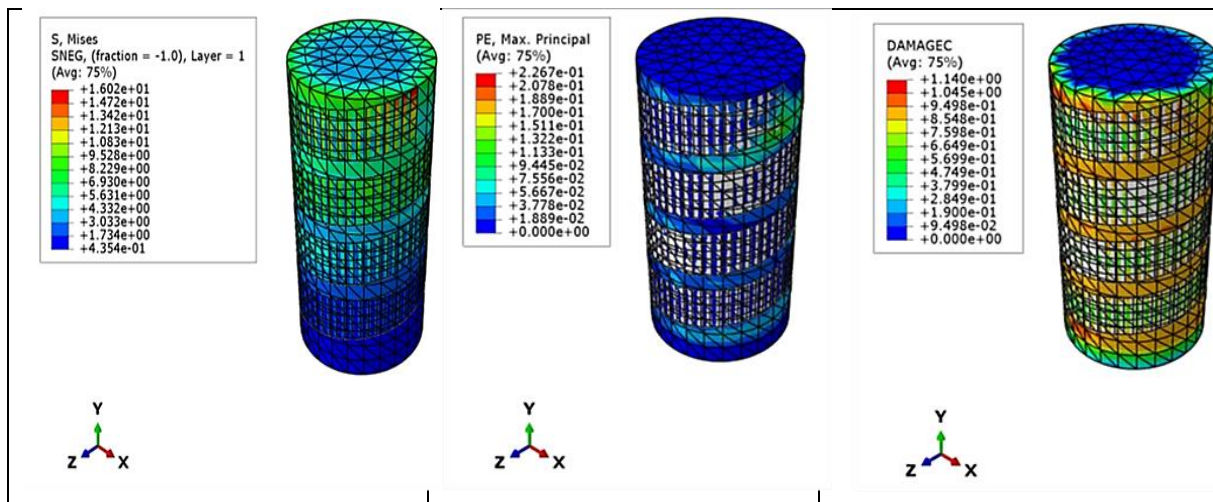
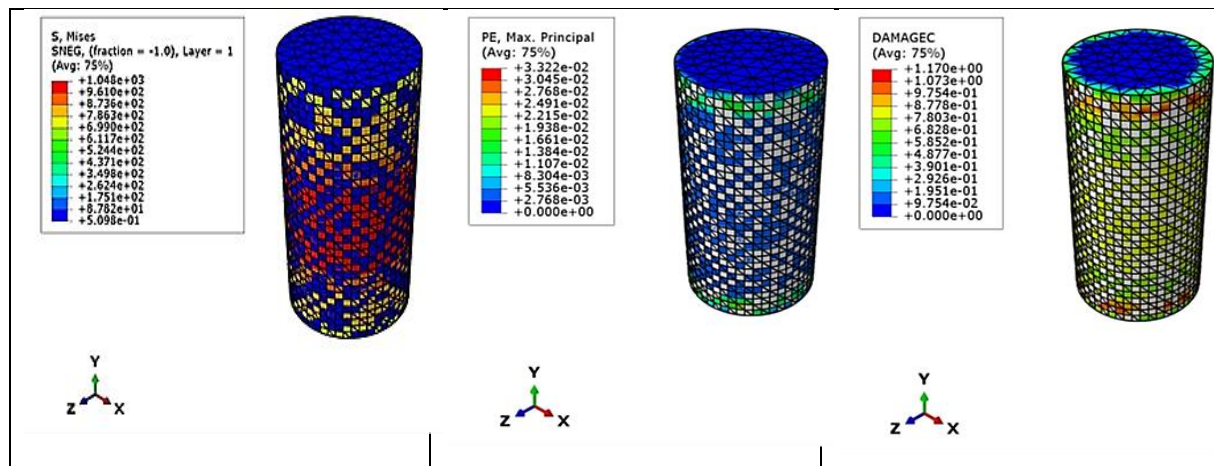


Figure IV.7 : Histogramme des contraintes.





**Figure IV.8:** Évolution de la contrainte de Mises – déplacement max – le degré d'endommagement

Après analyse des différentes configurations de confinement étudiées, il est très clair que le confinement total reste la solution qui donne les meilleurs résultats, le béton se trouve emprisonner totalement par la présence du tissu sur toute la hauteur des éprouvettes. Cependant il y a lieu d'indiquer que la configuration L30 avec un espacement de 10mm, nous donne des résultats concluants en termes de résistance et aussi en termes d'économie sachant qu'on ne confine que 75% de l'éprouvette en béton ce qui réduit la quantité du matériau à utiliser.

#### IV.5. Comparaison avec le tissu en polypropylène recyclé :

Comme indiqué dans l'introduction, nous présentons dans ce qui suit une comparaison entre la fibre de verre objet de notre travail et la fibre en polypropylène recyclé. Cette dernière a été utilisée par *Benkaci* [20]. Cette comparaison s'effectue en considérant les différentes configurations de confinement. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés dans les figures suivantes:

IV.5.a. Confinement avec cerces : L25 ES 10

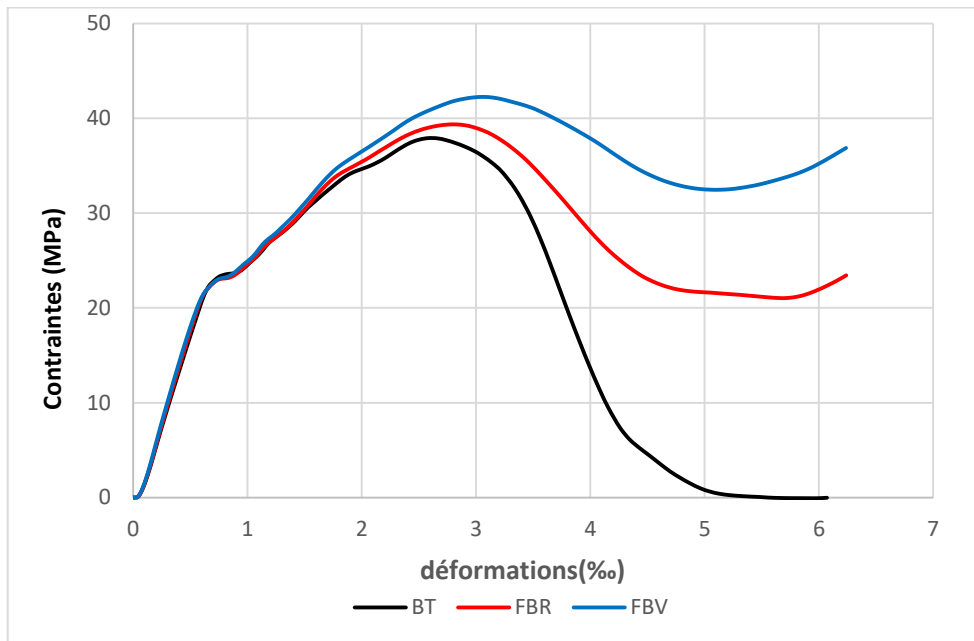


Figure IV.9: Courbe comparative contraintes – déformations.

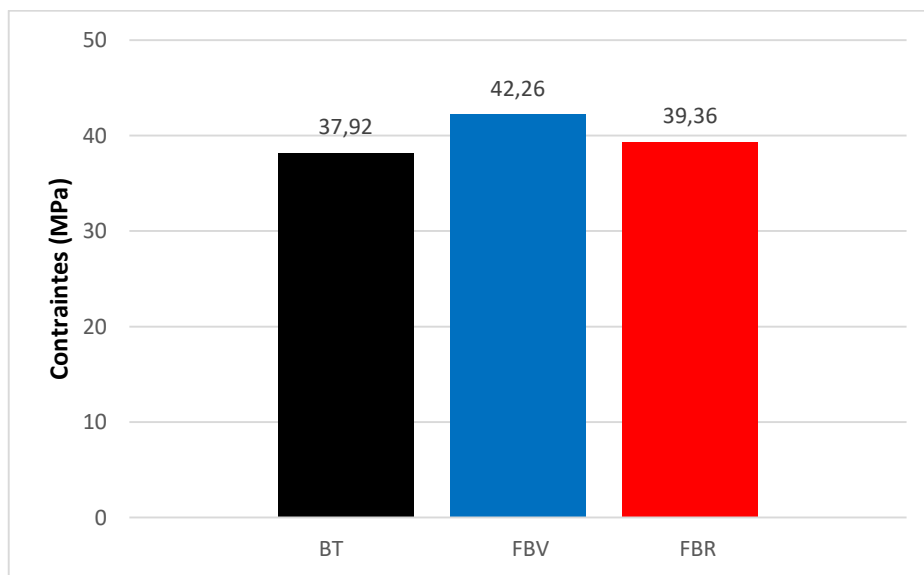


Figure IV.10 : Histogramme des contraintes.

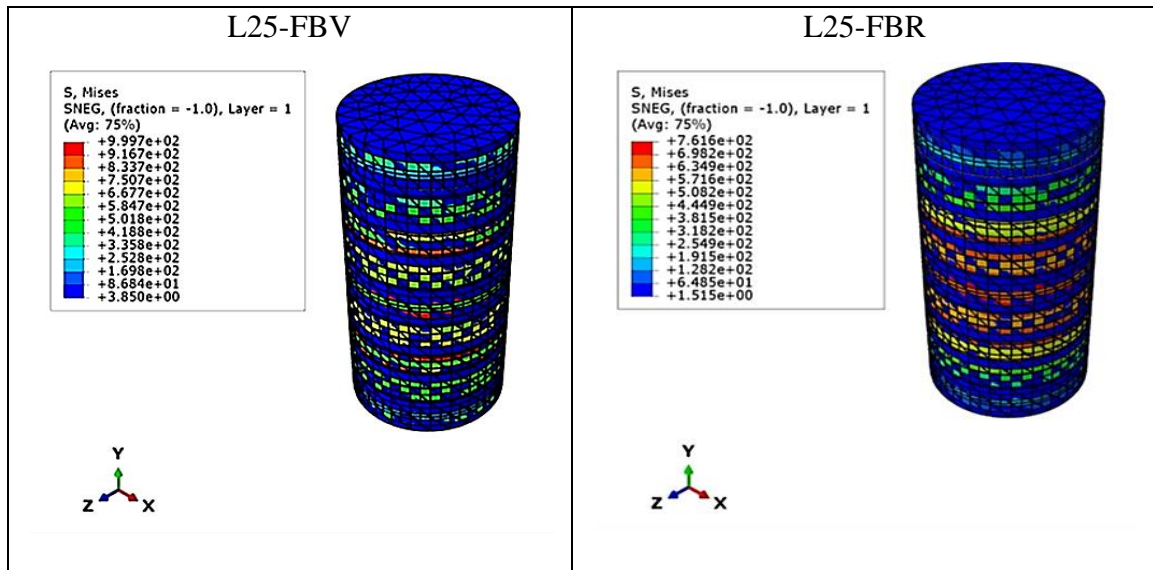


Figure IV.11 : Évolution de la contrainte

### IV.5.b. Confinement avec cerces : L30 ES 10

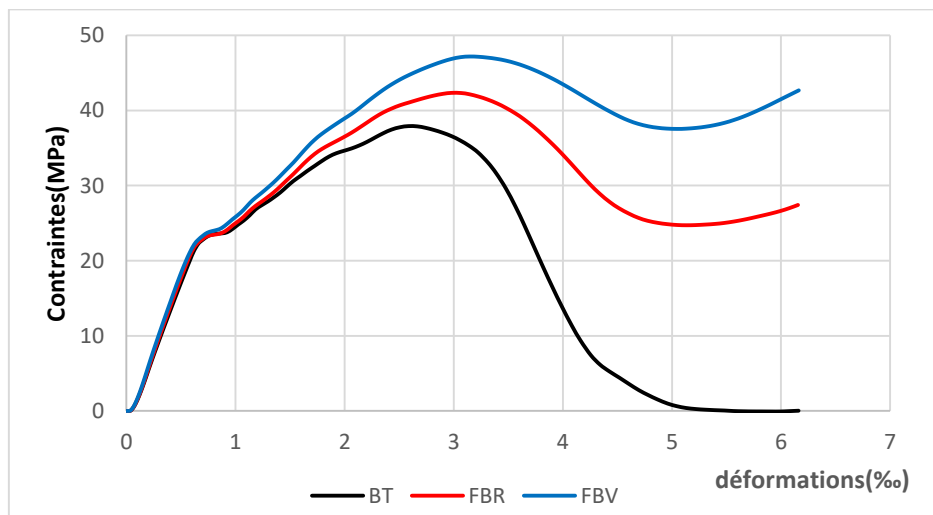


Figure IV.12 : Courbe comparative contraintes - déformations.

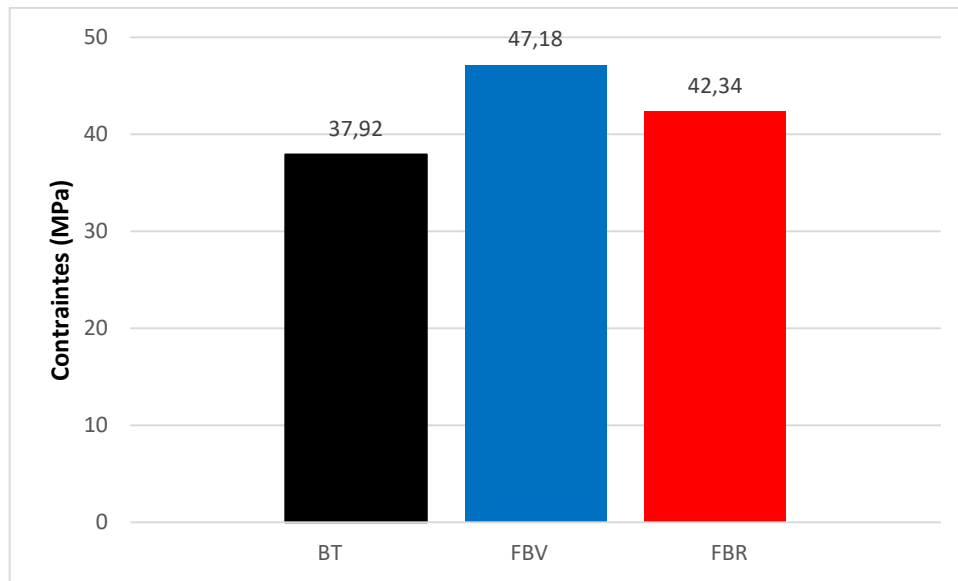


Figure IV.13 : Histogramme des contraintes.

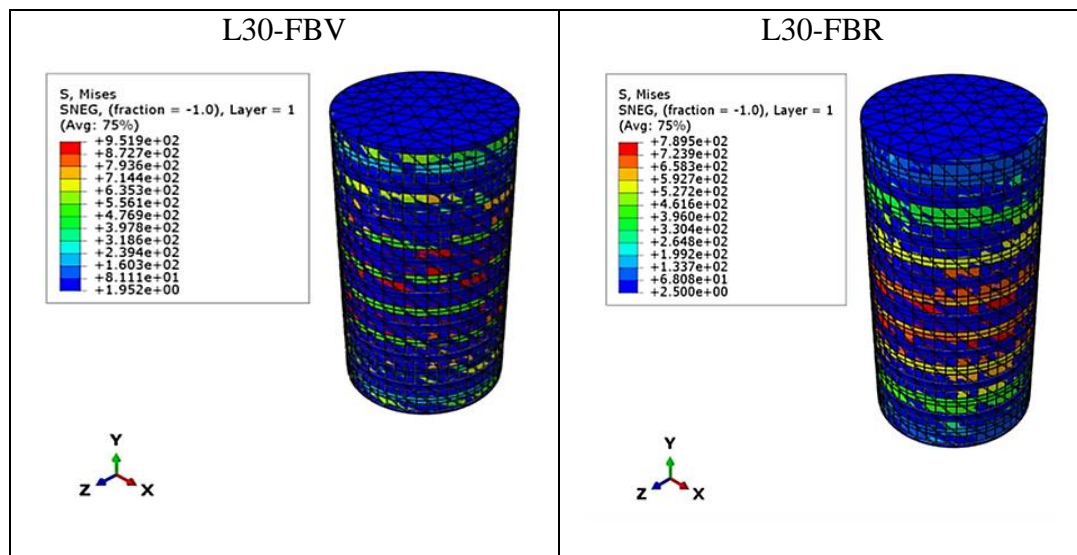


Figure IV.14: Évolution de la contrainte

IV.5.c. Confinement avec cerces : L40 ES 10

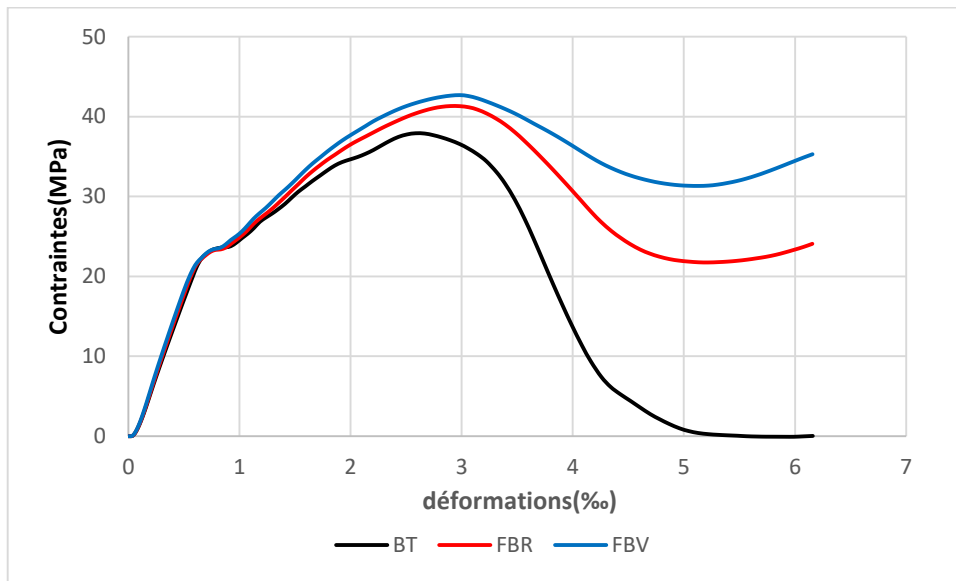


Figure IV.15 : Courbe comparative contraintes – déformations.

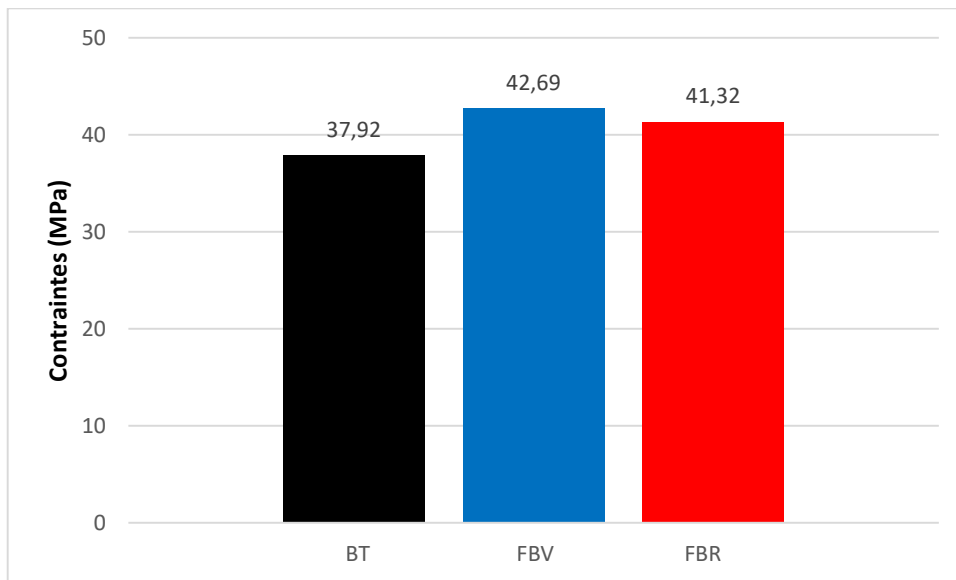


Figure IV.16 : Histogramme des contraintes.

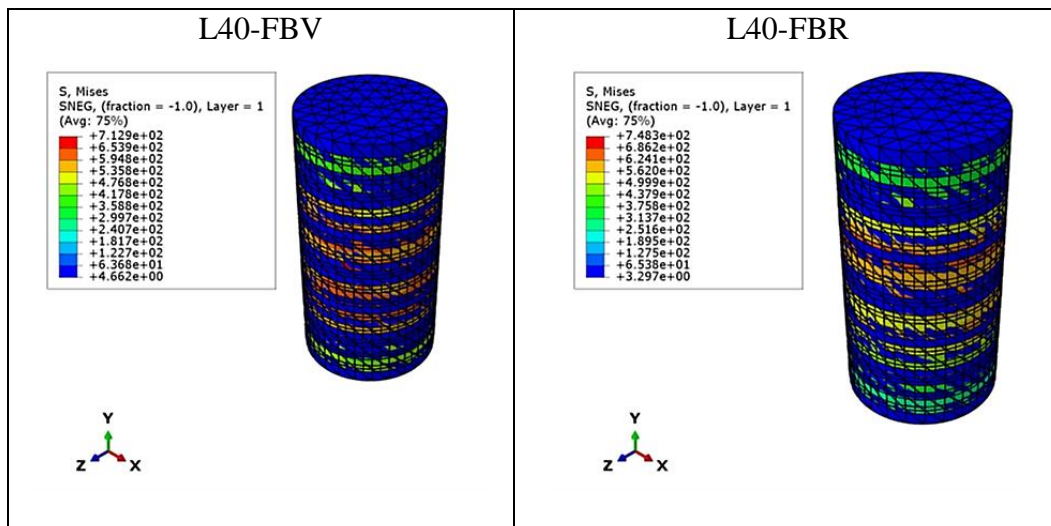


Figure IV.17 : Évolution de la contrainte

#### IV.5.d. Confinement avec cerces : L50 ES 10

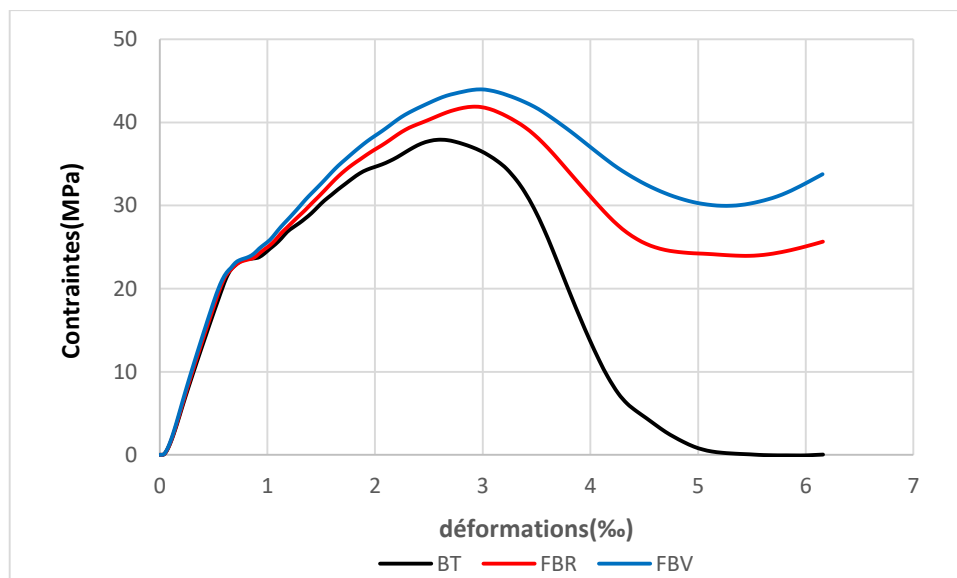


Figure IV.18: Courbe comparative contraintes – déformations.

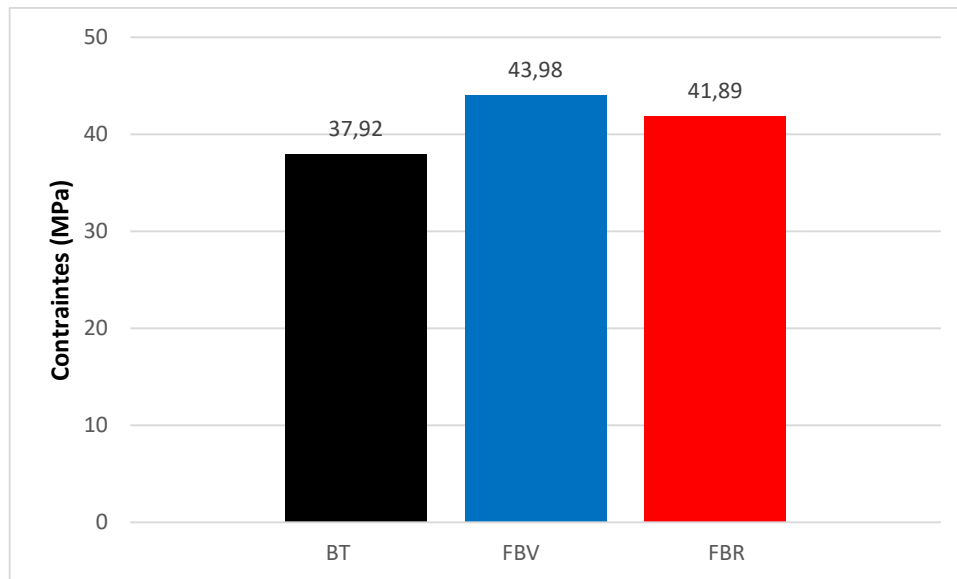


Figure IV.19: Histogramme des contraintes.

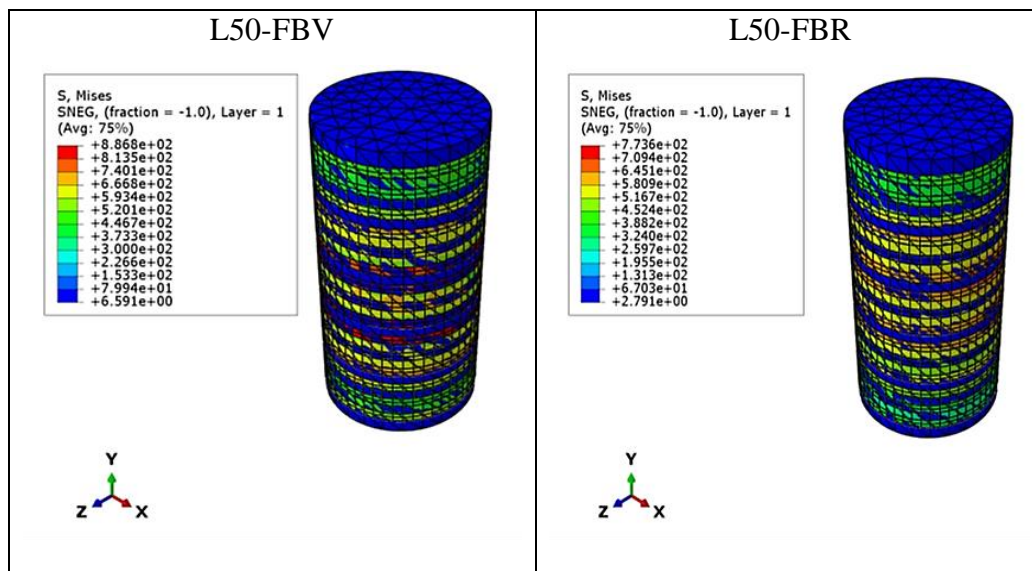


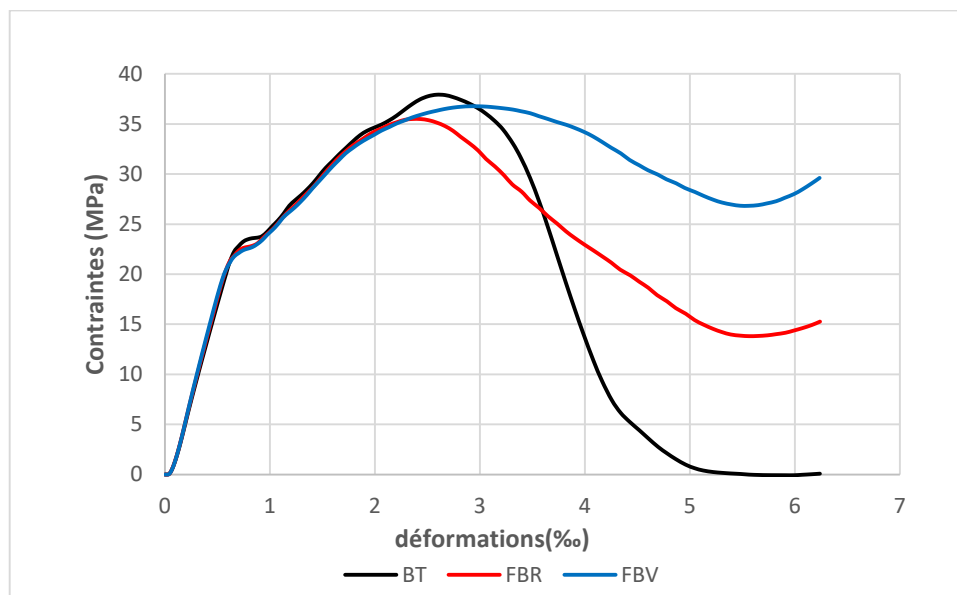
Figure IV.20: Évolution de la contrainte

A partir des résultats obtenus, nous constatons les points suivants :

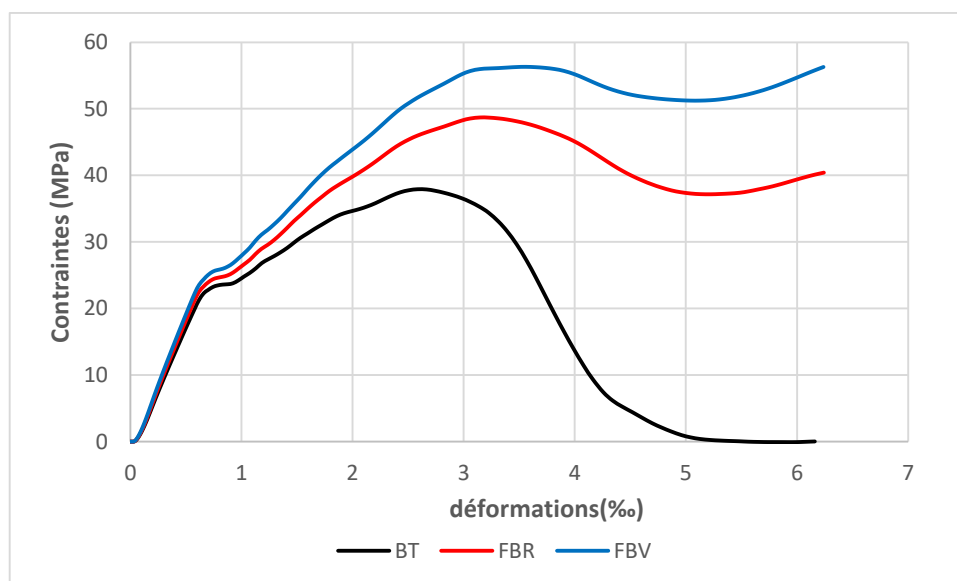
- Les quatre modèles confinés, sous chargement ultime, subissent un même déplacement égal à 1.5mm.
- En termes de charge ultime, le gain par rapport au modèle Béton non confiné varie respectivement de 10.6% à 15.09% pour un confinement L=25, L40 et L50 avec le tissu de verre, et varie respectivement de 3% à 9.62% pour un confinement L=25 L40 et L50 avec le tissu de PP recyclé.

- Le modèle confiné avec  $L=30\text{mm}$  engendre la plus grande progression estimée à presque 24% pour un confinement avec un tissu de verre et à 10.8% pour un tissu en PP recyclé.
- Ce dernier subit un déplacement de 1.5mm correspondant à la charge ultime, ce qui dénote une rigidité renforcée.

#### IV.5.e Confinement total et hélicoïdale

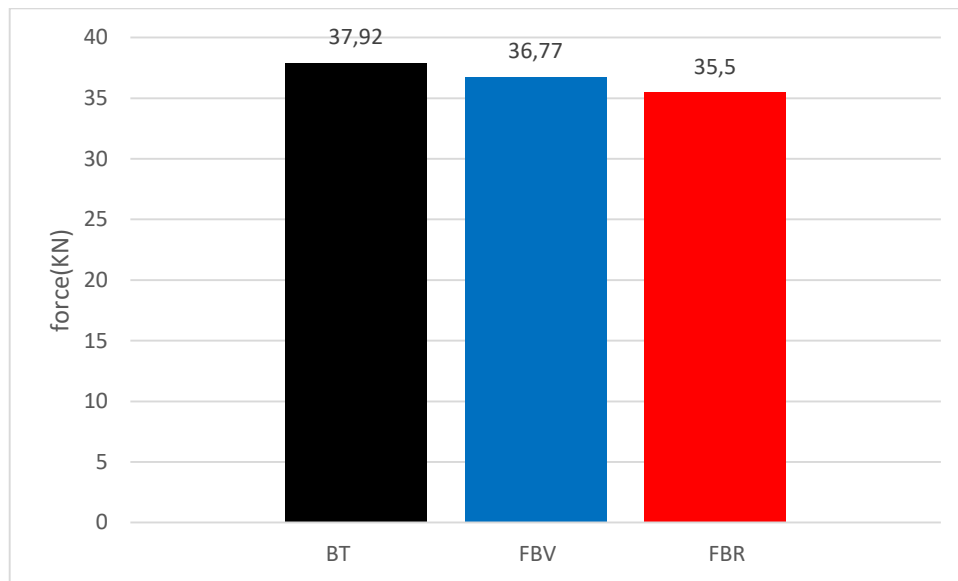


(a) Hélicoïdale

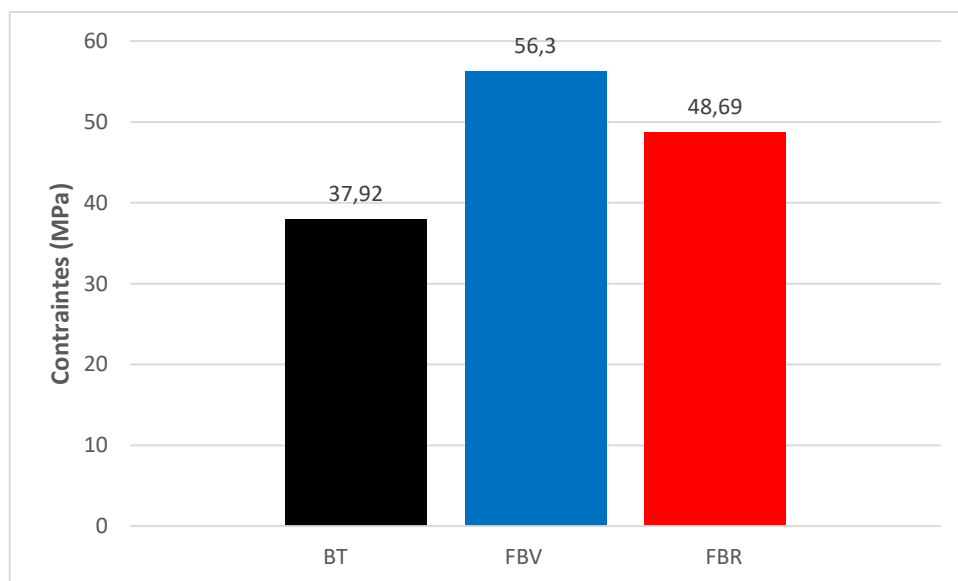


(b) total.

Figure IV.21: Courbe comparative contraintes - déformations.



(a) hélicoïdale



(a) Total.

**Figure IV.22:** Histogramme des contraintes.

Pour une même configuration, on constate à travers les résultats obtenus que le tissu en fibre de verre offre un meilleur résultat par rapport au tissu en fibre en polypropylène. Ceci est dû nécessairement aux propriétés de la fibre de verre. Reste toujours que le béton confiné avec le tissu de recyclage offre une amélioration en termes de contraintes par rapport au béton non confiné.

Dans le cas du confinement Hélicoïdal l'apport n'est pas significatif puisqu'on ne constate aucune amélioration de la contrainte par au béton non confiné.

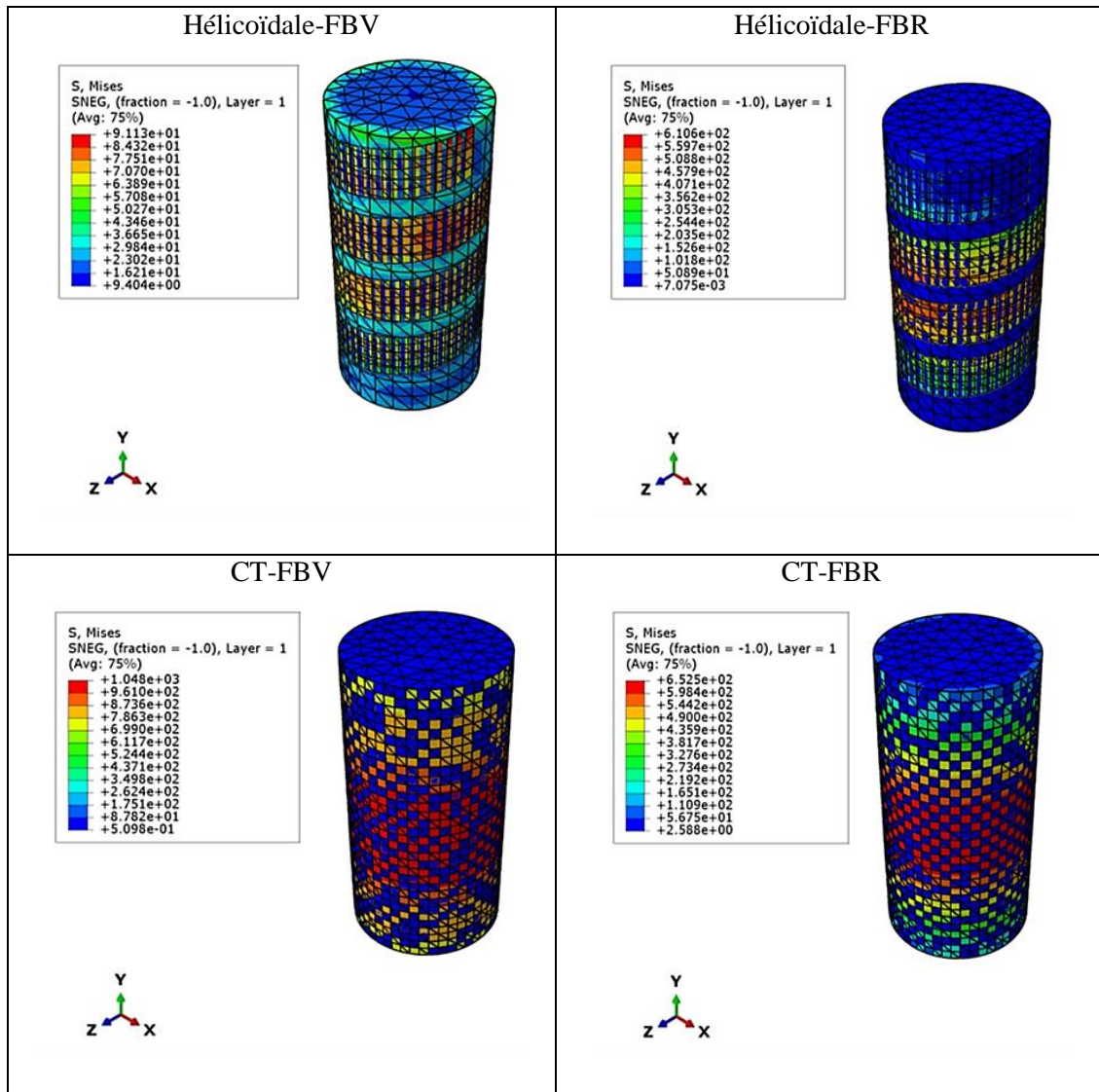


Figure IV.23: Evolution des contraintes

## IV.6 Optimisation de l'emplacement des bandes

Afin d'optimiser au maximum l'utilisation des bandes, on a procédé à une simulation d'une éprouvette confinée avec des cerces L30 correspondant à un taux de confinement de 56.25%. IL est primordial de préciser que nous maintenons le taux de confinement constant. Nous avons procédé à une variation de l'emplacement et à une variation de l'espacement entre les bandes. Les différentes configurations ainsi considérées sont comme suit :

Tableau IV.2 : Configurations de confinement considérées

Désignation	Conception	Taux de confinement (%)
BT	béton témoin	-
L30ES70	confinement avec 2 cerces L30 placées à chaque 70mm	56.25
L30ES20	six cerces de largeur L30 avec un espacement de 20mm	56.25
L30C	six cerces placées au centre de l'éprouvette en béton.	56.25

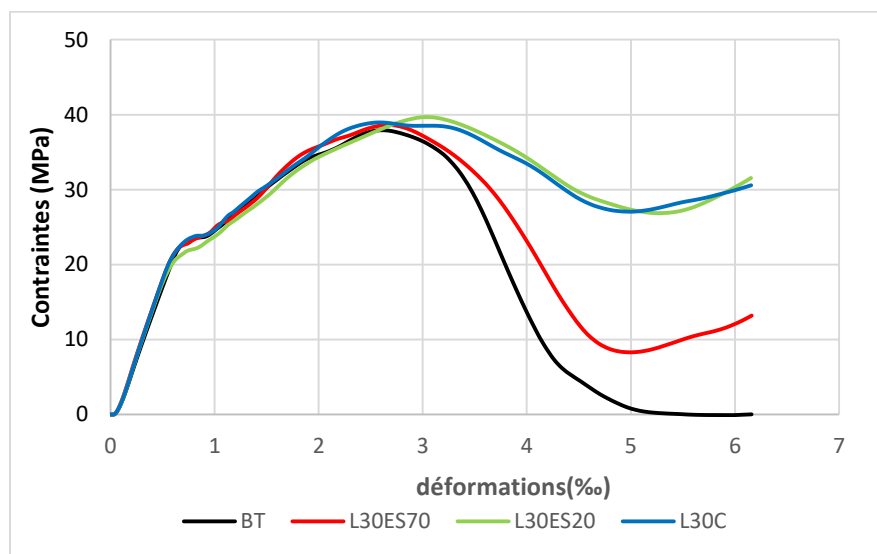


Figure IV.24: Courbe comparative contraintes - déformations.

A partir de la courbe de la figure IV.30, nous constatons clairement que la configuration L30-ES10 représente la configuration optimale bien sûr en comparaison avec les autres configurations correspondantes au confinement partiel. Le confinement reste bien évidemment la configuration qui donne les meilleurs résultats.

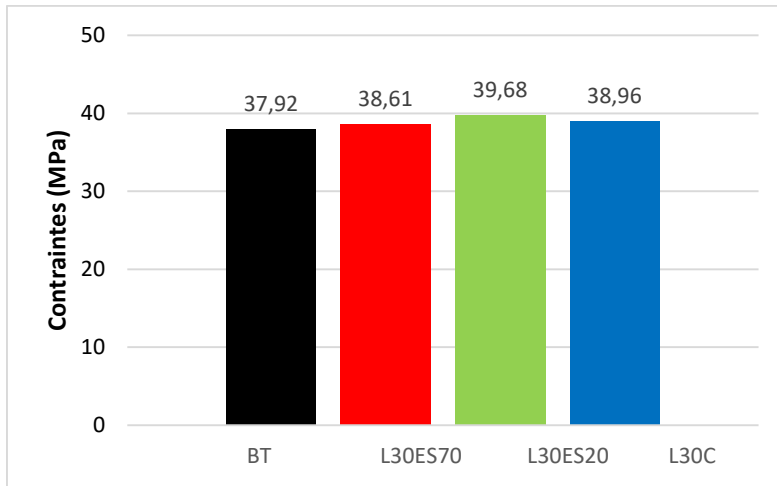
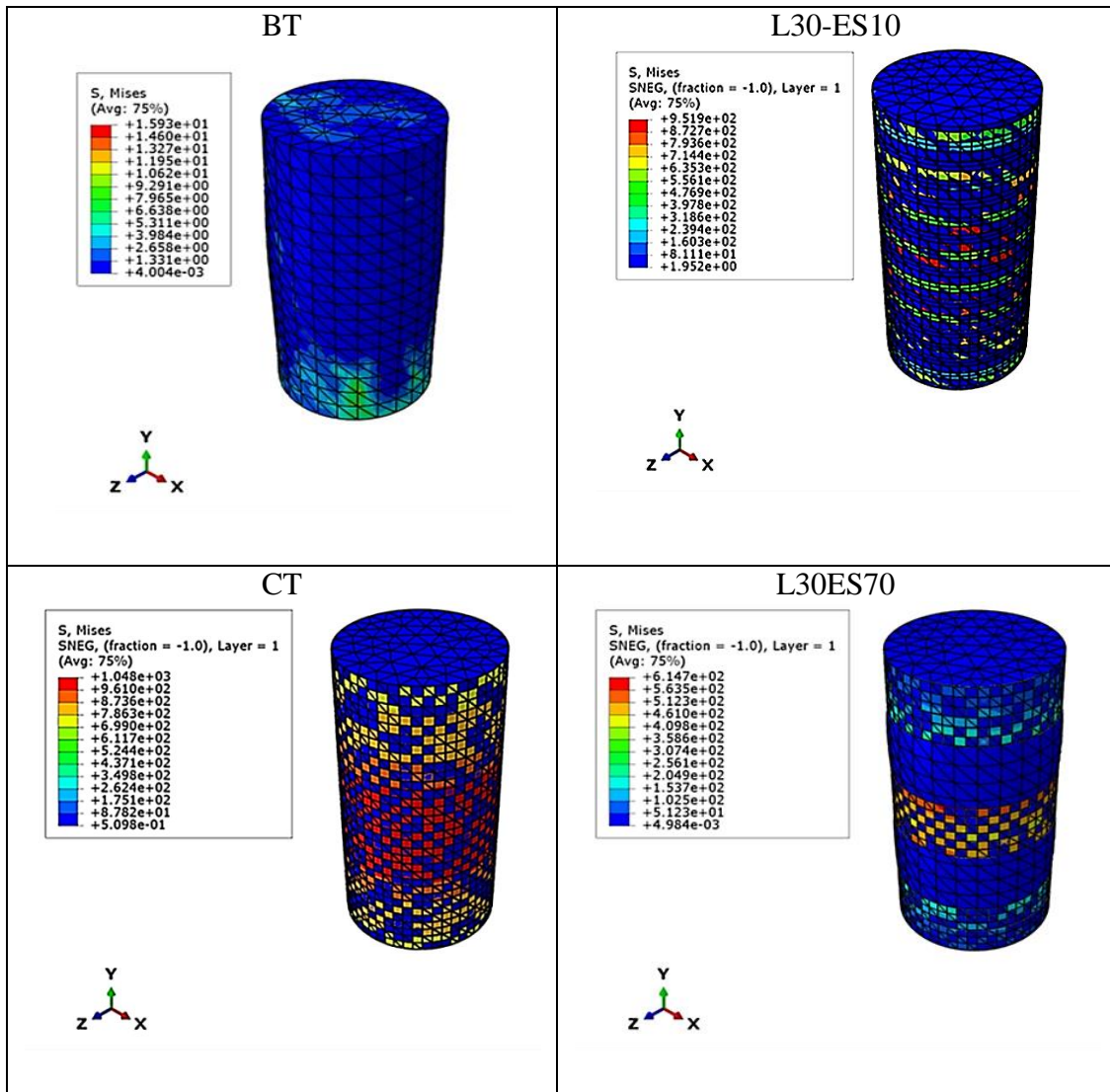


Figure IV.25: Histogramme des contraintes.



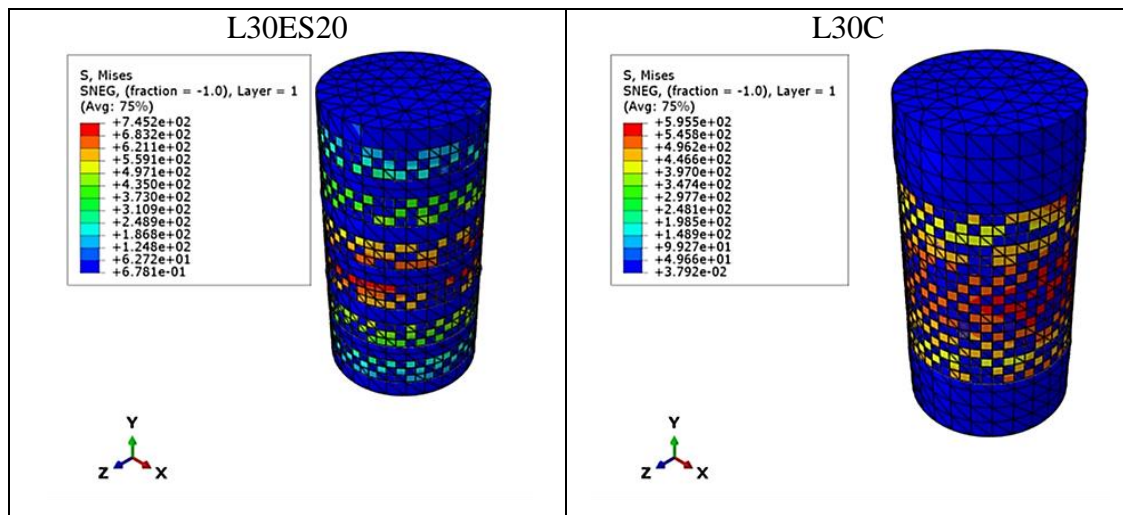


Figure IV.26: Évolution des contraintes

Les images de la figure IV.26 illustrent l'évolution de la distribution de contraintes dans des cylindres et composites partiellement et totalement confinés et non confinés. Nous constatons que le champ de contraintes évolue rapidement dans le cylindre non confiné : après un temps de chargement très court, l'élément atteint le stade de densification de la fissure, et la concentration des contraintes se produit dans l'élément analytique soumis à l'effort axial.

Le champ dans la région centrale provoque l'ouverture de fissures, ce qui entraînera la rupture de l'élément. Ces contraintes sont limitées par la présence du confinement, dans le cas d'un confinement partiel, elles sont concentrées dans la zone non confinée. La contrainte élevée dans le composite crée une contrainte supplémentaire sur le cylindre, ce qui augmente la contrainte du béton de confinement.

Les images de la figure IV.27 illustrent l'état d'endommagement des cylindres non confinés et confinés. Les cylindres non confinés subissent plus de dommages que les cylindres confinés au même taux de chargement. De plus, dans le cas d'un confinement total, les dommages étaient moins importants que ceux observés dans le cas d'un confinement partiel. Ceci s'explique d'une part par l'augmentation de la résistance du béton confiné et par le fait que les débris du béton qui restent emprisonnés à l'intérieur du confinement total, le béton reste emprisonné tout au long du confinement, créant des barrières de pression latérales supplémentaires.

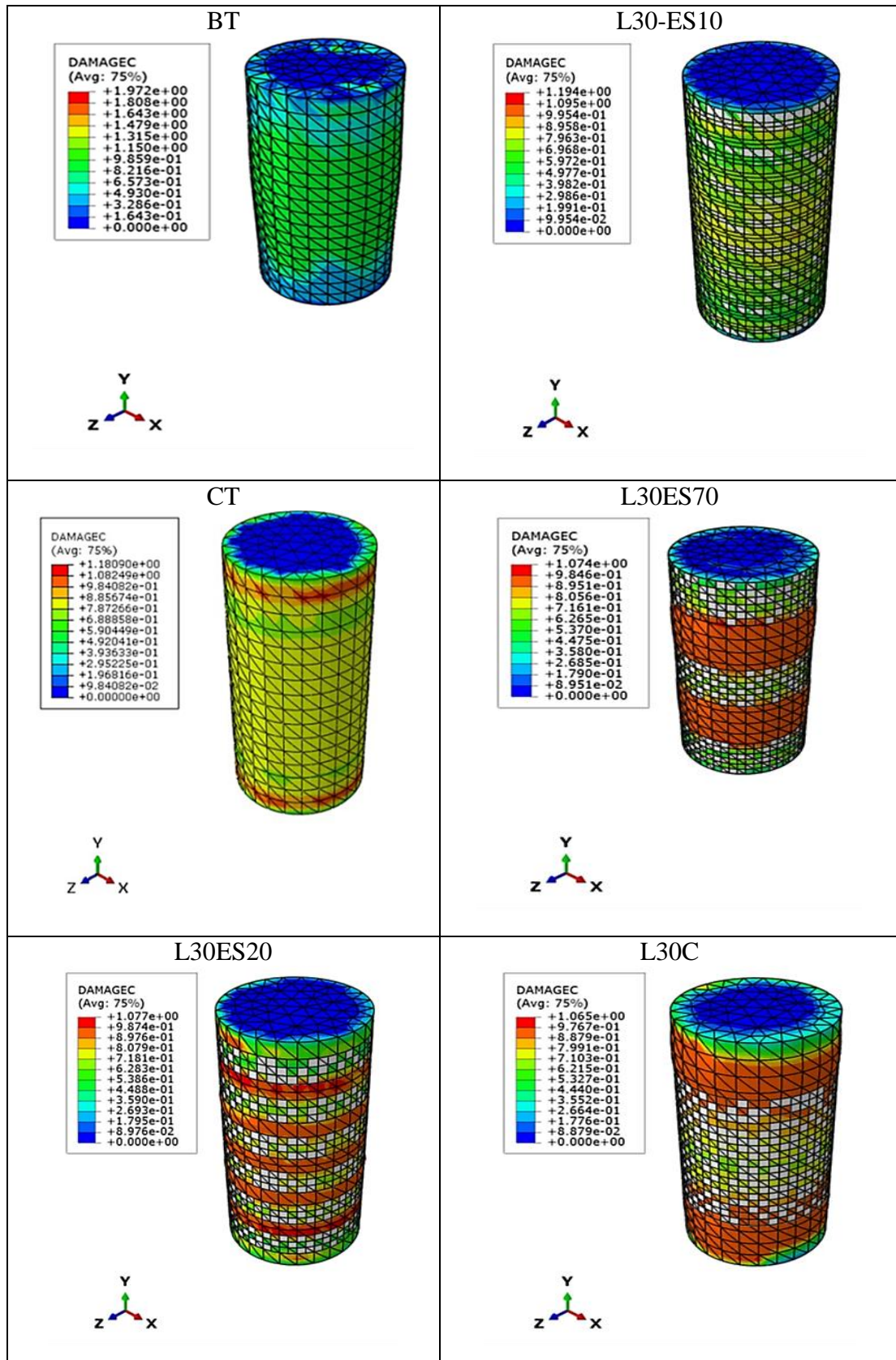


Figure IV.27: Évolution des dommages

### **IV.7. Conclusion**

Nous avons essayé à travers ce chapitre d'illustrer l'apport du confinement dans le renforcement du béton. En effet un modèle numérique a été mis en place et des simulations ont été réalisées. Plusieurs configurations de confinement ont été étudiées. Certaines ont donnés de bons résultats. Une optimisation a été proposée. Cependant tous les résultats ont montré que le confinement total permettait d'avoir le meilleur résultat comparativement aux autres types de confinement.

## **Conclusion générale**

L'objectif principal de cette étude consiste à mettre en évidence, à travers une simulation numérique en utilisant le code de calcul Abaqus, le comportement mécanique des cylindres en béton, confinés par des bandes composites d'un tissu à base de fibre de verre. Par la suite une comparaison du comportement mécanique, selon plusieurs configurations, avec un béton confiné avec un tissu de recyclage, issu de l'industrie de récupération.

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, des déformations et des dommages.

Au terme de cette recherche, nous pouvons retenir les points suivants :

- Le confinement avec les matériaux composites constitue une très bonne solution car elle permet de renforcer le béton tout en limitant le poids de la structure renforcé ceci est dû principalement à une des principales propriétés des composite qui est la résistance spécifique élevée.
- Les courbes obtenues ont montré que toutes les configurations en confinement partiel se situent en dessous de la courbe correspondant au confinement total. Ceci nous permet de dire que le confinement total reste la configuration qui présente le meilleur résultat. En effet la contrainte maximale obtenue est de l'ordre de 56.3 Mpa pour le confinement total.
- Cependant, certaines configurations testées ont montré que l'on peut atteindre des niveaux de renforcement acceptables avec un gain allant de 9% jusqu'à 12%.
- L'utilisation de la fibre de verre nous a permis d'obtenir des résultats intéressants notamment en termes de résistance limite et de la tenue de l'éprouvette.
- L'utilisation de la fibre de verre a donné des résultats meilleurs que ceux obtenus en utilisant un tissu de récupération à base de fibres de polypropylène. En effet, le gain obtenu respectivement est de 11% et 23.5%.
- L'optimisation de l'emplacement du composite a montré que ce paramètre pouvait jouer un rôle sur le comportement de l'éprouvette même si c'est faible en terme de

résistance limite. En effet le gain est estimé à 4%. Cependant lorsque nous analysons la courbe, nous constatons que certaines configurations confèrent au béton une ductilité. La rupture fragile est ainsi limitée.

- Il y a lieu d'indiquer qu'une étude expérimentale serait nécessaire pour vérifier tous ces résultats.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Djeboun Youcef**, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [2] **Pierre Jaquinet**, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, Paris, 1991.
- [3] **Jean Marie Berthelot**, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4<sup>ème</sup> Edition, Lavoisier 2005.
- [4] **Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot**, Des Matériaux ,3<sup>ème</sup> Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [5] **Daniel Gay**, Matériaux Composites 4<sup>ème</sup> Edition, Hermès 2009.
- [6] **Maurice Reyne** Technologie des composites Edition HERMES, Paris, 1990.
- [7] **Jean Marie Berthelot**, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010.
- [8] **M. Mezzo Aghiles**, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnel.
- [9] **ALI AHMED, Chafika**. Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques–expérimentation et modélisation. 2016. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [10] **J. Liu**, Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns. PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2013.
- [11] **V. Gopalaratnam and S. P. Shah**, “Softening response of plain concrete in direct tension,” ACI Journal, vol. 82, no. 3, pp. 310–323, 1985.
- [12] **B. Sinha, K. H. Gerstle, and L. Tulin**, “Stress-strain relation for concrete under cyclic loading,” Journal of American Concrete Institute, vol. 61, no. 2, pp. 195–211, 1964.
- [13] **J. F. Berthet, E. Ferrier, and P. Hamelin**, “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A : experimental study,” Construction and Building Materials, vol. 19, no. 3, pp. 223–232, 2005.
- [14] **FARAHMANDPOUR, Chia**. Modélisation et simulation du comportement des bétons confinés. 2017. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- [15] **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.
- [16] **REYNOUARD Jean Marie, PIJAUDIER-Cabot Gilles**, « Comportement mécanique du béton. Hermès Sciences, pp.1, 2005.

## Références bibliographiques

---

- [17] **ADAM et NEVILLE.M** « Propriétés des bétons » Éditions Eyrolles, Paris, 2000.
- [18] **SI SALEM Abdelmadjid**, « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [19]  **TSAI. W. HA S.S., Miyano Y., Tay T.E.**, «Strength & Life of Composites», edition Aero & Astro, Stanford, USA, 2009.
- [20] **BENKACI, Kahina.** Simulation numérique des cylindres en béton à base des déchets de verre confinés. 2019. Thèse de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [21] **EL-SOKKARY, H. et GALAL, K.** Comportement sismique des murs de cisaillement RC renforcés par un polymère renforcé de fibres. Journal of Composites for Construction, 2013, vol. 17, n° 5, p. 603-613.
- [22] **QAZI, S., MICHEL, L., et FERRIER, E.** Comportement mécanique des parois élancées en béton armé sous chargement sismique renforcées avec du PRFC collé extérieurement. Revue européenne de génie civil et environnemental, 2013, vol. 17, n° 6, p. 496-506.
- [23] **LUYCKX, Jean.** Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Ed. Techniques Ingénieur, 1999.
- [24] **CHATAIGNER, Sylvain.** Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil : contributions théoriques et applications. 2016. Thèse de doctorat. Université de Paris-Est.
- [25] **FARDIS, Michael N. et KHALILI, Homayoun H.** FRP-encased concrete as a structural material. Magazine of concrete research, 1982, vol. 34, no 121, p. 191-202.
- [26] **SHAHAWY, Mohsen, MIRMIRAN, Amir, et BEITELMAN, T.** Essais et modélisation de colonnes en béton enveloppé de carbone. Composites Partie B : Ingénierie, 2000, vol. 31, n° 6-7, p. 471-480.
- [27] **Marc Quiertant (Jean-Luc Clément).** Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites
- [28] **FARDIS, et KHALILI.** Béton recouvert de plastique renforcé de fibre de verre. Dans : Journal Actes. 1981.
- [29] **PRIESTLEY, et al.** Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York : Wiley, 1992.

## Références bibliographiques

---

- [30] **XIAO et al.** Rénovation parasismique des colonnes de pont en béton armé existantes à l'aide d'un système d'enveloppement composite préfabriqué. Dans : First International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation National Science Foundation . 1996.
- [31] **Mirmiran et Shahawy** (1997). Comportement des poteaux en béton confinés par des composites fibreux. Journal d'ingénierie structurelle, 1997, vol. 123, n° 5, p. 583-590.
- [32] **Haroun et al.** (1997). Essais cycliques sur des colonnes de pont réhabilités à l'aide d'enveloppes en matériau «PRFC» extérieurement collées.
- [33] **Miyauchi et al.** (1997). Essais de compression uni-axiale sur des colonnes en béton renforcées à l'aide de tissus en fibres de carbone (CFS: *carbon fiber sheets*).
- [34] **Berthet et al.** (2005). Essais sur des bétons de 5 classes de résistance différentes, allant du béton ordinaire (25 MPa) au béton à hautes performances BHP (170 MPa).
- [35] **Youssef et al.** (2007). Développent un modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF».
- [36] **Ait Tahar, K, Taouche F., & Bouamara, Y.** Parametric analysis of the models of confinement of the concrete column. In : key Engineering materials. Trans tech Publications Ltd. (2012). P.1-14.