

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil  
Laboratoire de Génie de Construction et d'Architecture (LGCA)

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**DOCTORAT**  
Domaine : Science et Technologie      Filière : Génie Civil  
Spécialité : Structures

Présentée par  
**DJENAD Sonia**

*Thème*

**Modélisation du comportement des structures composites confinées avec  
une nouvelle conception d'intégration partielle du renfort**

Soutenue le : 06/05/2023

Devant le Jury composé de :

**Nom et Prénom**

**Grade**

Mr TAHAKOURT Abdelkader	Professeur	Univ. De Bejaia	Président
Mr BOUZIDI Mohamed Amin	MCA	Univ. De Bejaia	Rapporteur
Mr SI SALEM Abdelmadjid	MCA	Univ. De Tizi Ouzou	Co-Rapporteur
Mr CHELOUAH Nasser	Professeur	Univ. De Bejaia	Examineur
Mme KHELOUI-TAUCHE Fatma	MCA	Univ. De Tizi Ouzou	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

### Remerciements

En tout premier lieu, je remercie dieu, tout puissant, qui m'a donné la capacité, la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser et d'achever ce travail.

Je remercie sincèrement mes deux encadrants : mon directeur de thèse **Dr BOUZIDI Mohamed Amin** et co-directeur de thèse **Dr SI SALEM Abdelmadjid**, pour avoir accepté de me proposer ce thème et diriger cette thèse, et qui ont suivi de près mon travail avec beaucoup de patiences. Leurs soutiens permanents et leurs passions de recherche m'encouragent à surmonter les difficultés rencontrées durant la thèse. Sans leurs aides précieuses, la thèse n'arrive pas à la fin.

J'exprime mes sincères remerciement aux membres de jury, à **Prof. TAHAKOURT Abdelkader** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. A **Prof. CHELOUAH Nasser** et **Dr KHELOUI-TAUCHE Fatma** qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse et sacrifié leur temps précieux pour évaluer et commenter mes travaux de thèse.

Enfin, je manifeste profondément mes reconnaissances à mes chers parents et ma très chère tante **Fatiha** qui m'ont soutenue, supportée et encouragée dans mes projets, ainsi qu'à mes sœurs, mon frère et mon mari et sans oublier ma chère amie **Boussaa Nadia** qui m'a beaucoup aidé. Merci pour leur amour et leur confiance, c'est grâce à eux que je suis ici aujourd'hui et je leur en serai éternellement reconnaissante.

Un grand merci à tous.

## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents ;*

*A ma chère tante Fatiha ;*

*A mes chères sœurs Fatima et Cecylia et mon cher frère Cherif ;*

*A mon cher mari Fares ;*

*A ma belle-mère et ma belle-sœur ;*

*A tous ma famille et mes amis*

**Table des matières**

Remerciements.....I  
Dédicaces.....II  
Table des matière.....III  
Liste des abréviations.....VI  
Liste des figures.....IX  
Liste des tableaux.....XV

**INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1**

**CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

I.1 Introduction.....5  
I.2 Principales causes conduisant au renforcement des structures en béton.....5  
I.3 Réparation et confinement des structures en béton au moyen de matériaux composites.....7  
    I.3.1 Matériaux composites de renfort en Génie Civil.....7  
        I.3.1.1 Matrices.....9  
        I.3.1.2 Le renfort.....10  
        I.3.1.3 Les charges et additifs.....13  
    I.3.2 Propriétés mécaniques des composites (FRP).....14  
    I.3.3 Application des FRP aux éléments de la structure.....16  
        I.3.3.1 Renforcement extérieur des structures par des FRP.....16  
        I.3.3.2 Renforcement intérieur des structures par des FRP.....18  
    I.3.4 Comportement en compression du béton confiné par FRP.....19  
I.4 Revue bibliographique sur le confinement de béton.....20  
I.5 Conclusion.....37

**CHAPITRE II : CONCEPTION ET ANALYSE EXPÉRIMENTALE**

---

II.1 Introduction.....39  
II.2 Synthèse permettant de définir la campagne des essais.....39  
II.3 Programme expérimental.....41  
    II.3.1 Conception proposée.....41  
    II.3.2 Caractérisation des matériaux.....42

## Table des matières

---

II.3.2.1	Le béton.....	42
II.3.2.2	Grille métallique.....	46
II.3.2.3	Matériau composite « GFRP ».....	49
II.3.3	Préparation des cylindres.....	52
II.3.3.1	Coffrage et bétonnage.....	53
II.3.3.2	Chargement et acquisition.....	54
II.4	Résultats expérimentaux et discussions.....	55
II.4.1	Comportement contrainte-déformation des colonnes.....	55
II.4.2	Mode de rupture.....	60
II.5	Conclusion.....	62

### CHAPITRE III : PROPOSITION ET VALIDATION D'UN MODÈLE ANALYTIQUE

---

III.1	Introduction.....	63
III.2	Synthèse permettant de proposer un modèle de confinement.....	63
III.2.1	Modèle de confinement interne des colonnes circulaires.....	64
III.3	Modèle proposé.....	66
III.3.1	Évaluation de la contrainte latérale de confinement.....	67
III.3.1.1	Confinement fourni par les cerces GFRP.....	68
III.3.1.2	Confinement fourni par la grille métallique.....	69
III.4	Validation du modèle proposé.....	72
III.4.1	Résultats expérimentaux vs. Analytiques.....	72
III.4.2	Confrontation des rapports de résistance à la compression $f'_{cc}/f'_{co}$ .....	74
III.5	Étude paramétrique.....	77
III.5.1	Influence de la résistance du béton non confiné.....	77
III.5.2	Influence de l'espacement et l'épaisseur des bandes GFRP.....	78
III.5.3	L'influence du diamètre des bandes GFRP/Grille.....	80
III.6	Conclusion.....	81

### CHAPITRE IV : SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

---

IV.1	Introduction.....	83
IV.2	Choix du logiciel de simulation.....	83
IV.3	Recours à la méthode des éléments finis.....	85

## Table des matières

---

IV.4	Modélisation numérique du comportement des matériaux.....	86
IV.4.1	Modèle pour le béton.....	86
IV.4.2	Modèle pour la grille métallique.....	91
IV.4.3	Modèle élastique-orthotrope pour les composites.....	93
IV.5	Procédure de la simulation avec ABAQUS.....	95
IV.5.1	Géométries, conditions aux limites et chargement.....	95
IV.5.2	Maillage et éléments finis.....	96
IV.5.3	Modélisation des contacts.....	98
IV.6	Résultats, validation et confrontation.....	98
IV.7	Conclusion.....	104

## CHAPITRE V : APPLICATION SUR UNE POTEAU EN BÉTON ARMÉ

---

V.1	Introduction.....	105
V.2	Description du modèle simulé.....	105
V.3	Procédure de la simulation et maillage.....	108
V.3.1	Modélisation des contacts.....	111
V.4	Résultats et validation.....	112
V.4.1	Validation du modèle simulé.....	112
V.4.2	Efficacité du confinement interne.....	113
V.4.3	Analyses des cartographies.....	114
V.5	Étude paramétrique numérique.....	119
V.5.1	Influence de l'épaisseur des bandes GFRP.....	116
V.5.2	Influence de l'espacement des bandes GFRP.....	118
V.6	Conclusion.....	123

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....124

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....127

**Liste des abréviations**

<b>Notation</b>	<b>Définition</b>
$f'_{cc}$	Résistance à la compression du béton confiné (MPa)
$\varepsilon_{cc}$	Déformation axiale ultime du béton confiné
$f'_{c0}$	Résistance à la compression du béton non confiné (MPa)
$\varepsilon_0$	Déformation axiale au pic du béton non confiné
$f'_l$	Pression latérale effective (MPa)
$k_1$	Coefficient de confinement effectif
$f_l$	Contrainte latérale (MPa)
$k_e$	Facteur de réduction de la Contrainte de confinement dû à la forme de la section transversale
$A_e$	Section effective du béton confine (mm <sup>2</sup> )
$A_c$	Section transversale totale du béton (mm <sup>2</sup> )
$E_l$	Module de confinement du GFRP (GPa)
$\rho_f$	Ration volumétrique des composites
$E_f$	Module élastique des composites (GPa)
$f_f$	Résistance à la traction du renforcement GFRP (MPa)
$f_g$	Tensile strength of steel grid reinforcement (MPa)
$f'_{lf}$	Pression de confinement latérale effectives fourni par le GFRP (MPa)
$f'_{lg}$	Pression de confinement latérale effectives fourni par la grille métallique (MPa)
$f_{lf}$	Pression de confinement latérale fourni par le GFRP (MPa)
$f_{lg}$	Pression latérale fourni par la grille métallique (MPa)

## Liste des abréviations

---

$k_{ef}$	Coefficient d'efficacité des GFRP
$k_{eg}$	Coefficient d'efficacité de la grille
$D'_f$	Diamètre du béton confine par les bandes hexagonale FRP (mm)
$a$	Longueur du côté de la section hexagonale (mm)
$r$	Rayon d'angle de la section hexagonale (mm)
$t_f$	Epaisseur du GFRP (mm)
$w_f$	Largeur des bandes GFRP (mm)
$s_f$	Espacement entre les bandes GFRP (mm)
$t_{eg}$	Epaisseur équivalent de la grille métallique (mm)
$b_g$	Largeur entre les mailles transversales de la grille (mm)
$t_g$	Espacement entre les mailles transversales de la grille (mm)
$s_g$	Espacement entre les bandes en grille métallique (mm)
$w_g$	Largeur des bandes en grille métallique (mm)
$D_g$	Diamètre de la grille métallique (mm)
$D'_g$	Diamètre du béton confine par la grille métallique (mm)
$s'_g$	Espacement net entre les bandes transversales en grille métallique (mm)
$d_c$	Variable d'endommagement en compression
$d_t$	Variable d'endommagement en traction
$\bar{\sigma}_c$	Contrainte effective de compression
$\bar{\sigma}_t$	Contrainte effective de traction
$\hat{\varepsilon}_c^{pl}$	Déformation plastique équivalente en compression
$\hat{\varepsilon}_t^{pl}$	Déformation plastique équivalente en traction
$\hat{\sigma}_{max}$	Contrainte effective principale maximale

## Liste des abréviations

---

$G$	Potentiel d'écoulement
$\epsilon$	Excentricité du potentiel d'écoulement
$\sigma_{t0}$	Contrainte de traction uni-axiale à la rupture.
$\psi$	Angle de dilatation
$\sigma_y$	Limite d'élasticité en traction
$J$	Second invariant des contraintes

---

Liste des figures

Chapitre I

**Figure I.1.** Schéma d'un matériau composite.....8

**Figure I.2.** Composition des matériaux composites.....8

**Figure I.3.** Organigramme des principales familles des matrices.....9

**Figure I.4.** Organigramme des principaux matériaux de renforts.....10

**Figure I.5.** Tissu de fibre de verre.....11

**Figure I.6.** Fibres de carbone.....11

**Figure I.7.** Organigramme d'obtention des fibres.....12

**Figure I.8.** Fibres d'aramide.....12

**Figure I.9.** Organigramme des différents charges et additifs utilisés dans les résines.....13

**Figure I.10.** Courbes contrainte-déformation des PRFV, PRFC et des aciers doux [32].....15

**Figure I.11.** Influence de la loi de comportement de la matrice sur les propriétés du composite unidirectionnel [33].....16

**Figure I.12.** Cas d'application de renforcement extérieur des structures (SikaWrap®).....16

**Figure I.13.** Méthode d'application de FRP sur les poteaux : (a) stratification au contact (SikaWrap®) ; (b) L'enroulement filamentaire [35] ; (c) Tube en FRP préfabriqué [36].....17

**Figure I.14.** Configuration de confinement du béton : (a) Béton entrainement confiné ; (b) Béton partiellement confiné [37].....17

**Figure I.15.** Plusieurs configurations des tubes en GFRP [12].....18

**Figure I.16.** Confinement du béton par intégration d'une grille polymère et un tube GFRP [41].....18

**Figure I.17.** Courbe contraintes-déformations idéalisée pour un béton confiné avec des matériaux composites [42,43].....19

**Figure I.18.** Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [44].....19

**Figure I.19.** Réponses contrainte-déformation typiques pour le béton confiné en FRP [45].....20

<b>Figure I.20.</b> Configurations de l'enveloppe FRP [45].....	21
<b>Figure I. 21.</b> Configuration des échantillons confinés et la grille composite [49].....	22
<b>Figure I. 22.</b> Courbe contrainte-déformation des colonnes confinés et non confinés [49].....	23
<b>Figure I.23.</b> Mécanisme de confinement, béton entièrement confiné et béton partiellement confiné [51].....	25
<b>Figure I.24.</b> Le coffrage avant le collage du béton [41].....	26
<b>Figure I.25.</b> Courbes contrainte-déformation des différentes colonnes conçues par Wang et al. 2017 [41].....	27
<b>Figure I.26.</b> Les différents cas de configuration de confinement [16].....	28
<b>Figure I.27.</b> Courbes force axiale-déformation axiale, obtenues par Long et al. 2018 [16].....	28
<b>Figure I.28.</b> Configuration de confinement de Abd El Fattah et al. 2018 [58] : (a) 20 fils de CFRP ; (b) 30 fils de GFRP.....	29
<b>Figure I.29.</b> Modèle analytique proposé par Abd El Fattah et al. 2018 [58].....	29
<b>Figure I.30.</b> Échantillons de tubes en GFRP [60].....	31
<b>Figure I.31.</b> Courbe contrainte-déformation des cylindres en béton confinés en GFRP obtenues par Cao et al. 2019 [60].....	32
<b>Figure I.32.</b> Les différents modèles d'enveloppe considérés par Totonchi et al. 2019 [61].....	32
<b>Figure I.33.</b> Comparaison des courbes contrainte-déformation axiale des spécimens confiné par Totonchi et al. 2019 [61].....	33
<b>Figure I.34.</b> Géo-grille et chargement des cylindres utilisés par Daou et al. 2020) [62].....	33
<b>Figure I.35.</b> Comportement du béton confiné par intégration de géo-grille [61].....	34
<b>Figure I.36.</b> Systèmes de confinement proposés par Zeng et al. 2021 [65].....	35
<b>Figure I.37.</b> Résultats des essais et prédits par Zeng et al. 2021 [65].....	36
<b>Figure I.38.</b> Colonnes en béton incorporant des dispositifs de confinement internes et externes en FRP étudiées par Ye et al. 2022 [66].....	37

## Chapitre II

<b>Figure II.1.</b> Organigramme de l'approche expérimentale.....	41
<b>Figure II.2.</b> Vue transversale des conceptions de confinement proposées.....	42
<b>Figure II.3.</b> Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.....	43
<b>FIGURE II.4.</b> (a) : Malaxeur de béton ; (b) : Cure d'hydratation des cylindres en béton.....	45
<b>Figure II.5.</b> Comportement du béton en compression.....	46
<b>Figure II.6.</b> La grille métallique utilisé.....	47
<b>Figure II.7.</b> Détail de la conception avec la grille métallique.....	47
<b>Figure II.8.</b> Les éprouvettes confectionnées pour un essai de traction.....	48
<b>Figure II.9.</b> Comportement mécanique de la grille métallique.....	49
<b>Figure II.10.</b> Tissu composite en fibres de verre.....	49
<b>Figure II.11.</b> Détail de la conception hexagonale avec le tissu GFRP.....	50
<b>Figure II.12.</b> Composant de l'adhésif.....	51
<b>Figure II.13.</b> Procédé de fabrication des différents échantillons.....	54
<b>Figure II.14.</b> Machine et dispositif d'essai pour les différentes éprouvettes.....	54
<b>Figure II.15.</b> Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes non confiné.....	55
<b>Figure II.16.</b> Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confiné GC.....	56
<b>Figure II.17.</b> Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confiné FC.....	56
<b>Figure II.18.</b> Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confiné FGC.....	57
<b>Figure II.19.</b> Récapitulatif des courbes contrainte-déformation des différentes colonnes.....	58
<b>Figure II. 20.</b> Histogramme des contraintes et le gain en résistance des différentes colonnes.....	59
<b>Figure II. 21.</b> Histogramme des déformations et le gain en ductilité des différentes colonnes.....	59
<b>Figure II.22.</b> Mode de rupture du béton témoin non confiné.....	60
<b>Figure II.23.</b> Mode de rupture du béton confiné avec la grille métallique.....	61
<b>Figure II.24.</b> Mode de rupture du béton confiné avec les composites GFRP.....	61
<b>Figure II.25.</b> Mode de rupture du béton doublement confiné avec GFRP et grille métallique.....	61

## Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Béton confiné avec des FRP et relation contrainte-déformation associée [87].....	64
<b>Figure III.2.</b> Organigramme de modèle analytique.....	66
<b>Figure III.3.</b> Zone de confinement efficace dans une section hexagonale en GFRP.....	69
<b>Figure III.4.</b> Zone de confinement efficace pour la grille métallique.....	70
<b>Figure III.5.</b> Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes GC.....	72
<b>Figure III.6.</b> Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes FC.....	73
<b>Figure III.7.</b> Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes FGC.....	73
<b>Figure III.8.</b> Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques.....	74
<b>Figure III.9.</b> Comparaison des rapports de résistance à la compression $f'_{cc}/f'_{co}$ .....	75
<b>Figure III.10.</b> Relation entre $f'_{cc}/f'_{co}$ et le taux de confinement en GFRP.....	76
<b>Figure III.11.</b> Courbe contrainte-déformation avec différentes résistances du béton.....	78
<b>Figure III.12.</b> Courbe contrainte-déformation avec différents espacements entre les bandes GFRP.....	79
<b>Figure III.13.</b> Courbe contrainte-déformation avec différentes épaisseurs des bandes GFRP.....	79
<b>Figure III.14.</b> Courbe contrainte-déformation des colonnes pour différents diamètres de confinement.....	80
<b>Figure III.15.</b> Influence des différents paramètres géométriques sur la résistance du béton confiné.....	81

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1.</b> Différents types d'éléments de la bibliothèque d'ABAQUS.....	84
<b>Figure IV.2.</b> Méthodes de résolution utilisées par le code de calcul de ABAQUS.....	84
<b>Figure IV.3.</b> Opérations liées à la modélisation avec le logiciel ABAQUS.....	84
<b>Figure IV.4.</b> Principaux types d'éléments utilisés dans ABAQUS.....	86
<b>Figure IV.5.</b> Organigramme du modèle décrivant le comportement du béton.....	87
<b>Figure IV.6.</b> Réponse du béton au chargement uni-axiale en traction (a) et en compression (b) [18].....	88

<b>Figure IV.7.</b> Surfaces de rupture dans le plan déviatorique correspondant à différentes valeurs de $K_c$ [18].....	90
<b>Figure IV.8.</b> Surface élastique en contrainte plane [18].....	90
<b>Figure IV. 9.</b> Relations constitutives pour modéliser la grille métallique.....	92
<b>Figure IV.10.</b> Matériau composite bidirectionnel.....	93
<b>Figure IV. 11.</b> Géométries et conditions aux limites du chargement.....	96
<b>Figure IV. 12.</b> Maillage adopté pour les différents éléments.....	97
<b>Figure IV. 13.</b> Courbe de convergence de maillage.....	97
<b>Figure IV. 14.</b> Détails de la modélisation des contacts.....	98
<b>Figure IV. 15.</b> Comparaison des courbes contrainte-déformation du béton non confiné.....	99
<b>Figure IV. 16.</b> (a) Mode de rupture expérimental du béton non confiné ; (b) Localisation des dommages simulés du béton non confiné.....	99
<b>Figure IV. 17.</b> Confrontation des courbes contrainte-déformation des colonnes GC.....	100
<b>Figure IV. 18.</b> Confrontation des courbes contrainte-déformation des colonnes FC et FGC.....	101
<b>Figure IV.19.</b> Confrontation des résultats numériques, théoriques et expérimentaux.....	101
<b>Figure IV. 20.</b> Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes GC.....	102
<b>Figure IV. 21.</b> Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes FC.....	103
<b>Figure IV. 22.</b> Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes FGC.....	103
<b>Figure IV.23.</b> Confrontation des courbes dommage en traction-temps calcul des colonnes.....	104

## Chapitre V

<b>Figure V.1.</b> Géométrie et détail de renforcement du poteau testé et simulé [108].....	106
<b>Figure V.2.</b> Condition aux limites et de chargement des poteaux.....	109
<b>Figure V.3.</b> Modèle élément fini et maillage du poteau.....	110
<b>Figure V.4.</b> Courbe de convergence de maillage de la semelle.....	110
<b>Figure V.5.</b> Courbe de convergence de maillage du poteau.....	111

<b>Figure V.6.</b> Modélisation par éléments finis de la colonnes FRC-2.....	111
<b>Figure V.7.</b> Confrontation des courbe force-déplacement expérimentale et numérique.....	112
<b>Figure IV.8.</b> (a) Mode de rupture obtenu des essais ; (b) Mode de rupture du modèle numérique.....	113
<b>Figure V.9.</b> Confrontation des courbes force-déplacement des colonnes confinées (FRC-1), chargées au sommet de la semelle.....	113
<b>Figure V.10.</b> Confrontation des courbes force-déplacement des colonnes confinées (FRC-2), chargées au sommet du poteau.....	114
<b>Figure V.11.</b> Distribution des contraintes principales ; (a) le béton ; (b) le renforcement en acier ; (c) les cerces FRP.....	115
<b>Figure V.12.</b> Confrontation de la courbe dommage en traction-temps des colonnes non confinées (RC) et les colonnes confinées (FRC-2).....	116
<b>Figure V.13.</b> Courbe force-déplacement selon l'épaisseur des bandes GFRP du modèle (FRC-1).....	117
<b>Figure V.14.</b> Courbe force-déplacement selon l'épaisseur des bandes GFRP du modèle (FRC-2).....	117
<b>Figure V.15.</b> Représentation des dommages en traction du béton pour les différentes épaisseurs du GFRP.....	118
<b>Figure V.16.</b> Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 0.35mm des FRP.....	119
<b>Figure V.17.</b> Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 0.7 mm des FRP.....	119
<b>Figure V.18.</b> Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 1.05mm des FRP.....	120
<b>Figure V.19.</b> Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 1.4 mm des FRP.....	120
<b>Figure V.20.</b> Représentation des dommages en traction du béton pour les différents espacements du GFRP.....	121

## Liste des tableaux

### Chapitre I

---

**Tableau I.1.** Propriétés en traction des fibres de verre, de carbone et d'aramide.....13

**Tableau I.2.** Propriétés mécaniques typiques des composites GFRP, CFRP et AFRP.....14

### Chapitre II

---

**Tableau II.1 :** Composition du béton utilisé.....44

**Tableau II.2 :** Caractéristiques mécaniques du béton.....46

**Tableau II.3.** Caractéristiques géométriques de la grille métallique.....47

**Tableau II.4.** Caractéristiques mécaniques de la grille métallique.....48

**Tableau II.5.** Caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.....51

**Tableau II.6.** Caractéristiques élastiques du tissu composite.....51

**Tableau II.7.** Matrice d'essai des éprouvettes.....52

**Tableau II.8.** Illustration des résultats des essais.....58

### Chapitre III

---

**Tableau III.1.** Certains modèles de résistance et de déformation du béton confiné.....65

**Tableau III.2.** Paramètres de confinement pour le calcul analytique.....71

**Tableau III.3.** Comparaison des valeurs des contraintes analytiques et expérimentales.....75

**Tableau III.4.** Comparaison des valeurs de déformation analytiques et expérimentales.....76

### Chapitre IV

---

**Tableau IV.1.** Paramètres du modèle de béton utilisé.....91

**Tableau IV.2.** Valeurs des paramètres du modèle de la grille métallique utilisée.....92

**Tableau IV.3.** Valeurs des paramètres du modèle de tissu GFRP.....94

**Tableau IV.4.** Valeur de contrainte du critère de Hill Tsai.....94

**Tableau IV. 5.** Résistance à la compression numérique, théorique et expérimentale de toutes les colonnes.....101

## **Chapitre V**

---

**Tableau V.1.** Caractéristiques géométriques et mécanique du poteau simulé.....107

**Tableau V.2.** Désignation des spécimens considérés.....108

**Tableau V.3.** Récapitulation des résultats de l'étude paramétrique pour les différentes épaisseurs des FRP.....122

**Tableau V.4.** Récapitulation des résultats de l'étude paramétrique pour les différents espacements des FRP.....122

# **Introduction générale**

La raison principale de la dégradation et la défaillance des structures de génie civil est la fissuration du béton d'enrobage conduisant à la corrosion des armatures en acier [1]. Pour remédier à ces problèmes structurels, il est généralement nécessaire d'effectuer des interventions de maintenance et réparation, dont le coût ne cesse d'augmenter. En raison de l'augmentation des dépenses de travaux de réhabilitation et des poids propres des ouvrages bâtis, le renforcement et le confinement en utilisant les matériaux composites a fait l'objet d'une recherche extensive durant les dernières décennies. Les matériaux innovants tels que, les composites plus particulièrement les polymères renforcés de fibre (FRP) sont de plus en plus appliqués dans la réparation, le renforcement et le confinement des éléments de structure en béton grâce aux avantages qu'ils présentent comparativement aux matériaux conventionnels, à savoir : la légèreté, durabilité, facilité d'application, résistance élevée à la corrosion, résistance mécanique et chimique et longue durée de vie [2-5].

De nos jours, le collage des matériaux composites est l'une des méthodes de réparation et de renforcement les plus employées, plusieurs éléments de structure peuvent être renforcés par collage de tissus ou lamelles en matériaux composites. Dans les premières études expérimentales réalisées, les colonnes étaient généralement entièrement enveloppées de feuilles de FRP, ce schéma d'enveloppement assure un confinement continu des colonnes le long de leurs axes longitudinaux, ce qui peut entraîner une amélioration considérable de la résistance à la compression et la capacité de déformation des colonnes [6-8]. Il a été également démontré que les colonnes en béton partiellement confinées par des FRP traitaient avec un rapport économique adéquat l'augmentation appropriée de la résistance et une amélioration remarquable de la capacité de déformation axiale par rapport aux colonnes non confinées [9-11].

Toutes les études réalisées sur le confinement du béton à l'aide de matériaux composites s'accordent sur l'augmentation de la résistance ultime, la déformation correspondante et la ductilité. L'amélioration de ces propriétés mécaniques permet aux éléments confinés de mieux reprendre les sollicitations auxquelles elles sont soumises. Néanmoins, au voisinage de la rupture, les colonnes présentent des défauts d'adhérence et d'interface entre le béton et les renforts. Il devient alors nécessaire de trouver une solution optimale de confinement des colonnes et de faire face aux problèmes liés au décollement des composites à cause de la concentration des contraintes au niveau de l'interface.

Dans cette optique ce travail de recherche s'accroît sur le développement d'un nouveau concept de réalisation des colonnes en béton à base des composites en fibre de verre (GFRP).

Cette conception consiste à intégrer des bandes discontinues en grille métallique et en tissu GFRP dans la matrice béton, afin d'améliorer la capacité portante et la ductilité des colonnes. En effet, l'originalité du sujet traité permet de pallier aux défauts de la rupture radiale des renforts circulaires adaptés par la majorité des chercheurs [12-17], causée par la concentration des contraintes sur la circonférence des cerces FRP, à travers un renfort en forme de nid d'abeille qui présente plus de stabilité structurelle. Afin de permettre la conjugaison des performances des bandes composites, et de conférer au béton d'enrobage une armature secondaire, un confinement interne additionnel est également appliqué à travers des cerces discontinues en grille métallique.

L'objectif général assigné dans ce travail de thèse est d'évaluer le comportement en compression axiale des colonnes partiellement confinées par intégration des renforts dans la matrice béton et de répondre à la principale problématique qui consiste à jumeler les trois aspects suivant : performance, économie et poids propre réduit. Par conséquent, les objectifs spécifiques attendus de la présente étude sont :

- Élaborer et quantifier l'apport de la nouvelle conception en béton composite à travers une étude expérimentale sur des colonnes de dimension  $\text{Ø}160 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$  soumises à la compression axiale jusqu'à la rupture ;
- Proposer et valider un modèle analytique propre à cette conception de confinement qui permet de transcrire et d'appréhender le comportement réel des colonnes confinées ;
- Développer un outil numérique afin de prendre en compte la non-linéarité et le comportement réel des matériaux constitutifs du système proposé, ainsi que l'adhérence entre ses différents composants ;
- Réaliser des études paramétriques pour évaluer l'influence des paramètres conceptuels sur le comportement en compression axiale des colonnes et examiner la fiabilité et la précision des modèles de prédiction à l'aide des résultats des essais.
- Appliquer la conception proposée aux colonnes réelle en béton armé à travers une modélisation numérique du comportement des colonnes sous un chargement latéral.

Le travail de recherche est structuré en cinq chapitres et terminé par une liste exhaustive des conclusions tirées et des perspectives pour des éventuels travaux futurs.

Après une introduction générale sur la thématique traitée dans ce travail de thèse, où la problématique et les principaux objectifs recherchés sont définis, le **premier chapitre** est consacré à la présentation d'une synthèse bibliographique exhaustive qui retrace le confinement

par les matériaux composites, les principales définitions et le comportement mécanique des matériaux composites. Ensuite, une présentation des différentes utilisations et application des matériaux composites dans le confinement des structures de génie civil. Une revue détaillée sur les travaux antérieurs portant sur le confinement des colonnes en béton est également présentée. Elle résume l'ensemble des travaux expérimentaux et théoriques réalisés par plusieurs chercheurs.

Le **deuxième chapitre** est totalement dédié à l'étude expérimentale. La caractérisation physique et mécanique des matériaux utilisés, la composition du béton, les dimensions des éprouvettes, le procédé et variantes de confinement considérées, le dispositif d'essai mécanique, ainsi que les différents résultats obtenus sous chargement de compression axiale sont présentés sous forme de courbes contrainte-déformation. Les modes de rupture des éprouvettes testées observés pour chaque variante de confinement considérée sont également rapportés et discutés.

Dans le **troisième chapitre**, un modèle de confinement de type résistance-déformation propre à la technique de confinement proposée qui permet de transcrire le comportement axial des colonnes partiellement confinées par intégration des composites est développé et calibré par les résultats expérimentaux. Sur la base du modèle analytique, l'influence de différents paramètres sur le comportement en compression axiale des colonnes confinées a été étudiée au moyen d'une étude paramétrique.

Le **quatrième chapitre** est consacré à la simulation numérique, basée sur la méthode des éléments finis, à l'aide du logiciel ABAQUS [18]. Le modèle numérique est décrit, en précisant les paramètres géométriques, mécaniques et les conditions aux limites auxquelles sont soumis ces éléments. Les matériaux utilisés sont modélisés suivant des modèles numériques tel qu'un modèle qui permet de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du béton en compression et en traction, couplé avec l'endommagement et un modèle élastique orthotrope est utilisé pour modéliser le comportement des composites GFRP. Les résultats obtenus par la simulation numérique sont validés par les résultats obtenus à partir du programme expérimental et analytique déjà réalisé.

Enfin, dans le **cinquième chapitre** tous les résultats et analyse préliminaires obtenus précédemment sont étendus et appliqués sur un poteau en béton armé à échelle réelle partiellement confiné avec des bandes hexagonales en GFRP sous un chargement horizontal monotone. Les effets de divers paramètres sur le mode de rupture et la capacité du chargement

des colonnes ont été étudiés pour mettre l'accent sur l'applicabilité de la conception proposée sur des colonnes en béton armé sous chargement réel.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle. La synthèse des différents résultats obtenus est effectuée en conclusion générale, où sont données quelques propositions en guise de perspectives pour des sujets et problématiques futures.

# **Chapitre 1**

## **Synthèse bibliographique**

## I.1. Introduction

Longtemps utilisés dans des applications aéronautiques et aérospatiales, les matériaux composites ont fait leur apparition dans le domaine de la construction à partir des années 1980 [19]. L'introduction de ce type de matériau alternatif aux matériaux traditionnels dans les secteurs du génie civil et du bâtiment est principalement motivée en raison de sa facilité d'application, de son rapport résistance / poids, de sa résistance élevée à la corrosion. En effet, la technologie de confinement et de réparation par des matériaux composites en Polymères Renforcés de Fibres (FRP), est une technique largement utilisée, qui vise l'augmentation de la résistance et la ductilité des structures en béton.

Le choix du système de renforcement dépend fondamentalement du type de sollicitations auxquelles est soumis l'élément à renforcer ainsi que de ses caractéristiques géométriques et physiques et son état d'endommagement. Dans cette optique, l'utilisation des FRP pour confiner les structures présente de nombreux avantages comparés à l'utilisation de l'acier. En effet, tandis que les aciers corrosifs et de poids propre élevé maintiennent une tension de confinement constante, le FRP présente un comportement élastique qui provoque une augmentation de l'action de confinement sous dilatation, sans augmenter le poids de la structure.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue bibliographique concernant le comportement des structures en béton et béton armé confinées par des matériaux composites fibreux. Cette étude bibliographique fait l'état de l'art des différents éléments nécessaires utilisés dans la réalisation des colonnes en béton partiellement confinées, à travers une synthèse détaillée sur les différentes techniques et modèles de confinement disponibles dans la littérature. L'analyse critiques des travaux antérieurs menés sur le confinement au moyen de matériaux composites, nous a permis de proposer une nouvelle conception qui répond aux exigences économique, écologique et de service.

## I.2. Principales causes conduisant au renforcement des structures en béton

Le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé au monde et le deuxième produit le plus utilisé par l'homme après l'eau [20], et sa demande augmente jour après jour pour les besoins en termes de développement durable. Il s'agit d'un matériau de construction des ouvrages de génie civil composé d'un mélange de sable, de granulats et d'eau aggloméré par un liant hydraulique le plus souvent le ciment. Sous toutes ses formes, le béton est l'un des choix économiques pour une construction civile. Néanmoins, le béton est un matériau fragile, naturellement fissuré et peu résistant à la traction, ce qui signifie que la rupture se produit sans

déformation importante, cette rupture prématurée est un danger pour l'utilisateur. Pour pallier cette insuffisance, les zones soumises à des efforts de traction sont généralement armées par des barres en acier résistantes à la fois à la compression et à la traction.

Considéré au début de son utilisation comme un matériau inerte et insensible aux agressions [21], le béton s'est révélé au fil de sa durée de vie qu'il est potentiellement affecté de phénomènes de dégradation plus ou moins complexes, selon les conditions d'exposition des ouvrages aux actions environnementales et/ou selon la composition intrinsèque du béton et ses conditions de mise en œuvre. Pour cette raison, malgré le renforcement intérieur par des armatures métalliques, le béton peut néanmoins subir des altérations internes ou externes et les structures ainsi peuvent nécessiter une réhabilitation structurelle supplémentaire pour plusieurs raisons :

- **Dégradations d'origine physique :** D'un point de vue physique, le béton est un matériau hydraulique et poreux et les dégradations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives, aux frottements, aux chocs thermiques, aux gonflements et aux retraites. Tous ces phénomènes sont basés sur les échanges avec le milieu extérieur [22].
- **Dégradations d'origine mécanique :** Les dégradations peuvent être d'ordre mécanique, à la suite de chocs, de vibration, de séismes.... Ces désordres se traduisent souvent par l'apparition de fissures ou d'éclats éventuellement aggravées par une déformation inadmissible de la structure.
- **Dégradations d'origine chimique :** Le béton est connu pour être un matériau basique, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides. La cause principale de toutes les dégradations chimiques est la possibilité de pénétration des fluides dans le béton qui dépend de sa perméabilité et de sa porosité. Dans les phénomènes qui peuvent être à l'origine d'une dégradation chimique, sont : la carbonatation connue par le vieillissement naturel, la corrosion des aciers, l'alcali-réaction et la réaction sulfatique, ainsi que l'attaque des eaux de mer et les eaux pures.

Avec tous ces différents mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performances dues à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas tous maîtriser, la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable. Cette vulnérabilité des structures exige à faire recourir à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage. Dans les cas où un renforcement est nécessaire, différentes techniques sont aujourd'hui utilisées à savoir :

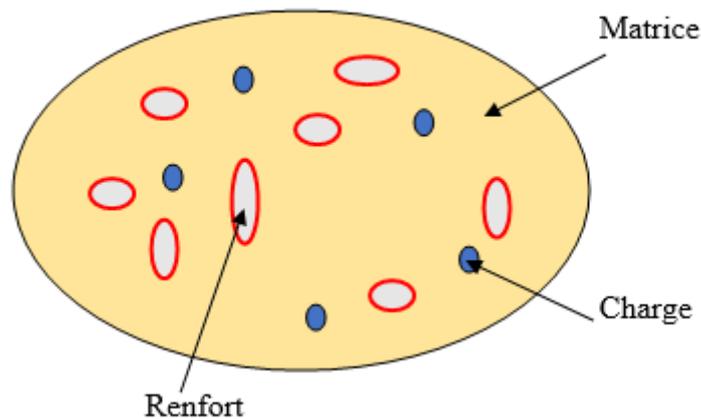
- **La projection de béton de fibre** : la projection de béton fibré limite les défauts de surface et augmente l'enrobage des armatures en prévention de la corrosion [23, 24].
- **L'application d'une précontrainte additionnelle** : L'application d'une précontrainte additionnelle par câbles métalliques ou composites, permet d'appliquer des efforts d'intensité connue en des points précis et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres [25].
- **Le collage des plaques métalliques** : Le collage des plaques métalliques en surface du béton travaille comme des armatures extérieures. Malgré l'efficacité de cette méthode, les plaques métalliques en acier sont sensibles à la corrosion et ne peuvent être utilisées sur des surfaces trop importantes à cause de leur masse considérable [26, 27].
- **Le collage de composites en polymère renforcé de fibres (FRP)** : c'est une technique de réparation substituant aux tôles métalliques, des feuillets de composite moins lourds et plus faciles à mettre en œuvre. Le collage de composite comme renforcement des ouvrages d'art et bâtiments s'est largement répandu, dans le monde, aussi bien pour la réhabilitation que pour la construction de nouveaux ouvrages plus performants [28, 29].

### **I.3. Réparation et confinement des structures en béton au moyen de matériaux composites**

La technologie de renforcement ou de réparation avec des polymères renforcés de fibres (FRP), est l'un des procédés les plus utilisés dans le monde [30]. Ils constituent une solution alternative très intéressante à l'utilisation des tôles d'acier. En plus de leur résistance à la corrosion et aux attaques chimiques, les matériaux composites présentent la particularité d'être résistants et légers à la fois.

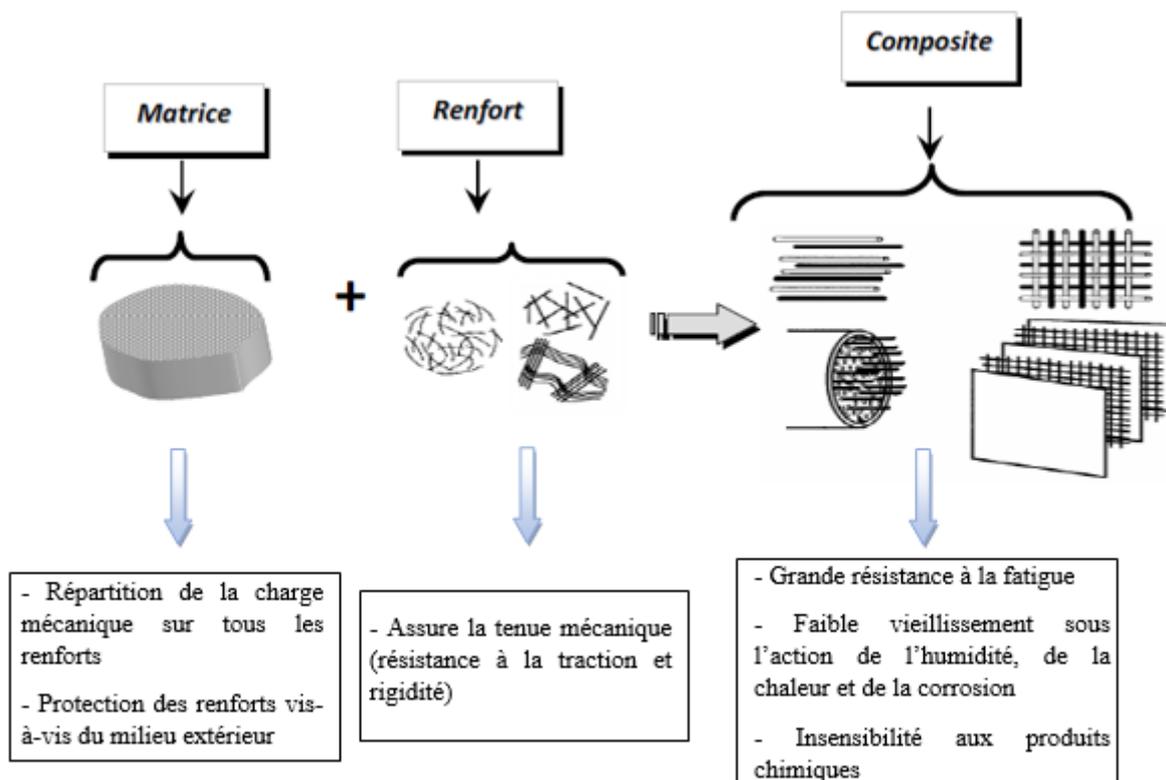
#### **I.3.1. Matériaux composites de renfort en Génie Civil**

Le terme de matériau « composite » désigne de manière générale un matériau issu de l'assemblage de deux ou plusieurs constituants, non miscibles mais présentant une forte adhérence entre eux. Un matériau composite se compose principalement d'une matrice, d'un renfort et éventuellement d'une charge ou d'un additif, (Voir Figure I.1). Les renforts assurent essentiellement les propriétés mécaniques des composites tandis que les matrices enrobent et protègent les renforts. Les matrices assurent la cohésion, l'orientation de la charge et également permet le transfert des efforts aux renforts.



**Figure I.1.** Schéma d'un matériau composite.

Les fibres de renfort assurent les propriétés en traction du composite. Elles sont incluses dans une matrice polymère dont le rôle est d'assurer le transfert des efforts entre les fibres ainsi que la protection du renfort (Voir Figure I.2). Ces deux matériaux (matrice et renfort) sont assez différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques. Les propriétés de cette combinaison peuvent être modifiées pour certaines applications, en incluant les charges et les additifs.



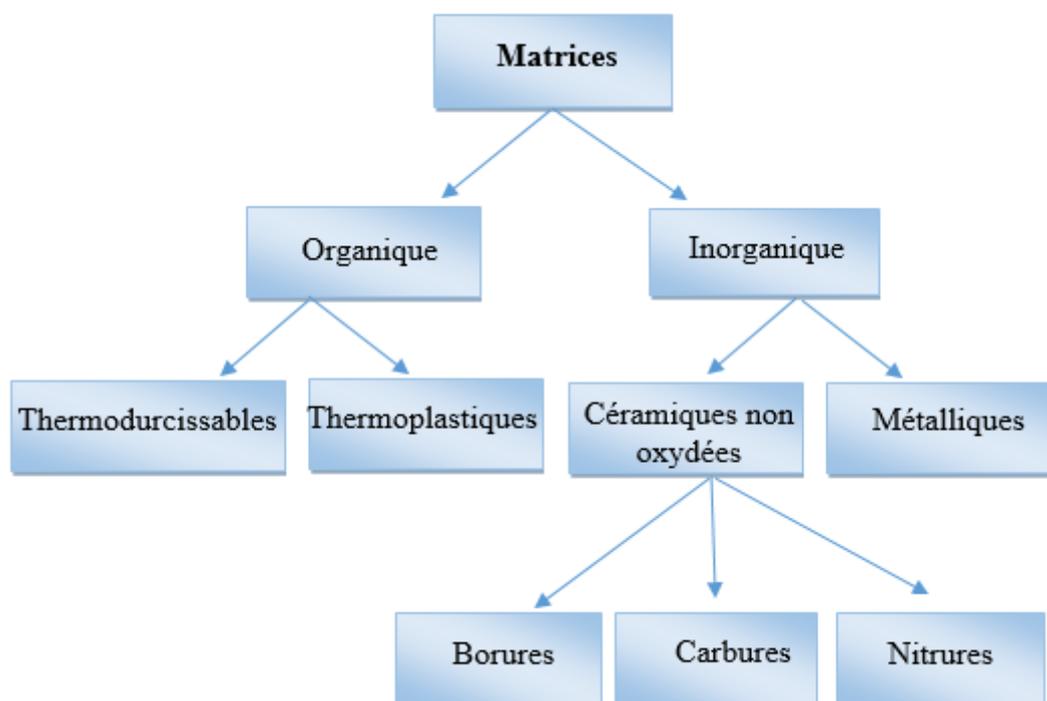
**Figure I.2.** Composition des matériaux composites.

Les propriétés globales des FRP qui sont confiées par les propriétés de leurs deux composants, dépendent de quatre points essentiels, notamment : la fraction volumique de fibres, l'orientation des fibres, type de matrice utilisé et de la méthode de fabrication.

### I.3.1.1. Matrices

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, assurer la répartition des contraintes et assurer aussi une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible d'une manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques élevées. Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la figure I.3.

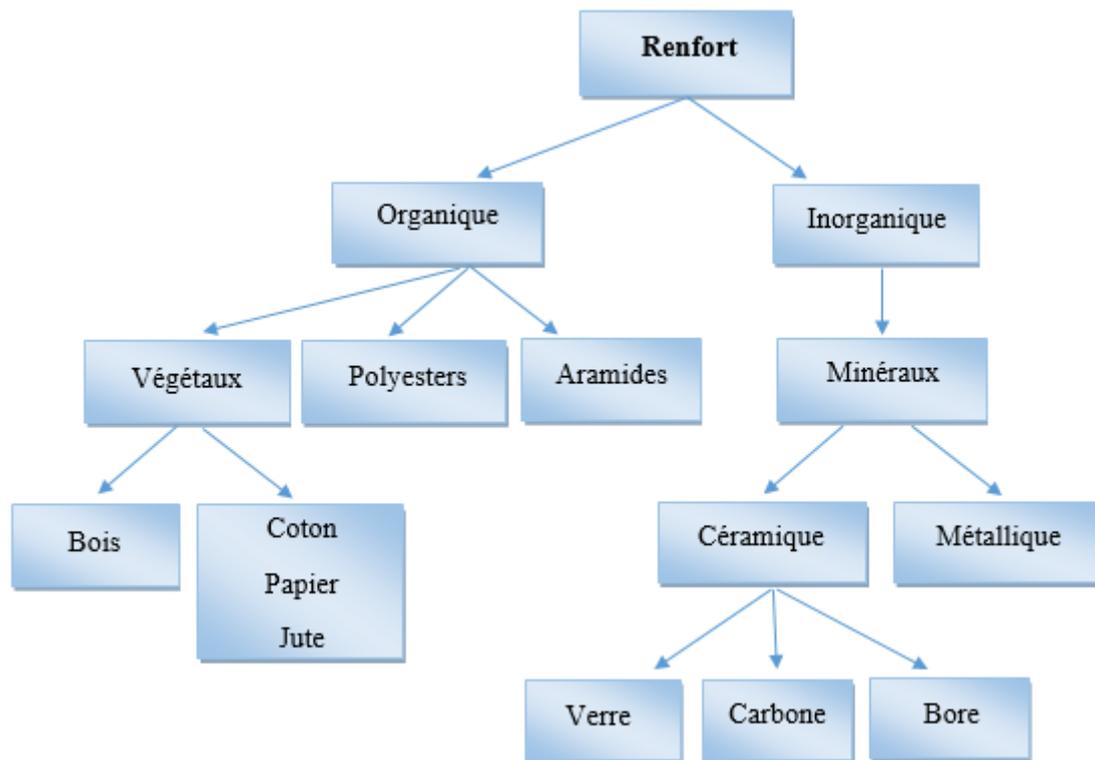
Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent la faculté d'être moulés pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.



**Figure I.3.** Organigramme des principales familles des matrices.

### I.3.1.2. Le renfort

Le renfort est le squelette ou l'armature du composite ; il assure les propriétés mécaniques du matériau composite à savoir : rigidité, résistance à la rupture, dureté... etc. Il permet aussi d'améliorer certains des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes température, tenue au feu, résistance à l'abrasion et propriété électrique. Les caractéristiques recherchées pour le renfort sont : caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les matrices, facilité de mise en œuvre et faible cout. Les principaux matériaux de renfort sont résumés sur organigramme de la figure I.4.



**Figure I.4.** Organigramme des principaux matériaux de renforts.

- **Fibres de verre**

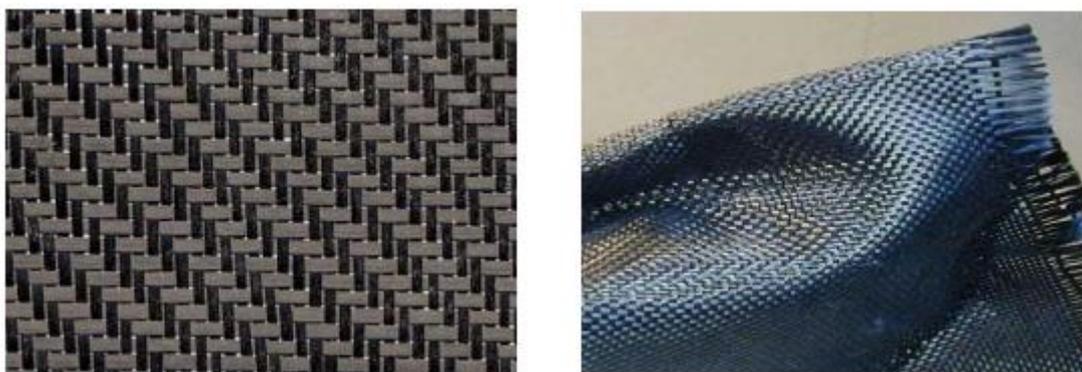
Les fibres de verre (Figure I.5) sont élaborées par un processus appelé la fusion directe à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé notamment de silice, alumine, chaux et magnésie. Suivant leurs compositions, différents types de verre filables peuvent être obtenus. Les fibres de verre sont caractérisées par leur haute résistance, leur module d'élasticité et leur masse volumique modérés et par leur faible conductivité thermique. Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction des structures composites. Les caractéristiques des différentes fibres de verres sont récapitulées dans le tableau I.1.



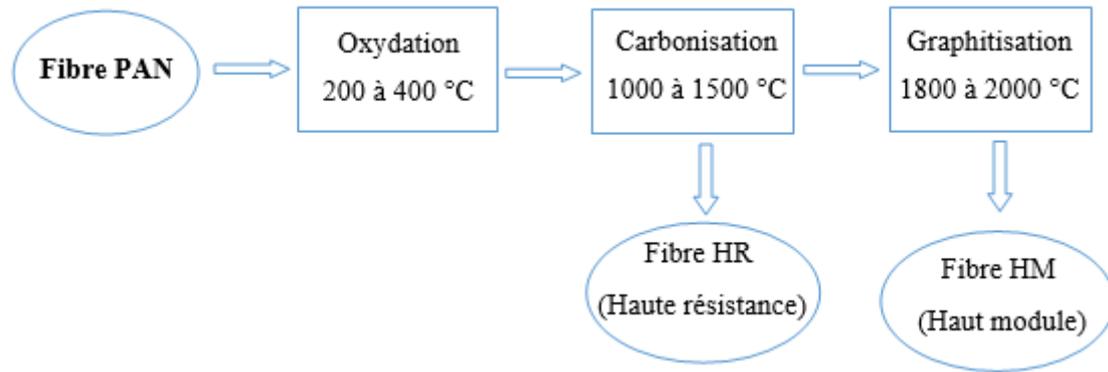
**Figure I.5.** Tissu de fibre de verre.

- **Fibres de carbone**

Les fibres de carbone (Voir Figure I.6) sont des fibres synthétiques, de la famille des fibres minérales artificielles non siliceuses. Ils doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites des graphites qui les composent. Elles sont élaborées à partir d'un polymère précurseur, se présentant sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement les fibres utilisées sont principalement des fibres acryliques fabriquées à partir de poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent ensuite une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation de la structure graphite (Figure I.7). Les fibres de carbone présentent un coût 10 à 20 fois plus élevé que les fibres de verre, et sont donc utilisées dans des applications nécessitant des propriétés comparables à celles de l'acier. Elles présentent de très bonnes propriétés mécaniques, pour une masse volumique généralement inférieure à 2000 kg/m<sup>3</sup>. Les propriétés physique et mécaniques des fibres de carbone sont résumées dans le tableau I.1.



**Figure I.6.** Fibres de carbone.



**Figure I.7.** Organigramme d'obtention des fibres.

- **Fibres d'aramide**

Les fibres aramides de la Figure I.8 sont des fibres synthétiques à caractéristiques élevées, généralement connues sous le nom de « Kevlar », sont produites à partir de polyamides aromatisés. Les fibres sont obtenues à partir d'un procédé appelé filage par fusion (étirage au travers d'une filière) à partir d'une dissolution. Les stratifiés fabriqués avec ces fibres se caractérisent par une grande énergie de fracture, des modules d'élasticité variant de 70 à 200 GPa et un allongement ultime de 1,5 à 5%. Néanmoins ces fibres ne sont pas largement utilisées, vu leur sensibilité à l'humidité, leurs mauvaises tenues en compression. Les propriétés mécaniques des fibres d'aramide sont résumées dans le tableau I.1.



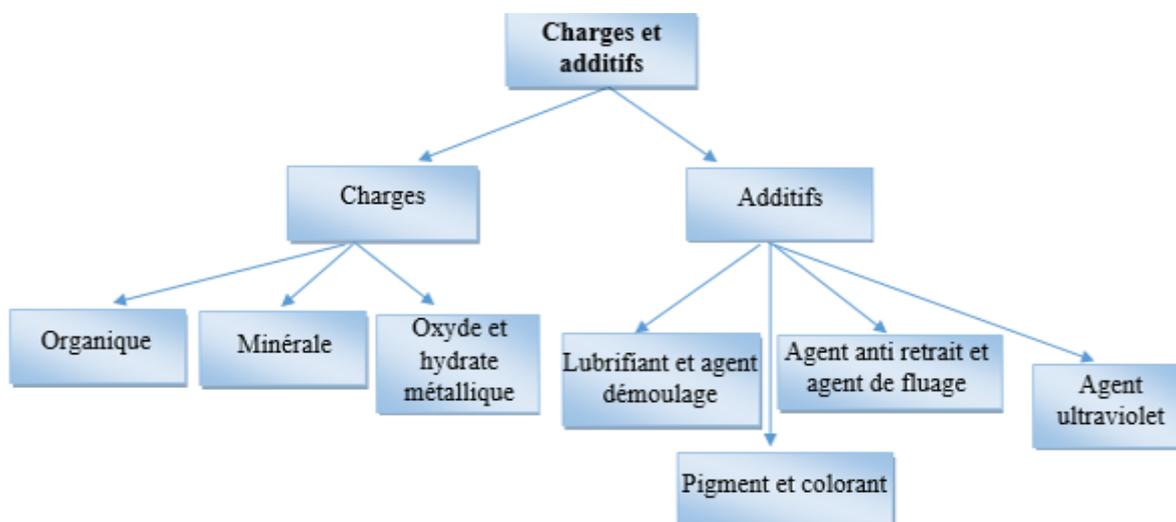
**Figure I.8.** Fibres d'aramide.

**Tableau I.1.** Propriétés en traction des fibres de verre, de carbone et d'aramide.

Caractéristiques		Résistance à la traction (GPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Fibre de verre	<b>E</b>	3 200 à 3 400	72 à 73	4,6 à 4,8
	<b>D</b>	2 500	55	4,5
	<b>A</b>	3 100	71	4,4
	<b>C</b>	3 300	70,3	4,8
	<b>R, S</b>	4 400-4 600	86-87	5,2-5,4
Fibre de carbone	<b>UHM</b>	> 1700	> 400	0.38
	<b>HM</b>	> 1700	300 - 400	0.60
	<b>THR</b>	> 2760	200 – 250	1.27
	<b>HR</b>	2000 - 2750	200 – 250	1.12
Fibre d'aramide	<b>Haut module</b>	2760	120	2,4
	<b>Haute résistance</b>	3400	73	4,5

### I.3.1.3. Les charges et additifs

Il est désigné sous le nom générale charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui incorporée à la résine, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite.

**Figure I.9.** Organigramme des différents charges et additifs utilisés dans les résines.

Les différents charges et additifs utilisés dans les résines sont résumés sur la figure I.9. Les additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

### I.3.2. Propriétés mécaniques des composites (FRP)

Les propriétés mécaniques d'un matériau composite FRP dépendent d'un certain nombre de facteurs comprenant : les proportions relatives des fibres et de la matrice ; le type et les propriétés mécaniques des matériaux constituant (fibres, matrice et tous les additifs) ; l'orientation des fibres dans la matrice ; le ratio du volume fibres par rapport au volume total du composite et le volume ou la dimension du composite lui-même. Le tableau I.2 présente les propriétés mécaniques typiques des trois groupes des FRP (GFRP, CFRP et AFRP) utilisés en génie civil.

**Tableau I.2.** Propriétés mécaniques typiques des composites GFRP, CFRP et AFRP.

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

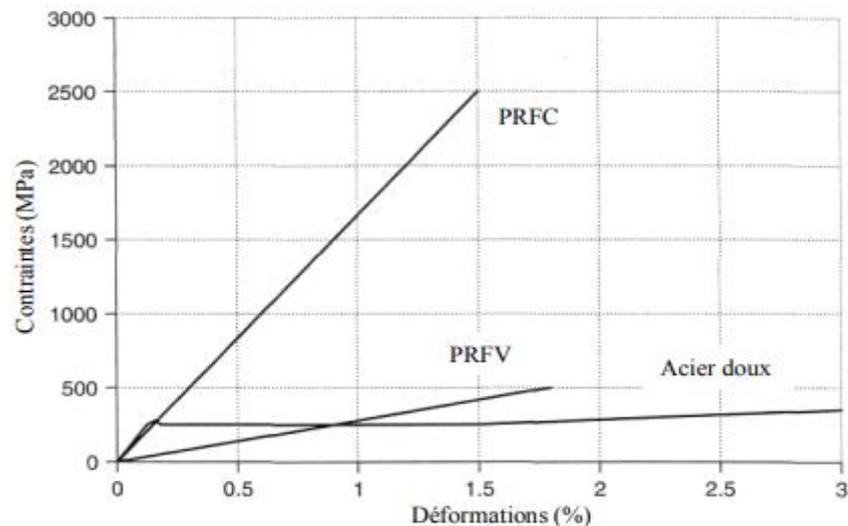
Dans les matériaux composites, les fibres reprennent principalement des efforts dans leur direction, la matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège. Selon un bulletin de la Fédération Internationale de Béton (FIB bulletin 14, 2001 [31]), les propriétés mécaniques des matériaux composites sont données par les relations suivantes :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (I.1)$$

$$R_c = R_f V_f + R_m V_m \quad (I.2)$$

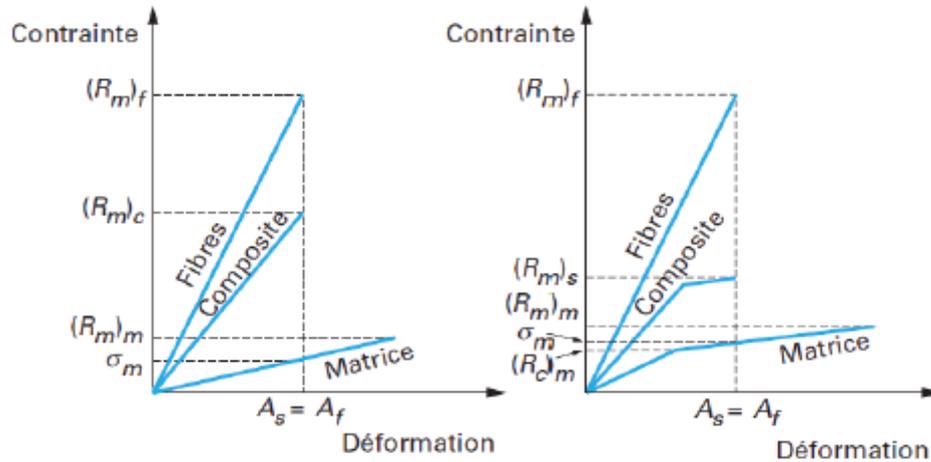
Où  $E_c$  est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres,  $E_f$  le module d'Young des fibres,  $E_m$  le module d'Young de la matrice,  $V_f$  la fraction volumique de fibres,  $V_m$  la fraction volumique de la matrice,  $R_c$ ,  $R_f$  et  $R_m$  sont la résistance en traction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

Le module élastique en compression est généralement plus faible que celui en traction. Les valeurs des modules élastiques en compression sont typiquement de l'ordre de 50-80% de celles déterminées à partir des essais en traction, dépendamment du type de FRP considéré. Les résistances en compression axiale pour les matériaux de FRP uni-axiaux chargés dans la direction des fibres sont en général environ 55%, 20% et 78% de la résistance à la traction axiale pour les FRP de verre, d'aramide et de carbone respectivement. La figure I.10 montre la réponse globale des composites (GFRP et CFRP) sous chargement de traction directe comparativement à celui des aciers classiques.



**Figure I.10.** Courbes contrainte-déformation des PRFV, PRFC et des aciers doux [32].

Les matériaux composites unidirectionnels présentent généralement un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture, les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique - fragile". Lors de l'application d'un effort de traction dans le sens des fibres, et sous l'hypothèse d'une déformation uniforme et identique dans la fibre et dans la matrice, l'amorçage de la rupture se produit par rupture des fibres ou de la matrice. Dans le cas des matériaux utilisés pour le renforcement en Génie Civil, les fibres présentent généralement un allongement inférieur à celui de la matrice et rompent en premier. La loi de comportement de la matrice, en considérant les deux cas représentés sur la figure I.11 influe sur les propriétés du composite. En effet, dans les deux cas l'allongement à la rupture du composite est contrôlé par l'allongement à la rupture des fibres.



**Figure I.11.** Influence de la loi de comportement de la matrice sur les propriétés du composite unidirectionnel [33].

### I.3.3. Application des FRP aux éléments de la structure

La facilité et rapidité de mise en œuvre des FRP font de leur utilisation des techniques de prédilection pour renforcer les structures afin de prolonger leur durée de vie, assurer la sécurité des usagers et améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité. Ce principe de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plaques métalliques extérieurs collés. Ce concept repose alors sur le transfert des efforts entre le support béton et les fibres de renfort.

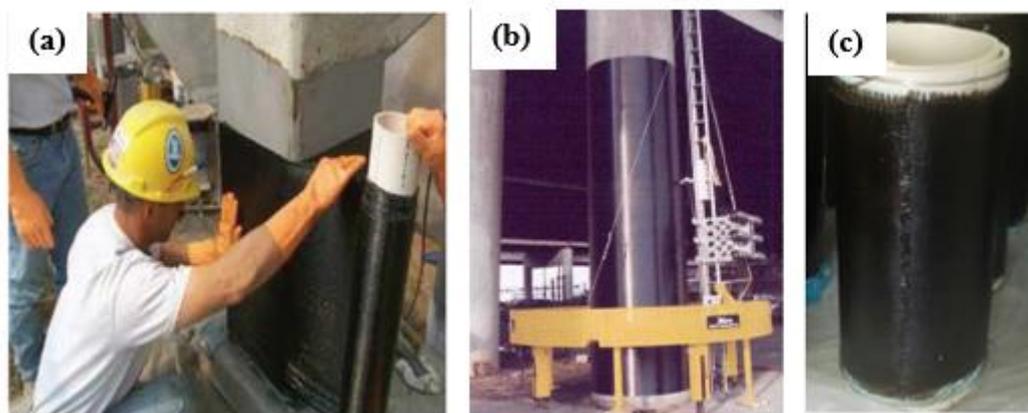
#### I.3.3.1. Renforcement extérieur des structures par des FRP

Le renforcement ou la réparation de structures en béton avec les matériaux composites, est réalisé principalement par le collage de plaques, de lamelles ou de textiles. Actuellement les polymères renforcés de fibre (FRP) sont utilisés comme renforcement extérieur de structures en béton dans principalement trois cas d'application [34] : la flexion, l'effort tranchant (cisaillement) et le confinement (Voir figure I.12).



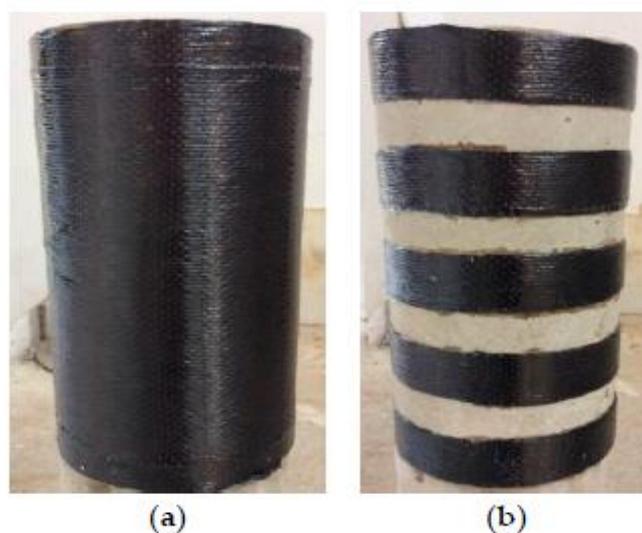
**Figure I.12.** Cas d'application de renforcement extérieur des structures (SikaWrap®).

La pression latérale exercée par l'enveloppe de composites augmente la résistance en compression du béton ; la capacité axiale et latérale de la colonne. Selon le degré de confinement, la déformation à la rupture du béton peut être augmentée amplement. En effet, trois méthodes sont adaptées aux applications des composites FRP sur les poteaux à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en « FRP » (Voir Figure I.13).



**Figure I.13.** Méthode d'application de FRP sur les poteaux : (a) stratification au contact (SikaWrap ®) ; (b) L'enroulement filamentaire [35] ; (c) Tube en FRP préfabriqué [36].

Par ailleurs, une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus « PRF » avec une ou plusieurs couches (Figure I.14.a). Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes « FRP » (Figure I.14.b).



**Figure I.14.** Configuration de confinement du béton : (a) Béton entièrement confiné ; (b) Béton partiellement confiné [37].

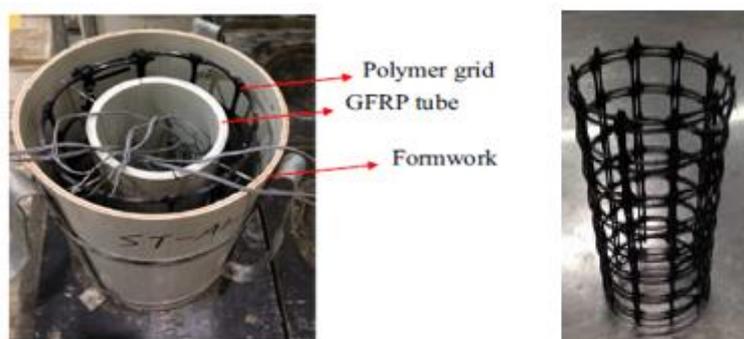
### I.3.3.2. Renforcement intérieur des structures par des FRP

Les technologies de confinement des structures en béton ont connu d'importants progrès ces dernières années, et plusieurs approches pour le béton confiné par des composites FRP ont été développées. Parmi ces techniques le renforcement basé sur l'enveloppe composite FRP collées sur les zones externes des éléments en béton, cette méthode augmente la rigidité et la capacité portante du béton confiné de façon considérable mais il est nécessaire de tenir compte du traitement de surface, de l'influence du glissement et de la rupture prématurée de l'interface. Différentes études [38-40] ont montré que la rupture de l'adhésif implique une rupture soudaine des éprouvettes en béton. Pour remédier à ces problèmes les composites FRP sont incorporer au béton dans le but d'améliorer les performances mécaniques des structures tout en restant protégé par le béton d'enrobage.

Afin d'améliorer l'efficacité mécanique du béton confiné des grilles composites, des tubes FRP et des bandes composites (Figure I.15) peuvent être intégré au béton afin d'assurer la continuité du béton au sein de la structure, éviter le problème de rupture d'interface et améliorer la résistance au feu des colonnes en raison de la présence d'un composant d'enrobage en béton, voir figure I.16.



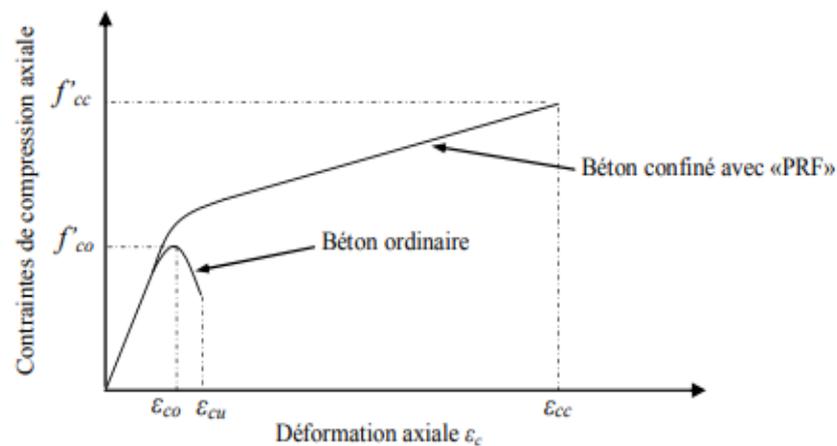
**Figure I.15.** Plusieurs configurations des tubes en GFRP [12].



**Figure I.16.** Confinement du béton par intégration d'une grille polymère et un tube en GFRP [41].

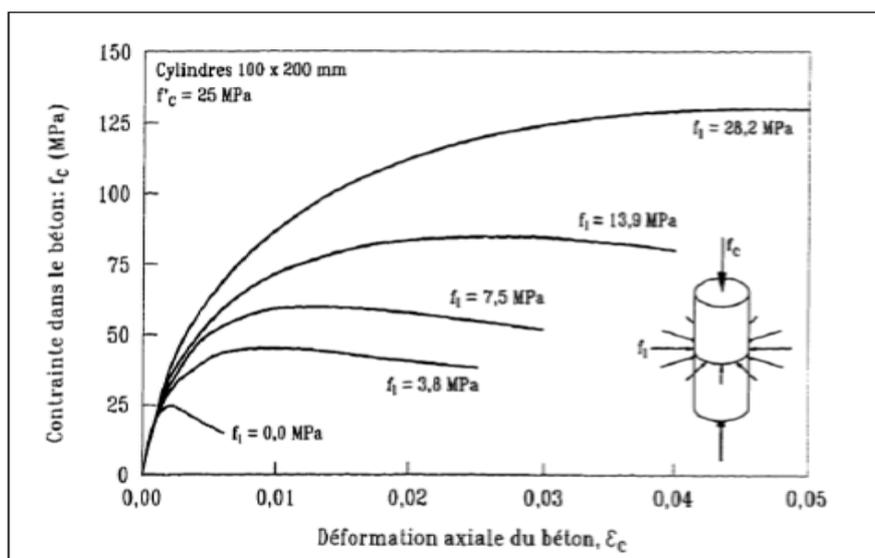
### I.3.4. Comportement en compression du béton confiné par FRP

Les composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Sous l'action d'une charge de compression axiale, le béton présente une déformation latérale, cette déformation engendre une fissuration qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement de façon à réduire, voire empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité augmentent. La Figure ci-dessous présente les courbes contraintes-déformations pour des bétons confinés et non confinés.



**Figure I.17.** Courbe contraintes-déformations idéalisée pour un béton confiné avec des matériaux composites [42,43].

A partir de la Figure I.17 [42,43] on peut facilement observer que le confinement des colonnes avec des composites PRF a nettement augmenté la capacité et la ductilité des colonnes en béton.



**Figure I.18.** Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [44].

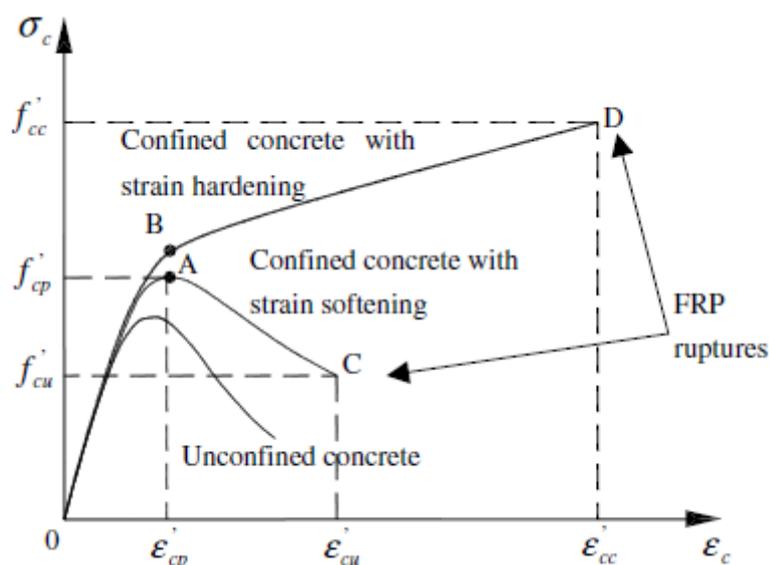
Il est constaté à partir de la figure I.18 que la pression de confinement latérale augmente considérablement la résistance et la rigidité des cylindres en béton et améliore la contrainte de rupture. En effet le développement du champ de fissuration est ralenti et la propagation des fissures est réduite, d'où une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné. Pour des niveaux de contraintes faible, la réponse du béton confiné est semblable à celle du béton non confiné, par contre lorsque la contrainte dépasse la limite de rupture du béton ordinaire, le FRP active une pression, et la courbe présente un deuxième tronçon linéaire ascendant jusqu'à la rupture des composites FRP. Ceci traduit le phénomène de confinement.

#### I.4. Revue bibliographique sur le confinement de béton

La littérature scientifique actualisée nous fournit aujourd'hui énormément de travaux de recherches expérimentaux réalisés pour mettre en évidence tous les aspects de confinement de béton par matériaux composites et de mettre au point des modèles théoriques de résistance et de déformation, afin de définir l'état de comportement jusqu'à rupture de éléments confinés.

- **Wu et al (2006) [45]**

Les auteurs ont analysé l'effet de confinement et les mécanismes de rupture des cylindres en béton confinés par des FRP en se basant sur des résultats de plus de 300 spécimens couvrant une large gamme de paramètres. Une attention particulière est accordée pour prédire la réponse d'écrouissage ou d'adoucissement des cylindres confinés (Voir figure I.19). Par conséquent, des équations pour prédire la résistance maximale, la déformation maximale, la résistance ultime et la déformation correspondante sont suggérées dans leur étude.



**Figure I.19.** Réponses contrainte-déformation typiques pour le béton confiné en FRP [45].

Les composites FRP sont souvent des matériaux élastiques linéaires, les équations pour calculer le module de confinement ( $E_l$ ) et la résistance de confinement ( $f_l$ ) peuvent être dérivées sur la base des conditions d'équilibre et de compatibilité de déformation [46,47].

$$E_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \quad (\text{I.3})$$

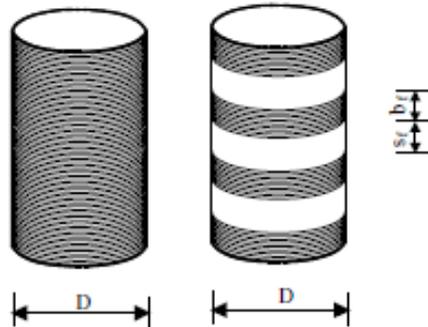
$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f f_f \quad (\text{I.4})$$

$E_f$ ,  $f_f$  sont respectivement le module d'élasticité et la résistance à la traction du composite et  $\rho_f$  est la densité du matériau composite par rapport au volume de béton, qui peut être déterminé comme suit :

$$\rho_f = \frac{4 t_f}{D} \quad (\text{Pour les cylindres entièrement enveloppés}) \quad (\text{I.5})$$

$$\rho_f = \frac{4 t_f b_f}{D (b_f + s_f)} \quad (\text{Pour les cylindres partiellement enveloppés}) \quad (\text{I.6})$$

Avec  $t_f$  l'épaisseur du FRP ; D est le diamètre du béton.



**Figure I.20.** Configurations de l'enveloppe FRP (Wu et al. 2006) [45].

De nombreux chercheurs ont suggéré différentes méthodes pour prédire la résistance des cylindres en béton confinés en FRP en référence à l'équation bien connue proposée par Richart et al. (Équation I.7 [48]), mais le coefficient d'efficacité  $k$  a été ajusté en fonction des caractéristiques du béton confiné en FRP.

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f'_l \quad (\text{I.7})$$

Où  $f'_{c0}$  et  $f'_{cc}$  sont la résistance à la compression des cylindres en béton non confiné et confinés en FRP, respectivement.

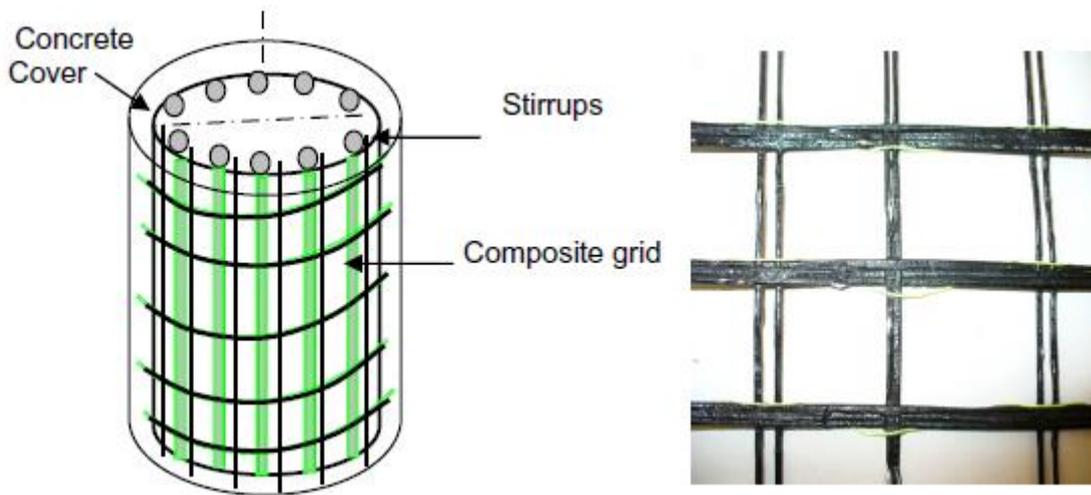
Les équations de régression linéaire suivante sont proposées par les auteurs afin de prédire la résistance du béton confiné.

$$\text{Pour les feuilles de FRP de module commun : } \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.0 \frac{f_l}{f'_{co}} + 1 \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Pour les feuilles de CFRP à haut module : } \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.4 \frac{f_l}{f'_{co}} + 1 \quad (\text{I.9})$$

▪ **Bentayeb et al (2008) [49]**

Dans ce travail les auteurs ont réalisé une étude expérimentale et numérique, en intégrant une grille composite à mailles rectangulaires en fibres de carbone (voir figure I.21 [49]) à l'intérieur de la matrice béton, afin d'assurer, d'une part, une rigidité et une résistance suffisante empêchant l'effondrement global et, d'autre part, de préserver l'aspect extérieur et esthétique des ouvrages en béton armé.



**Figure I. 21.** Configuration des échantillons confinés et la grille composite proposée par Bentayeb et al [49].

Le chargement ultime du béton confiné implique la mobilisation de la contribution du renforcement, et dépend donc du rapport de confinement  $d = f_l/f'_{co}$ . Alors que pour le renforcement externe, les auteurs ont développé un modèle spécifique en termes de paramètres de grille composites comme suit :

$$f'_{cu} = f'_{co} \left( 0.75 + 2.5 \left( \frac{\varphi_1 \varphi_2 f_f}{f'_{co}} \right) \right) \quad (\text{I.10})$$

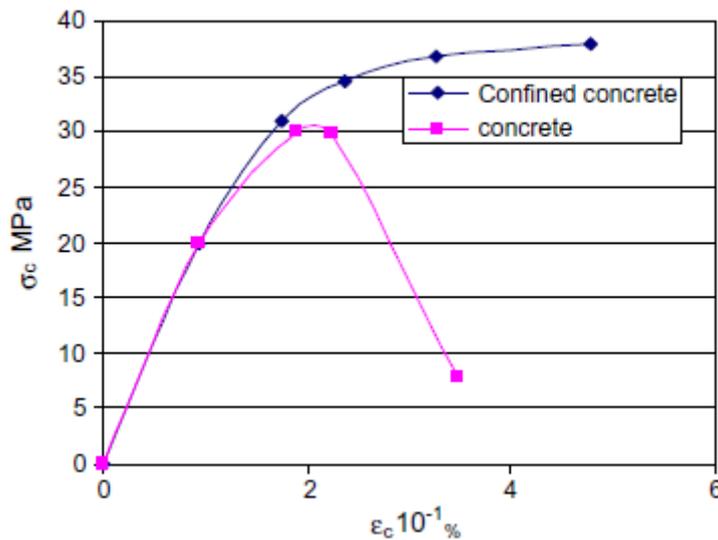
$$\varepsilon'_{cu} = \varepsilon'_{co} \left( 1.3 + 6.3 \left( \frac{\varphi_1 \varphi_2 f_f}{f'_{co}} \right) \right) \quad (\text{I.11})$$

D'où  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont les paramètres de la grille composite donné par :

$$\varphi_1 = 2t_f b_f \left( 1 - \frac{A_v}{A_b} \right) \quad (\text{I.12})$$

$$\varphi_2 = \left( D'(b_f + s_f) \right)^{-1} \quad (\text{I.13})$$

La figure I.22 [49] illustre les courbes contrainte-déformation pour les deux types de béton : confinés et non confinés. Il a été constaté qu'avec un niveau de confinement raisonnable, la résistance moyenne du béton est améliorée de près de 20 % en raison des effets d'écroutissage avant la rupture du béton confinée. De plus, la classe du béton et les paramètres de grille ont une grande influence sur le niveau de confinement.



**Figure I. 22.** Courbe contrainte-déformation des colonnes confinés et non confinés [49].

#### ▪ Pham et al (2015) [51]

Le comportement et les modes de défaillance du béton confiné par des PRF enveloppés avec différents schémas de FRP, y compris des cylindres de béton entièrement enveloppés, partiellement enveloppés a été investi par les auteurs.

En effet, une nouvelle équation qui peut être utilisée pour prédire la déformation axiale de des cylindres en béton enveloppés partiellement de FRP est proposée.

#### ➤ Pour les colonnes entièrement enveloppées

La pression de confinement est supposée uniforme sur la section transversale et le long de l'axe axial des colonnes circulaires. Parmi les études existantes, le modèle proposé par Lam et Teng (2003) [52] est adopté par les auteurs, car il offre une précision raisonnable avec une forme très simple, pour calculer la résistance à la compression des poteaux entièrement enveloppés de FRP comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (\text{I.14})$$

$f_l$  est la pression de confinement effective, donnée comme suit :

$$f_l = \frac{2E_f \varepsilon_{fe} t}{D} \quad (\text{I.15})$$

Où  $E_f$  module d'élasticité du FRP ;  $t$  épaisseur nominale de la gaine FRP ;  $D$  diamètre de la section de colonne ;  $\varepsilon_{fe}$  contrainte de rupture réelle du FRP dans la direction radiale.

Le modèle de déformation proposé par Pham et Hadi (2013) [53] est adopté pour calculer la déformation axiale de compression du béton confiné comme suit :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + \frac{2ktf_{fe}\varepsilon_{fe}}{Df'_{co} + 3.3tf_{fe}} \quad (\text{I.16})$$

Où  $\varepsilon_{cc}$  déformation axiale ultime du béton confiné ;  $\varepsilon_{co}$  déformation axiale à la contrainte maximale du béton non confiné ;  $k = 7,6$  est le facteur proportionnel ;  $f_{fe}$  résistance à la rupture réelle du FRP.

➤ Pour les colonnes partiellement enveloppées

Les colonnes en béton partiellement enveloppées de FRP sont de nature moins efficace que les colonnes entièrement enveloppées car il existe des zones confinées et non confinées. Une approche similaire à celle proposée par Sheikh et Uzumeri (1980) [54] est adoptée par les auteurs pour déterminer la pression de confinement effective sur le noyau de béton. Dans un tel cas, un coefficient effectif de confinement ( $k_e$ ) est introduit pour tenir compte de l'enveloppement partiel comme suit :

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} = \left(1 - \frac{s}{2D}\right)^2 \quad (\text{I.17})$$

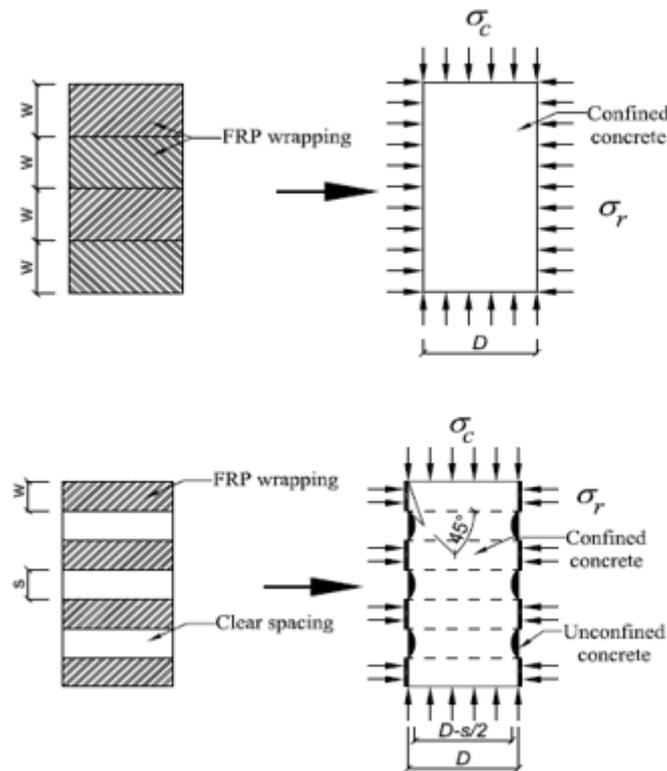
Où  $A_e$  et  $A_c$  sont respectivement l'aire du noyau de béton effectivement confiné et l'aire de la section transversale ;  $s$  = espacement libre entre deux bandes FRP. Par conséquent, la résistance à la compression des colonnes en béton partiellement enveloppées de FRP pourrait être calculée comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3k_e \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad (\text{I.18})$$

$f_l'$  est la pression de confinement équivalente du FRP, supposée uniformément répartie le long de l'axe longitudinal de la colonne :

$$f_l' = \frac{2E_f \varepsilon_{f_{et}} w}{D} \frac{w}{w+s} \quad (\text{I.19})$$

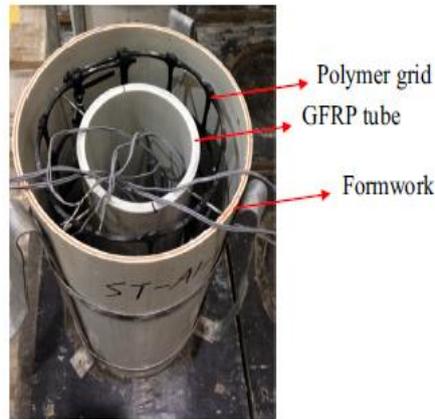
Où  $w$  = largeur des bandes FRP ;  $s$  = espacement libre entre les bandes FRP



**Figure I.23.** Mécanisme de confinement, béton entièrement confiné et béton partiellement confiné [51].

- **Wang et al (2017) [41]**

Une nouvelle colonne composite (CCFT) qui se compose d'un tube intérieur en polymère renforcé de fibres (FRP) rempli de béton, d'un béton extérieur confiné avec une grille en polymère et le béton d'enrobage, est proposée par les auteurs (Voir figure I.24 [41]). En effet, 16 colonnes en béton ont été coulées et testées sous compression axiale. Pour les colonnes en béton confiné en FRP, une couche et deux couches de feuille de carbone CFRP ont été enveloppées, respectivement. Pour les colonnes CCFT, un tube en verre GFRP a été utilisé pour confiner le béton intérieur, et une grille en polymère a été utilisée pour confiner le béton extérieur.



**Figure I.24.** Conception de confinement interne proposé par Wang et al [41].

Un modèle analytique pour la prédiction du comportement charge axiale-déformation axiale des colonnes CCFT a été développé et validé avec des résultats expérimentaux.

➤ Pour le béton intérieur au tube :

Le modèle contrainte-déformation proposé par Lam et Teng [55] est utilisé pour modéliser le béton intérieur au tube, puisque ce modèle s'est avéré être l'un des modèles contrainte-déformation les plus précis [56]. Les équations pour calculer la résistance ultime et la déformation du béton confiné en FRP est donné par :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \quad (I.20)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12 \left( \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \quad (I.21)$$

➤ Pour le béton extérieur au tube :

La résistance au pic ainsi que la déformation au pic du béton confiné avec la grille polymère peut être calculé par les équations suivantes :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.0053 \lambda_1 \quad (I.22)$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + 0.0073 \lambda_1 \quad (I.23)$$

Dans le quel :  $\lambda_1 = \frac{c_j}{\sqrt{f'_{co}}}$

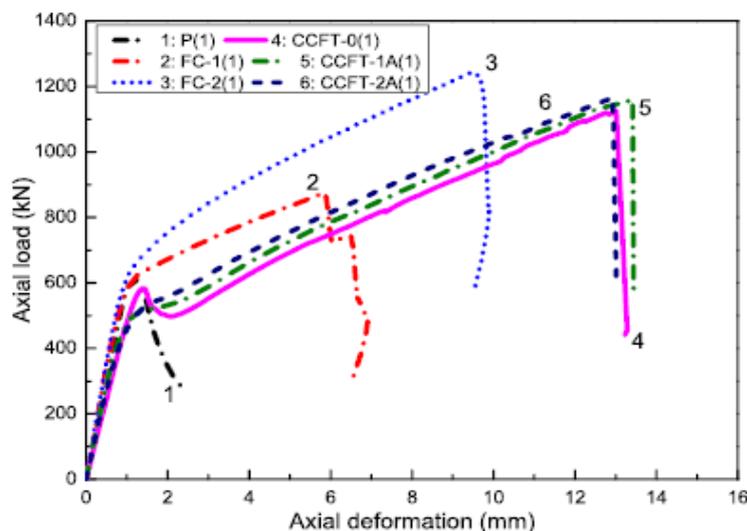
Le module de confinement  $C_j$  est définis par la relation suivante :

$$C_j = -\frac{2k_e n A_g}{d_g (s_g + b_g)} E_g \quad (\text{I.24})$$

$k_e$  est le coefficient effectif de confinement qui a été d'abord proposé par Sheikh et Uzumeri [57], qui peut être exprimée comme suit :

$$k_e = \left(1 - \frac{s_g}{2d_g}\right)^2 \quad (\text{I.25})$$

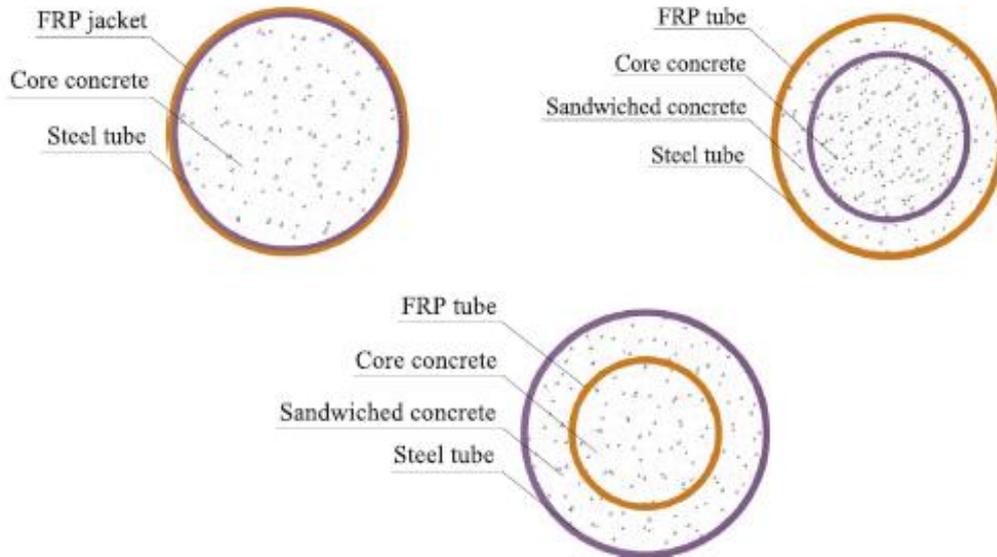
Les résultats obtenus par les auteurs montrent qu'une augmentation considérable de la résistance et de la ductilité des colonnes CCFT (Voir figure I.25 [41]). En outre, leurs résultats analytiques se sont avérés en bon accord avec les résultats expérimentaux. Les auteurs ont conclu que le tube FRP assure le confinement du béton intérieur et supporte la charge axiale. La grille en polymère assure le confinement du béton extérieur et la capacité de charge de la colonne CCFT peut être légèrement augmentée en augmentant la quantité de grille en polymère.



**Figure I.25.** Courbes contrainte-déformation des colonnes conçues par Wang et al. [41].

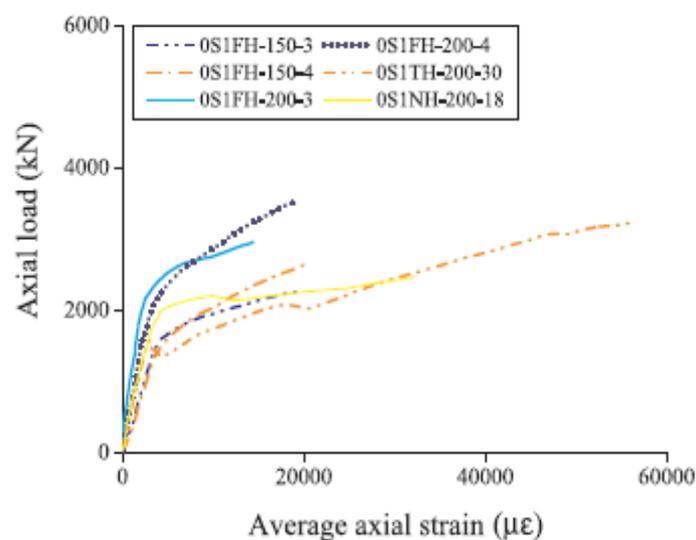
- **Long et al (2018) [16]**

Une étude expérimentale du comportement en compression axiale des colonnes en acier à section creuse circulaire remplies de béton avec des tubes internes en polymère renforcé de fibres (FRP) a été présentée, tel que montré sur la figure I.26 [16].



**Figure I.26.** Les configurations de confinement proposées par Long et al. [16].

Il a été constaté que la présence du tube interne en PRF conduisait à un comportement en compression axiale considérablement amélioré en raison des niveaux de confinement plus élevés accordés au noyau en béton interne « doublement confiné ». La capacité portante a été augmentée d'environ 10 % à 50 % et la ductilité a également été améliorée (Voir Figure I.27 [16]). De plus grands avantages sont apparus avec l'augmentation du diamètre du tube interne en FRP en raison de la partie accrue de la section transversale qui est doublement confinée.



**Figure I.27.** Courbes force axiale-déformation axiale, obtenues par Long et al. 2018 [16].

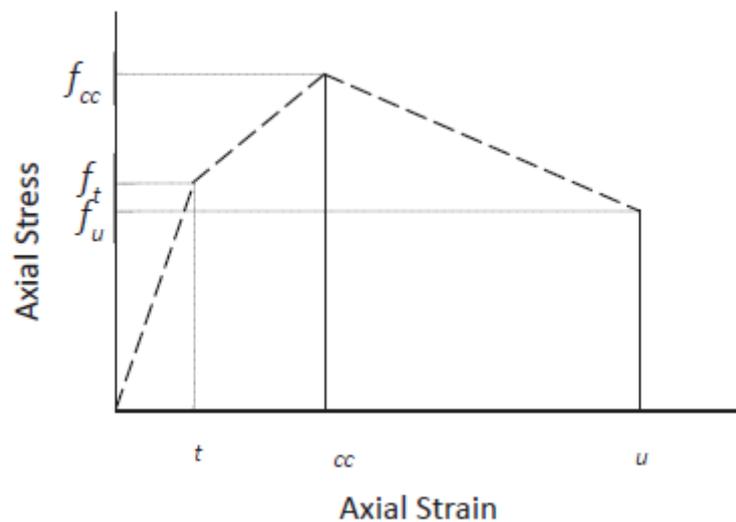
- **Abd El Fattah et al (2018) [58]**

Les auteurs ont réalisé un programme expérimental, dans lequel des faisceaux de fils en fibre carbone et de verre ont été enroulés en spirale autour de cinq barres d'acier longitudinales de 8 mm de diamètre pour agir comme un confinement passif à l'intérieur des colonnes de béton. (Voir Figure I.28 [58]).



**Figure I.28.** Configuration de confinement de Abd El Fattah et al. 2018 [58]

Les auteurs ont développé un modèle analytique qui propose une courbe tri-linéaire reliant quatre points (Figure I.29 [58]) ; le point d'origine, le point de transition ( $f_t, \varepsilon_t$ ), le point qui représente la résistance maximale ( $f_{cc}, \varepsilon_{cc}$ ) et le point qui représente la déformation ultime où la rupture du FRP ( $f_u, \varepsilon_u$ ).



**Figure I.29.** Modèle analytique proposé par Abd El Fattah et al. 2018 [58].

Le point de transition qui représente l'activation de confinement est représenté par :

$$\varepsilon_t = 0.0022 \quad (I.26)$$

$$f_t = 0.65 f_{cc} \quad (I.27)$$

La force maximale est représentée par les équations suivantes adaptées de Mander et al. [59] :

$$f_{cc} = \alpha f'_c \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_c}} - 2 \frac{f'_l}{f'_c} \right) \quad (I.28)$$

$\alpha = 1$  Pour le CFRP et 1.12 pour le GFRP

$$\varepsilon_{cc} = 0.5 \varepsilon_0 \quad (I.29)$$

Où  $f'_c$  et  $\varepsilon_0$  sont respectivement la résistance à la compression et la déformation correspondante.

En effet, la pression latérale de confinement effective  $f'_l$  est obtenue comme suit :

$$f'_l = 0.5 k_e \rho_{sp} f_{frp} \quad (I.30)$$

Où  $k_e$  est le coefficient d'efficacité du confinement,  $\rho_{sp}$  est le rapport du volume de l'armature transversale au volume de l'aire confinée et  $f_{frp}$  est la résistance effective du FRP.

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (I.31)$$

$$\rho_{sp} = \frac{4A_{sp}}{s' d_s} \quad (I.32)$$

Le point ultime est prédit selon les équations suivantes :

$$f_u = 0.6 f_{cc} \quad (I.33)$$

$$\varepsilon_u = 0.002 \left( 1.5 + 12 \omega \frac{f'_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_0} \right)^{0.5} \right) \quad (I.34)$$

$\omega$  est le coefficient de ductilité et sa valeur est de 1,8 pour le CFRP et de 0,4 pour le GFRP.

- **Cao et al (2019) [60]**

Ils ont exploré le comportement en compression axiale des cylindres en béton expansifs confinés avec un tube en GFRP, comme montré sur la figure I.30. Dix-huit cylindres en béton confinés en GFRP, dont neuf en béton expansif (EG) et neuf en béton ordinaire (OG) comme référence ont été coulés puis chargés en compression axiale.



**Figure I.30.** Échantillons de tubes en GFRP proposés par Cao et al. [60].

Un modèle contrainte-déformation axiale a été formulé sur la base de la modification des équations unifiées de la littérature pour tenir compte des effets de confinement actif générés par l'agent expansif. Le modèle analytique est sous la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = E = \begin{cases} 1 + 3.5(\rho_K - 0.01)\rho_\varepsilon, & \text{si } \rho_K \geq 0.01 \\ 1 & \text{si } \rho_K < 0.01 \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

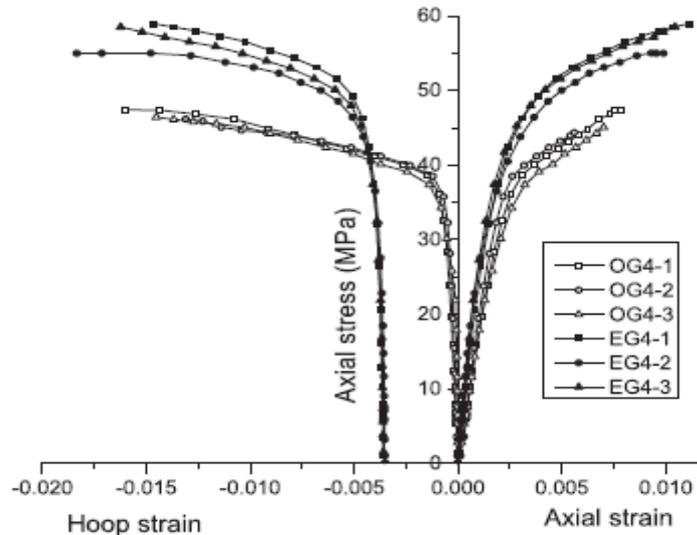
$$\text{Avec } \rho_K = \frac{2E_{frpnt}}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})D'} \text{ et } \rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{co}}$$

Ainsi, l'équation modifiée de la résistance à la compression proposée par les auteurs est la suivante :

$$\text{➤ Pour le béton ordinaire : } \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = E + 0.15 \quad (\text{I.36})$$

$$\text{➤ Pour le béton confiné : } \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = E + 0.15 + \Delta \frac{f_0}{f'_{co}} \quad (\text{I.37})$$

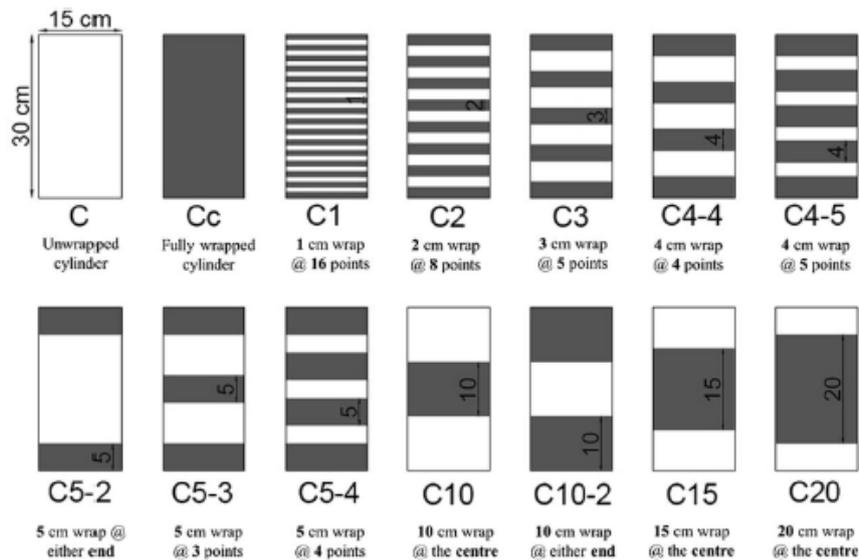
Comparé au béton conventionnel, le béton confiné produit un certain confinement actif sur le tube périphérique en FRP en raison de la dilatation du béton. Les résultats expérimentaux de la figure I.31 [60] obtenus par les auteurs indiquent qu'en raison de l'effet de confinement et de l'expansion du béton central, le facteur de réduction de la déformation périphérique, la contrainte normalisée aux points d'inflexion, la résistance à la compression et la déformation axiale ultime des spécimens avec le béton expansif, confiné avec le GFRP, ont tous été améliorés par rapport aux spécimens en béton ordinaire.



**Figure I.31.** Courbe contrainte-déformation des cylindres en béton confinés en GFRP obtenues par Cao et al. 2019 [60].

▪ **Totonchi et al (2019) [61]**

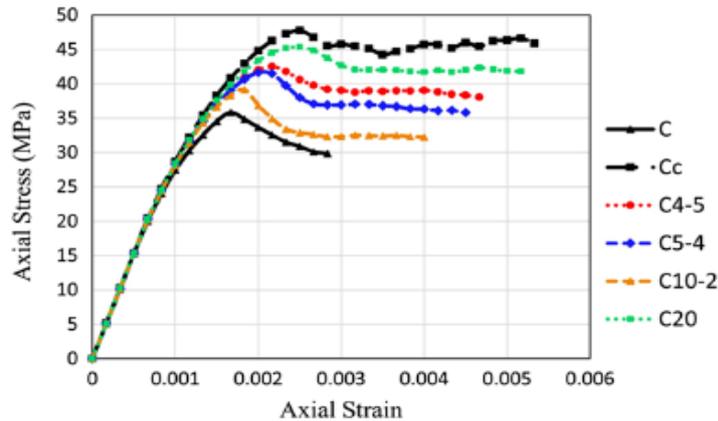
Le confinement discontinu ou partiel des colonnes circulaires en béton en utilisant des bandes ou des enveloppes de stratifiés en CFRP qui peut être une méthode efficace de réhabilitation et de renforcement structurels a été exhaustivement investi par les auteurs. En effet, une distinction a été établie entre les schémas d'enveloppe partiel et discontinu en CFRP (Voir Figure. I.32 [61]).



**Figure I.32.** Les différents modèles d'enveloppe considérés par Totonchi et al. 2019) [61].

Il a été conclu par les auteurs à travers les courbes contrainte-déformation de la figure I.33 que les différents arrangements de bandes discontinues de stratifiés CFRP n'avaient aucun effet

notable sur le comportement contrainte-déformation axiale des éprouvettes de béton, tandis que le changement de position et de largeur des enveloppes partielles de CFRP affectait de manière significative le comportement contrainte-déformation axiale du béton.



**Figure I.33.** Comparaison des courbes contrainte-déformation axiale des spécimens confinés par Totonchi et al. 2019) [61].

- **Daou et al (2020) [62]**

Les auteurs ont présenté dans leur étude, les résultats d'une recherche expérimentale et analytique du comportement des colonnes en béton armé, confinées avec des géo-grilles, soumise à une charge de compression uni-axiale monotone. L'objectif principal l'investigation était d'étudier la faisabilité de l'utilisation des géo-grilles de la figure I.34 [62] comme remplacement du renforcement de l'acier transversal ordinaire dans les colonnes. Par conséquent, les auteurs ont montré que l'utilisation de géo-grilles comme matériau de confinement dans des colonnes en béton armé offre des avantages par rapport aux étriers en acier, vu qu'ils sont moins laborieux à installer et plus durables.



**Figure I.34.** Géo-grille et chargement des cylindres utilisés par Daou et al. 2020) [62].

Deux modèles analytiques distincts ont été développés pour prédire le comportement axial, l'un pour les échantillons de béton ordinaire non confinés, et l'autre pour les colonnes avec une armature transversale en géo-grille. La contrainte maximale ( $f_{cc}''$ ) pour une éprouvette cylindrique spécifiée est donnée par [59] comme :

$$f_{cc}'' = f_c' + k_1 \cdot f_u \quad (\text{I.38})$$

Avec  $k_1 = 2$  et la résistance du confinement ( $f_u$ ) est donné par l'équation suivante :

$$f_u = \frac{2 \cdot t_{eq}}{d_g} f_{ru} \quad (\text{I.39})$$

La déformation axiale du béton confiné à la contrainte au pic a été déterminée selon l'expression adoptée par Wight et MacGregor [63] :

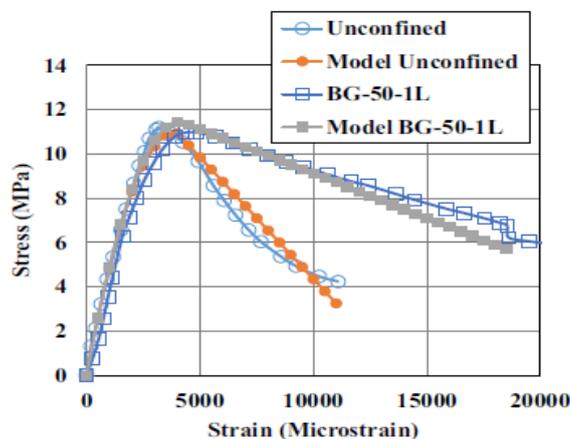
$$\varepsilon_{c0} = 1.8 \frac{f_{cc}''}{E_c} \quad (\text{I.40})$$

$$\text{Avec } E_c = 4730 \sqrt{f_c'}$$

Les équations I.40 et I.42 ont été combinés avec l'équation contrainte-déformation de Hognestad modifiée [64] comme suit :

$$f_c = f_{cc}'' \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (\text{I.41})$$

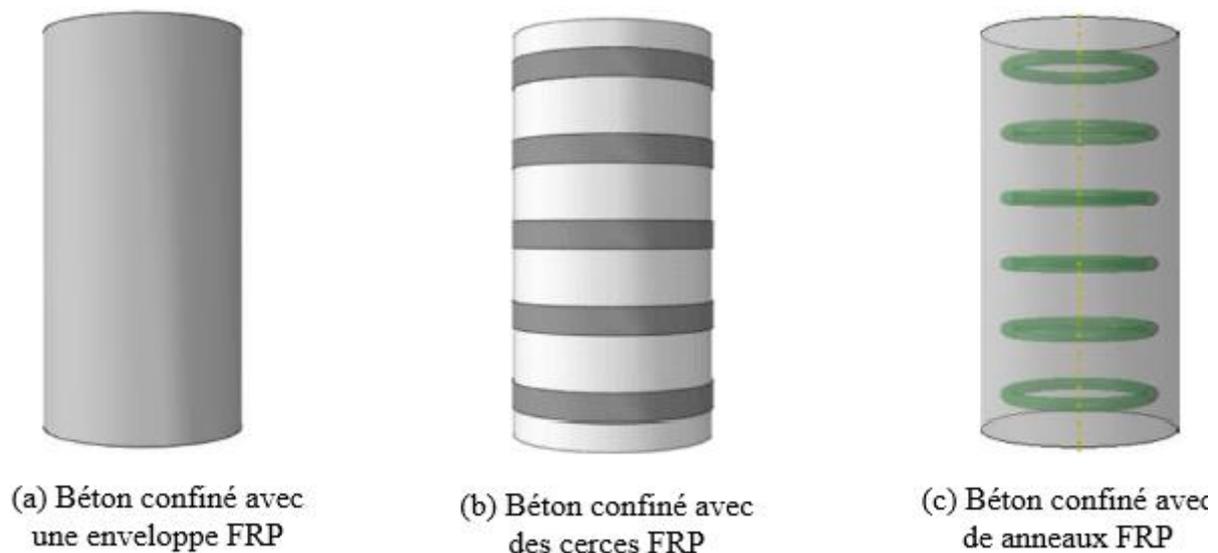
D'après la figure I.35 [62] obtenue par les auteurs, les modèles ont fourni des prévisions satisfaisantes de la réponse contrainte-déformation lorsque les résultats analytiques et expérimentaux ont été comparés.



**Figure I.35.** Comportement du béton confiné par intégration de géo-grille obtenu par Dao et al [62].

- **Zeng et al (2021) [65]**

Un modèle d'analyse par une approche avancée par éléments finis a été mis en œuvre pour étudier les distributions de contrainte axiale du béton confiné avec des anneaux FRP. La distribution des contraintes au niveau central de deux anneaux FRP adjacents est obtenu, et la relation entre l'angle d'action d'arc et les paramètres de contrôle (c'est-à-dire la résistance au béton non confinée, la largeur du FRP, l'épaisseur FRP et l'espacement clair des anneaux FRP) est établi à base d'un modèle proposé. Un nouveau coefficient d'efficacité de confinement est ensuite proposé par les auteurs, conduisant à une prédiction beaucoup plus fiable du béton confiné par intégration de cerces FRP dans des colonnes circulaires.



**Figure I.36.** Systèmes de confinement proposés par Zeng et al. 2021 [65].

Les nouvelles équations proposées par les auteurs pour la contrainte axiale ultime et la déformation des colonnes sur la base d'une analyse de régression avec le nouveau coefficient d'efficacité de confinement sont :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 4.3 \left( \frac{k_{v,new} f'_{l,a}}{f'_{c0}} \right)^{1.25} \quad (I.42)$$

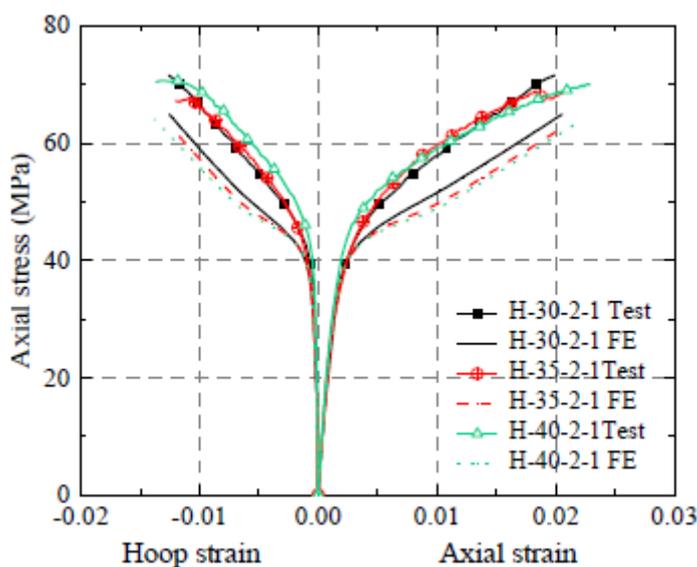
$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 50 \left( \frac{k_{v,new} f'_{l,a}}{f'_{c0}} \right)^{1.45} \quad (I.43)$$

Dans la plupart des modèles de contrainte-déformation existants pour le béton confiné en FRP avec confinement vertical non uniforme, le coefficient empirique d'efficacité du confinement est établi sur la base du rapport entre la zone de confinement effective et l'ensemble de la section transversale, et il néglige la section en dehors de la zone de confinement effectif. Pour cela, un nouveau coefficient d'efficacité du confinement est proposé par Zeng et al (2021) [65] :

$$k_{v,new} = V_e/V_v \quad (I.44)$$

C'est le rapport entre le volume réduit dans la génératrice de l'arc et le volume total entre deux anneaux FRP adjacents.

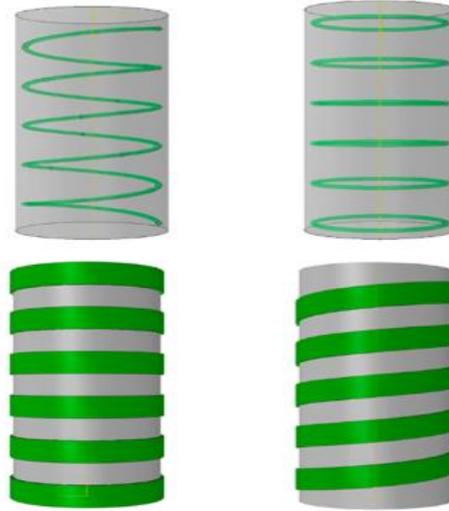
Les résultats théoriques basés sur le coefficient d'efficacité de confinement proposé par Zeng et al (2021) [65] sont justifiés comme étant fiables et précis en comparaison avec les résultats des essais, comme le montre la figure I.37 [65]. En effet, le coefficient d'efficacité de confinement proposé par les auteurs peut être adopté dans différents modèles de confinement et peut être facilement étendu au béton confiné avec des anneaux FRP avec diverses sections transversales.



**Figure I.37.** Résultats des essais et prédits par Zeng et al. 2021 [65].

- **Ye et al (2022) [66]**

Une évaluation des modèles existants de contraintes et de déformations axiales ultimes du béton confiné (y compris des modèles pour le béton confiné en spirale de FRP de verre (GFRP) sous formes d'une base de données a été présentée dans l'étude menée par Ye et al [66]. Les colonnes en béton incorporant des dispositifs de confinement internes et externes en FRP étudiées par (Ye et al. 2022) sont montrées sur la figure I.38 [66]. Un nouveau modèle de contrainte-déformation axiale est ensuite proposé pour des colonnes de sections circulaires en considérant explicitement le comportement de trois composants clés, à savoir, le noyau en béton confiné, le renforcement longitudinal en FRP et le béton d'enrobage.



**Figure I.38.** Colonnes en béton incorporant des dispositifs de confinement internes et externes en FRP étudiées par Ye et al. 2022 [66].

Les auteurs ont constaté que les modèles disponibles dans la littérature ne tiennent pas nécessairement compte de l'effet de l'angle d'enroulement en spirale du FRP et de l'action de l'arc verticale. Par conséquent, ils ont supposé que la contrainte de confinement latérale effective ultime fournie par la spirale en FRP ( $f'_l$ ) est obtenue par un produit de trois parties (voir équation (I.45)). En effet, la contrainte de confinement latérale nominale uniforme ( $f_l$ ) définie comme suit :

$$f'_l = k_v k_a f_l = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{\pi d_c}\right)^2} \times \frac{2A_{sp} E_{ft-s} \varepsilon_{f,rupt}}{s d_c} \quad (\text{I.45})$$

Une version modifiée du modèle de déformation axiale ultime de Guo et al. [67] est proposé par Ye et al [66] à travers une analyse de régression de la base de données des colonnes confinées, comme suit :

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{c0} [1.75 + 1.8 \rho_{Ke}^{0.8} \rho_{\varepsilon}^{1.45}] \quad (\text{I.46})$$

## I.5. Conclusion

À travers cette étude bibliographique nous constatons que l'utilisation des matériaux composites FRP a montré son efficacité en termes d'amélioration des performances mécaniques des colonnes en béton. Néanmoins, les travaux antérieurs traitant le comportement des colonnes confinées par intégration des FRP ne sont pas aussi riches que ceux qui traitent le confinement totale ou partiel par collage externe de FRP. Au même titre, les conceptions du confinement

interne par incorporation d'un refont composite nécessitent plus que compréhension, notamment, en termes de géométrie et de paramètres conceptuels.

Par conséquent, le travail de thèse entrepris se propose de s'investir sur une nouvelle conception des renforts intégrés dans la matrice béton. En effet, pour pallier aux défauts de la rupture radiale des bandes circulaires adaptées par la majorité des chercheurs, causée par la concentration des contraintes sur la circonférence des cerces FRP, un renfort en forme de nid d'abeille qui présente plus de stabilité structurelle est proposé. On traitera ainsi la réponse axiale des colonnes confinées par plusieurs approches, à savoir : expérimentale, analytique et numérique. Enfin, une application de la conception proposée sur un poteau à échelle réelle, soumis à des charges latérales est également menée.

## **Chapitre 2**

# **Conception et analyse expérimentale**

## II.1. Introduction

En basant sur une revue bibliographique, la partie expérimentale s'est commencée par une caractérisation du comportement des cylindres en béton confinés sous compression axiale. C'est-à-dire dans ce chapitre, les matériaux constitutifs de la colonne composite (béton, fibre de verre et grille métallique) seront testés afin de caractériser leur comportement et d'identifier leurs propriétés mécaniques. En effet, l'objectif de ce travail consiste à développer une nouvelle technique durable de confinement des colonnes en béton, sous chargement axiale, et mettre en évidence l'effet de confinement interne partiel pour faire face au problème lié au décollement des renforts dû à la concentration des contraintes au niveau de l'interface. Cette nouvelle technique de conception consiste à intégrer dans la matrice béton des cerces composites en polymère renforcé de fibre de verre (GFRP) de forme hexagonale. Les apports de confinement s'expriment surtout en termes de ductilité et d'augmentation de la résistance en compression du béton ont été mis en exergue.

L'étude expérimentale est réalisée au Laboratoire de Génie de la Construction et d'Architecture de l'université de Bejaia, et le laboratoire du génie civil de l'université de Tizi Ouzou. Les sections suivantes présentent respectivement et en détail cette approche expérimentale : les matériaux constitutifs, la procédure d'expérimentation et les résultats obtenus. La première partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisées à travers des essais de compression et de traction réalisés sur des éprouvettes normalisées. La deuxième partie est réservée à l'analyse du comportement expérimental des cylindres en béton soumis à un chargement monotone de compression. Les résultats expérimentaux sont ainsi résumés, discutés et comparés ensemble pour lister les paramètres importants des composants influençant considérablement le comportement mécanique des colonnes composites, et de quantifier l'apport de cette nouvelle conception comparativement aux colonnes de référence non confiné. Dans la dernière partie, nous regrouperons et discuterons les résultats des expériences qui ont permis de cerner le phénomène de confinement des colonnes par intégration partielle des composites.

## II.2. Synthèse permettant de définir la campagne des essais

Le confinement du béton à l'aide des composites de polymères renforcés de fibres (FRP) a été considéré comme l'une des méthodes les plus approuvées pour assurer la ductilité, ainsi que pour renforcer et augmenter la capacité portante des colonnes en béton. Les polymères renforcés de fibres de verre (GFRP) ont été largement utilisés pour devenir aujourd'hui un matériau

composite incontournable. L'utilisation du GFRP s'est progressivement répandu en raison de sa facilité d'application, de son rapport résistance / poids élevé, de sa résistance élevée à la corrosion, ainsi que de sa capacité à s'adapter à la structure existante [68-71]. Dans les premières études expérimentales réalisées sur la réhabilitation et le renforcement des colonnes en béton avec des composites, les colonnes étaient entièrement enveloppées de feuilles de FRP. Ce schéma d'enveloppement assure un confinement continu des colonnes le long de leurs axes longitudinaux, ce qui peut entraîner une amélioration considérable de la résistance à la compression et la capacité de déformation des colonnes [72-74]. Bien que la plupart des études existantes soient liées à des colonnes en béton entièrement confinées en FRP un certain nombre d'études ont été menées sur le confinement partiel des colonnes en béton en raison de son application plus facile et plus rapide. Il a également été démontré que les colonnes partiellement confinées en FRP traitent une augmentation adéquate de la résistance et une augmentation considérable de la capacité de déformation axiale par rapport aux colonnes en béton non confinées [75-77]. Par ailleurs, de nombreuses recherches ont constaté que le comportement mécanique des colonnes renforcées dépendent principalement des interfaces béton-composite, des sollicitations extérieures et l'environnement auquel sont exposés. Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est de remédier au problème lié à l'arrachement des renforts composites dû à la concentration des contraintes au niveau de l'interface et cela, par intégration partielle des composites FRP dans la matrice béton.

Dans le but d'étudier le comportement des structures en béton, des colonnes en béton composite soumise à une compression axiale ont été considérées dans cette investigation en se basant sur les études et recherches antérieures menées sur l'incorporation des composites dans la matrice béton [49, 58, 62, 66, 78]. En effet, la détermination des propriétés mécaniques des grandes structures en béton armé sont principalement basées sur les résultats des essais sur des spécimens de petite taille. Dans cette optique, de nombreuses études expérimentales sur des colonnes en béton à petite échelle confinées avec des matériaux composites et soumises à une compression uniaxiale jusqu'à la rupture ont été menées au cours des dernières décennies [8, 73, 78, 79].

Par conséquent, les essais de notre étude sont menés sur des éprouvettes cylindriques de dimension  $\varnothing 160$  mm x 320 mm soumises à un chargement de compression axial, suivant la norme française NF EN 12390-1 [80].

### II.3. Programme expérimental

Cette section présente l'ensemble des procédures de toute l'approche expérimentale (Voir Figure II.1) ainsi que les différentes techniques utilisées pour l'élaboration des éprouvettes et la disposition des bandes composites et des cerces en grille métallique. Le détail de la description et la configuration des essais de compression et la démarche d'acquisition et d'analyse des résultats, sont présentés et discutés. La série d'éprouvettes est réalisée à partir de deux gâchées en considérant trois répétitions pour chaque configuration.

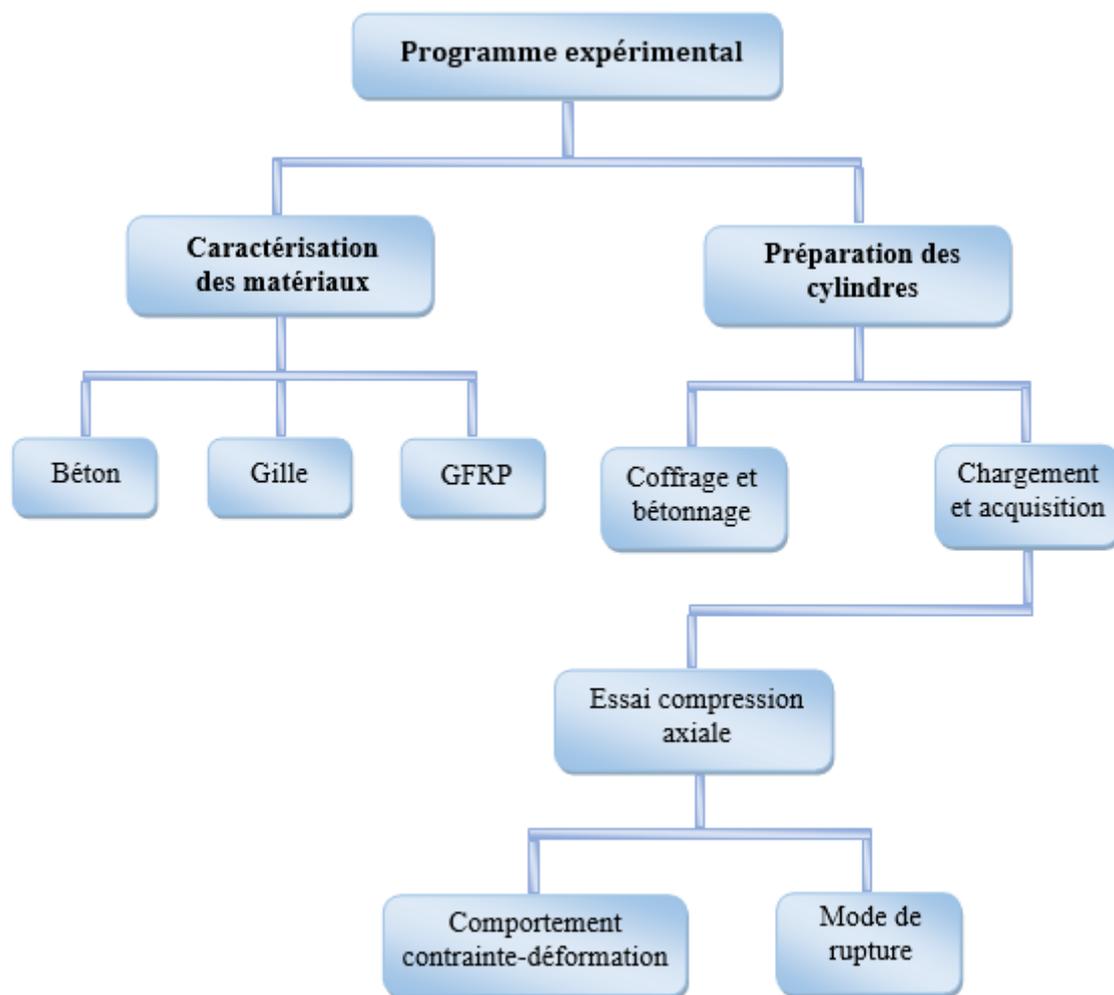


Figure II.1. Organigramme de l'approche expérimentale.

#### II.3.1. Conception proposée

Afin de fournir une plus grande efficacité mécanique du béton confiné par intégration partielle du renfort composite, la nouvelle technique proposée dans cette recherche consiste à incorporer au béton une grille métallique circulaire et des cerces en GFRP en forme hexagonale, comme le montre la figure II.2. Les structures en nid d'abeilles, de forme hexagonale,

comparables aux alvéoles d'abeille, servent à renforcer la résistance d'un élément tout en garantissant une légèreté et une stabilité maximales avec moins de déformations radiales comparativement à la conception classique circulaire. En effet, les matériaux structurés en nid d'abeille sont largement utilisés dans le domaine de l'ingénierie, en raison de leur poids propre réduit, de leur forte rigidité et de leur haute résistance en compression axiale. Le recours à la grille métallique est justifié du fait qu'il permet de confiner le béton intérieur comme une armature secondaire. Par conséquent, si le béton intérieur dans la grille métallique est confiné, l'expansion vers l'extérieur de la grille peut être limitée et si le béton extérieur est suffisamment confiné par des bandes de FRP tout en réduisant la surface du béton d'enrobage. Les renforcements en FRP peuvent ainsi être sollicités à leur résistance maximale, ce qui peut améliorer considérablement la résistance et la ductilité des colonnes confinées.

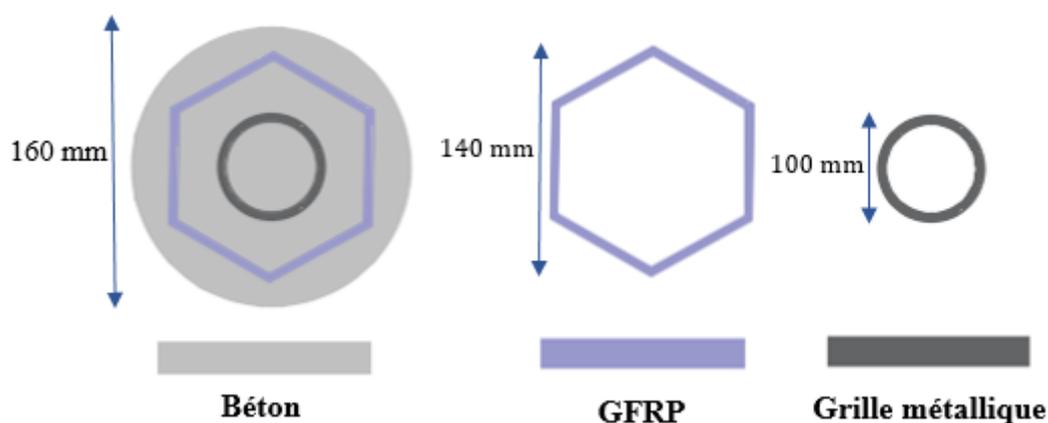


Figure II.2. Vue transversale des conceptions de confinement proposées.

### II.3.2. Caractérisation des matériaux

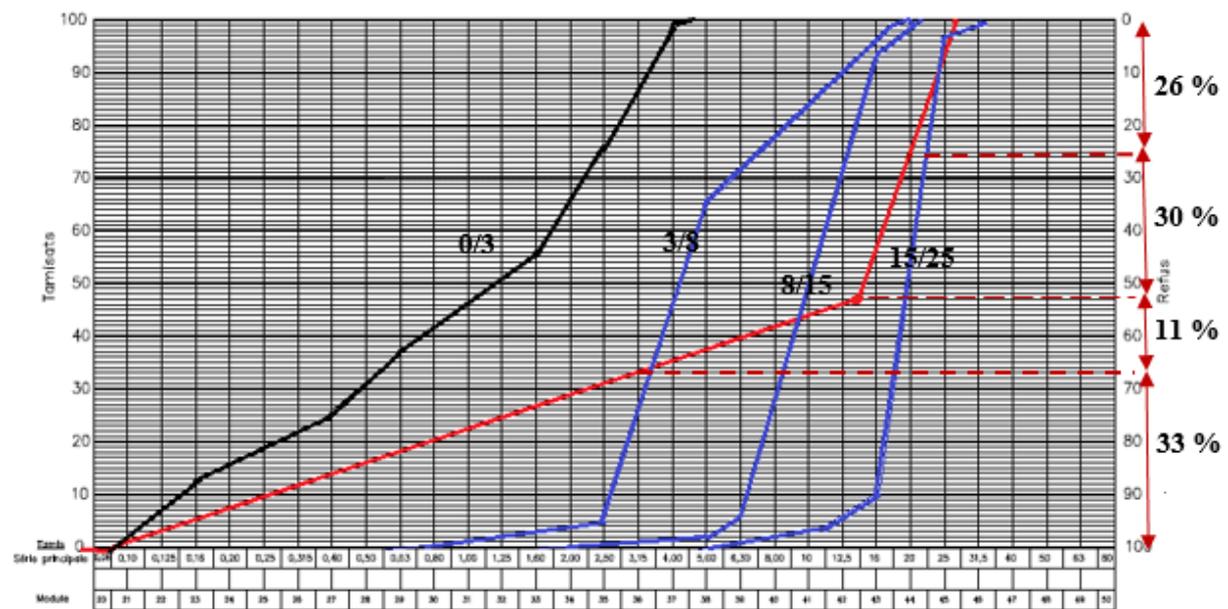
Cette section présente les matériaux utilisés et leurs caractéristiques ainsi que les différents essais de caractérisation de tous les matériaux utilisés dans cette approche expérimentale.

#### II.3.2.1. Le béton

Le béton utilisé dans cette étude est préparé sur place au laboratoire, avec un ciment de type CEM II, 42,5, un sable roulé (0/3), un gravier (3/8), (8/15) et (15/25) lavés et séchés à l'étuve à une température de 105°C et de l'eau de gâchage. La formulation du béton est faite d'après la méthode de Dreux Gorisse basée sur l'analyse granulométrique du sable et des différentes fractions des graviers. Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable et des gravillons qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vide. La courbe

granulométrie théorique d'un matériau à minimum de vide peut être schématisée par une droite brisée, comme montré sur la figure II.3.

On trace, alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe granulaire suivante et ainsi de suite. Des lectures sont faites sur la courbe de référence, au point de croisement avec les lignes de partage, des pourcentages de chacun des granulats 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25, qui sont respectivement : 33 %, 11 %, 30% et 26 % (voir figure II.3).



**Figure II.3.** Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en  $m^3$  de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable et de gravier).

La valeur de la compacité  $c$  ( $c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$ ) du béton permet de déterminer le volume total absolu  $V$  de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c) \quad \text{II.1}$$

Où  $V_c$  est le volume de ciment défini par  $V_c = C / \rho_s$  où  $\rho_s$  est la masse volumique absolue du ciment utilisé. Dans notre cas :  $c_0 = 0,827$  ;  $c_1 = - 0,03$  ;  $c_2 = 0$  ;  $c_3 = + 0,004$  donc  $c = 0,801$  et  $V_c = 120$  litres ; Le volume total absolu  $V = 801 - 120 = 681$  litres.

Connaissant le volume total absolu des granulats ( $V$ ) et les pourcentages en volume absolue de sable ( $S$  %), de gravillon ( $g$  %) et de gravier ( $G_1$  % et  $G_2$  %), il est alors possible de déterminer

les volumes de sable ( $V_s$ ) de gravillon ( $V_g$ ) et de gravier ( $V_{G1}$  et  $V_{G2}$ ) ainsi que leurs masses respectives ( $S$ ,  $g$ ,  $G_1$  et  $G_2$ ) :

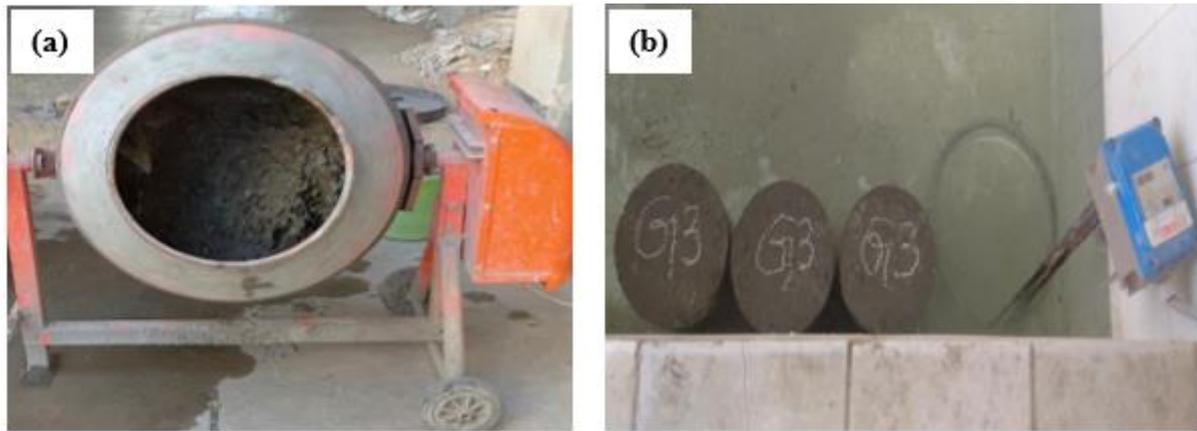
$$\begin{aligned}
 V_s &= V * S \% & S &= V * S \% * \rho_s \\
 V_g &= V * g \% & g &= V * g \% * \rho_s \\
 V_{G1} &= V * G_1 \% & G_1 &= V * G_1 \% * \rho_s \\
 V_{G2} &= V * G_2 \% & G_2 &= V * G_2 \% * \rho_s
 \end{aligned}
 \tag{II.2}$$

On obtient les dosages, en multipliant le volume absolu de chaque granulat par sa masse volumique absolue ( $\rho_s$ ). Les quantités des constituants du béton utilisé pour 1 m<sup>3</sup> de volume sont présentés dans le tableau (II.1).

**Tableau II.1** : Composition du béton utilisé.

Constituants	Masse (Kg) pour 1 m <sup>3</sup>
Ciment	370
Sable	635,98
Gravier (3/8)	201,51
Gravier (8/15)	559,78
Gravier (15/25)	424,94
Eau	200

Le béton est mélangé sur place à l'aide d'un malaxeur de béton à tambour rotatif conventionnel (Figure II.4.a), suivi d'un test d'affaissement, dont la valeur est 8 cm. Pour chaque gâchés du mélange, trois éprouvettes cylindriques sont coulées en même temps pour le caractériser. Le béton est coulé dans des éprouvettes normalisées de 16cm x 32cm en respectant la norme NF EN 12390-1 [80], décoffrés au bout de 24 heures, conservés pour une cure d'hydratation à température modérée et constante pendant 28 jours selon la norme NF EN 12390-2 [81] (Figure II.4.b). Les éprouvettes ont été séchées en surfacées suivant la norme NF EN 12390-3 [82], pour éviter que la force de compression ne soit excentrée pendant les essais.



**Figure II.4.** (a) : Malaxeur de béton ; (b) : Cure d'hydratation des cylindres en béton.

La procédure du test des cylindres est conforme à la norme NF EN 12390-04 [83] de détermination de la résistance en compression des cylindres en béton. Le test est réalisé à 28 jours sur une presse de compression d'une capacité de 2000 kN avec un taux de chargement de 0,5 KN/s. La machine d'essai indique la charge appliquée en fonction du temps, permettant de définir les courbes contrainte-déformation. La résistance du béton en compression est calculée selon l'équation (II.3) :

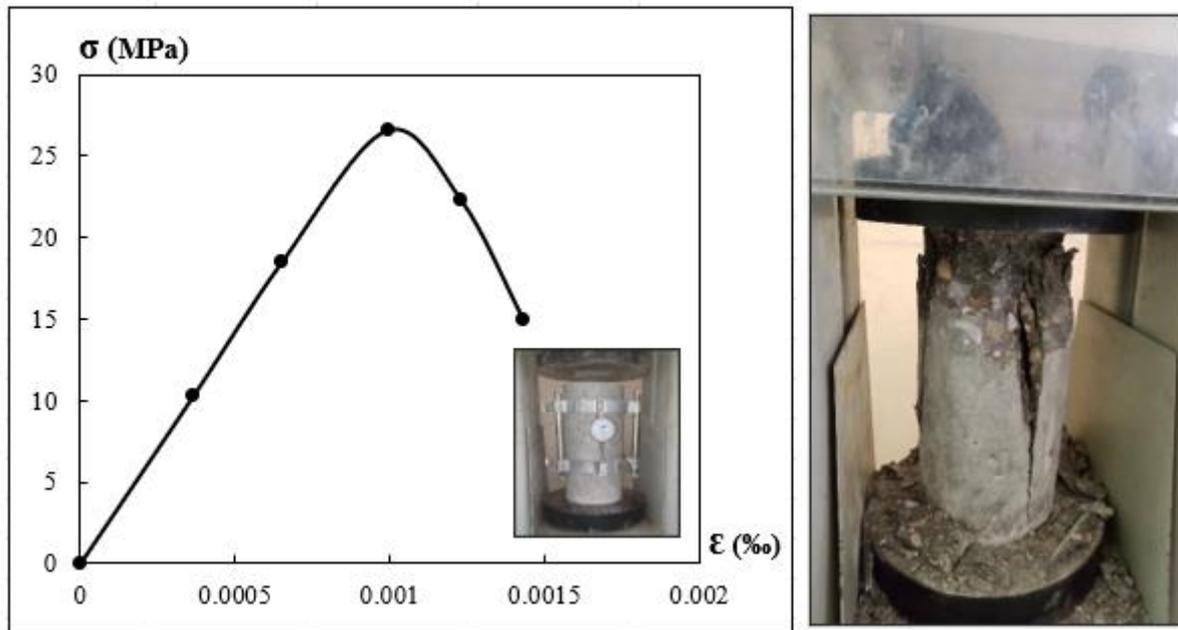
$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D^2} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

F : la charge maximale enregistrée par la machine (kN)

D : le diamètre du cylindre (mm)

L'expansion latérale des échantillons est mesurée par un montage équipé d'un comparateur de déplacement installé dans le sens radial avec lecture manuelle des données. Le comportement expérimental du matériau béton est illustré sur la figure (II.5), qui montre l'évolution des contraintes à 28 jours en fonction des déformations axiales des éprouvettes cylindriques.



**Figure II.5.** Comportement du béton en compression.

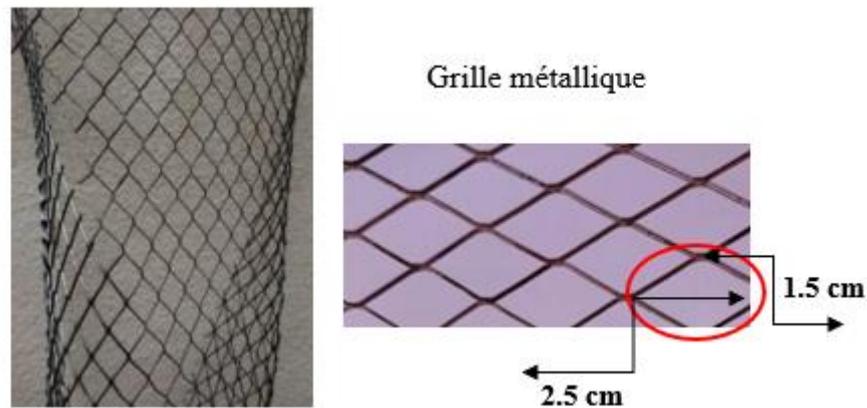
L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques (résistance à la compression, module d'élasticité  $E$  et le coefficient de poisson  $\nu$ ) et la loi de comportement du béton. La valeur moyenne de la résistance caractéristique à 28 jours est de 27,3 MPa. Les différentes caractéristiques du béton utilisé dans ce programme expérimental sont récapitulées dans le tableau (II.2) :

**Tableau II.2 :** Caractéristiques mécaniques du béton.

Paramètres mécaniques	Valeur
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	27,3
Déformation correspondante au pic (‰)	1,03
Déformation axiale de rupture (‰)	1,53
Module d'élasticité (MPa)	33121,77
Coefficient de poisson	0.19

### II.3.2.2. Grille métallique

Les aciers internes utilisés pour renforcer les colonnes sont des cerces en grille métallique à maille en forme de losange de dimension (2.5 cm  $\times$  1.5 cm) d'une épaisseur nominale de 0.7 mm, comme le montre la figure (II.6). Les caractéristiques géométriques de la grille métallique sont illustrées sur le tableau (II.3) :



**Figure II.6.** La grille métallique utilisé.

**Tableau II.3.** Caractéristiques géométriques de la grille métallique

Poids (g)	Nombre de maille (par m <sup>2</sup> )	Longueur initiale (mm)	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Aire (mm <sup>2</sup> )
900	1952	100	1	0.7	1.4

#### ✓ Préparation des cerces en grille métallique

Pour le renforcement des éprouvettes avec la grille métallique un squelette d'armature, à base de treillis a soudé de 3 mm de diamètre, formé de quatre barres longitudinales de 30 cm de longueur maintenues avec deux cerces en forme circulaire de 10 cm de diamètre a été mis en place. Au total 24 bandes de grille métallique ont été mesurées ensuite découpées, avec 32 cm de longueur et 3 cm de largeur.



**Figure II.7.** Détail de la conception avec la grille métallique.

Après avoir découpé les bandes, ces dernières sont posées autour des barres à l'aide d'un fil d'attache en acier. Par la suite une autre bande est placée en laissant un espacement de 6 cm entre les deux bandes. Les détails de la conception est représenté sur la figure (II.7).

#### ✓ Essai de traction pour caractérisation de la grille métallique

Afin de déterminer les propriétés mécaniques en traction de la grille métallique, des essais de traction simple ont été réalisés au sein du laboratoire, en utilisant une machine de traction IBERTEST équipée d'une cellule de force maximale de 200 kN. Elle est munie d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une représentation des diagrammes (force /déplacement) avec une bonne précision.

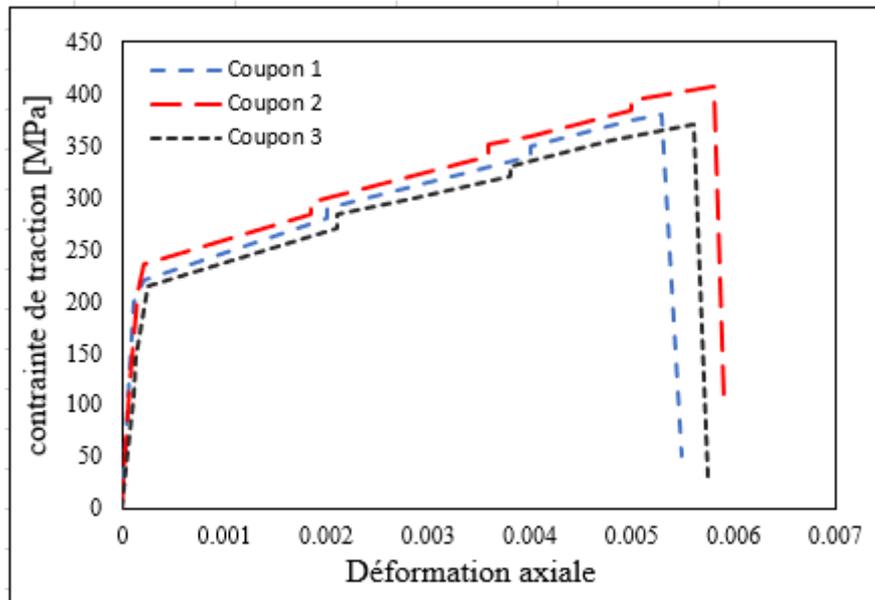


**Figure II.8.** Les éprouvettes confectionnées pour un essai de traction.

Des éprouvettes normalisées selon la norme ASTM D3039 [83] sont fabriquées et testées. Les éprouvettes ainsi réalisées sont illustrées sur la figure II.8 et les résultats des essais sont illustrés et résumés sur la figure II.9 et le tableau II.4.

**Tableau II.4.** Caractéristiques mécaniques de la grille métallique.

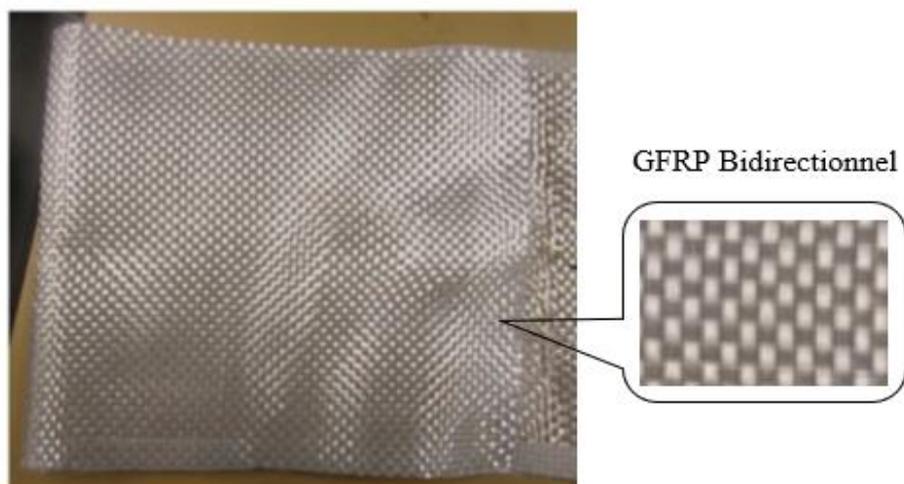
Paramètres mécaniques	Valeur
Module d'élasticité (MPa)	162000
Résistance maximale à la traction (MPa)	380.32
Déformation axiale de rupture (‰)	5.71



**Figure II.9.** Comportement mécanique de la grille métallique.

### II.3.2.3. Matériau composite « GFRP »

Le tissu utilisé dans ce travail, est un tissu bidirectionnel à base de fibres de verre (GFRP) formé d'un ensemble de filaments surfaciques, de fils et de mèches, comme le montre la figure (II.10). Il est constitué de chaînes (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et de trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaînes).



**Figure II.10.** Tissu composite en fibres de verre.

### ✓ Préparation du tissu

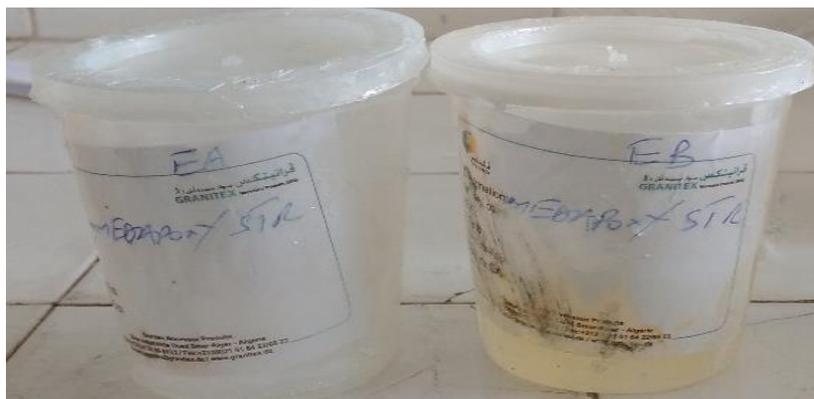
Pour le confinement des éprouvettes avec le tissu GFRP un squelette d'armature, à base de treillis à soudé de 3 mm de diamètre, formé de six barres longitudinales de 30 cm de longueur, maintenues avec deux cerces en forme hexagonale de 14 cm de diamètre a été mis en place. Au total 24 bandes de tissu en fibre de verre ont été mesurées, ensuite découpées, avec 45 cm de longueur, 3 cm de largeur et une épaisseur de 0.35 mm. Les bandes en GFRP sont adhérentes sur les barres à l'aide d'un adhésif (résine). Pour coller les bandes de tissu au niveau des points de leur passage sur les armatures, un pinceau a été imbibé l'adhésif puis appliqué. Par la suite une autre bande est collée en laissant un espacement de 3 cm entre les deux bandes. Les cages en cerces hexagonales en GFRP ainsi obtenues sont laissées au séchage à température ambiante dans le laboratoire environ une semaine. Les détails de la conception sont représentés sur la figure (II.11).



**Figure II.11.** Détail de la conception hexagonale avec le tissu GFRP.

### ✓ Résine et adhésifs

La résine utilisée pour la mise en forme du squelette renforcé par le tissu GFRP, est une résine organique à performances élevées, de type époxy, conçue par Granitex (Algérie). Cette dernière est obtenue en malaxant la résine (EA) avec une proportion de 35% en masse du durcisseur (EB) (Voir Figure II.12). Le mélange est effectué pendant 5 minutes à l'aide d'un agitateur pour empêcher l'inclusion des bulles d'air dans le mélange. Les mélanges sont immédiatement utilisés après leur préparation. Le tableau (II.5) résume les caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.



**Figure II.12.** Composant de l'adhésif.

**Tableau II.5.** Caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.

Paramètres	Valeur
Densité (ISO 758)	$1.1 \pm 0.05$ (kg/m <sup>3</sup> )
Viscosité (NF T76-102)	11000 (mPaS) à 25°C
DPU : durée pratique d'utilisation (NFP18 810)	1h15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse : 6h ; Dur : 16h
Résistance en compression (NA427)	> 70 (MPa)
Résistance en flexion (NA 234)	> 25 (MPa)
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 (MPa)
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale (A/B)	Résine : 1 Kg Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20 °C	$10^{10}$ à $10^{13}$ ( $\Omega \cdot m$ )

Pour identifier les caractéristiques mécaniques de résistance de l'ensemble tissu GFRP et résine, des essais de traction simple ont été réalisés dans des études antérieures [85,86]. Les caractéristiques élastiques du tissu composite obtenues sont résumées dans le tableau II.6.

**Tableau II.6.** Caractéristiques élastiques du tissu composite.

Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	E1 (MPa)	E2 (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	G12 (MPa)
2600	82000	13600	0.31	0.33	4700

### II.3.3. Préparation des cylindres

Pour étudier le comportement des colonnes en béton confinées, nous avons réalisés un programme de recherche expérimental qui permet de mieux comprendre le comportement mécanique des colonnes sous compression axiale ainsi que et leurs modes de rupture. À cet effet, vingt-quatre (24) colonnes en béton sont confectionnées à partir de deux gâchées. Neuf (09) colonnes ont été confinées avec les cerces composite et grille métallique, Neuf (09) colonnes à base du squelette en acier sans renforcement sont considéré pour quantifier l'apport du renforcement et l'influence des aciers utilisé pour maintenir le tissu GFRP et la grille métallique. Six (06) colonnes considérées comme des colonnes de référence (témoins) ont été testés jusqu'à la rupture pour mesurer la résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours. Cette section présente respectivement les procédures expérimentales pour les essais sur les différents éprouvettes, tels que la présentation des équipements utilisés, la préparation d'éprouvette et la procédure d'essai.

Le Protocol expérimental est mené sur un ensemble d'éprouvettes cylindriques, de diamètre 160 mm et de hauteur 320 mm, dont certaines sont confinées avec des cerces en polymère renforcé de fibres de verre « GFRP » et des cerces en grilles métalliques et d'autres non confinées (cylindres de référence) destinées à la caractérisation du béton.

Les colonnes fabriquées et testées sont désignées : (a) « P » colonnes en béton ordinaire non confinées ; (b) « FC » représente les colonnes en béton confinées en GFRP ; (c) « GC » désigne les colonnes en béton confinées avec la grille métallique ; (d) « FGC » représente les colonnes en béton doublement confinées avec des GFRP et la grille métallique. Les détails de la matrice des essais sont présentés sur le tableau II.7.

**Tableau II.7.** Matrice d'essai des éprouvettes.

Type d'éprouvette	Nombre d'éprouvette	Type de béton
P	P - 1,2,3	Béton ordinaire (non confiné)
FC	FC - 1,2,3	Béton pareillement confiné avec intégration des cerces FRP
GC	GC - 1,2,3	Béton pareillement confiné avec intégration des cerces en grille métallique

FGC	FGC - 1,2,3	Béton pareillement et doublement confiné avec intégration des cerces en grille métallique et FRP
-----	-------------	--

### II.3.3.1. Coffrage et bétonnage

La préparation des matériaux, le coffrage des éprouvettes, la confection du béton, le malaxage et le coulage ont été réalisés sur place au laboratoire. Le coffrage utilisé est un moule en acier démontable et imprégnés par un agent démoulant pour faciliter l'extraction des éprouvettes après la prise de béton. Pour les colonnes confinées avec le GFRP, le squelette en acier et les bandes en tissu de fibre de verre en forme hexagonal a été mis au centre du coffrage et maintenu à l'aide d'une barre d'acier et des fils d'attache afin d'assurer l'enrobage de 1 cm au haut et en bas de l'éprouvette et sur les côtés.

La même démarche est utilisée pour le renforcement des colonnes avec la grille métallique, le squelette en acier avec les bandes de grille métallique a été mis au centre du coffrage toute en assurant un enrobage de 1 cm en haut et en bas de l'éprouvette et de 3 cm sur les côtés. Pour les colonnes doublement confinées avec le GFRP et la grille métallique, la cage réalisée à base de tissu GFRP a été mis en premier ensuite la cage en grille métallique a été mis à l'intérieur et maintenu d'une manière a assuré un enrobage de béton de 1 cm en haut et en bas de l'éprouvette et 2 cm entre les deux cages de confinement.

Avant l'introduction du béton dans le moule, nous avons effectué un contrôle d'affaissement en utilisant un cône d'Abrams (slump test) (EN 12350-2) [81]. La mise en place du béton dans les moules a été faite en trois couches, chacune vibrée pendant 20 à 30 secondes avec un vibreur électrique. Après 24 h de séchage, le coffrage a été retiré et les éprouvettes ont été mises en murissement. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant une durée de 28 jours à une température ambiante de 20°. Le procédé de fabrication des différents échantillons est illustré sur la figure (II.13).



**Figure II.13.** Procédé de fabrication des différents échantillons.

### II.3.3.2. Chargement et acquisition

Après 28 jours de murissement et de conservation dans des conditions climatiques ambiantes, toutes les colonnes confectionnées sont testées sous chargement de compression axiale. L'essai de compression nous permet de déterminer les propriétés mécaniques des différentes configurations considérées, d'observer le mode de rupture du béton confiné et d'évaluer la contribution de la grille métallique et le tissu GFRP en résistance et ductilité. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité de 2000 kN.



**Figure II.14.** Machine et dispositif d'essai pour les différentes éprouvettes.

Cette machine d'essai comporte deux plateaux, un plateau supérieur mobile et un autre inférieur fixe (Figure II.14). A mi-portée de chaque éprouvette on a pu mesurer, à intervalles rapprochés les déplacements en fonction de l'évolution de la charge grâce à des comparateurs. La machine d'essai indique la charge appliquée en fonction du temps, permettant de définir les courbes contrainte-déformation.

## II.4. Résultats expérimentaux et discussions

Cette section présente tous les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais de compression axiale sur des éprouvettes partiellement confinées par intégration des composites FRP et des cerces en grille métallique. La réponse des colonnes renforcées chargées en compression permet d'évaluer leurs comportements ainsi que l'effet du confinement considéré sur le mode de rupture des éprouvettes.

### II.4.1. Comportement contrainte-déformation des colonnes

La confrontation des résultats obtenus en termes de courbe contrainte-déformation selon les différentes configurations de confinement considérées (P, GC, FC et FGC) est illustrée sur les figures II.15, II.16, II.17 et II.18. Les résultats en termes de valeurs moyennes de des trois colonnes testées dans chaque groupe sont mis en valeur.

D'après les figures, que toutes les colonnes ont montré un comportement similaire au stade initial (partie élastique, avant atteinte du premier pic). La contrainte des colonnes non confiné (béton témoin) de la figure II.15, a diminué de manière significative, la colonne a perdu toute sa résistance avec une petite déformation correspondante.

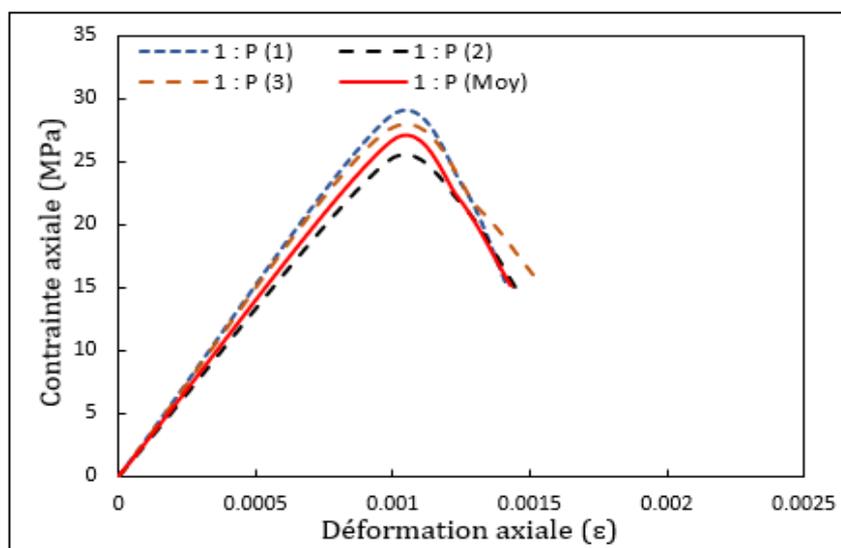
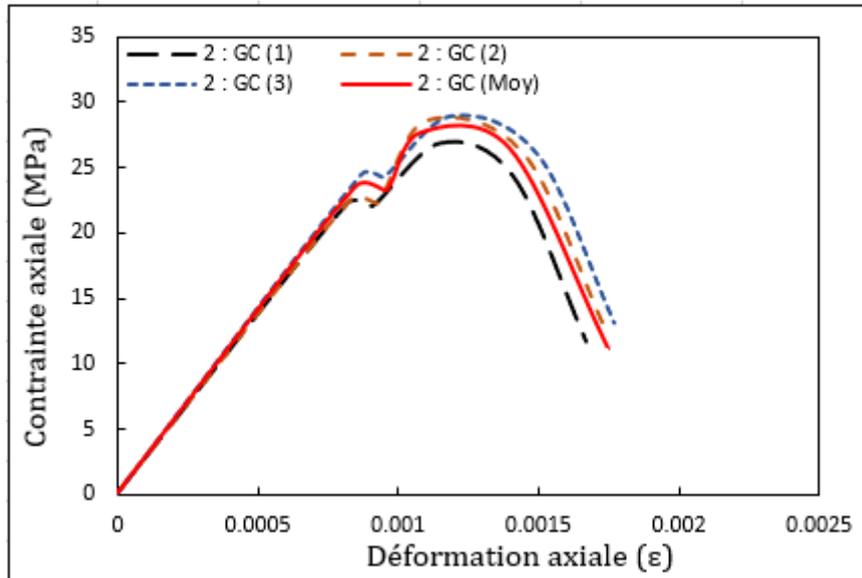
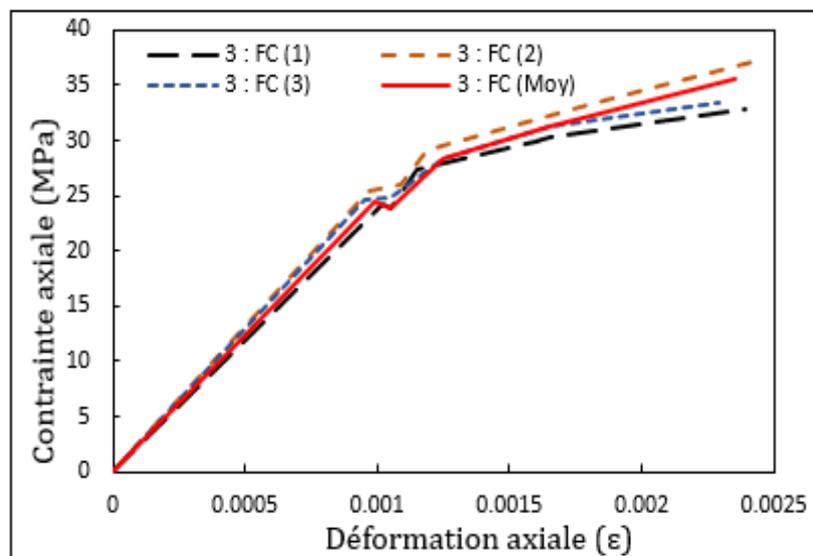


Figure II.15. Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes non confinées.



**Figure II.16.** Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confiné GC.

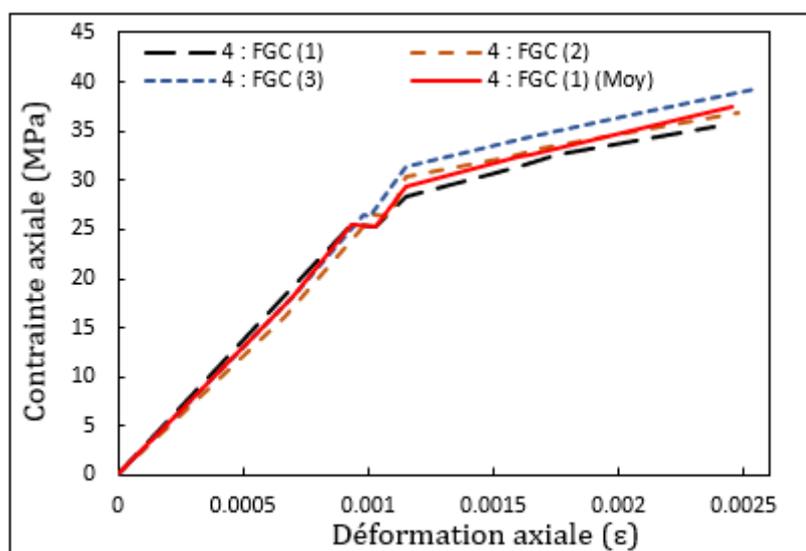
En ce qui concerne le comportement des colonnes (GC) confinées avec la grille métallique, représenté sur la figure II.16, une diminution considérable de la résistance a été observée au-delà du premier pic due à l'éclatement du béton d'enrobage. En effet, les fissures dans la matrice béton sont fortement concentrées entre deux bandes adjacentes, la dilatation du béton confiné avec la grille n'est pas suffisamment importante pour activer le comportement l'effet du confinement. En conclusion, l'efficacité du confinement sera plus élevée dans le spécimen avec un petit espacement et des ouvertures de grille plus petites.



**Figure II.17.** Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confiné FC.

La figure II.17 montre les courbes contrainte-déformation des colonnes (FC) confinées avec les bandes GFRP. Pour ces colonnes une diminution de la résistance a été observée avant d'atteindre la résistance du béton témoin car le béton d'enrobage a atteint sa résistance ce qui entraîne une perte de résistance. Par la suite, la résistance des colonnes FC a été à nouveau reprises avec l'augmentation de la déformation en raison de l'activation et l'effet de confinement fourni par le GFRP.

La réponse des colonnes (FGC) doublement confinées, avec la grille métallique et les cerces GFRP illustrée sur la figure II.18, a montré un comportement similaire à celle des colonnes (FC) (c'est-à-dire une diminution de la résistance avant d'atteindre la résistance du béton non confiné ensuite la résistance augmente à nouveau) avec une résistance et une déformation plus élevée en raison du confinement fourni par la grille et GFRP. On peut expliquer cette diminution de résistance, que l'existence des bandes en GFRP et de la grille métallique a interrompu la continuité de la matrice béton, ce qui peut avoir influencé négativement la qualité de l'adhérence du béton entre et deux renforts, entraînant ainsi une chute de résistance. L'intégration des bandes en GFRP dans le béton offre une résistance élevée à la traction lors de l'expansion transversale du noyau de béton, ce qui permet d'empêcher la propagation des fissures.



**Figure II.18.** Courbe contrainte axiale-déformation axiale des colonnes confinées FGC.

La confrontation des résultats obtenus en termes de courbe contrainte-déformation selon les différentes configurations de confinement considérées est illustrée sur la figure II.19. Les résultats des tests obtenus pour toutes les colonnes sont récapitulés dans le tableau II.8.

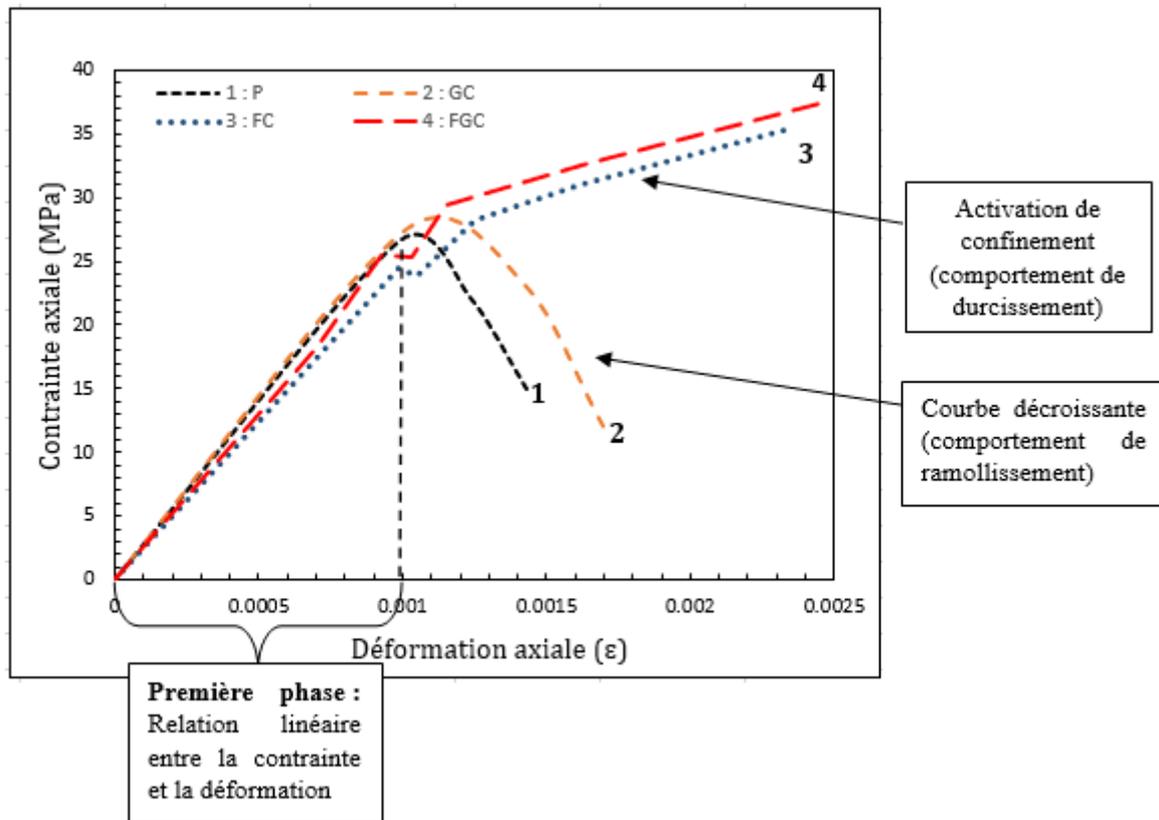
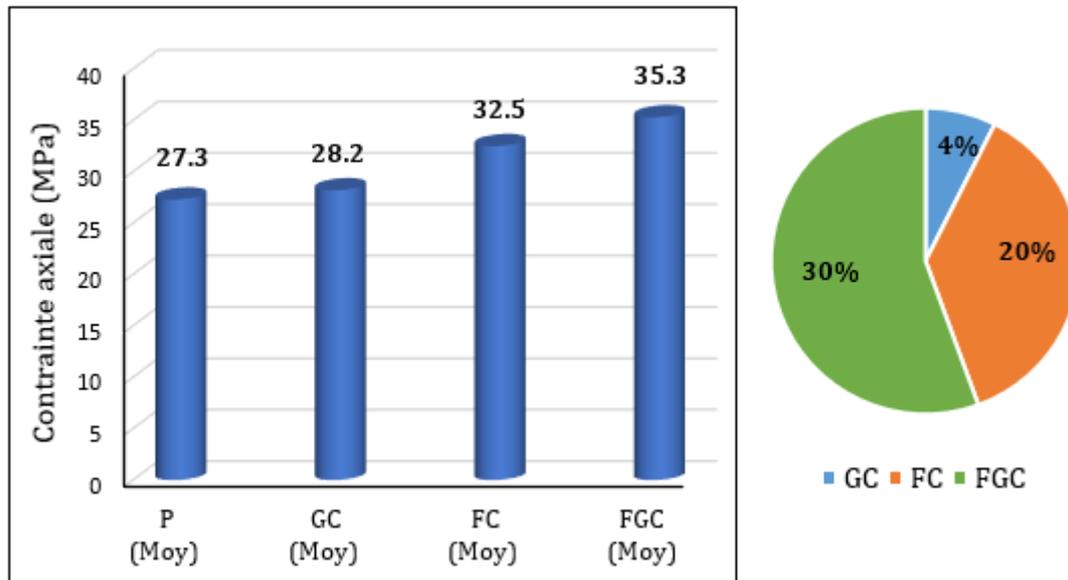


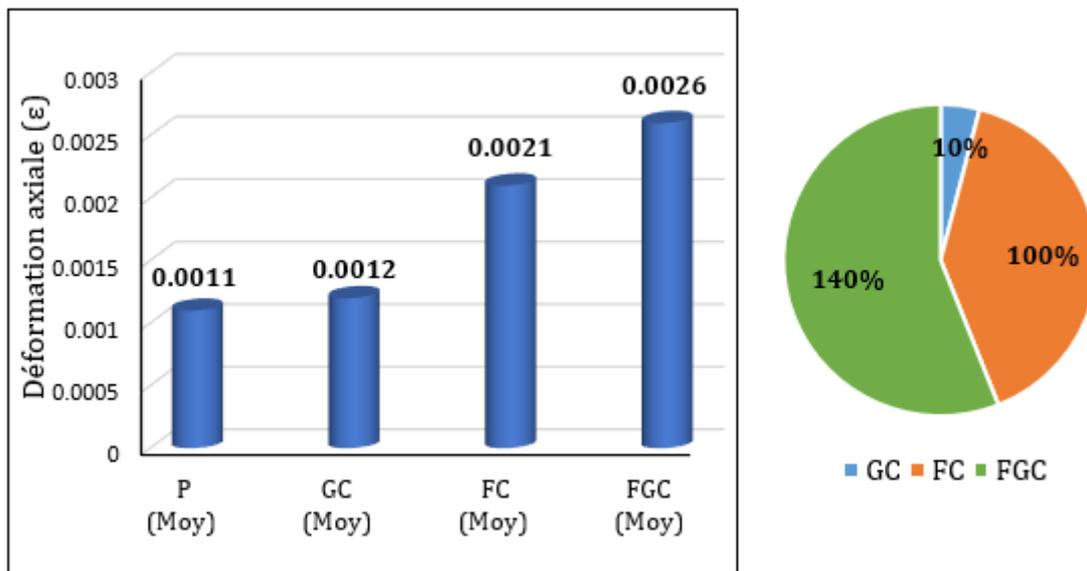
Figure II.19. Récapitulatif des courbes contrainte-déformation des différentes colonnes.

Tableau II.8. Illustration des résultats des essais.

Éprouvettes	Force au premier pic (kN)	Déplacement axiale au premier pic (mm)	Force ultime (kN)	Déplacement axiale à la force ultime (mm)
P (1)	574	0,334	574	0,334
P (2)	523	0,325	523	0,325
P (3)	549	0,311	549	0,311
GC (1)	552	0,356	552	0,356
GC (2)	574	0,343	574	0,343
GC (3)	579	0,335	579	0,335
FC (1)	492	0,246	640	0,641
FC (2)	529	0,306	624	0,622
FC (3)	517	0,296	713	0,801
FGC (1)	511	0,293	721	0,811
FGC (2)	534	0,311	693	0,736
FGC (3)	527	0,304	733	0,985



**Figure II. 20.** Histogramme des contraintes et le gain en résistance des différentes colonnes.



**Figure II. 21.** Histogramme des déformations et le gain en ductilité des différentes colonnes.

La confrontation des courbes contrainte-déformation montre un apport positif en termes de capacité portante, comparativement aux colonnes de référence. Les colonnes confinées présentent une capacité portante plus importante surtout pour les colonnes FGC confinées avec la grille métallique et les bandes en GFRP. Les résistances maximales enregistrées pour les colonnes GC, les colonnes FC et les colonnes FGC sont respectivement 28.2 MPa, 32.5 MPa et 35.3 MPa, montrant une amélioration de la résistance de 4 %, 20 % et 30 % respectivement par rapport à 27.3 MPa des échantillons témoins, comme le montre la figure II.20.

D'autre part, la déformation ultime dans le cas des colonnes GC, FC et FGC sont de 0.0012, 0.0021 et 0.0026 respectivement. Comparativement aux échantillons témoins qui ont enregistré une déformation de 0,0011, une amélioration en termes de ductilité de l'ordre de 10 %, 100 % et 140 % est respectivement quantifiée, comme illustré sur la figure II.21.

#### II.4.2. Mode de rupture

Les modes de rupture typiques des cylindres testés sont illustrés sur les figures II.22, II.23, II.24 et II.25. Pour les colonnes de références non confinées (P) et les colonnes (GC), confinées avec les cerces en grille métallique, la majeure partie du béton extérieur s'est effondrée car aucun confinement n'a été fourni au béton d'enrobage. Pour les colonnes FC et FGC, le béton d'enrobage a commencé à éclater lorsque la résistance à la compression du béton non confiné a été approchée, néanmoins, ces colonnes reprennent des déformations plus élevées après l'éclatement du béton d'enrobage.

En effet, l'éclatement du béton d'enrobage a été efficacement contrôlé en raison du confinement assuré par les GFRP. Physiquement, le béton présente une dilatation volumique importante, si moins de confinement a été prévu et une dilatation plus faible, si le béton est suffisamment confiné. Par conséquent, si le béton à l'intérieur de la grille en acier est insuffisamment confiné et que le béton extérieur est suffisamment confiné, l'expansion vers l'extérieur de la grille peut être efficacement limitée par le béton extérieur confiné avec les bandes de GFRP, ce qui évite la défaillance de la grille. Comme les composites sont noyés dans la matrice en béton, le comportement des colonnes reste ductile.



Figure II.22. Mode de rupture du béton témoin non confiné.



**Figure II.23.** Mode de rupture du béton confiné avec la grille métallique.



**Figure II.24.** Mode de rupture du béton confiné avec les composites GFRP.



**Figure II.25.** Mode de rupture du béton doublement confiné avec GFRP et grille métallique.

Les résultats expérimentaux des essais sur les différentes configurations de confinement montrent clairement le passage d'un mode de rupture fragile à un mode de rupture ductile. Ce passage est sujette par l'activation du confinement due au tissu composite GFRP. Cette contribution de ductilité confère à la colonne composite une capacité portante intéressante. Grace aux performances mécaniques du tissu GFRP utilisé, la propagation rapide des fissures est diminuée, celui-ci procure à la colonne confinée un comportement relativement ductile comparativement à la colonne de référence non confinée.

## II.5. Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre avait pour objectif d'étudier les principales caractéristiques de différents matériaux utilisés et de présenter les différentes démarches d'une campagne expérimentale dont le but est la proposition d'une nouvelle technique qui permet de confiner des colonnes en béton partiellement et de rehausser sa résistance et sa capacité de déformation. Les résultats expérimentaux des différents essais issus de l'analyse expérimentale montrent clairement l'efficacité de la nouvelle technique en termes d'apport positif en résistance et en ductilité à travers la confrontation des courbes contrainte-déformation avec un gain de résistance qui dépasse 30%. Les résultats ont montré aussi le passage d'un mode de rupture fragile à un mode de rupture ductile.

D'après les résultats encourageants obtenus, l'objectif assigné dans le chapitre suivant est de proposer et de valider un modèle analytique capable de prédire la réponse des colonnes confinées sous chargement axiales. Ceci permettra d'une part de lister les paramètres affectant le comportement du béton confiné, et d'autre part de réaliser des études paramétriques et comparatives, vu que les essais sont coûteux et le temps de réalisation est exorbitant.

## **Chapitre 3**

# **Proposition et validation d'un modèle analytique**

### III.1. Introduction

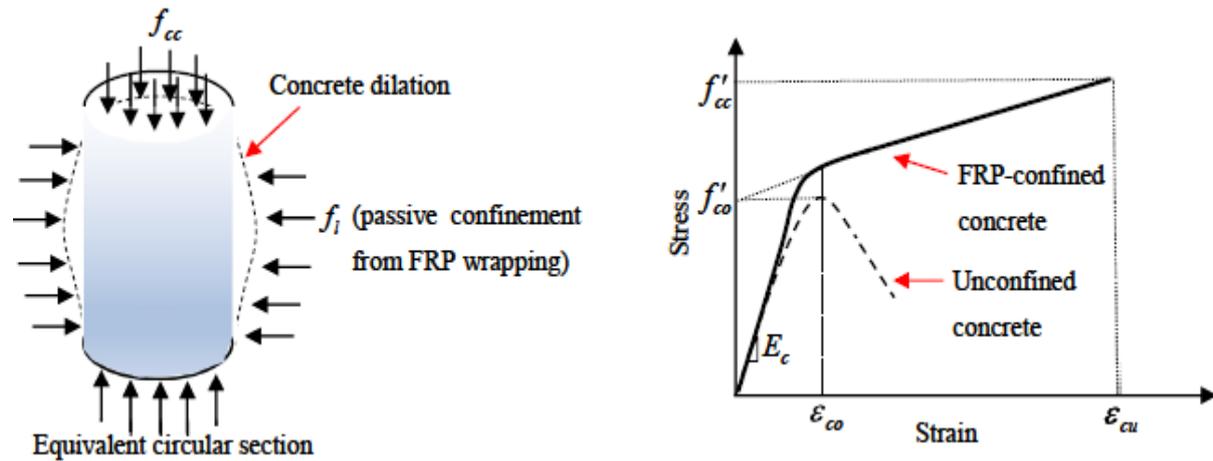
La modélisation analytique est une approche permettant de transcrire le comportement d'un matériau vis-à-vis des différentes sollicitations auxquelles il est sujet. En effet, celle-ci permet de disposer d'un outil de théorie efficace, puisqu'elle est basée sur des équations relativement simplifiées. Il est parfois nécessaire d'ajuster les équations théoriques sur la base d'expériences réelles sur la structure étudiée. Par ailleurs, un modèle analytique validé peut ainsi permettre de prédire le comportement de la structure et donc d'en sortir de premiers résultats et d'en tirer des conclusions.

Par conséquent, ce chapitre a pour objet de présenter une démarche originale permettant de modéliser le comportement mécanique des colonnes confinées, étudiées précédemment sous compression axiale. Cette approche théorique est fondée sur l'utilisation des modèles existants dans la littérature en introduisant certains facteurs de modification qui dépendent des paramètres de la grille métallique et des bandes en FRP. Dans un premier temps, le comportement contrainte-déformation des différents types de confinement ont été décrits. Par la suite, une équation a été proposée pour prédire la résistance à la compression et la déformation correspondante des colonnes doublement confinées (FGC). Enfin, les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux pour valider la précision du modèle proposé.

### III.2. Synthèse permettant de proposer un modèle de confinement

Plusieurs chercheurs se sont investis dans le but de développer de nouvelles techniques de confinement qui engendrent des nouveaux modèles de confinement du béton. Dans les premières années de l'utilisation des FRP pour le confinement interne des poteaux, le dimensionnement se faisait avec le modèle de Mander et al (1988) [59], généralement basé sur les modèles du confinement par les aciers (Teng et al 2002 [32], Y.F.Li et al 2003 [87], Nanni et Bradford 1995 [88], Shahawy et al 2000 [42]). En effet, ces études ont démontré que le confinement de béton par FRP résulte de la rupture des matériaux en FRP associée à la dilatation du béton, comme le montre la Figure III.1.

Il est important de noter que dans la plupart des modèles de confinement, il y a une équation qui donne la résistance en compression du béton confiné et qu'on appelle « modèle de résistance », et d'autres équations qui donnent l'allure du diagramme contrainte-déformation et qu'on appelle « modèle contrainte-déformation ».



**Figure III.1.** Béton confiné avec des FRP et relation contrainte-déformation associée [89].

### III.2.1. Modèle de confinement interne des colonnes circulaires

De nombreuses études expérimentales et théoriques ont été menées sur des éprouvettes en béton circulaires confinées par intégration de polymères renforcés de fibres (FRP), conduisant à une variété de modèles pour prédire leurs résistances à la compression axiale. Plusieurs modèles de résistance existants prennent la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (\text{III.1})$$

où  $f'_{cc}$  et  $f'_{co}$  sont les résistances à la compression du béton confiné et non confiné, respectivement,  $f_l$  la pression latérale de confinement, et  $k_1$  est le coefficient d'efficacité du confinement. Cette forme a été proposée pour la première fois par Richart et al. (1928) [48] pour le béton activement confiné avec une valeur de 4,1 pour  $k_1$ . Richart et al. (1929) [48] ont montré par la suite que le modèle convenait également au béton confiné avec l'acier. Fardis et Khalili (1981) [90] a suggéré que le modèle Richart et al. (1928) [48] pourrait être directement utilisé pour le béton confiné en FRP. En effet, lorsque le béton est soumis à une compression axiale, il se dilate latéralement et cette expansion est empêchée par les composites qui fournissent une pression de confinement au béton.

Pour les sections circulaires, le béton est sujet d'un confinement uniforme et la pression maximum de confinement fournie par le FRP est liée à la quantité et l'épaisseur du composite ainsi que le diamètre de la section du béton, cette pression est calculée comme suit :

$$f_l = \frac{2f_{FRP}t}{d} \quad (\text{III.2})$$

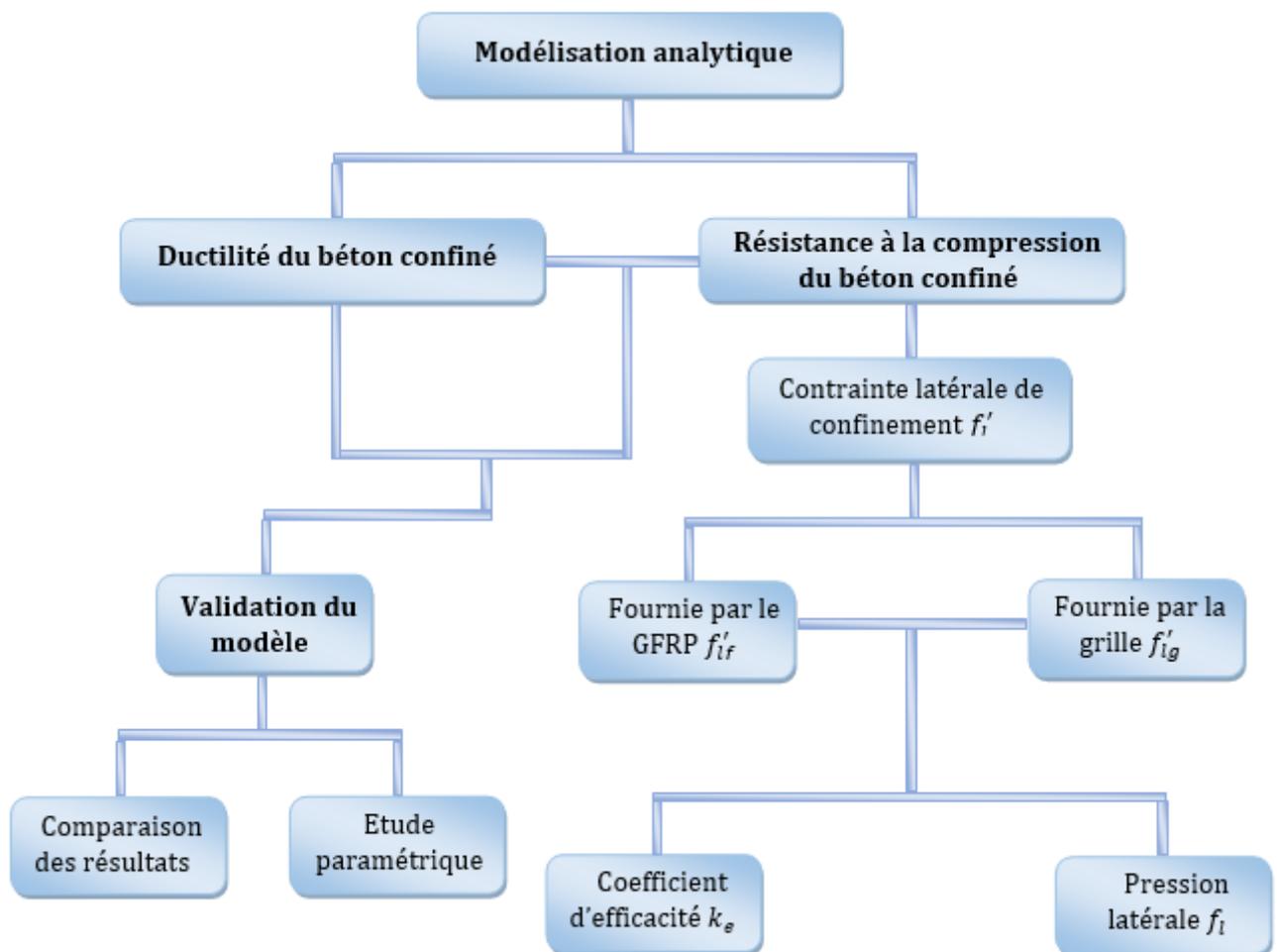
où  $f_{FRP}$  la résistance à la traction du FRP dans la direction radiale,  $t$  est l'épaisseur totale du FRP (ou l'épaisseur totale équivalente dans le cas de bande FRP espacées), et  $d$  est le diamètre du béton confiné. Un résumé de quelques modèles de résistance et de déformation du béton confiné par intégration partielle des composites en fibre de verre (GFRP) est présenté dans le tableau (III.1) suivant :

**Tableau III.1.** Certains modèles de résistance et de déformation du béton confiné.

Auteurs	Résistance du béton	Déformation correspondante
Samaan, Mirmiran et Shahawy (1998) [91]	$f'_{cu} = f'_{c0} + 6.0f'_l{}^{0.7}$	$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cu} - 0.872f'_{c0} - 0.371f_f - 6.258}{245.61f'_{c0}{}^{0.2} + 1.3456\frac{E_f t f}{D}}$
Spoelstra et Monti (1999) [92]	$f'_{cu} = f'_{c0} \left( 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f'_l}{f'_{c0}}} \right)$	$\varepsilon_{cu} = 2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_{c0}} \varepsilon_f \sqrt{\frac{f'_l}{f'_{c0}}}$
Bentayeb, et al (2008) [49]	$f'_{cu} = f'_{c0} \left( 0.75 + 2.5 \left( \frac{\varphi_1 \varphi_2 f_f}{f'_{c0}} \right) \right)$	$\varepsilon'_{cu} = \varepsilon'_{c0} \left( 1.3 + 6.3 \left( \frac{\varphi_1 \varphi_2 f_f}{f'_{c0}} \right) \right)$
Wang, et al (2017) [41]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 1.3 \frac{f_{lu,a}}{f'_{c0}}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1.75 + 12 \left( \frac{f_{lu,a}}{f'_{c0}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0.45}$
Wang, et al (2018) [93]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 3.3k_v \frac{f'_{l,a}}{f'_{c0}}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1.75 + 12k_v \left( \frac{f'_{l,a}}{f'_{c0}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{c0}} \right)$
Abd El Fattah et Rasheed (2018) [58]	$f_{cc} = \alpha f'_c \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_c} - 2 \frac{f'_l}{f'_c}} \right)$	$\varepsilon_u = 0.002 \left( 1.5 + 12\omega \frac{f'_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_0} \right)^{0.5} \right)$
Guo, Gao, Zeng, Duan, Ni et Peng (2019) [67]	$f'_{cu} = f'_{c0} [1 + 2(\rho_{Ke} - 0.01)\rho_\varepsilon]$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{c0} [1.75 + 5.5\rho_{Ke}^{0.8} \rho_\varepsilon^{1.45}]$
Zeng, Chen, Zhuge, Gao, Duan et Guo (2021) [65]	$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 4.3 \left( \frac{k_{v,new} f'_{l,a}}{f'_{c0}} \right)^{1.25}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 50 \left( \frac{k_{v,new} f'_{l,a}}{f'_{c0}} \right)^{1.45}$
Ye, Zhuge, Smith, Zeng et Bai (2022) [66]	$f'_l = k_v k_a f_l = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{\pi d_c}\right)^2} \times \frac{2A_{sp} E_{ft,s} \varepsilon_{f,rup}}{s d_c}$	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{c0} [1.75 + 1.8\rho_{Ke}^{0.8} \rho_\varepsilon^{1.45}]$

### III.3. Modèle proposé

Le modèle proposé dans cette étude est élaboré dans le but d'évaluer la résistance et la ductilité des colonnes en béton partiellement confinées par des bandes en GFRP et grille métallique, par rapport aux colonnes de référence en béton non confiné, en étant basé sur les résultats de l'analyse expérimentale. Cette modélisation est en fonction de la forme géométrique et des caractéristiques mécaniques des composites et de la grille utilisée. La figure III.2 montre un récapitulatif des démarches entreprises permettant de développer et de valider un modèle de confinement propre à la conception proposée dans cette étude.



**Figure III.2.** Organigramme de modèle analytique.

La plupart des modèles disponibles pour évaluer la résistance à la compression et la ductilité du béton confiné sont basés sur le modèle de Richart et al proposé pour des cylindres en béton soumis à une pression hydrostatique :

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f'_l \quad (\text{III.4})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_0 \left( 1 + k_2 \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right) \quad (\text{III.5})$$

$f'_{cc}$ ,  $\varepsilon_{cc}$  sont la résistance à la compression et la déformation correspondante du béton confiné ;  $f'_{c0}$ ,  $\varepsilon_0$  sont la résistance à la compression et la déformation correspondante du béton non confiné ;  $f'_l$  est la pression latérale de confinement ;  $k_1$  coefficient d'efficacité de confinement ajusté selon les caractéristiques du béton confiné, dans le but de minimiser la différence entre les valeurs des résistances théorique et expérimentale.

Pour le béton confiné par des aciers, le coefficient d'efficacité du confinement est généralement pris entre 2,8 et 4,1. Cependant, Lam et Teng (2002) [94] et Campione et Miraglia (2003) [95] ont constaté que les valeurs ci-dessus surestiment ce coefficient lorsqu'il s'agit d'un confinement par des FRP. Ils ont ainsi, préconisé que la valeur de ce coefficient est de 2. À cet effet, le coefficient d'efficacité du confinement du modèle proposé est :  $k_1 = 2$  et  $k_2 = 5k_1$ .

### III.3.1. Évaluation de la contrainte latérale de confinement

L'augmentation de la résistance due à la pression latérale effective  $f'_l$  dépend de la pression latérale  $f_l$ , supposée uniformément répartie sur la surface du noyau de béton et dépend également du coefficient d'efficacité  $k_e$ .

$$f'_l = k_e f_l \quad (\text{III.6})$$

Où :

$$k_e = \frac{A_e}{A_c} \quad (\text{III.7})$$

Avec  $A_e$  est la section transversale de la zone de confinement efficace du noyau en béton et  $A_c$  est la section transversale totale du béton.

Généralement le module ( $E_l$ ) et la résistance ( $f_l$ ) de confinement sont considérés comme les facteurs les plus importants affectant le comportement mécanique. Ces paramètres modifient la forme de la courbe de capacité dans sa partie élasto-plastique. Les expressions de ces facteurs sont données comme suit :

$$E_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \quad (\text{III.8})$$

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f f_f \quad (\text{III.9})$$

$E_f$ ,  $f_f$  sont respectivement le module d'élasticité et la résistance à la traction du composite et  $\rho_f$  est la densité du matériau composite par rapport au volume de béton.

En particulier, le rapport volumique du FRP pour les colonnes circulaires partiellement enveloppées peut être estimé sur la base de l'équation suivante :

$$\rho_f = \frac{4 n t_f w}{D (s+w)} \quad (\text{III.10})$$

Où  $n$  est le nombre de couches de FRP,  $t_f$  est l'épaisseur nominale de FRP par couche,  $D$  est le diamètre de la colonne circulaire,  $w$  et  $s$  sont les largeurs et l'espacement libre des bandes de FRP respectivement.

Les modèles de contrainte-déformation existants de (Ye et al 2020 [96], Zeng et al 2018 [97], Zeng et al 2019 [11]), y compris le modèle de Lam et Teng (2003) [55] ne peuvent pas être utilisés dans leur forme actuelle pour prédire le comportement contrainte-déformation des colonnes (FGC) partiellement et doublement confinées par intégration des cerces en grille métallique et des bandes en GFRP.

En effet, certains facteurs de modification qui dépendent des paramètres de la grille et des bandes FRP doivent être introduits. Par conséquent, un nouveau modèle spécifique basé sur la conception proposée et des différents résultats expérimentaux a été développé.

Le tissu GFRP en forme hexagonale et la grille métallique circulaire utilisé dans cette étude ont fourni la pression de confinement latérale au noyau du béton :

$$f'_i = f'_{lf} + f'_{lg} \quad (\text{III.11})$$

$f'_{lf}$  : Pression de confinement latérale efficace fournie par les GFRP

$f'_{lg}$  : Pression de confinement latérale efficace fournie par la grille métallique

### III.3.1.1. Confinement fourni par les cerces GFRP

Pour les colonnes partiellement confinées par des bandes hexagonales en GFRP, la pression de confinement latérale efficace est donnée comme suit :

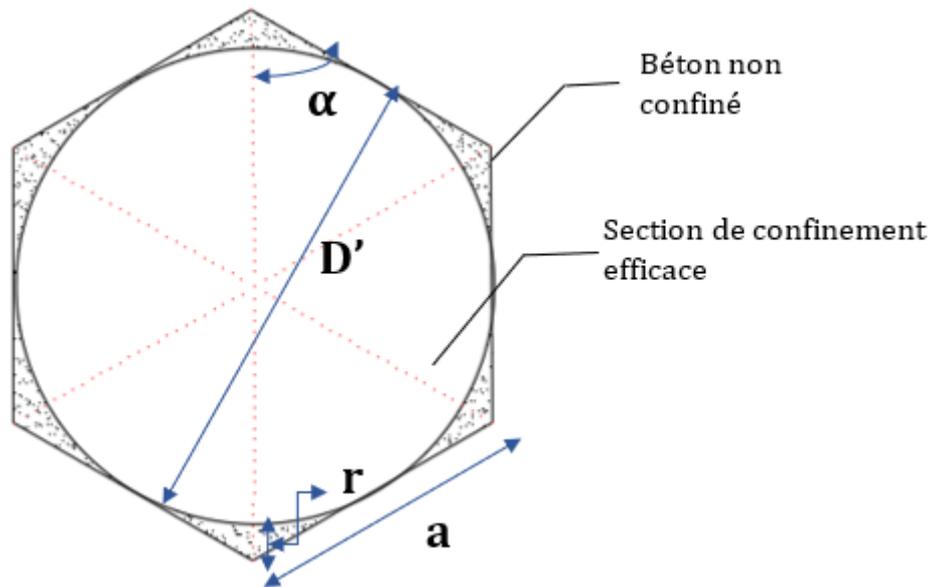
$$f'_{lf} = k_{ef} f_{lf} \quad (\text{III.12})$$

Avec  $k_{ef}$  est le coefficient d'efficacité des GFRP et  $f_{lf}$  est la pression de confinement latérale. Dans le modèle proposé, la colonne circulaire équivalente est définie pour avoir un diamètre ( $D'$ ) étant la distance diagonale de la section hexagone (figure III.3). C'est-à-dire :

$$D' = \frac{2a-2r(1+\sin\alpha)}{\sin\alpha} \quad (\text{III.13})$$

En effet, la pression de confinement latérale fournie par les GFRP, enveloppant une section hexagonale, est équivalente à la pression fournie par un cercle d'un diamètre ( $D'$ ) :

$$f_{lf} = \frac{2 t_f w}{D' (s+w)} f_f \quad (\text{III.14})$$



**Figure III.3.** Zone de confinement efficace dans une section hexagonale en GFRP.

Dans tous les modèles théorique existants basés sur le concept de la zone de confinement effective, seule la partie du béton contenu par les six paraboles qui coupent les bords d'un angle  $\alpha$  est effectivement confiné par le renforcement transversal.

Le coefficient d'efficacité est donc donné par l'équation suivante :

$$k_{ef} = \frac{A_e}{A_c} = \frac{\pi(D')^2/4}{3a(a-r)} = \frac{\pi(a-r)}{3a \sin^2 \alpha} - \frac{\pi r}{3a} \left[ \frac{2}{\sin \alpha} - \frac{r}{a-r} \right] \quad (\text{III.15})$$

### III.3.1.2. Confinement fourni par la grille métallique

Pour les colonnes partiellement confinées par des bandes en grille métallique, la pression de confinement latérale efficace est donnée comme suit :

$$f'_{lg} = k_{eg} f_{lg} \quad (\text{III.16})$$

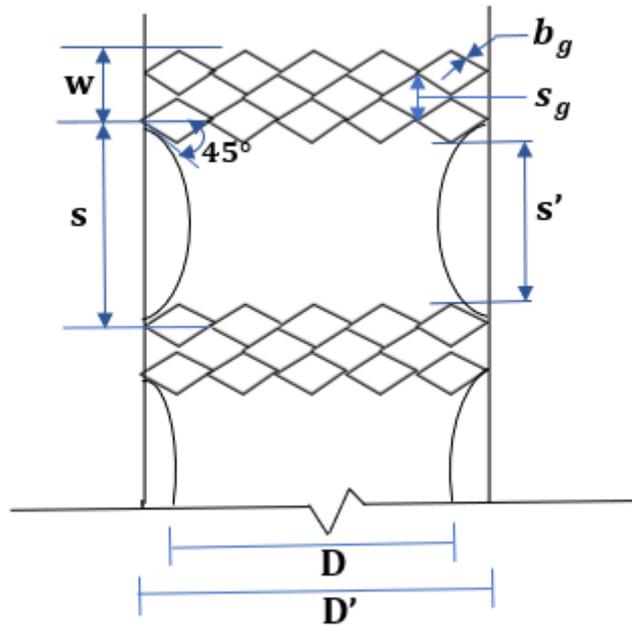
Avec  $k_{eg}$  étant de coefficient d'efficacité de la grille et  $f_{lg}$  est la pression de confinement latérale.

Pour le béton confiné avec une grille métallique, seule une partie de la surface du béton a été recouverte (Figure III.4). Afin d'étudier l'effet de confinement apporté par la grille, l'épaisseur

équivalente est utilisée. L'épaisseur équivalente est déterminée comme une épaisseur transversale de couverture totale équivalente de la grille métallique ; l'épaisseur équivalente  $t_{eg}$  est calculée selon l'équation suivante :

$$t_{eg} = \frac{b_g t_g}{s_g + b_g} \quad (\text{III.17})$$

Avec  $b_g$ ,  $t_g$  et  $s_g$  sont respectivement la largeur, l'épaisseur et l'espacement entre la grille transversale.



**Figure III.4.** Zone de confinement efficace pour la grille métallique.

Sur la base de la condition de compatibilité des déformations, la pression de confinement latérale  $f_{lg}$  est donnée par l'équation suivante :

$$f_{lg} = \frac{2 t_{eg} w}{D(s+w)} f_g \quad (\text{III.18})$$

Le coefficient d'efficacité de confinement peut être calculé par l'équation de (Zeng 2018 [96], Yang 2020 [97]) suivante :

$$k_{eg} = \frac{A_e}{A_c} = \frac{\pi(D')^2/4}{\pi D^2/4} = \left(1 - \frac{S'}{2D}\right)^2 \quad (\text{III.19})$$

Avec  $S' = (S - S_g)$ , l'espacement net entre deux bandes.

Les différents paramètres de confinement pour le calcul analytique sont récapitulés dans le tableau III.2 qui donne les valeurs calculées par les expressions de la modélisation théorique.

**Tableau III.2.** Paramètres de confinement pour le calcul analytique.

Paramètres	Définitions	Expressions	Valeurs
$\rho_f$	Rapport de densité volumique FRP/béton	$\frac{4 n t_f w}{D (s + w)}$	$\rho_f = 0.00577$
$\rho_g$	Rapport de densité volumique grille/béton	$\frac{4 n b_g t_g w}{D (s + w)(s_g + b_g)}$	$\rho_g = 0.000583$
$f_{lf}$ (MPa)	Pression de confinement latérale du GFRP	$\frac{1}{2} \rho_f f_f$	$f_{lf} = 4.041$
$f_{lg}$ (MPa)	Pression de confinement latérale de la grille	$\frac{1}{2} \rho_g f_g$	$f_{lg} = 0.1108$
$k_{ef}$	Coefficient d'efficacité du GFRP	$\frac{\pi(a-r)}{3a \sin^2 \alpha} - \frac{\pi r}{3a} \left[ \frac{2}{\sin \alpha} - \frac{r}{a-r} \right]$	$k_{ef} = 0.9$
$k_{eg}$	Coefficient d'efficacité de la grille	$\left( 1 - \frac{S'}{2D} \right)^2$	$k_{eg} = 0.6$
$f'_{lf}$ (MPa)	Pression de confinement latérale efficace du GFRP	$k_{ef} f_{lf}$	$f'_{lf} = 3.68$
$f'_{lg}$ (MPa)	Pression de confinement latérale efficace de la grille	$k_{eg} f_{lg}$	$f'_{lg} = 0.0665$
$f'_l$ (MPa)	Pression de confinement latérale	$f'_{lf} + f'_{lg}$	$f'_l = 3.7465$
$f'_{c0}$ (MPa)	Résistance du béton non confiné (P)	Résistance moyenne du béton témoin (valeur expérimentale)	$f'_{c0} = 27.3$
$\varepsilon_0$	Déformation au pic du béton non confiné (P)	Déformation au pic du béton témoin (valeur expérimentale)	$\varepsilon_0 = 0.000979$
$f'_{cc}$ (MPa)	Résistance du béton confiné (FGC)	$f'_{c0} + 2 f'_l$	$f'_{cc} = 34.71$
$\varepsilon_{cc}$	Déformation au pic du béton confiné (FGC)	$\varepsilon_0 \left( 1 + 10 \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right)$	$\varepsilon_{cc} = 0.00231$

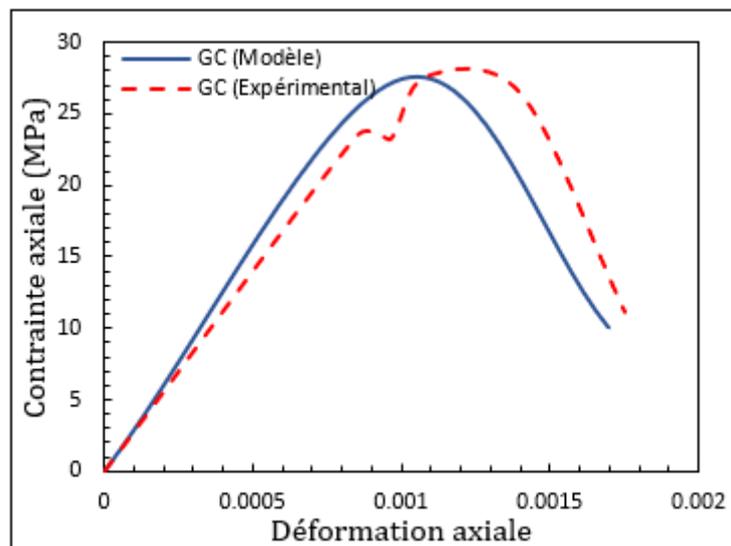
### III.4. Validation du modèle proposé

Le modèle analytique développé a été validé à l'aide des résultats expérimentaux, pour prédire les performances des colonnes confinées sous compression axiale. La fiabilité et la précision de modèle proposé est examinée par la confrontation des résultats des essais avec ceux prédits par le modèle théorique pour les différentes variantes d'étude.

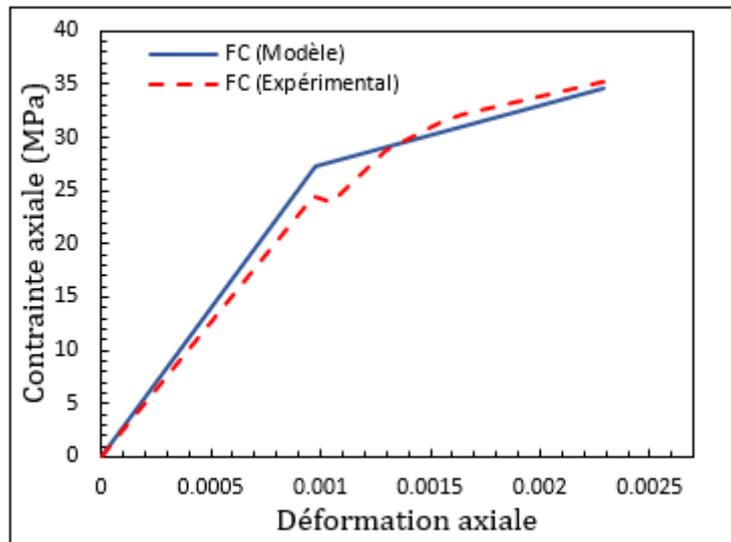
#### III.4.1. Résultats expérimentaux vs. Analytiques

Les figures III.5, III.6 et III.7 montrent la confrontation de la réponse contrainte-déformation axiale de l'analyse expérimentale vs résultats analytiques de différentes colonnes confinées. Les résultats expérimentaux récapitulés dans le tableau II.7 du chapitre précédant permettent de valider les équations analytiques : III. 14, III. 15, III. 18 et III. 19.

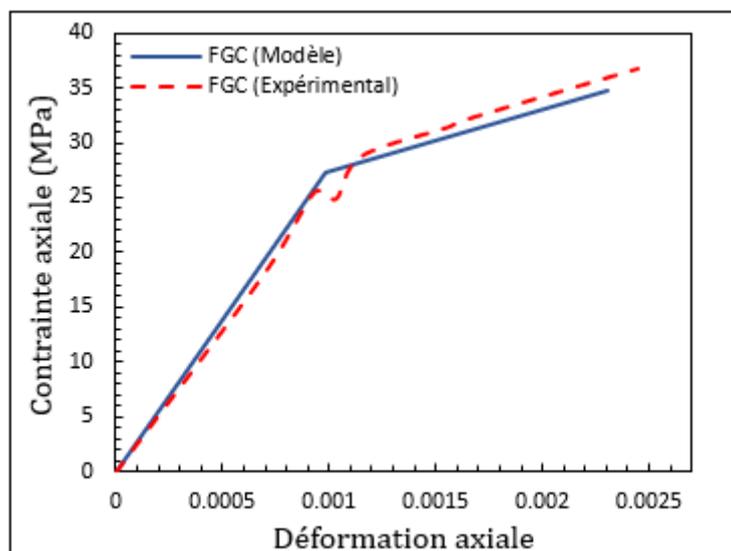
Pour confirmer la précision du modèle proposé, les caractéristiques mécaniques et géométriques de tous les matériaux et spécimens préalablement testés sont utilisées. On note que les résultats prédits sont bien corrélés aux résultats expérimentaux.



**Figure III.5.** Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes GC.



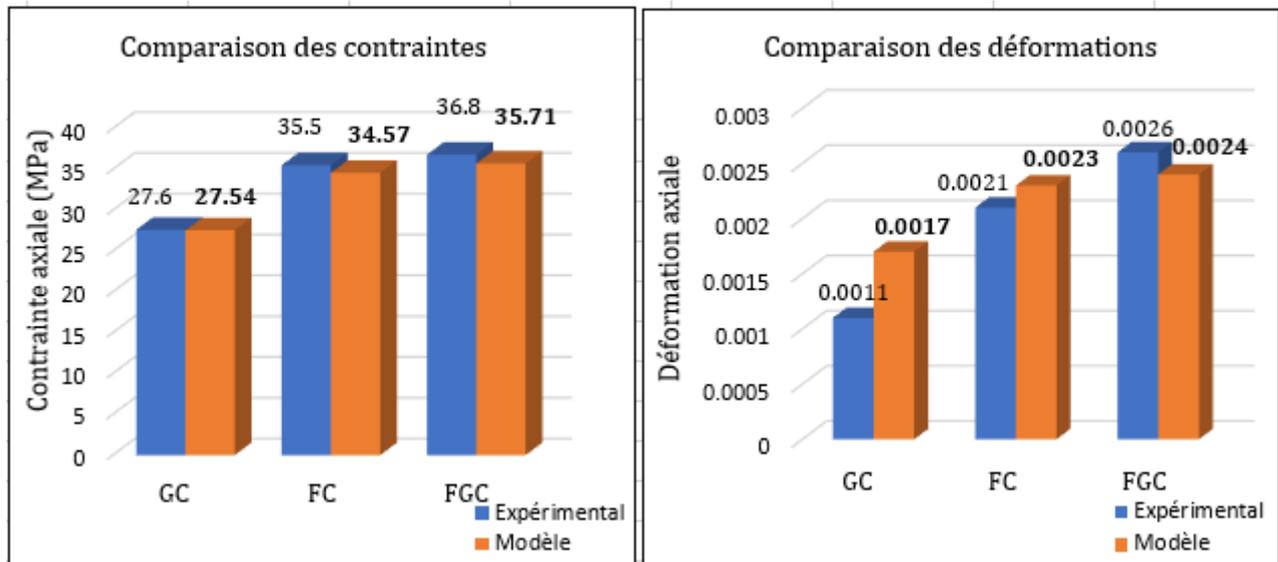
**Figure III.6.** Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes FC.



**Figure III.7.** Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques des colonnes FGC.

L'analyse des courbes contrainte-déformation prédites montre un comportement similaire au premier stade : élastique linéaire pour tous les types de poteaux. Dans l'étape suivante, la résistance des colonnes confinées en GFRP augmente en fonction de l'augmentation de la déformation axiale. Pour éviter l'effondrement globale des colonnes, le béton confiné avec des bandes hexagonales en GFRP doit supporter une résistance du béton importante, de fait il faut augmenter le taux de confinement.

La confrontation des résultats illustrés sur la figure III.8 montre une bonne concordance, en termes de résistance à la compression et de déformation entre les résultats expérimentaux et analytiques pour les différentes configurations de confinement considérées dans cette étude.

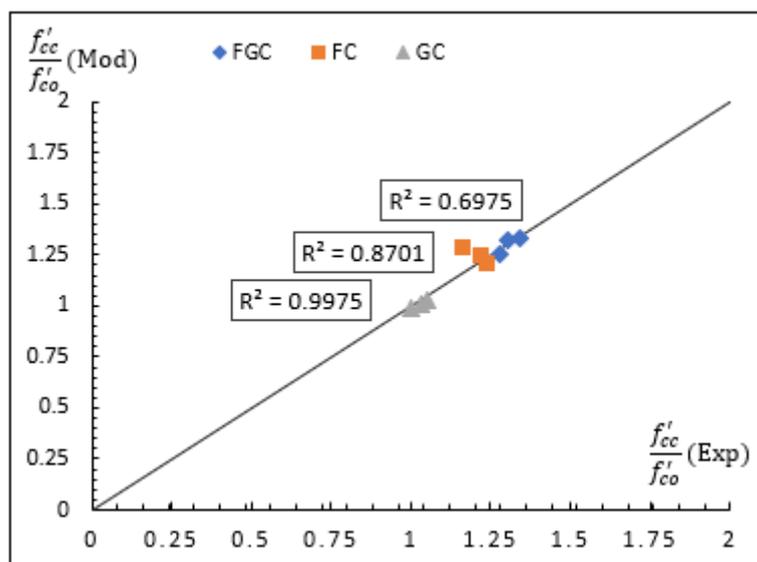


**Figure III.8.** Confrontation des résultats expérimentaux et analytiques.

Les histogrammes de la confrontation des résultats expérimentaux et analytiques de la figure III.8 montrent et confirment l'efficacité du modèle développé. En effet, la colonne doublement confinée (FGC) présente une résistance très importante (une contrainte expérimentale de 36.8 MPa et contrainte théorique de 35.71 MPa) et une ductilité largement améliorée (déformation expérimentale de 0.0026 et déformation théorique de 0.0024). Par ailleurs, la différence entre le modèle analytique et l'analyse expérimentale est inférieure à (<5%), ce qui est fort satisfaisant pour valider la précision du modèle.

#### III.4.2. Confrontation des rapports de résistance à la compression $f'_{cc}/f'_{co}$

La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux en termes de contrainte de compression des colonnes en béton confinées est représentée sur la Figure III.9. On peut visualiser à partir de la figure que les valeurs prédites présentent une bonne corrélation par rapport aux valeurs expérimentales. De plus, le coefficient de détermination  $R^2$  qui permet d'estimer le niveau de corrélation linéaire entre les valeurs expérimentales et théoriques de résistance à la compression montre une combinaison linéaire positive élevée. En effet, les valeurs de  $R^2$  correspondant aux colonnes GC, FC et FGC sont respectivement de 0,99, 0,87 et 0,69. Pour plus de clarté, les tableaux III.3 et III.4 résument les valeurs expérimentales et théoriques du rapport de résistance à la compression et déformation axiale.



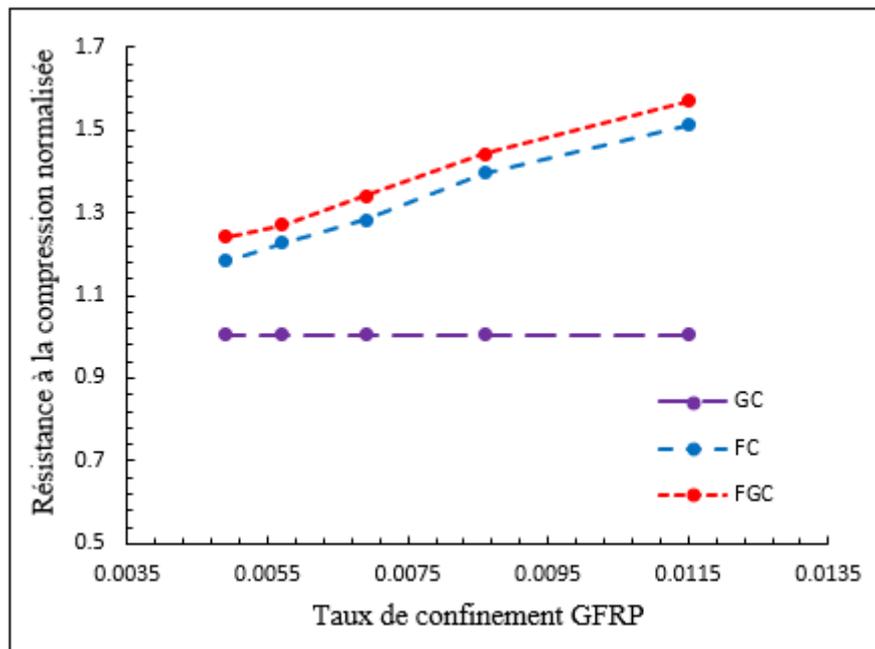
**Figure III.9.** Comparaison des rapports de résistance à la compression  $f'_{cc}/f'_{co}$ .

**Tableau III.3.** Comparaison des valeurs des contraintes analytiques et expérimentales.

Type de colonne	Contrainte axiale $f'_{co}$ (MPa)	Valeur expérimentale $f'_{cc}$ (MPa)	Valeur théorique $f'_{cc}$ (MPa)	Valeur expérimentale $f'_{cc}/f'_{co}$	Valeur théorique $f'_{cc}/f'_{co}$
GC (1)	26,02	27,4	26,7	1,053	1,026
GC (2)	27,32	28,2	27,63	1,032	1,011
GC (3)	28,55	28,5	28,3	0,998	0,991
FC (1)	27,32	31,85	34,92	1,165	1,278
FC (2)	26,02	31,85	32,43	1,224	1,246
FC (3)	28,55	35,5	34,35	1,243	1,203
FGC (1)	28,55	36,5	35,87	1,278	1,256
FGC (2)	26,02	33,85	34,5	1,301	1,325
FGC (3)	27,32	36,7	36,5	1,343	1,336

**Tableau III.4.** Comparaison des valeurs de déformation analytiques et expérimentales.

Type de colonne	Déformation axiale $\varepsilon_{c0}$	Valeur expérimentale $\varepsilon_{cc}$	Valeur théorique $\varepsilon_{cc}$	Valeur expérimentale $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$	Valeur théorique $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$
GC (1)	0.00104	0.0011	0.00098	1,058	0.942
GC (2)	0.00101	0.00107	0.00097	1,059	0.961
GC (3)	0.00097	0.00104	0.00096	1.072	0,991
FC (1)	0.00111	0.002	0.0015	1,165	0.989
FC (2)	0.00108	0.0019	0.0019	1.759	1.759
FC (3)	0.00105	0.0025	0.0016	2.381	1.523
FGC (1)	0.00077	0.00253	0.0022	3.285	2.857
FGC (2)	0.00096	0.0023	0.0023	2.396	2.396
FGC (3)	0.00093	0.0031	0.0025	3.333	2.688

**Figure III.10.** Relation entre  $f'_{cc}/f'_{c0}$  et le taux de confinement en GFRP.

Afin de souligner la participation positive des GFRP intégrés dans la matrice béton, la relation entre la résistance à la compression normalisée  $f'_{cc}/f'_{co}$  et le taux de renforcement en GFRP des colonnes GC, FC et FGC est tracée à la Figure III.10. En effet, on peut conclure que la résistance à la compression des échantillons FC et FGC augmente lorsque le rapport de confinement en GFRP augmente, tandis que la résistance à la compression des échantillons GC (sans confinement en GFRP) reste constante.

En conclusion, les formules analytiques proposées sont bien validées par les résultats des essais. En effet, une bonne concordance est observée en termes de résistance axiale, déformation correspondante, et rapport de résistance. Par conséquent, une étude paramétrique pour évaluer les paramètres de conception affectant le comportement en compression axiale des colonnes confinées peut être menée.

### III.5. Étude paramétrique

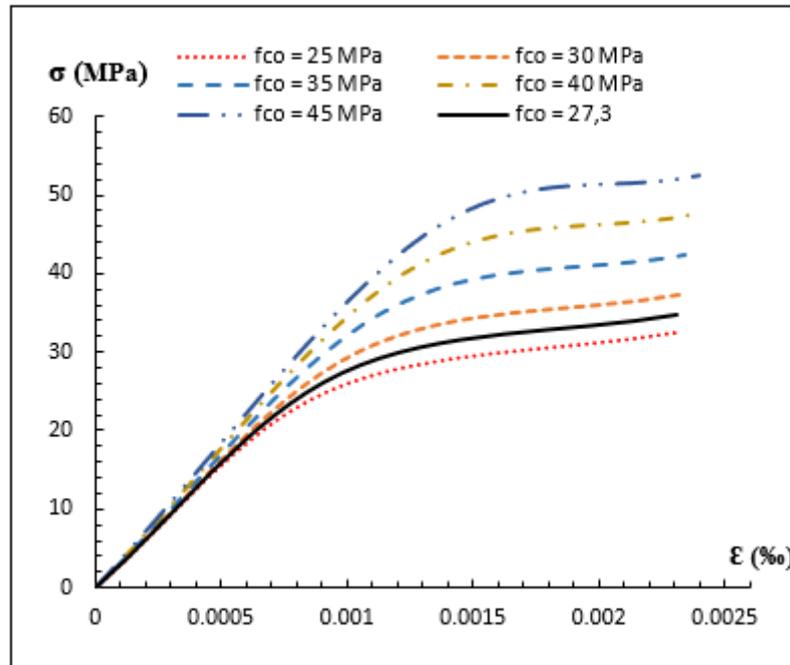
Après la validation expérimentale et statistique du modèle proposé, des études paramétriques ont été réalisées pour analyser les performances mécaniques des colonnes composites FGC et d'étudier l'influence des différents paramètres géométriques sur leur comportement en compression. Le but de cette étude paramétrique est d'analyser l'effet des différents facteurs qui n'ont pas été étudiés dans l'expérience en raison des limitations de la machine de mesure. En effet, l'influence de la contrainte du béton non confiné, de l'espacement des bandes GFRP, de l'épaisseur des bandes GFRP et du rapport GFRP/diamètre de la grille ont été mis en valeur et analysés.

#### III.5.1. Influence de la résistance du béton non confiné

L'effet de la résistance du béton non confiné sur le comportement en compression axiale des colonnes FGC a été étudié au moyen de cinq différents niveaux de contrainte du béton, à savoir : 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa et 45 MPa, tandis que tous les paramètres restants ont été maintenus constants.

Les courbes contrainte-déformation des éprouvettes FGC avec différentes classes de résistance du béton non confiné sont illustrées sur la Figure III.11. La comparaison montre que l'augmentation de la résistance du béton non confiné conduit à une amélioration considérable à la fois de la résistance initiale et de la résistance ultime. Cependant, la déformation axiale ultime n'est que sensiblement affectée par les changements de résistance du béton non confiné. Ceci

est dû au fait que le béton d'enrobage perd toute sa résistance avant la rupture des colonnes puisque le confinement assuré par la grille métallique est très faible.



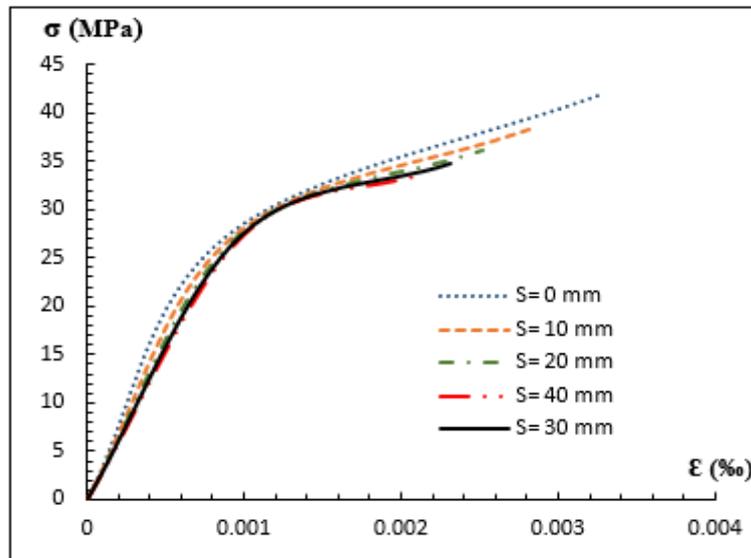
**Figure III.11.** Courbe contrainte-déformation avec différentes résistances du béton.

### III.5.2. Influence de l'espacement et l'épaisseur des bandes GFRP

Quatre espacements de bandes en GFRP ont été considérés, à savoir :  $S = 0$  mm,  $S = 10$  mm,  $S = 20$  mm et  $S = 40$  mm. La résistance du béton non confiné est de 27,3 MPa et l'épaisseur des bandes en GFRP est de 0,35 mm, tandis que tous les paramètres restants ont été maintenus constants.

Les courbes contrainte-déformation des colonnes FGC avec différents espacements entre les bandes GFRP sont présentées sur la Figure III.12. Il est évident que la résistance des colonnes confinées augmente lorsque l'espacement net est diminué. En effet, lorsque l'espacement tend vers zéro les colonnes seront totalement confinées, donc un confinement continu est fourni au noyau de béton avec un comportement adoucissant.

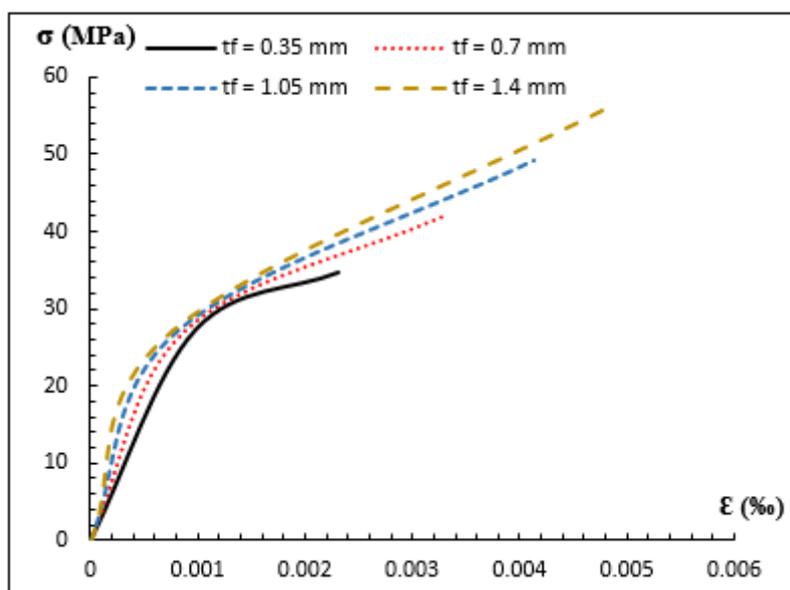
Par conséquent, le taux de confinement conduit à une amélioration significative en termes de déformation ultime. Au fur et à mesure que l'espacement diminue, les bandes sont très proches, la fragilité du noyau en béton est réduite et l'expansion latérale est empêchée, ce qui affecte considérablement la résistance et la ductilité colonnes renforcées.



**Figure III.12.** Courbe contrainte-déformation avec différents espacements entre les bandes GFRP.

L'influence de l'épaisseur des bandes GFRP sur le comportement axial des colonnes FGC a été également étudiée. Les épaisseurs de bandes suivantes : 0,7 mm, 1,05 mm et 1,4 mm ont été considérées. La figure III.13 illustre la réponse contrainte-déformation des colonnes avec différentes épaisseurs des bandes GFRP.

La comparaison des courbes confirme que l'augmentation de la quantité de fibres (nombre de couches) affecte légèrement la résistance du premier pic et considérablement la résistance ultime des colonnes et la déformation correspondante. L'épaisseur du GFRP affecte également la rigidité axiale des colonnes confinées.



**Figure III.13.** Courbe contrainte-déformation avec différentes épaisseurs des bandes GFRP.

Avec l'augmentation de l'épaisseur des composites, la pression de confinement fournie par les bandes de GFRP est considérablement augmentée. En conclusion, la capacité portante des colonnes dépend fortement du taux et du volume de confinement par les composites.

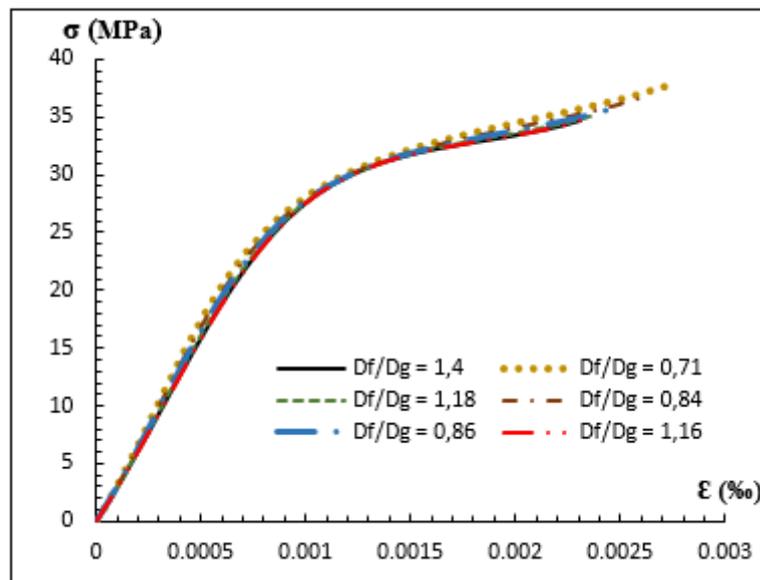
### III.5.3. L'influence du diamètre des bandes GFRP/Grille

L'influence du rapport des diamètres des bandes GFRP/Grid ( $(D_f/D_g)$ ) sur le comportement axiale des colonnes FGC a été étudiée. Cinq rapports de diamètre (100/140, 110/130, 120/140, 140/120 et 130/110) ont été pris en compte, tandis que tous les autres paramètres ont été maintenus constants.

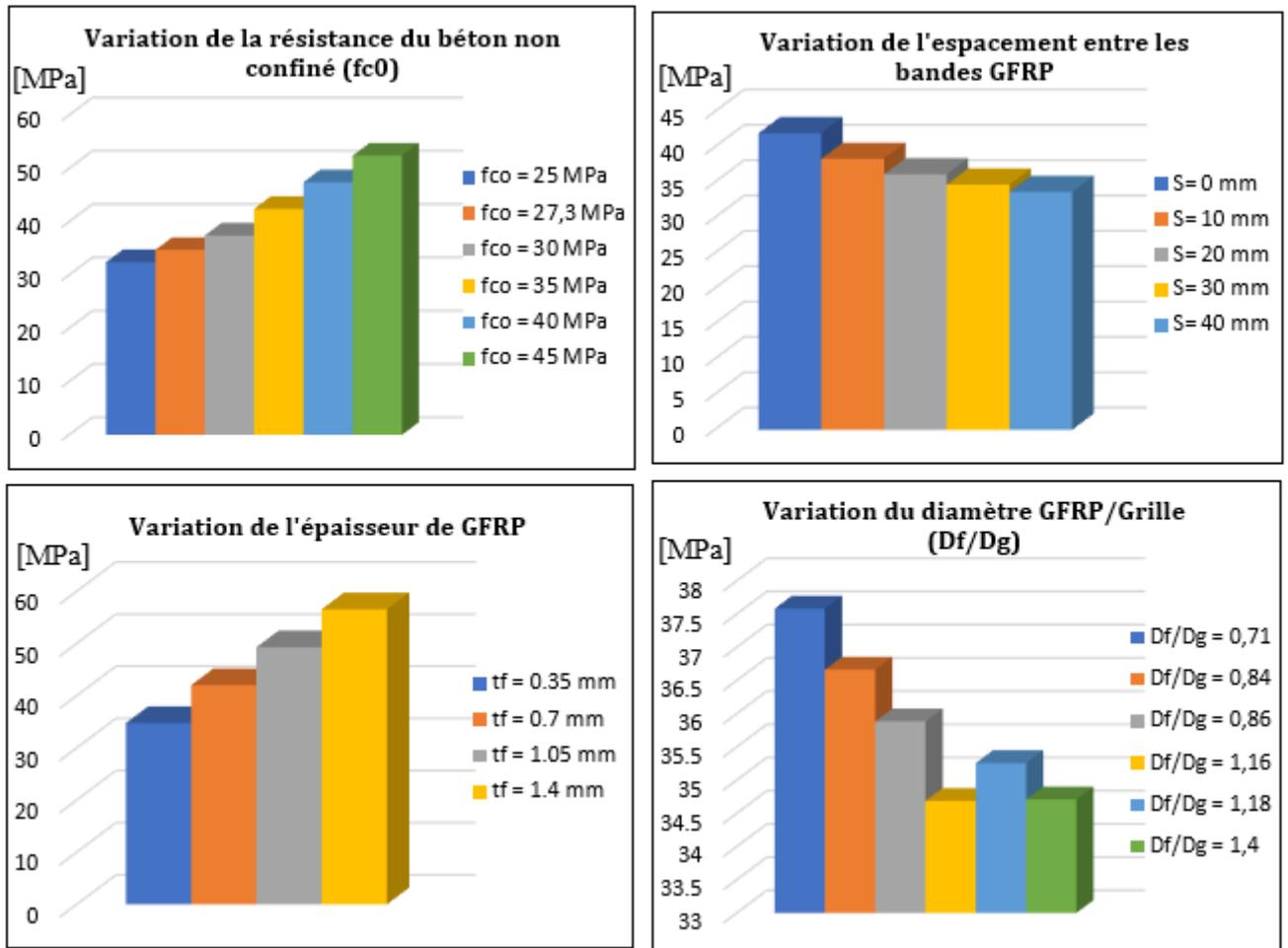
La courbe contrainte-déformation des colonnes avec plusieurs rapports de diamètre des bandes est illustrée sur la Figure III.14. La comparaison montre que l'augmentation du diamètre des bandes de la grille suivie de la diminution de celui des cerces hexagonaux en GFRP n'a pratiquement aucune influence sur la résistance ultime et la déformation axiale correspondante. En d'autres termes, l'armature GFRP peut être utilisée comme confinement externe ou interne du béton.

Par exemple, ( $(D_f/D_g = 1,4)$ ) correspond à ( $(D_f = 140 \text{ mm})$  et ( $(D_g = 100 \text{ mm})$ ), dans ce cas les GFRP sont considérés comme un confinement extérieur du béton.

L'ensemble des résultats de l'analyse paramétrique, récapitulés sous forme d'histogrammes, est représenté sur la figure III.15.



**Figure III.14.** Courbe contrainte-déformation des colonnes pour différents diamètres de confinement.



**Figure III.15.** Influence des différents paramètres géométriques sur la résistance du béton confiné.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle analytique a été proposé, validé, et appliqué pour décrire avec grande précision, le comportement global en compression axiale des colonnes partiellement confinées. En effet, les valeurs prédites se sont toutes avérées en bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Une analyse paramétrique a été ensuite menée pour étudier l'influence des paramètres de conception des bandes FRP sur la réponse ultime des colonnes. Les analyses paramétriques indiquent que tous les paramètres étudiés ont des effets significatifs sur le comportement axial des colonnes confinées, et l'efficacité du confinement dépend effectivement de plusieurs facteurs, y compris l'espacement net des bandes FRP, la largeur et l'épaisseur des FRP.

Cette modélisation nous a permis d'établir un complément de résultat et de conclusions à la compréhension du comportement mécanique de la nouvelle conception développée. Néanmoins, d'autres approches seront nécessaires pour optimiser les formes et les paramètres de conceptions considérés dans notre étude. Dans ce contexte, une simulation numérique à base des éléments finis fera l'objet du chapitre suivant.

# **Chapitre 4**

## **Simulation par éléments finis**

## IV.1. Introduction

Afin de prendre en compte la non-linéarité et le comportement réel des matériaux constitutifs de la conception proposée ainsi que l'adhérence entre ses différents composants, la simulation numérique s'avère une approche qui permet de représenter ces phénomènes physiques complexes grâce à une série de calculs et un modèle mathématique comportant des équations et des lois de comportement. En effet, la méthode la plus répandue est la méthode de calcul par éléments finis qui permet d'avoir une solution approchée de la réalité.

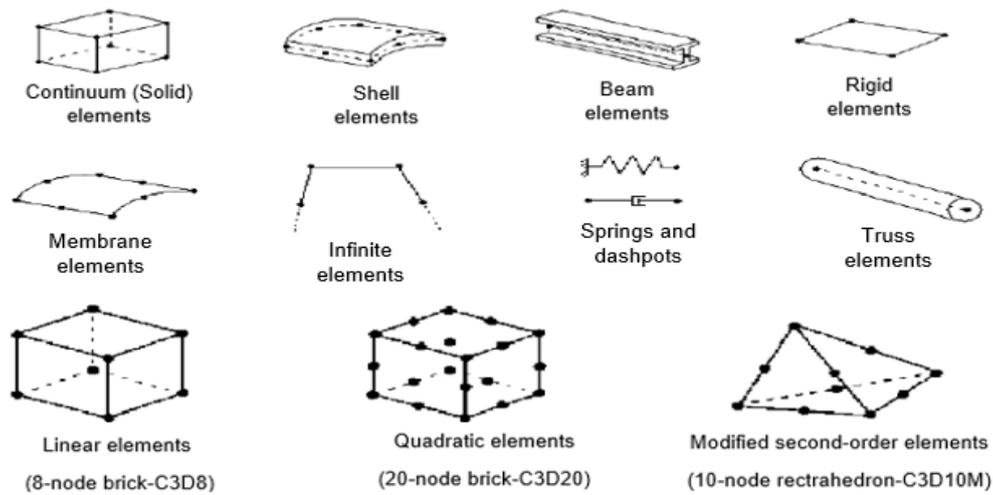
Par conséquent, dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la démarche numérique sur le comportement des colonnes en béton, confinées par intégration partielle des matériaux composites, sous un chargement de compression. Cette étude numérique est réalisée à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS [18]. L'objectif de cette partie est de confronter les résultats trouvés expérimentalement et analytiquement aux résultats donnés par la modélisation numérique, dans le but de mettre en évidence les paramètres conceptuels non pris en compte dans les approches précédentes, tel que : la non-linéarité géométrique et matérielle, l'endommagement du béton et l'anisotropie des composites FRP.

La modélisation du comportement des matériaux constitutifs de la colonne proposée (béton, grille et composites) est présentée dans la première partie de ce chapitre. Les étapes de la modélisation ainsi que tous les résultats obtenus, en termes de contrainte, déformation et de mode de rupture sont discutés et présentés, sous forme de graphiques et de cartographies d'évolution des endommagements, et ce pour mettre en valeur l'apport de la technique proposée par rapport aux colonnes de référence.

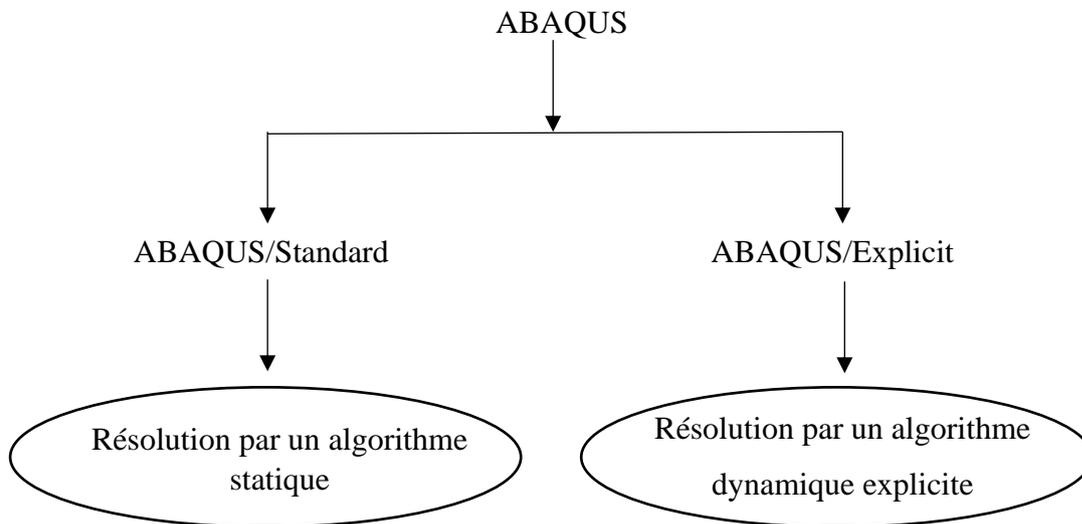
## IV.2. Choix du logiciel de simulation

Connu et répondu, en particulier pour ces traitements performants de problèmes non linéaire, ABAQUS est un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Créé en 1978, il possède une riche bibliothèque contenant des éléments qui peuvent modéliser n'importe quelle géométrie, tel que montré sur la figure IV.1. Dans la base de données de ABQUS, il est également intégré une multitude de lois de comportement caractérisant pratiquement tous les matériaux typiques en ingénierie.

À partir d'un fichier de donnée (caractérisé par le suffixe .cae), ainsi deux méthodes se présentent pour générer un fichier d'entrée : soit manuellement (fichier texte), soit avec ABAQUS/CAE (graphique), qui décrit l'ensemble du problème mécanique.

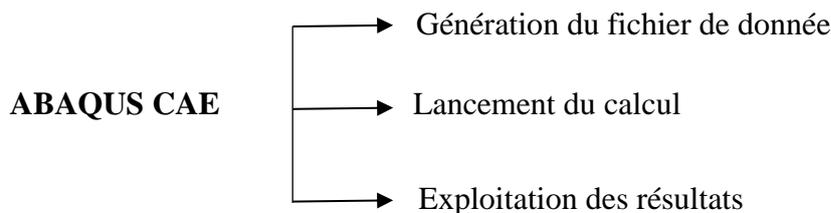


**Figure IV.1.** Différents types d'éléments de la bibliothèque d'ABAQUS.



**Figure IV.2.** Méthodes de résolution utilisées par le code de calcul de ABAQUS.

Le logiciel analyse alors les données, effectue les simulations demandées, et enfin fournit les résultats dans un fichier (odb), voir figure IV.3. La structure du fichier de donnée peut se révéler complexe ; elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc., suivant une syntaxe précise.



**Figure IV.3.** Opérations liées à la modélisation avec le logiciel ABAQUS.

La littérature scientifique nous fournit, une grande variété de travaux de simulation à l'aide du code éléments finis ABAQUS menés sur des colonnes en béton et en béton armé confinées, sous chargement axial :

- Ali et al [100] ont présenté une étude qui vise à calibrer l'angle de dilatation du béton et les paramètres de régularisation viscoplastique dans le modèle « concrete damage plasticity », disponible dans logiciel ABAQUS, à travers une modélisation du comportement axial des colonnes courtes en béton armé, confinées avec des feuilles en FRP ;
- Ferrotto et al [101] ont évalué numériquement à travers une simulation non-linéaire à base d'ABAQUS, les effets de la pré-charge sur la réponse des prismes de béton confinés avec collage extérieur de plaques FRP en fibre de carbone sous une charge de compression ;
- Une série d'échantillons cylindriques, partiellement confinés avec des bandes discontinues en CFRP ont été simulés à l'aide du progiciel d'éléments finis d'ABAQUS par Totonchi et al [61]. Les auteurs ont développé un modèle numérique pour mieux comprendre l'effet marqué de divers arrangements de stratifiés CFRP sur la réponse contrainte-déformation des éprouvettes cylindriques en béton et leur mode de défaillance typique.

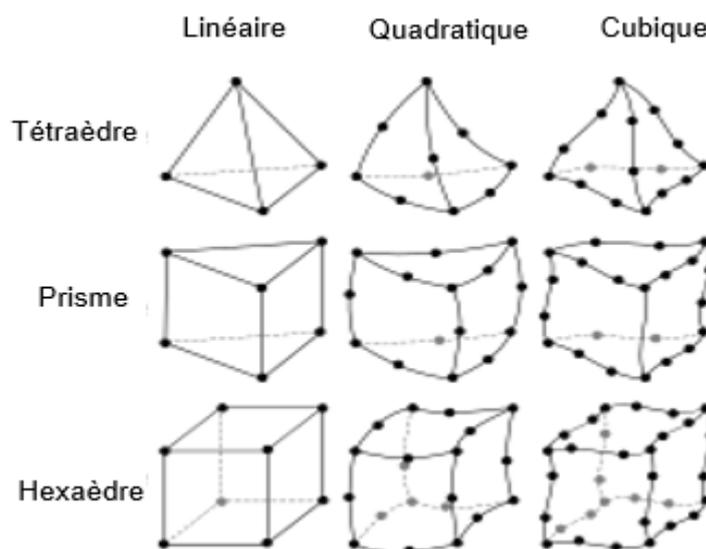
Dans cette optique, le recours au logiciel ABAQUS est justifié par sa capacité de simuler avec grande précision le comportement de la conception proposée tout en tenant compte des paramètres géométriques et mécaniques des matériaux utilisés.

### IV.3. Recours à la méthode des éléments finis

En analyse numérique, le comportement des structures peut être décrit mathématiquement à l'aide d'équations différentielles. L'un des outils très adaptés pour l'étude des phénomènes mécaniques complexes est la modélisation numérique par éléments finis, qui est une technique de discrétisation qui permet de transformer une théorie continue conduisant à des problèmes mathématiques insolubles, en une théorie discrète conduisant à de simples systèmes d'équations. En effet, la méthode des éléments finis permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial et à découper ensuite le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément. Plusieurs choix d'éléments finis utilisés pour discrétiser une forme complexe des structures sont alors possibles (Figure IV.4).

En mécanique des structures, de nombreux éléments de complexité variable ont été développés pour être utilisés avec des structures planes, des structures axisymétriques, des plaques, des coques et des composants tridimensionnels. Il est désormais possible d'inclure des non-

linéarités géométriques, matérielles et structurelles (zones de contact). Dans cette optique, dans notre travail le logiciel ABAQUS basé sur la méthode des éléments finis est adapté à la résolution des problèmes mécaniques liés à la conception proposée, et cela grâce à sa grande capacité de convergence et de réduire les temps de calcul.



**Figure IV.4.** Principaux types d'éléments utilisés dans ABAQUS.

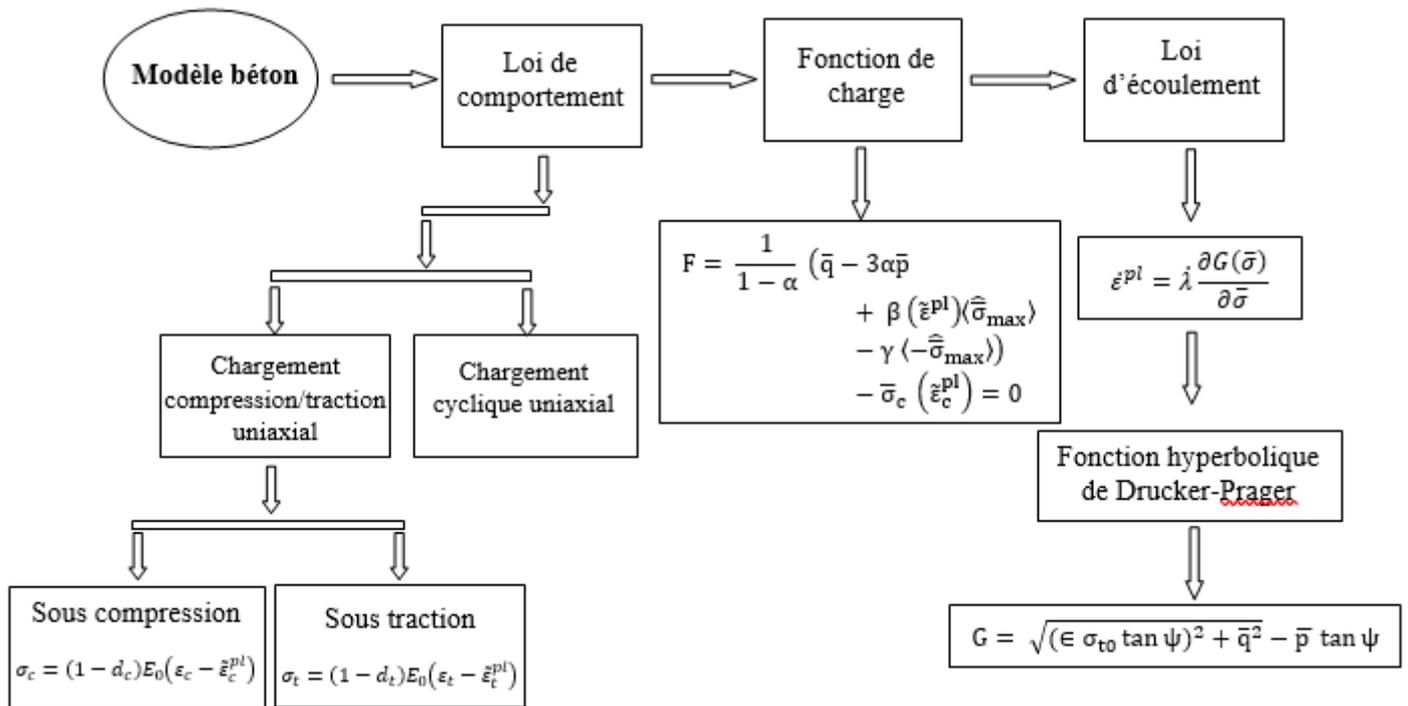
#### IV.4. Modélisation numérique du comportement des matériaux

Le béton, la grille métallique et les matériaux composites sont modélisés séparément à travers des lois de comportement disponibles dans la littérature et intégrées dans la base de données de ABAQUS. La modélisation du béton est bien moins évidente et son comportement mécanique non-linéaire et dissymétrique en compression et traction est encore aujourd'hui très mal décrit par les logiciels industriels. Pour les autres matériaux dont le comportement est linéaire ou bilinéaire, leur modélisation s'avère relativement simple.

##### IV.4.1. Modèle pour le béton

Le béton est un matériau hétérogène qui peut être sujet à une dégradation chimique ou/et mécanique, suite à un chargement quelconque, dès que la résistance de traction du béton est atteinte. En cas d'augmentation des déformations, la résistance du béton continue de chuter, ce qui se traduit par le caractère adoucissant du comportement (phase post-pic) et cette phase s'achève par la ruine du matériau. Globalement, le béton est donc un matériau fragile en traction, ductile en compression et présentant un comportement non linéaire lors de la phase post-pic. Les non linéarités regroupent entre autres les déformations permanentes, la présence d'effets unilatéraux et l'apparition de phénomènes hystérétiques locaux. L'organigramme de la

figure IV.5 résume le modèle qui décrit le comportement élasto-plastique couplé à la théorie d'endommagement adopté pour modéliser le béton.

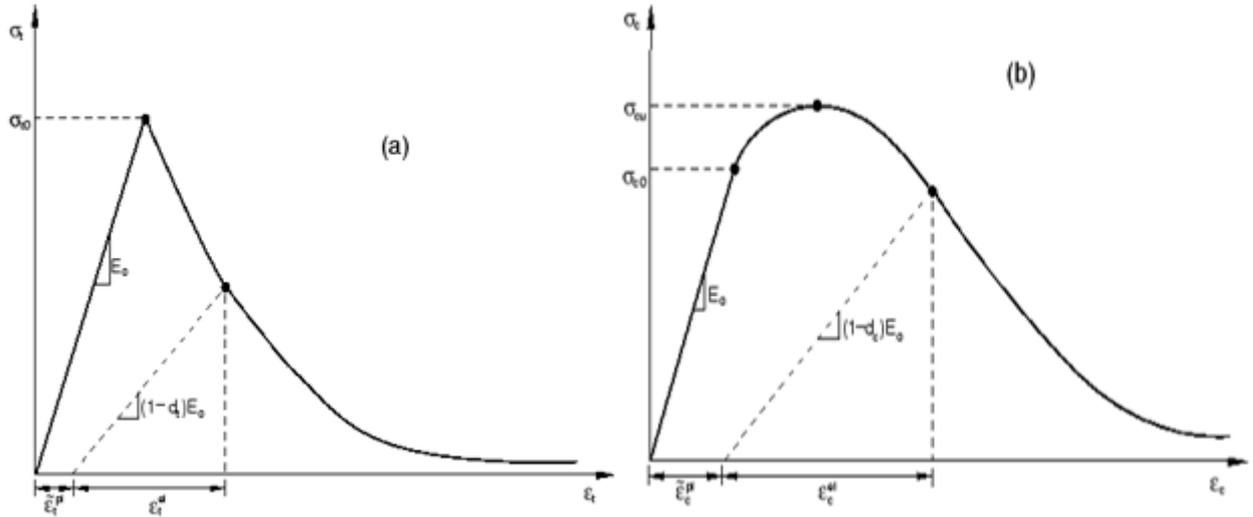


**Figure IV.5.** Organigramme du modèle décrivant le comportement du béton.

Pour décrire le comportement du béton, il est donc essentiel que le modèle puisse considérer d'une part son comportement instable qui se traduit par l'apparition de fissures et d'autre part la dissymétrie du comportement entre la traction et la compression. À cet égard, le modèle numérique Concrete Damaged Plasticity (CDP) intégré dans le code élément finis ABAQUS a été utilisé pour simuler le comportement non linéaire du béton.

Dans le cas de la traction uni-axiale, 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. La réponse post-élastique du modèle à la traction est illustrée sur la figure (IV.6).

Dans le cas de la compression uni-axiale, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique. Dans le domaine plastique, la réponse est généralement caractérisée par un écrouissage suivi d'adoucissement au-delà de la contrainte de rupture.



**Figure IV.6.** Réponse du béton au chargement uni-axiale en traction (a) et en compression (b) [18].

Lorsque l'échantillon de béton est déchargé de tout point d'adoucissement, la rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. Cette dégradation du béton est caractérisée par deux variables d'endommagement qui sont en fonction des déformations plastiques. Elles sont prédéfinies comme suit :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl})} \quad (IV.1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})} \quad (IV.2)$$

Dans la rigidité élastique du matériau, les relations contraintes-déformation sous traction et compression simple sont respectivement :

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (IV.3)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (IV.4)$$

Les contraintes effectives de traction et de compression sont respectivement :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (IV.5)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (IV.6)$$

Les paramètres du modèle sont ceux qui régissent la fonction de plastification et la loi d'écoulement. La fonction de plastification représente l'état de rupture pour le cas de la contrainte effective. Le modèle CDP utilise la fonction de charge de Lubliner et. Al. [102] avec les modifications proposées par Lee et Fenves [103] pour tenir compte de l'évolution de la résistance en traction et en compression. L'évolution de la surface d'écoulement est caractérisée par deux variables d'écrouissage à savoir : les déformations plastiques équivalentes en traction et en compression ( $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$  et  $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ ), liées respectivement aux mécanismes de rupture sous chargement en traction et en compression. En termes de contraintes effectives, la fonction de charge prend la forme suivante :

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta (\tilde{\epsilon}^{pl}) \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \langle -\hat{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c (\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (IV.7)$$

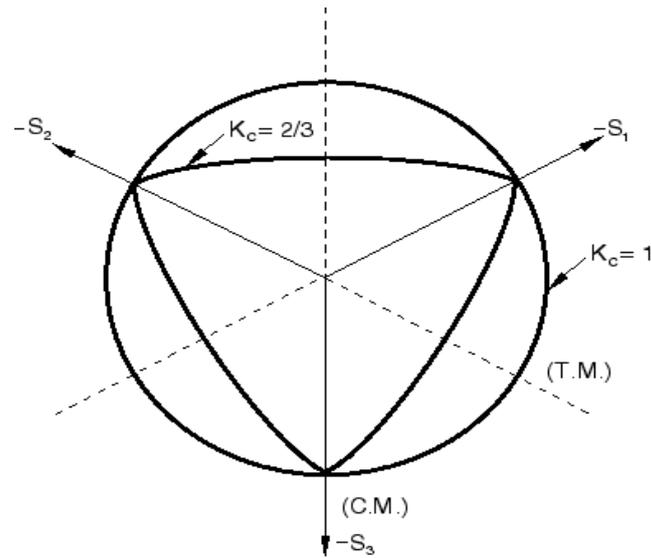
Où  $\hat{\sigma}_{max}$  est la contrainte effective principale maximale ;  $(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})$  le rapport de la limite d'élasticité en compression équilibriaxiale initiale à la limite d'élasticité en compression uni-axiale initiale ;  $\gamma$  est un paramètre qui dépend du rapport du deuxième invariant de contrainte sur la méridienne en traction à celui sur la méridienne en compression  $K_c$ . Sa valeur doit être  $0.5 < K_c \leq 1.0$ , la valeur par défaut  $2/3$  est utilisée, comme le montrent les Figures IV.7 et IV.8.

$\beta$  est une fonction des variables plastiques d'écrouissage données par l'équation (IV.9). Alors que,  $\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$ ,  $\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$  sont respectivement la contrainte uni-axiale en traction et en compression,  $p$  est la contrainte de pression hydrostatique et  $q$  est la contrainte équivalente de Von Mises.

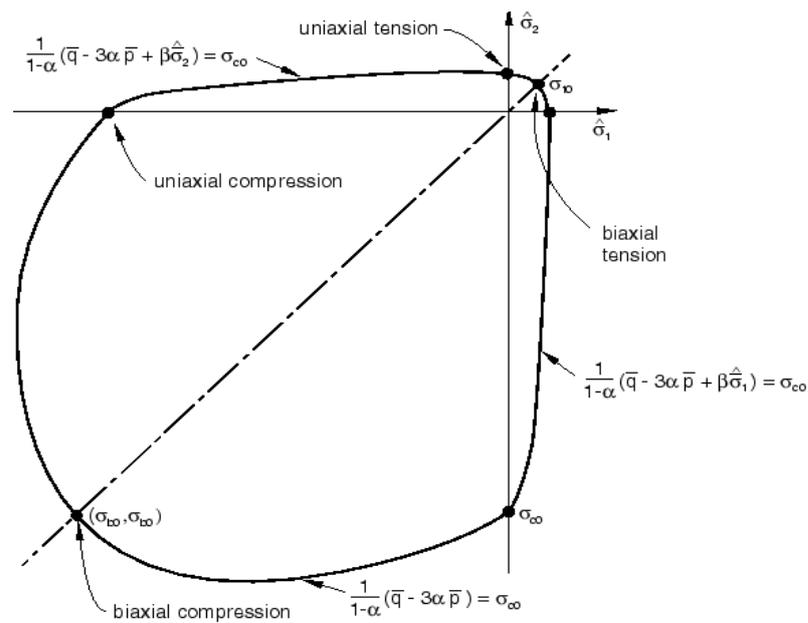
$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1}}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1} - 1} \quad 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (IV.8)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (IV.9)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \quad (IV.10)$$



**Figure IV.7.** Surfaces de rupture dans le plan déviatorique correspondant à différentes valeurs de  $K_c$  [18].



**Figure IV.8.** Surface élastique en contrainte plane [18].

Le potentiel d'écoulement  $G$  utilisé pour ce modèle est la fonction hyperbolique de Drucker-Prager, donnée par la relation suivante :

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \tag{IV.11}$$

Où  $\epsilon$  est l'excentricité du potentiel d'écoulement ;  $\sigma_{t0}$  est la contrainte de traction uni-axiale à la rupture. Tandis que  $\psi$  est l'angle de dilatation mesurée dans le plan  $p$ - $q$  de la contrainte de pression hydrostatique.

En effet, les paramètres du modèle numérique du béton considéré dans notre simulation numérique sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1.** Paramètres du modèle de béton utilisé.

Paramètres définissant la réponse uni-axiale et triaxiale	Valeur	Dénotation
$f_c$ (MPa)	27.3	Contrainte de compression du béton
$f_{c0} = 0.3f_c$ (MPa) [104]	8.19	Contrainte élastique en compression
$f_{t0} = 0.33\sqrt{f_c}$ (MPa) [104]	1.72	Contrainte élastique en traction
$G_{ft} = 10^{-3}a_f f_c^{0.7}$ (N/mm) [105]	0.101	Énergie de fissuration en traction
$G_{fc} = 100G_{ft}$ (N/mm) [105]	10.1	Énergie de fissuration en compression
$E = 11000(f_c)^{\frac{1}{3}}$ (MPa) [106]	33121.77	Module de Young instantané
$a_c = 2\frac{f_c}{f_{c0}} - 1 + 2\sqrt{\left(\frac{f_c}{f_{c0}}\right)^2 - \frac{f_c}{f_{c0}}}$ [105]	11.23	Paramètre pilotant la courbe de compression avant le pic
$b_c = f_{c0}\frac{l_c}{G_{fc}}\left(1 + \frac{a_c}{2}\right)$ [107]	85.82	Paramètre pilotant la courbe de compression après le pic
$a_t$ [18, 107]	-0.5	Paramètre pilotant la courbe de traction avant le pic
$b_t = f_{t0}\frac{l_c}{G_{ft}}\left(1 + \frac{a_t}{2}\right)$ [107]	204.35	Paramètre pilotant la courbe de traction après le pic
$\Psi$ [109]	40°	Angle de dilatation
$\epsilon$ [110]	0.1	Excentricité du potentiel d'écoulement
$\mu$ [111]	0	Viscosité

#### IV.4.2. Modèle pour la grille métallique

Nous avons modélisé le comportement de la grille métallique suivant un modèle élasto-plastique avec écrouissage isotrope à l'aide d'une loi de comportement utilisant le critère de plasticité de Von Mises. Ce critère est le plus simple car il n'utilise que le second invariant du déviateur des contraintes. Ceci correspond à un ellipsoïde dans l'espace des contraintes principales. En notant  $\sigma_y$  la limite d'élasticité en traction, le critère s'écrit :

$$f(\sigma) = J - \sigma_y \quad (\text{IV.12})$$

Où  $J$  est le second invariant des contraintes, appelé aussi contrainte équivalente de Von Mises. Il peut également s'exprimer en fonction des contraintes principales  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  comme suit :

$$J = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (\text{IV.13})$$

Le déviateur  $S$  est défini en enlevant à la contrainte la pression hydrostatique :

$$S = \sigma - \frac{\text{tr}(\sigma)}{3} I \quad (\text{IV.14})$$

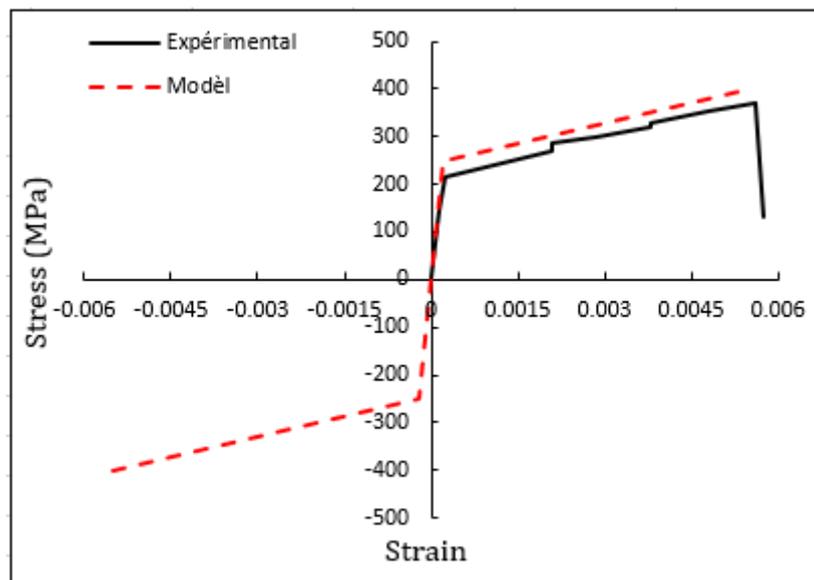
Le comportement du système se résume alors aux équations suivantes :

- Le domaine d'élasticité correspond aux valeurs négatives de  $f$  :  $f < 0$
- La décharge élastique si :  $f = 0$  et  $\dot{f} < 0$
- L'écoulement plastique si :  $f = 0$  et  $\dot{f} = 0$

Les relations expérimentales contrainte-déformation en traction et en compression de la grille métallique [34] et numérique sont représentées sur la Figure IV.9. Les paramètres utilisés pour définir ce modèle sont : le module d'Young ( $E$ ), la limite d'élasticité ( $\sigma_y$ ), la contrainte ( $\sigma_u$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ). Les valeurs des paramètres de la grille utilisée sont indiquées dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2.** Valeurs des paramètres du modèle de la grille métallique utilisée.

Grille métallique	$E$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\nu$	Épaisseur (mm)
	162000	200	380.32	0.21	0.7



**Figure IV. 9.** Relations constitutives pour modéliser la grille métallique.

### IV.4.3. Modèle élastique-orthotrope pour les composites

Les composites orthotropes sont des composites dont le renfort est généralement constitué de fils unidirectionnels croisés à 90° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame, comme le montre la figure IV.10. 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, et la troisième direction orthogonale au plan de la couche est notée 3. (Voir Figure IV.10).

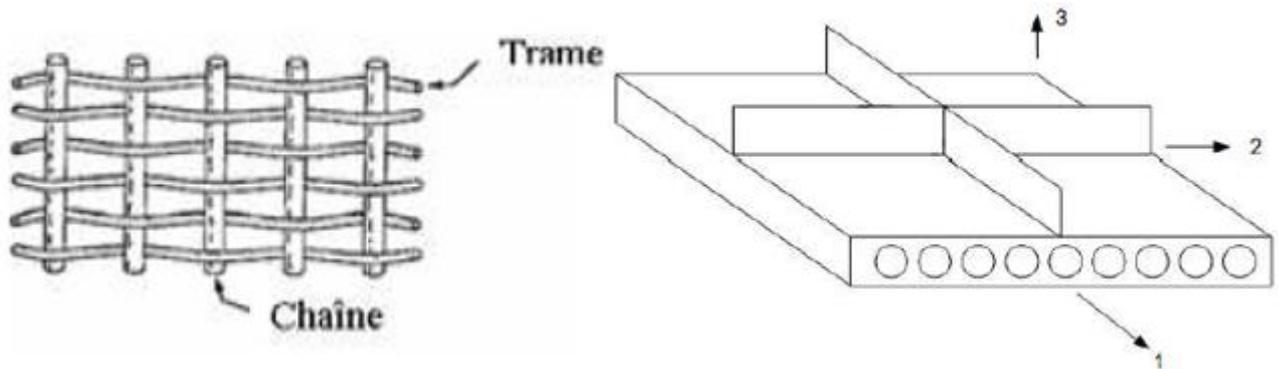


Figure IV.10. Matériau composite bidirectionnel.

Le comportement d'un matériau orthotrope est décrit en introduisant dans la loi de Hooke soit la matrice de rigidité  $C_{ij}$  ou la matrice de souplesse  $S_{ij}$ .

La matrice de rigidité s'écrit, après simplification due à la symétrie par rapport à trois plans de symétrie, comme suit :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15})$$

Les coefficients de la matrice de souplesse peuvent être obtenus par l'inversion de la matrice de rigidité  $S = c^{-1}$ . Dans le cas d'un matériau orthotrope la loi de comportement s'écrit en utilisant soit la matrice de rigidité ou soit la matrice de souplesse comme suit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \text{ ou } \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

Afin d'évaluer la résistance mécanique du GFRP qui correspond à une dégradation irréversible du matériau, les critères de rupture de Hill-Tsai qui prend en compte les résultats expérimentaux, est utilisé.

Ce critère est utilisé pour les composites à fibres continues unidirectionnelles et suppose que le point qui correspond à  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y$ ,  $\sigma_{12} = 0$  est sur la surface de rupture. La ruine du matériau est produite lorsque les contraintes normales  $\sigma_{11}$  et  $\sigma_{22}$  atteignent la tension ultime transversale  $Y$ . L'état limite de contraintes n'est pas atteint tant que l'inégalité est vérifiée, selon la relation (IV.17) :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{X_{LT}}\right)^2 = 1 \quad (\text{IV.17})$$

Le tissu GFRP est généralement supposé avoir un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture. Par conséquent, le type de matériau "Lamina", fourni par ABAQUS [18] pour modéliser les matériaux élastiques orthotropes minces, a été attribué aux propriétés élastiques du tissu GFRP. L'épaisseur mesurée des stratifiés GFRP était de 0,35 mm.

Les données d'entrée nécessaires pour modéliser les composites FRP sont : l'épaisseur des fibres, l'orientation de la direction des fibres, le module d'élasticité FRP dans toutes les directions de l'espace (E1, E2), le module de cisaillement dans trois directions (G12, G13 et G23). Comme les fibres GFRP considérées dans cette étude sont toutes orientées dans la direction du cerceau, la rigidité dans la direction axiale (E3) est négligeable.

Le module d'élasticité (E1) a été mesuré conformément à la norme ASTM D3039 [83], comme indiqué dans la partie expérimentale. Les principales caractéristiques du GFRP utilisé sont représentées dans le tableau IV.3.

**Tableau IV.3.** Valeurs des paramètres du modèle de tissu GFRP.

Tissu GFRP	E1(MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)
	82000	1400	450	420	400

**Tableau IV.4.** Valeur des contraintes du critère de Hill Tsai [112-116]

Contrainte à la rupture	Xt (MPa)	Xc (MPa)	Yt (MPa)	Yc (MPa)	S (MPa)
	1400	430	90	35	50

## IV.5. Procédure de la simulation avec ABAQUS

L'objectif principal de cette étude est de mettre en évidence numériquement l'utilisation des composites FRP comme renfort interne pour améliorer les performances des colonnes en béton soumises à des charges axiales. Par conséquent, le comportement non linéaire contrainte-déformation des cylindres en béton avec des bandes hexagonales en GFRP et des cerces en grille métallique déjà étudié expérimentalement et analytiquement dans les chapitres précédents a été analysé numériquement à l'aide du logiciel éléments finis ABAQUS [18].

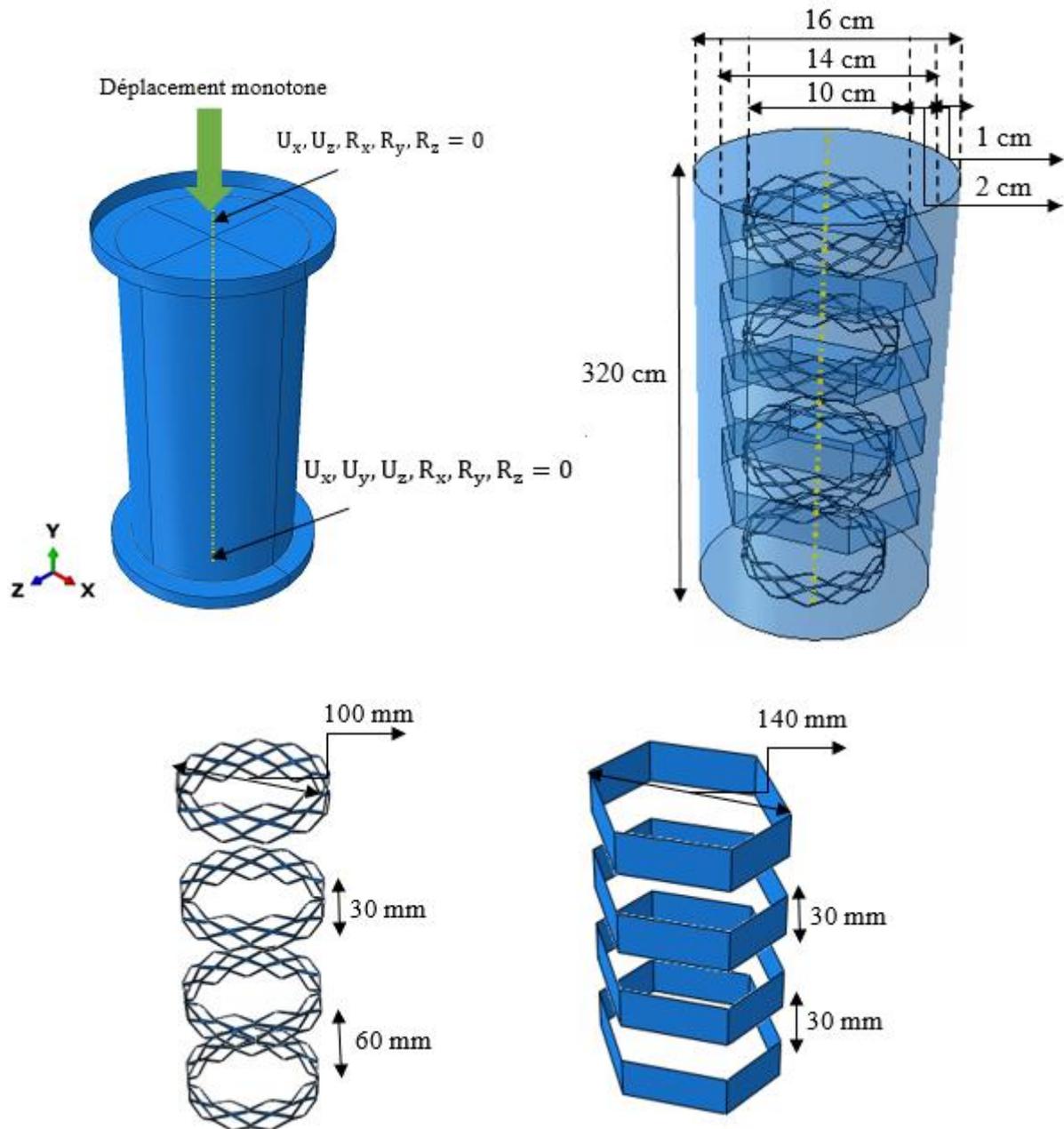
En effet, le modèle numérique a été validé en comparant les résultats des modèles simulés avec les données obtenues à partir du programme expérimental et théorique. L'étude comparative a examiné le comportement contrainte-déformation et les modes de rupture du béton confiné et non confiné.

### IV.5.1. Géométries, conditions aux limites et chargement

Les conditions aux limites et la configuration de chargement dans le modèle numérique sont similaires à la disposition des essais. En effet, pour appliquer les conditions aux limites et le déplacement axial, deux points de référence ont été attribués à deux plaques rigides, le premier point de référence placé sur la plaque rigide supérieure et le deuxième point de référence placé sur la plaque rigide inférieure.

En utilisant l'option du corps rigide (rigid body) disponible dans ABAQUS [18], les points de référence peuvent distribuer uniformément la charge à tous les nœuds des colonnes simulées.

La figure IV.11 montre les conditions aux limites et les dispositions du chargement. Tous les degrés de liberté des points de référence ont été retenus, à l'exception du déplacement vertical du premier point de référence. Les translations horizontales dans le sens de l'axe x et z sont restreintes. L'analyse explicite dynamique a été prise en compte dans la présente étude car les difficultés de convergence avec le modèle CDP sont réduites avec une analyse explicite.



**Figure IV. 11.** Géométries et conditions aux limites du chargement.

#### IV.5.2. Maillage et éléments finis

Le cylindre en béton a été modélisé en utilisant un élément hexaédrique 3D de huit nœuds (Hex8, Abaqus Elements C3D8) et la plaque rigide est modélisée à l'aide d'un élément rigide 3D avec quatre nœuds (R3D4). Par ailleurs, les composites FRP et la grille métallique ont été modélisés à l'aide d'éléments de coque à 4 nœuds (S4R). Sachant que la densité du maillage affecte la fiabilité des résultats de la simulation numérique, une étude de convergence de maillage a été réalisée pour définir la taille optimale des éléments pour des résultats plus précis avec un temps d'analyse raisonnablement court.

Le maillage a été raffiné pour éviter toute discontinuité dans la distribution des contraintes et des souches dans le noyau en béton, les composites FRP et la grille métallique. La taille approximative des bandes GFRP et des bandes de grille métallique est inférieure à la taille de l'élément de cylindre en béton, ce qui a assuré un bon ajustement à la surface de contact. La taille du maillage globale de 10 mm et 5 mm a été adoptée pour le béton et le renforcement respectivement (Figure IV.12). En effet, la courbe de convergence du maillage est représentée sur la figure IV.13.

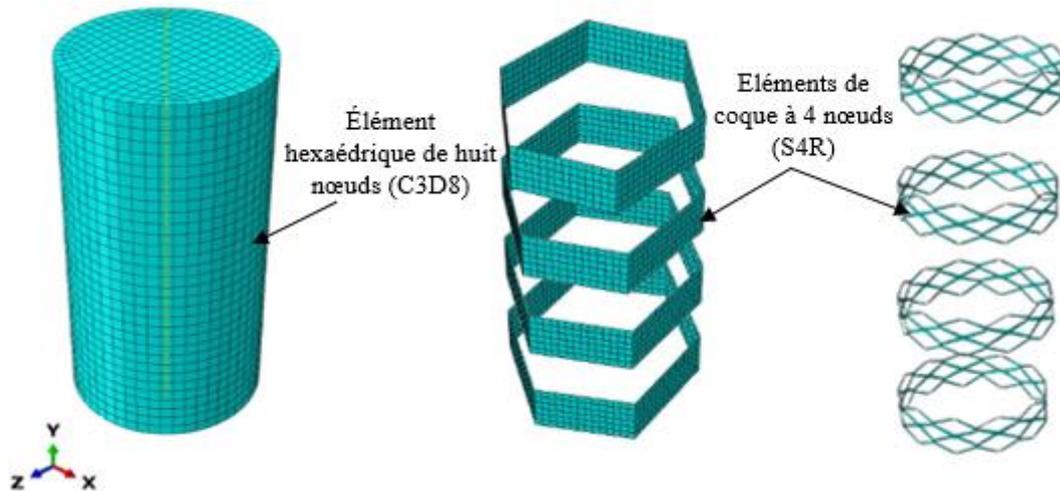


Figure IV. 12. Maillage adopté pour les différents éléments.

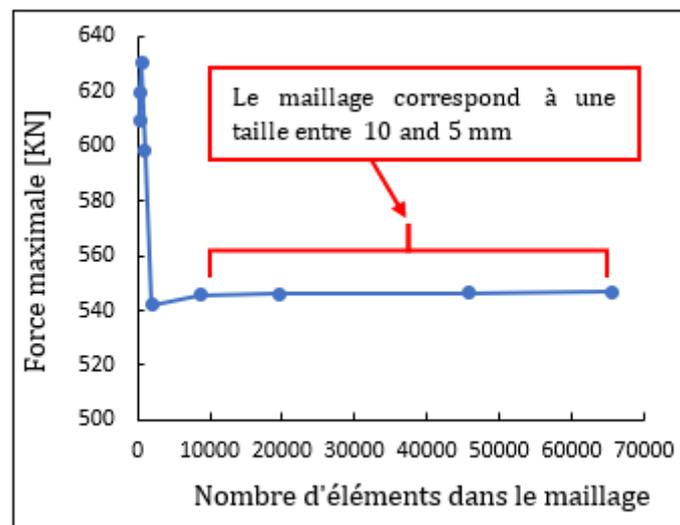


Figure IV. 13. Courbe de convergence de maillage.

### IV.5.3. Modélisation des contacts

L'interaction entre les plaques rigides et le béton a été définie comme une contrainte de liaison de surface (Tie constraint), et l'interaction entre les bandes GFRP et le cylindre en béton a été définie comme une région intégrée (Embedded region).

En ce qui concerne l'interaction entre les plaques rigides supérieures et inférieures, qui enregistrent le déplacement et la réaction de la force, le contact parfait (Rigid body) a été défini. Les détails de la modélisation des contacts sont illustrés sur la figure IV.14.

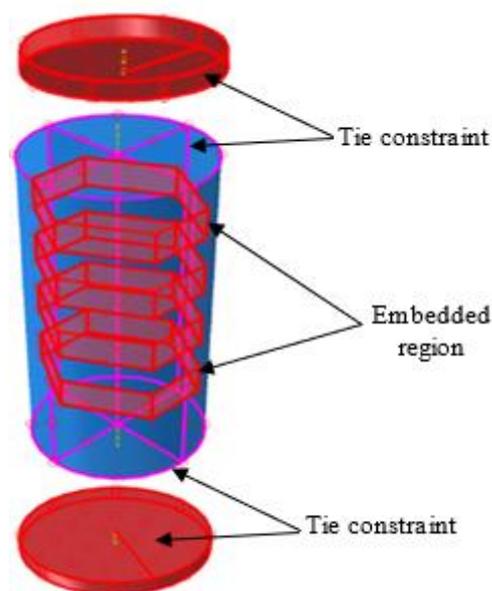
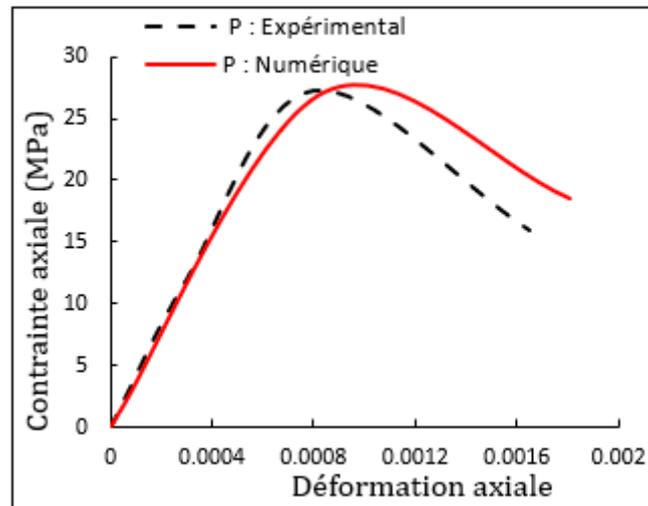


Figure IV. 14. Détails de la modélisation des contacts.

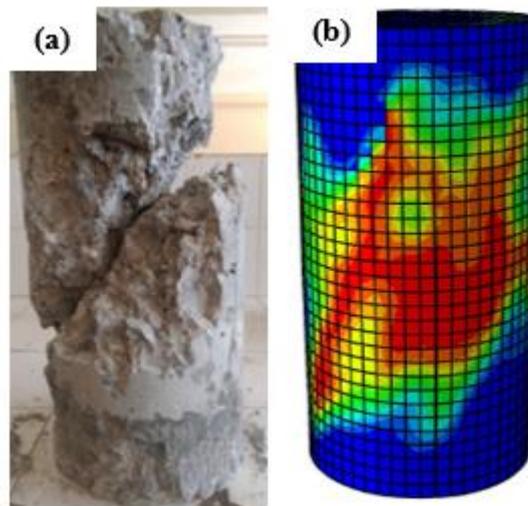
## IV.6. Résultats, validation et confrontation

La validité des modèles constitutifs de matériaux proposés pour le GFRP, le béton et la grille métallique a été vérifiée en utilisant les données expérimentales et analytiques. La réponse contrainte-déformation ainsi que le mode de rupture des cylindres ont été présentés dans cette confrontation.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques des cylindres non confinés sont montrés sur la figure IV.15. La comparaison du mode de rupture du béton obtenu lors des essais et des dommages simulés du béton non confiné est illustrée sur la figure IV.16. En effet, le comportement contrainte-déformation des prédictions numériques et le mode de rupture correspondait à une précision satisfaisante aux résultats des tests expérimentaux.

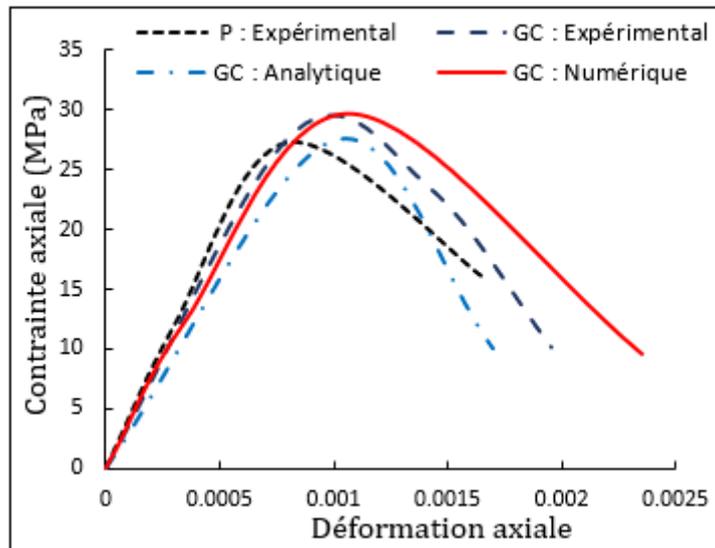


**Figure IV. 15.** Comparaison des courbes contrainte-déformation du béton non confiné.



**Figure IV. 16.** (a) Mode de rupture expérimental du béton non confiné ; (b) Localisation des dommages simulés du béton non confiné.

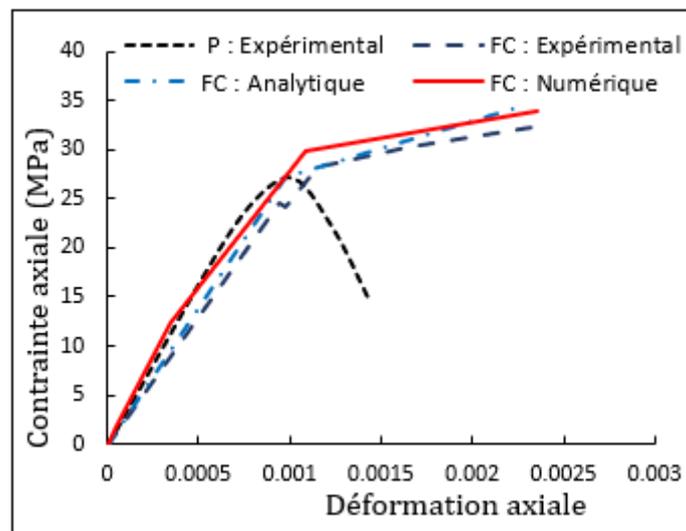
Les Figures IV.17 et IV.18 illustrent la comparaison des résultats expérimentaux, analytiques et numériques des colonnes confinées. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les courbes expérimentales et prédites analytiquement correspondaient de manière acceptable avec les courbes de la simulation numérique. Il est évident qu'à l'exception des cylindres GC, confinés avec la grille métallique, qui ont un comportement similaire au béton non confiné, les autres configurations de confinement ont marqué une augmentation considérable de la résistance à la compression et de la déformation axiale, qui atteint respectivement des gains d'environ 25% à 32%, comparé aux colonnes non confinées.

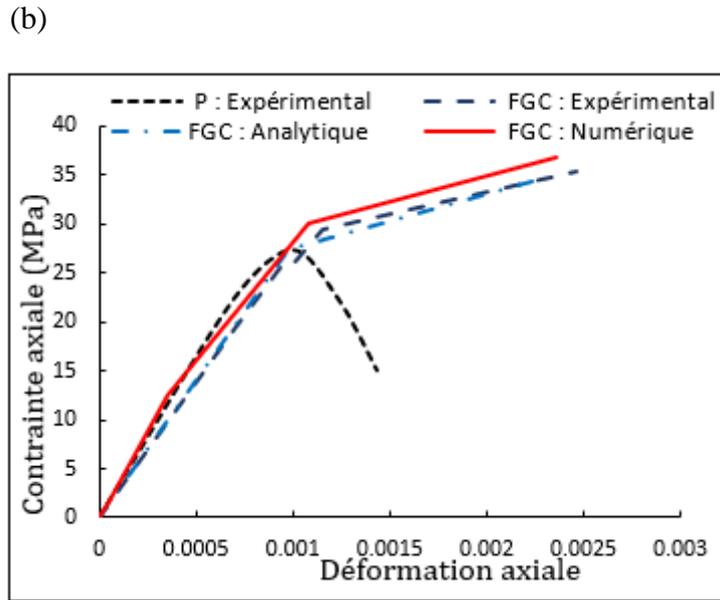


**Figure IV. 17.** Confrontation des courbes contrainte-déformation des colonnes GC.

Cependant, la comparaison des résultats expérimentaux et numériques confirme que les courbes simulées ont tendance à surestimer la contrainte de béton confiné. Cela peut s'expliquer par l'effet du confinement du béton qui n'est pas complètement activé dans les essais, par rapport aux conditions idéales considérées dans les modèles numériques. Cela est probablement dû au contact parfait entre le noyau en béton et le renforcement intégré. En outre, il est clairement observé que la grille métallique n'ajoute pas plus d'efficacité au comportement des colonnes confinées et que seules les bandes en GFRP ont assuré le confinement et l'amélioration des performances du béton.

(a)



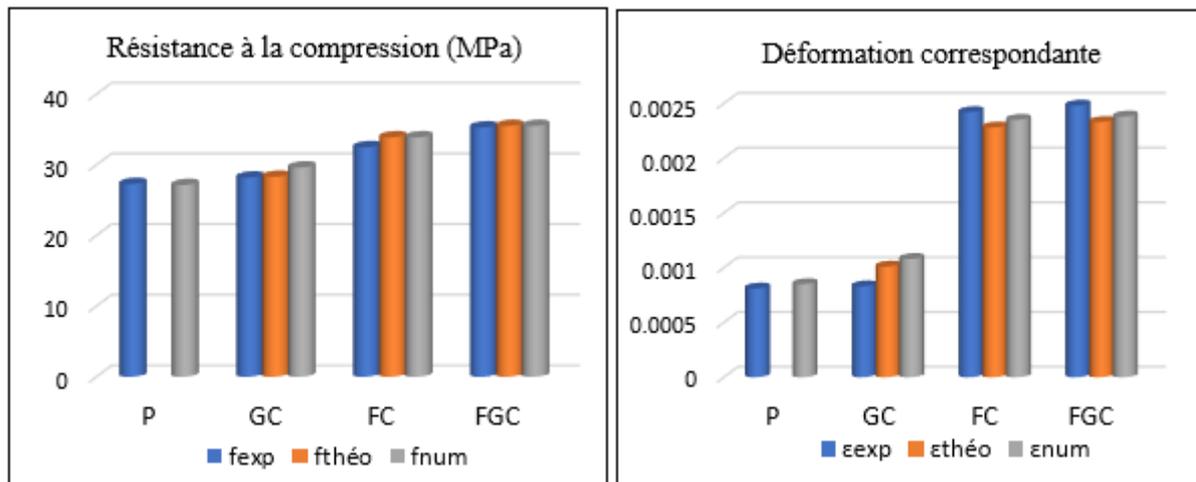


**Figure IV. 18.** Confrontation des courbes contrainte-déformation des colonnes FC et FGC.

Pour plus de clarté, un récapitulatif des résultats expérimentaux, analytiques et numériques de tous les échantillons considérés est rapporté sur le tableau IV.4 et la figure IV.19.

**Tableau IV. 5.** Résistance à la compression numérique, théorique et expérimentale de toutes les colonnes.

Colonnes	Résistance à la compression (MPa)			Déformation correspondante			$f_{num} / f_{exp}$	$f_{num} / f_{théo}$	$\epsilon_{num} / \epsilon_{exp}$	$\epsilon_{num} / \epsilon_{théo}$
	$f_{exp}$	$f_{théo}$	$f_{num}$	$\epsilon_{exp}$	$\epsilon_{théo}$	$\epsilon_{num}$				
(P)	27.3	/	27.15	0.00081	/	0.00085	0.994	/	1.05	/
(GC)	28.2	28.32	29.63	0.00083	0.00101	0.00108	1.05	1.04	1.30	1.07
(FC)	32.5	33.9	33.9	0.00242	0.00228	0.00235	1.05	1.04	0.97	1.03
(FGC)	35.3	35.52	35.52	0.00248	0.00233	0.00238	1.01	1.01	0.96	1.02

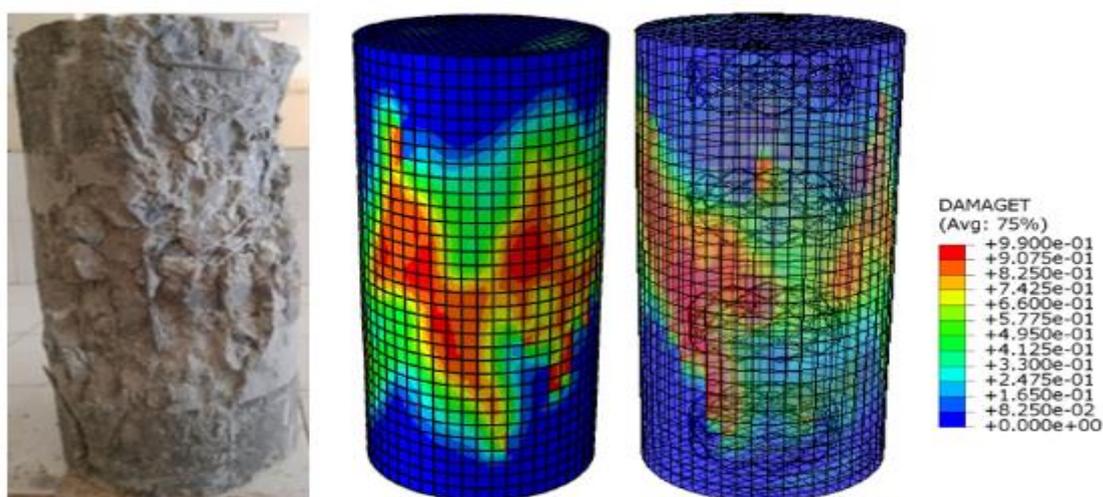


**Figure IV.19.** Confrontation des résultats numériques, théoriques et expérimentaux.

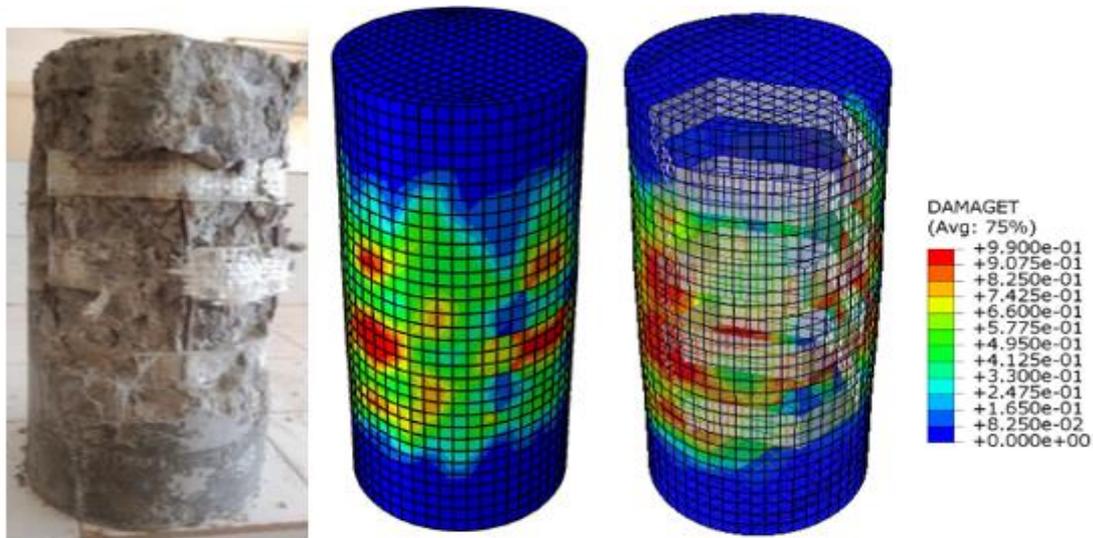
Les modes de ruptures expérimentaux et les cartographies des endommagements pour toutes les colonnes confinées sont présentés sur les figures IV.20, IV.21 et IV.22. La comparaison entre le mode de défaillance expérimental et les dommages obtenus par la simulation indiquent qu'un bon accord est observé. En effet, les modes de rupture des modèles numériques ont été visualisés par les valeurs de dommages à la traction introduites dans le modèle CDP. Il convient également de noter que les modèles ont simulé avec succès la rupture des colonnes confinées (GC, FC et FGC), comme observé dans les essais effectués dans la partie expérimentale.

À partir de la figure IV.20, la plupart du béton d'enrobage des colonnes confinées avec les bandes de grille métallique (GC) s'est effondré car aucun confinement n'a été fourni au béton. Cependant, les colonnes en béton confinées FC (Figure IV.21) et FGC (Figure IV.22) ont connu un peu plus de déformation après l'éclatement du béton d'enrobage car l'effondrement du béton extérieur a été efficacement contrôlé en raison du confinement fourni par le GFRP.

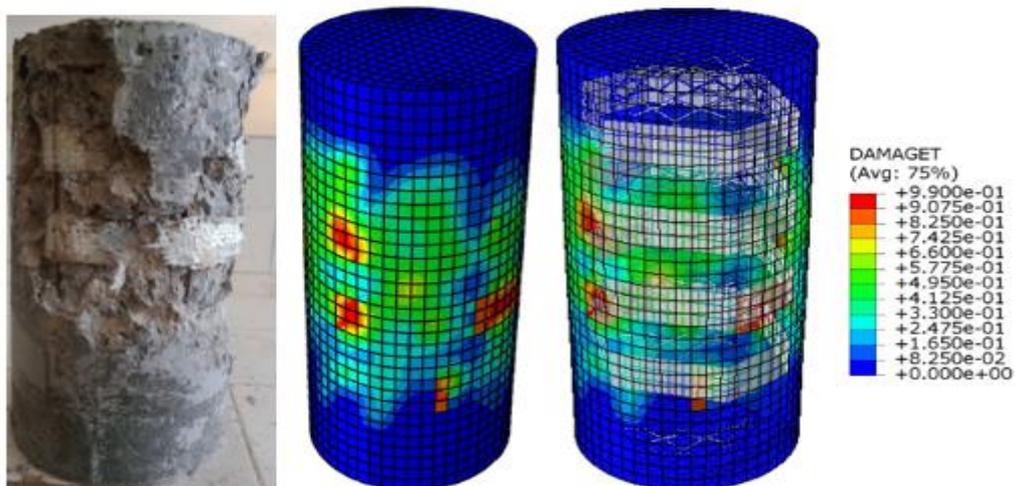
Lorsque le cylindre confiné a été soumis à une compression axiale, le béton se dilate latéralement et cette expansion est retenue par le GFRP. Les bandes FRP ont conduit à éliminer les fissures de traction et ont considérablement réduit les dommages du noyau en béton. Les cylindres non confinés et GC ont présenté des modèles de dommages plutôt similaires et les dommages à la traction se sont propagés sur la circonférence à travers la hauteur de la colonne. On peut observer que la rupture des cylindres est principalement à mi-hauteur et que cette défaillance se produit généralement lorsque la résistance radiale du GFRP est atteinte.



**Figure IV. 20.** Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes GC.



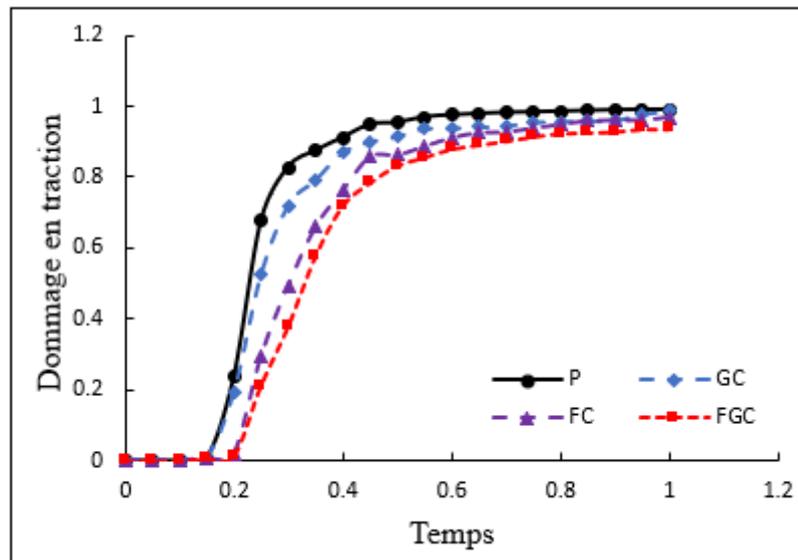
**Figure IV. 21.** Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes FC.



**Figure IV. 22.** Comparaison entre les modes de rupture et les dommages en traction des colonnes FGC.

Pour plus de détail, la confrontation des courbes de l'évolution des dommages en traction par rapport aux temps de calcul des cylindres non confinées (P) et des cylindres confinés (GC, FC et FGC) a été illustrée sur la figure IV.23. On peut clairement voir que les dommages en traction des colonnes confinés sont inférieurs aux dommages en traction des colonnes non confinées. Par exemple, à 30% de la charge, une valeur de 0,9 de dommage en traction correspond à (P), tandis que (GC) (FC) et (FGC) sont caractérisé par des valeurs de 0,8, 0,6 et 0,55 respectivement. En effet, les bandes GFRP réduisent considérablement l'état de fissuration des

échantillons, ce qui entraîne une augmentation de la résistance et des performances mécaniques des colonnes.



**Figure IV.23.** Confrontation des courbes dommage en traction-temps calcul des colonnes

## IV.7. Conclusion

L'objectif du travail mené dans ce chapitre est de proposer et valider un outil numérique capable de reproduire le comportement global et local des colonnes confinées. En conclusion, les résultats de la simulation ont montré une précision acceptable dans la prédiction de la réponse et mettent davantage en évidence l'applicabilité et la fiabilité de la conception et des modèles proposés. En outre, la visualisation des cartographies des dommages en traction et la propagation des fissures dans le béton est très proche du comportement et le mode de rupture réel observé dans l'analyse expérimentale.

Après les résultats encourageants obtenus par les trois approches précédentes sur des colonnes en béton confinées, on se propose dans le chapitre suivant d'appliquer la conception proposée sur une configuration à l'échelle réelles.

## **Chapitre 5**

### **Application sur un poteau en béton armé**

## V.1. Introduction

Dans ce chapitre, le comportement des colonnes en béton armé à grande échelle a été modélisé pour mettre l'accent sur l'applicabilité de la conception proposée sur des colonnes réelles en béton armé partiellement confinées avec des bandes composites FRP soumises à un chargement monotone horizontal. Selon l'étude numérique réalisée dans le chapitre précédent, la grille métallique n'a pas été prise en compte dans le confinement des colonnes en béton armé, car elle n'apporte aucune efficacité en termes de résistance et de ductilité.

Pour affirmer l'applicabilité de la configuration proposée et le modèle par éléments finis, les résultats expérimentaux et les spécifications des poteaux en béton armé conçus et testés sous une charge horizontale monotone par Xie et al. [108] sont utilisés. En effet, la validation de la procédure éléments finis à travers la confrontation des courbes de capacité et la visualisation des endommagements a été effectuée en détail.

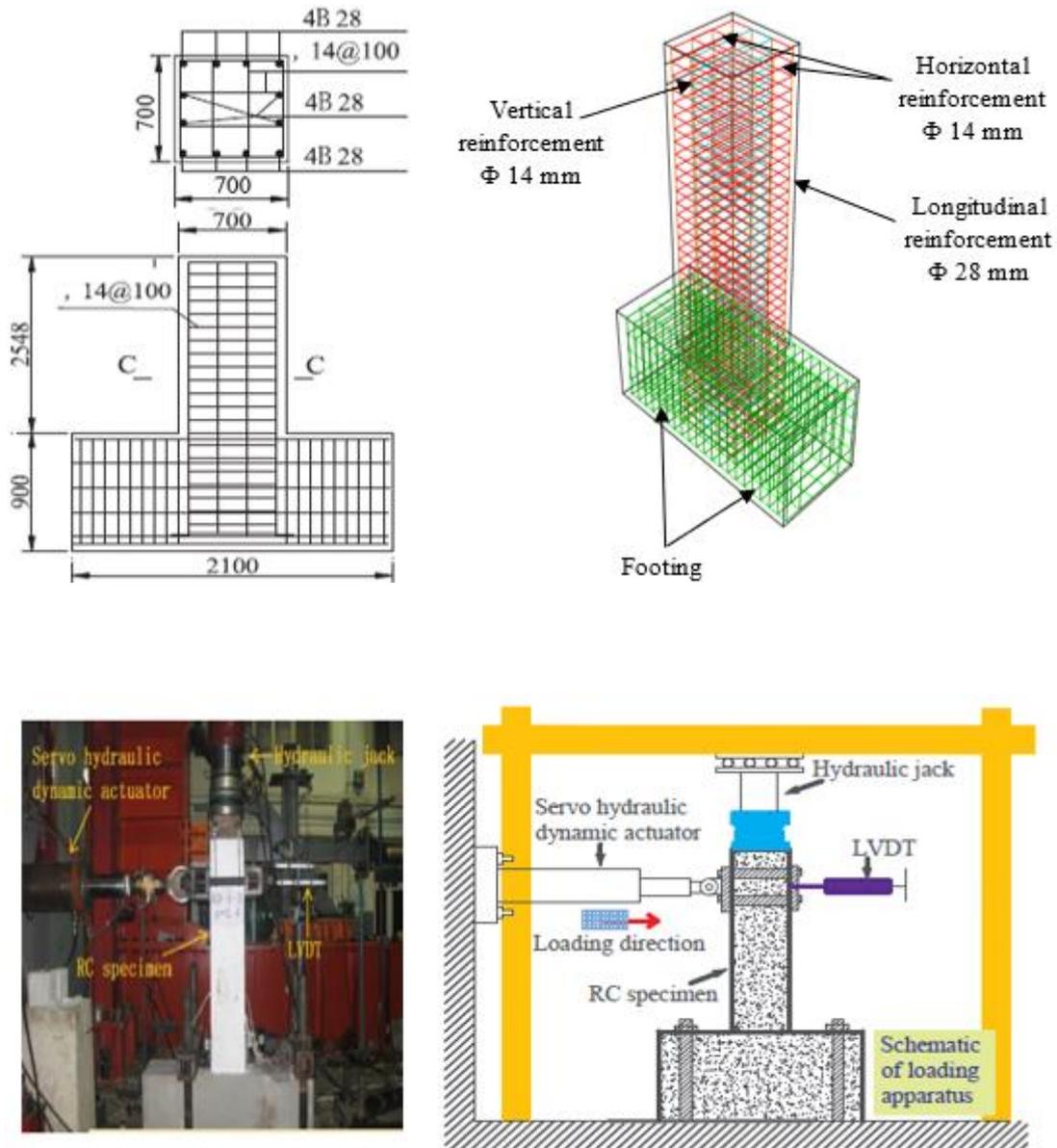
Enfin, une analyse paramétrique a été menée pour évaluer les effets de l'épaisseur des bandes FRP et leur espacement respectif sur le mode de rupture et la capacité de charge latérale des colonnes confinées en se basant sur les travaux de [117-120].

## V.2. Description du modèle simulé

Dans cette partie, la conception de confinement proposée pour les cylindres en béton partiellement confinés par intégration des bandes hexagonales GFRP a été étudiée sur un poteau réel en béton armé dimensionné et testé par Xie et al [108]. En effet, deux dispositions du chargement appliqué ont été considérées par les auteurs [108], à savoir : charge latérale appliquée au sommet du poteau pour les configurations non élancées, et charge appliquée au sommet de la fondation des poteaux élancés.

Pour cela, le modèle numérique proposé a été validé à l'aide des poteaux élancés, sous charges latérales monotones appliquée au sommet de la fondation, dénommés (W-0.4-7) par les auteurs. Cependant, toutes les autres configurations ont été réalisées sur des poteaux avec une charge horizontale appliquée au sommet de la colonne.

Les poteaux en béton armé étudiés sont caractérisés par une section transversale de  $700 \times 700$  mm, et 2548 mm de hauteur. La colonne a été connectée verticalement à une semelle solide avec les dimensions suivantes  $900 \times 700 \times 2100$  mm. Les détails des spécimens testés et modélisés sont représentés sur la figure V.1 et le tableau V.1.



**Figure V.1.** Géométrie et détail de renforcement du poteau testé et simulé [108].

**Tableau V.1.** Caractéristiques géométriques et mécanique du poteau simulé.

<b>Caractéristiques géométriques du poteau</b>	Largeur (mm)	$b = 700$
	Longueur (mm)	$h = 700$
	Hauteur (mm)	$H = 2548$
	Enrobage du béton (mm)	$c = 35$
<b>Caractéristiques géométriques des armatures</b>	Diamètre des armatures longitudinales (mm)	28
	Diamètre des cadres (mm)	14
	Espacement des cadres (mm)	$s = 100$
<b>Caractéristiques mécaniques</b>	Charge axiale de compression (KN)	$N = 5782$
	Résistance à la compression du béton (MPa)	$f_{cu} = 29.5$

Les simulations réalisées visent à mettre en évidence la contribution du renforcement en FRP intégrés dans la matrice béton sur la capacité latérale des colonnes en béton armé. Pour cela, quatre modèles éléments finis sont étudiés sous charges horizontales et verticales.

Le premier modèle est celui de la colonne en béton armé, soumise à une charge horizontale appliquée au sommet de la semelle, considérée comme un échantillon de référence et dénoté (RC-1) dans la présente étude. Le deuxième modèle est le même échantillon, dans lequel la charge horizontale est appliquée au sommet de la colonne, dénotée (RC-2).

Les deux autres modèles, traitent le confinement partiel avec des bandes FRP incorporées sur la surface externe des armatures transversales en acier, dénommé (FRC-1) lorsque la charge est appliquée au sommet de la semelle, et (FRC-2) lorsque la charge est appliquée au sommet du poteau. La désignation des différents échantillons considérés dans cette partie est récapitulée dans le tableau V.2.

La nuance des aciers utilisés pour le renforcement longitudinal sont des HRB400 avec un diamètre de 28 mm, le renforcement transversal est de de nuance HPB300 et un diamètre de 14 mm. Cependant, les bandes composites GFRP sont de 100 mm de largeur et 0,35 mm d'épaisseur.

**Tableau V.2.** Désignation des spécimens considérés.

Type d'éprouvette	Nombre d'éprouvette		Type de béton
RC (colonne en béton armé)	RC-1		Béton armé avec une charge horizontale appliquée au sommet de la semelle
	RC-2		Béton armé avec une charge horizontale appliquée au sommet de la colonne
FRC-1	Groupe I (variation de l'épaisseur du FRP 0.35, 0.7, 1.05 et 1.4)	FRC-1- (épaisseur)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la semelle
FRC-2		FRC-2- (épaisseur)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la colonne
FRC-2-0.35	Groupe II (variation de l'espacement entre les bandes FRP 100, 200, 300 et 400)	FRC-2-0.35- (espacement)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la colonne avec différents espacements des bandes FRP pour une épaisseur de 0.35 mm
FRC-1-0.7		FRC-2-0.7- (espacement)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la colonne avec différents espacements des bandes FRP pour une épaisseur de 0.7 mm
FRC-2-1.05		FRC-2-1.05- (espacement)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la colonne avec différents espacements des bandes FRP pour une épaisseur de 1.05 mm
FRC-2-1.4		FRC-2-1.4- (espacement)	Béton armé confiné avec FRP, charge appliquée au sommet de la colonne avec différents espacements des bandes FRP pour une épaisseur de 1.4 mm

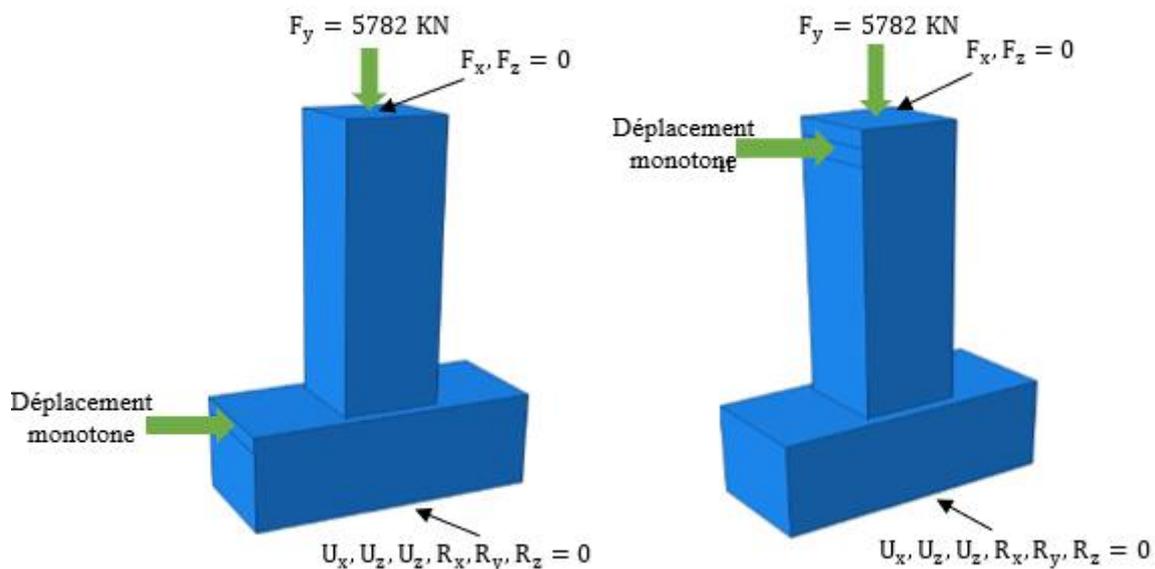
### V. 3. Procédure de la simulation et maillage

Une analyse non linéaire des colonnes en béton armé chargées latéralement, confinées avec des bandes GFRP est réalisée. Les conditions aux limites et de chargement du modèle sont similaires à celles de la configuration des essais expérimentaux, deux étapes ont été définies pour appliquer les charges comme le montre la figure V.2. Sur la base du programme expérimental réalisé par Xie et al [108], la colonne a été chargée dans la première étape avec une charge axiale de magnitude de 5782 kN, cette charge a été maintenue constante dans la deuxième étape. Une charge horizontale monotone a été défini dans la deuxième étape.

Le béton a été modélisé comme une section solide homogène tridimensionnelle (C3D8), tandis qu'un élément 3D de deux nœuds (T3D2) est utilisé pour simuler les barres longitudinales et transversales avec des sections de 615,44 mm<sup>2</sup> et 153,86 mm<sup>2</sup>, respectivement.

Une plaque rigide au sommet du poteau est utilisée pour assurer une distribution uniforme de la charge axiale. La plaque rigide est modélisée à l'aide d'un élément rigide 3D avec quatre nœuds (R3D4).

Le modèle est analysé à l'aide d'une option de contrôle de déplacement, avec un déplacement latéral est appliqué au milieu d'une autre plaque rigide, qui est définie comme le deuxième point de référence. Le mouvement de rotation et de translation des colonnes a été restreint à l'exception du déplacement horizontal dans le sens de l'axe x (la translation horizontale dans le sens de l'axe z, la translation verticale dans le sens de l'axe y ainsi que la rotation des axes X, Y et Z sont restreintes).



**Figure V. 2.** Condition aux limites et de chargement des poteaux.

Les composants et les maillages utilisés dans les modèles numériques sont représentés sur la figure V.3. Pour des résultats plus précis, les tailles optimales des éléments finis pour la colonne et sa semelle ont été obtenues à partir d'une étude de sensibilité de maillage, comme illustré sur les figures V.4 et V.5.

Les résultats de l'étude de convergence suggèrent qu'un maillage approprié serait un maillage raffiné avec la taille de 20 mm pour la colonne et une taille de 70 mm pour la semelle solide. Le bande GFRP et le renforcement en acier ont été maillés de manière uniforme, avec une taille approximative de 20 mm et 50 mm respectivement.

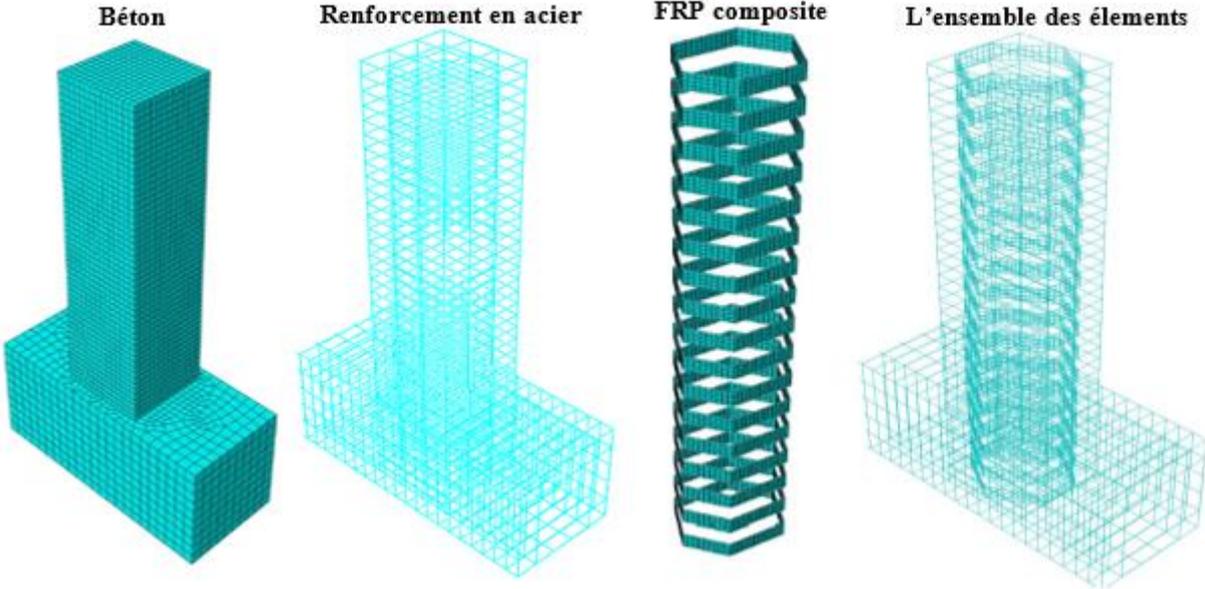


Figure V. 3. Modèle élément fini et maillage du poteau.

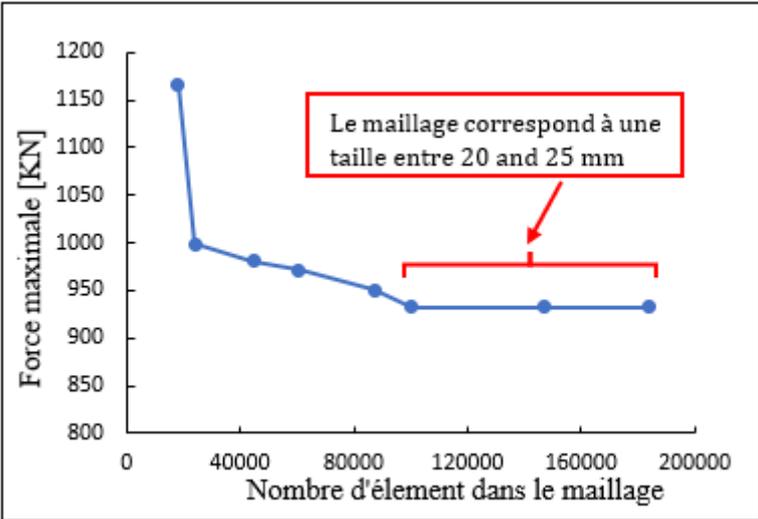
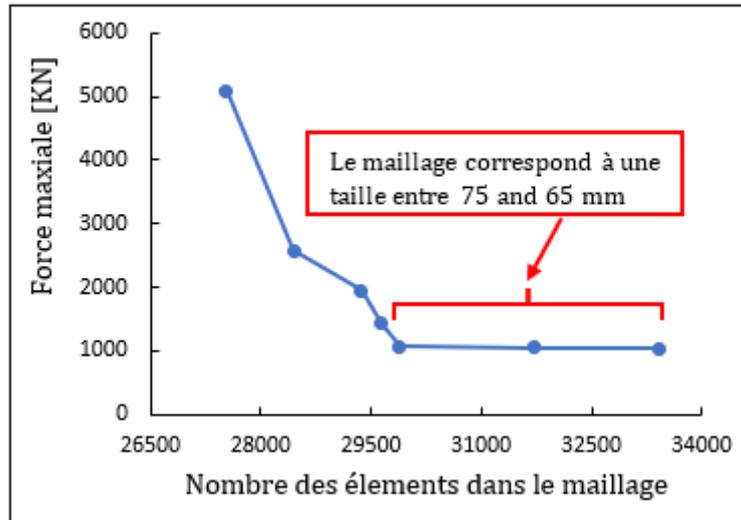


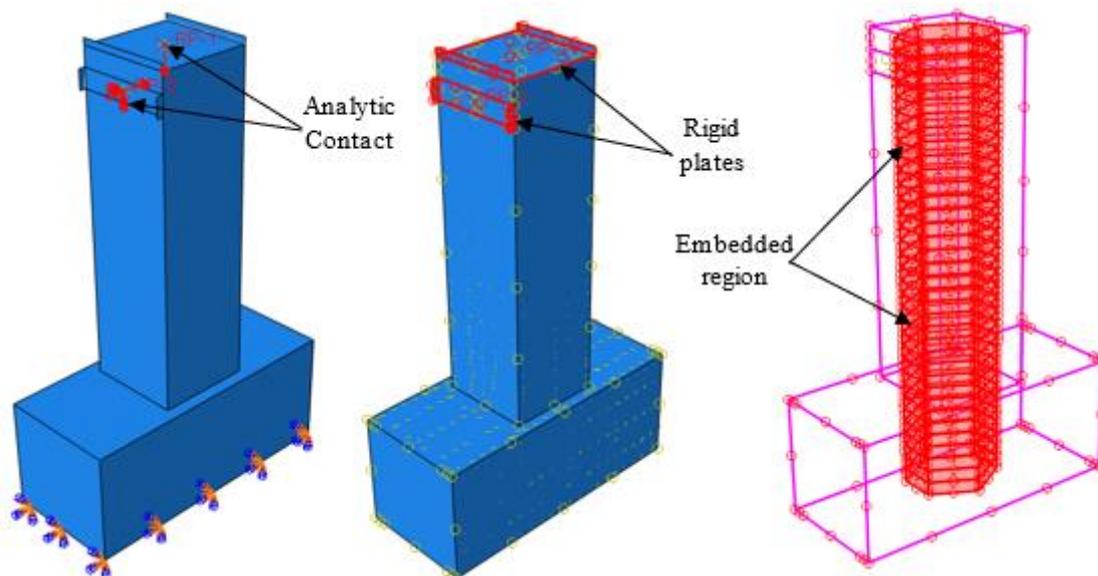
Figure V. 4. Courbe de convergence de maillage de la semelle.



**Figure V. 5.** Courbe de convergence de maillage du poteau.

### V.3.1. Modélisation des contacts

Un contact surfacique de liaison a été utilisé pour simuler l'interaction entre les plaques rigides et les surfaces latérales du poteau (Figure V.6. B). Cependant, l'interaction entre les points de référence et les plaques rigides a été définie comme un contact rigide (rigid body, voir Figure V. 6. A). En ce qui concerne l'interaction entre les renforcements internes et le noyau en béton, l'option embedded region qui simule une action de liaison complète entre le béton et les barres en acier / bandes GFRP a été définie. La surface intégrée étant le renforcement en acier et les bandes GFRP et la région maître est la surface de la colonne en béton (Figure V.6 .C).



**Figure V. 6.** Modélisation par éléments finis de la colonne FRC-2.

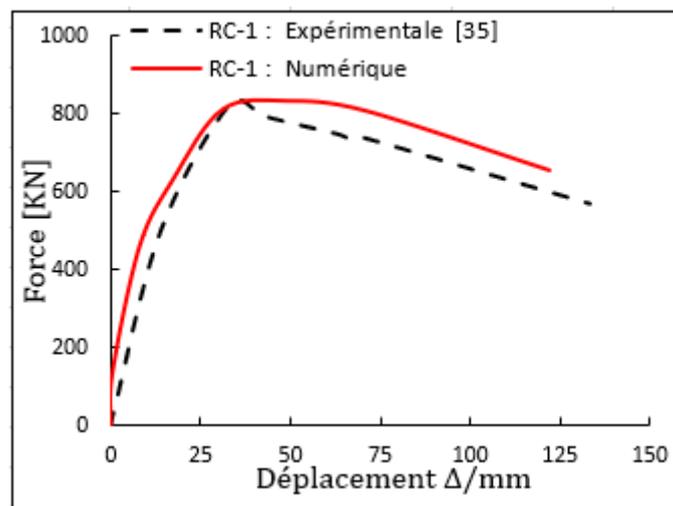
## V.4 Résultats et validation

Les résultats numériques prédits ont été validés à l'aide des résultats des essais. En effet, les résultats expérimentaux de la colonne (RC-1), y compris son mode de rupture, ont été utilisés dans cette comparaison. La figure V.7 montre l'évolution des courbes force-déplacement obtenues par les deux approches, qui correspondaient bien les uns aux autres.

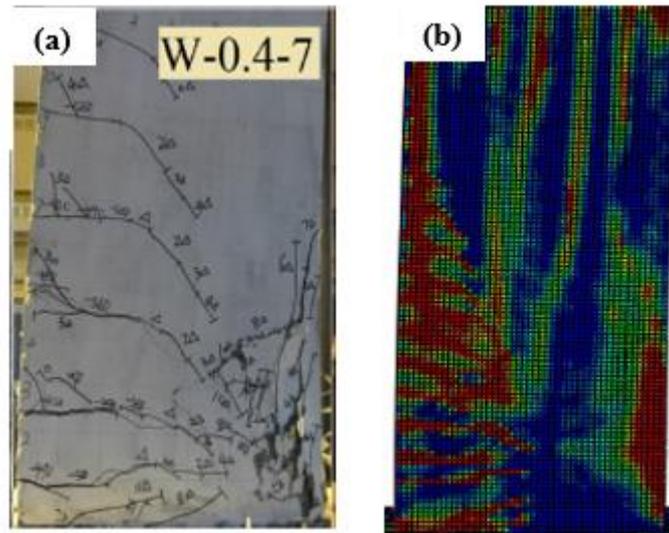
### V.4.1. Validation du modèle simulé

La capacité de charge du chargement latérale maximale prévue par la simulation est de 831,76 KN, tandis que les expériences donnent une valeur moyenne de 826,6 KN. La différence entre les deux valeurs est probablement liée aux conditions parfaites de la modélisation, à savoir l'interface entre tous les matériaux considérés. Globalement, la confrontation des résultats numériques en termes de courbe force-déplacement et de mode de rupture montre une bonne corrélation avec ceux des essais.

Il est clairement observé sur la figure V. 8 que les lignes de rupture de la colonne, obtenues à partir des dommages à la traction et de l'échantillon donné par les essais, sont plutôt similaires. En tant que conclusion préliminaire, les figures V.7 et V.8 indique que les résultats simulés et ceux des essais sont en concordance satisfaisante, montrant ainsi la validation des modèles éléments finis proposés.



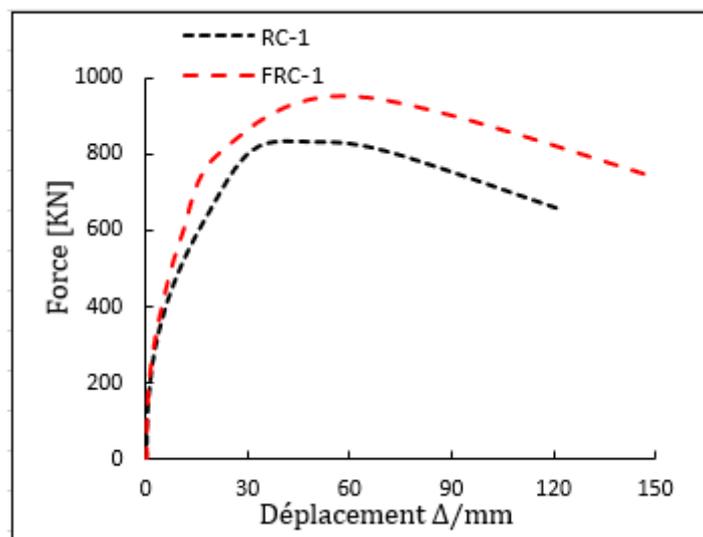
**Figure V. 7.** Confrontation des courbe force-déplacement expérimentale et numérique.



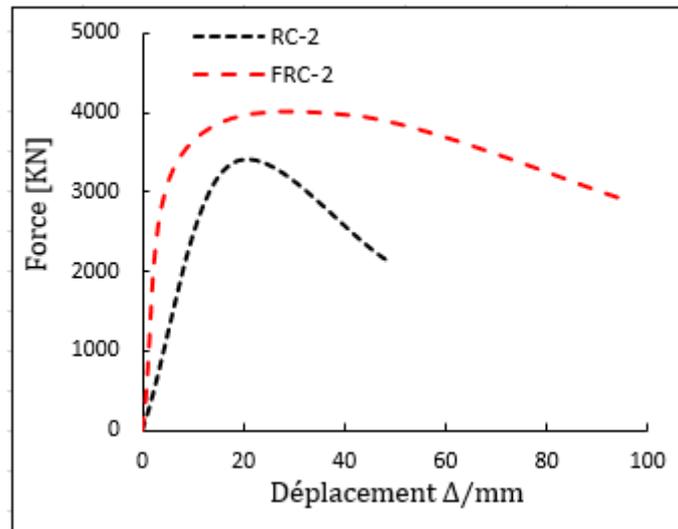
**Figure IV. 8.** (a) Mode de rupture obtenu des essais ; (b) Mode de rupture du modèle numérique.

#### V.4.2. Efficacité du confinement interne

Les figures V.9 et V.10 montrent la comparaison des courbes force-déplacement obtenues à partir de la simulation numérique des colonnes confinées (FRC-1) et (FRC-2) par rapport aux colonnes non confinées. Les courbes de capacité de charge confirment l'efficacité de confinement FRP en termes de comportement global sous charge latérale. En effet, un gain moyen de 15% et 19% en termes d'amélioration de la charge est respectivement enregistré pour (FRC-1) et (FRC-2).



**Figure V. 9.** Confrontation des courbes force-déplacement des colonnes confinées (FRC-1), chargées au sommet de la semelle.

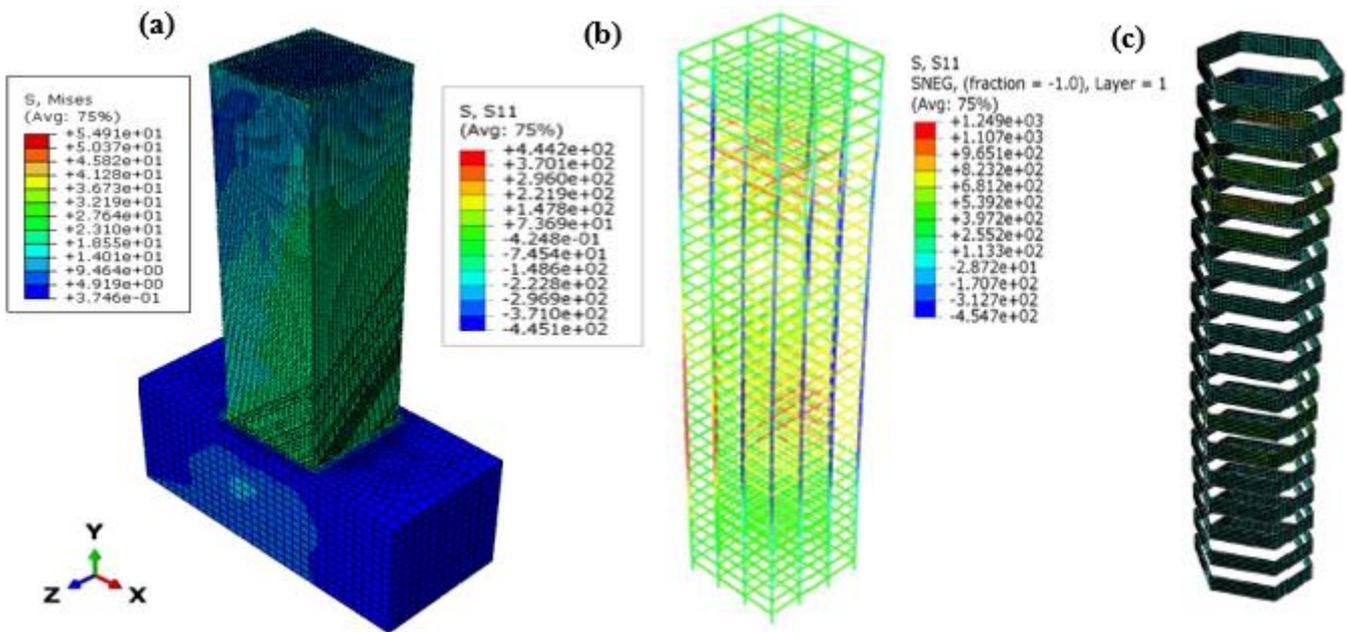


**Figure V. 10.** Confrontation des courbes force-déplacement des colonnes confinées (FRC-2), chargées au sommet du poteau.

Malgré le confinement assuré par les barres de renforcement longitudinales et transversales, les cerces FRP ont fourni une efficacité de confinement au béton. La quantité de bandes GFRP est largement inférieure à celle des barres de renforcement, ce qui peut réduire l'effet de confinement des colonnes en béton armé. En effet, la capacité de charge latérale et la ductilité des colonnes confinées peuvent être davantage améliorées en augmentant la quantité et le nombre de couches des composites GFRP.

#### V.4.3. Analyses des cartographies

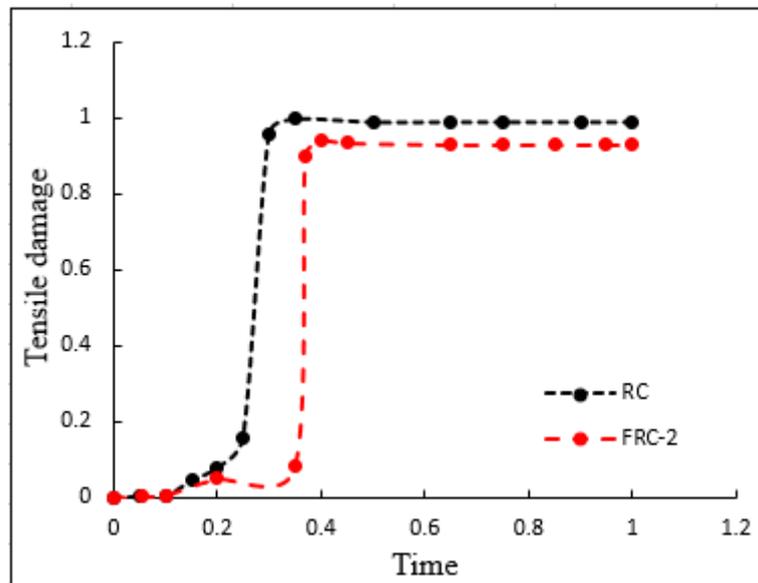
La figure V.11 illustre les cartographies de la distribution des contraintes sur les différents composants des colonnes confinées. Avec l'activation de l'effet de confinement, des contraintes de traction plus élevées ( $> 1200$  MPa) ont été observées dans les bandes GFRP intégrées. En effet, la contrainte de traction ultime dans le noyau en béton diminue avec la diminution de l'espacement des bandes GFRP sur les régions de confinement. Les barres en acier de la colonne (RC) non confinée et la colonne (FRC) confinée ont marqué des contraintes de traction maximales de 439,2 MPa et 454,7 MPa, respectivement. Tandis que les barres de la zone comprimée supportent des contraintes maximales de 75,03 MPa et 225,2 MPa.



**Figure V. 11.** Distribution des contraintes principales ; (a) le béton ; (b) le renforcement en acier ; (c) les cerces FRP.

Il convient de noter que les contraintes de compression maximales dans le renforcement longitudinal ont été développées dans la région centrale de la colonne, tandis que les contraintes de traction maximales sont sur la partie supérieure des colonnes.

Pour plus de clarté, la confrontation des courbes : dommages en traction vs. temps d'application du chargement des colonnes non confinées (RC) et confinées (FRC-2) est illustrée sur la figure V.12. On peut clairement déduire que le taux d'endommagement des colonnes confinées est réduit par rapport à celui des colonnes non confinées. Par exemple, à 30% de la charge maximale, une valeur de 0,9 de dommage en traction correspond à (RC-2), tandis que (FRC-2) est caractérisé par une valeur de 0,2. En effet, le confinement activé par la présence des bandes GFRP réduit considérablement l'état d'endommagement du spécimen. De plus, les cerces GFRP intégrés diminuent les dommages concentrés au voisinage de la des colonnes, ce qui entraîne une augmentation de la résistance, en conséquence, les performances mécaniques des colonnes sont améliorées.



**Figure V. 12.** Confrontation de la courbe dommage en traction-temps des colonnes non confinées (RC) et les colonnes confinées (FRC-2).

### V.5. Étude paramétrique numérique

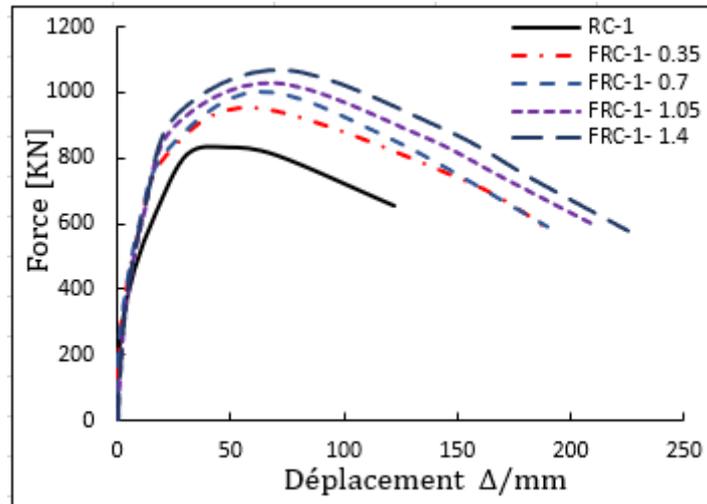
Sur la base du modèle élément fini validée et en utilisant la même configuration de la section précédente, une étude paramétrique a été réalisée. L'objectif de cette investigation est d'analyser l'influence de différents paramètres, qui n'ont pas été étudiés dans la partie expérimentale. En outre, 24 modèles numériques ont été développés pour évaluer l'effet de l'épaisseur du tissu GFRP en modifiant le nombre de couches (1, 2, 3 couches et 4 couches), ainsi que l'étude de l'effet de l'espacement des cerces GFRP.

En effet, les modèles numériques ont été divisés comme suit : le groupe 1 comprend les modèles (FRC-1) et (FRC-2), qui étudie l'influence de l'épaisseur des bandes GFRP. Le groupe 2 étudie l'influence de l'espacement entre les bandes GFRP en utilisant le modèle (FRC-2). Quatre configurations d'espacement des bandes ont été envisagées, à savoir ; 100 mm, 200 mm, 300 mm et 400 mm.

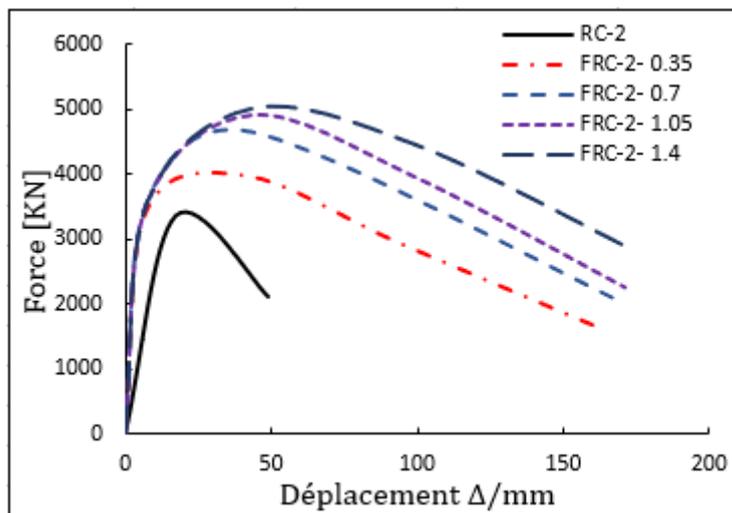
#### IV.5. 1. Influence de l'épaisseur des bandes GFRP

L'effet de l'épaisseur des bandes GFRP sur le comportement des colonnes du groupe 1 (FRC-1 et FRC-2) a été étudié. Des épaisseurs de 0,7 mm, 1,05 mm et 1,4 mm ont été prises en compte, tandis que tous les autres paramètres ont été maintenus constants. Les courbes force-déplacement selon les épaisseurs considérées de FRC-1 et FRC-2 sont représentées sur les figures V.13 et V.14. À partir des figures, on peut clairement constater qu'en augmentant la

quantité de GFRP, la capacité de charge latérale des colonnes confinées augmente, accompagné d'une augmentation considérable de la ductilité. À mesure que l'épaisseur des composites augmente, la pression de confinement fournie par les bandes GFRP augmente, entraînant ainsi une amélioration de la déformabilité latérale du béton jusqu'à la rupture. Par conséquent, la capacité de charge des colonnes dépend fortement de la quantité des composites.



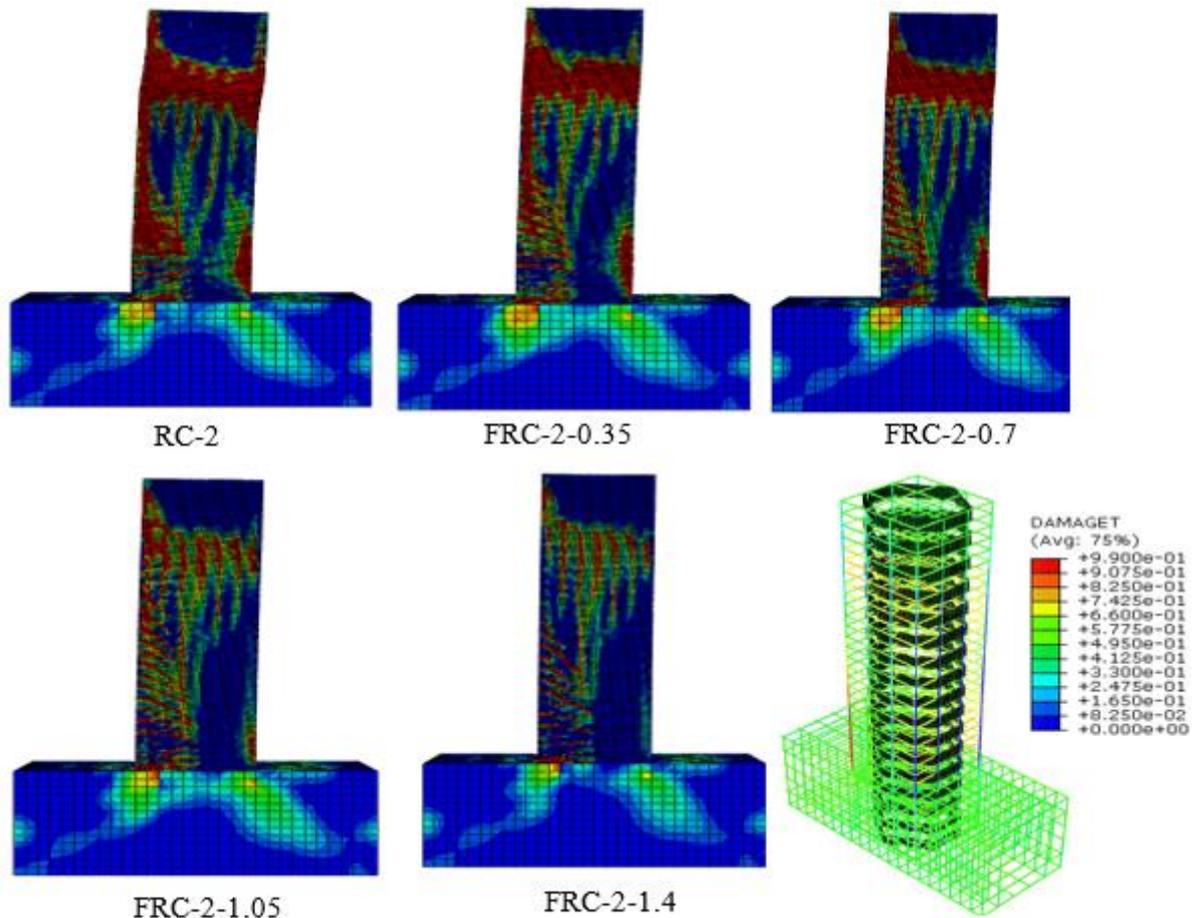
**Figure V. 13.** Courbe force-déplacement selon l'épaisseur des bandes GFRP du modèle (FRC-1).



**Figure V. 14.** Courbe force-déplacement selon l'épaisseur des bandes GFRP du modèle (FRC-2).

La figure V.15 représente la localisation des dommages en traction dans la matrice béton en fonction des épaisseurs des FRP correspondant à un temps de chargement de 0,35 s. Le modèle non confiné (RC) a été globalement endommagé. Cependant, l'incorporation de bandes FRP réduit considérablement et progressivement l'état de fissuration des colonnes confinées et

permet d'éviter la rupture prématurée. En effet, pour tous les modèles éléments finis de poteaux confinés, l'épaisseur de FRP de 1,4 mm donne un état de dommage et une capacité de charge plus améliorés.



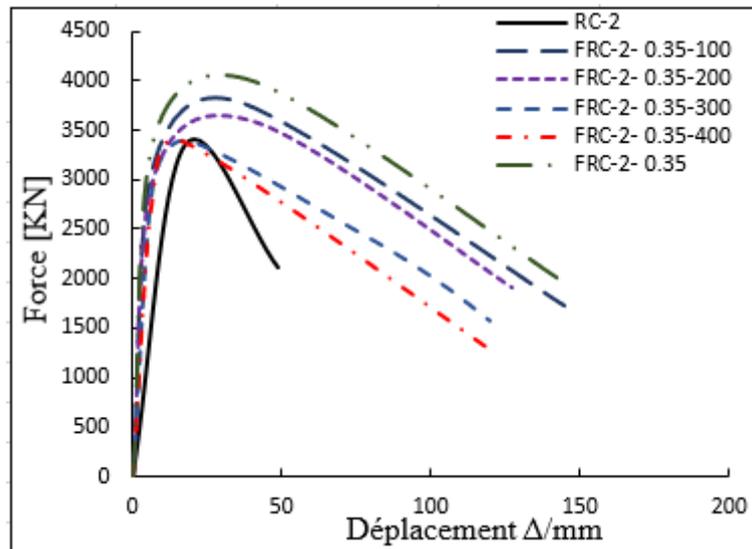
**Figure V. 15.** Représentation des dommages en traction du béton pour les différentes épaisseurs du GFRP.

#### IV.5. 2. Influence de l'espacement des bandes GFRP

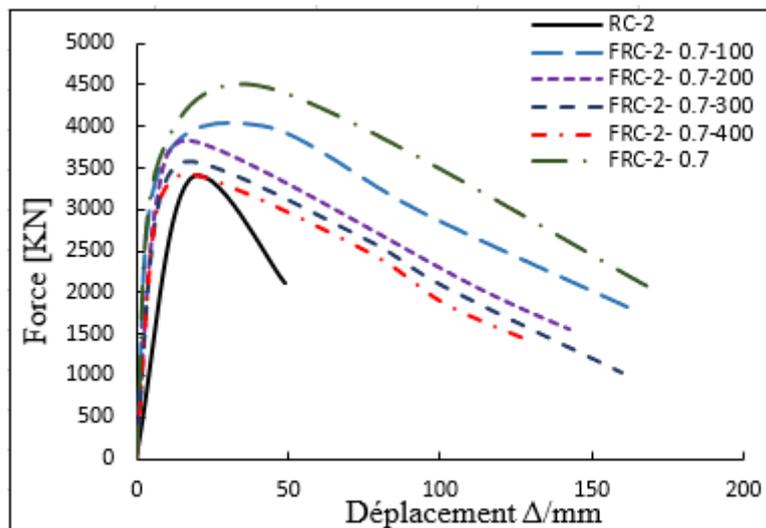
L'effet d'espacement des bandes GFRP sur les colonnes (FRC-2) a été étudié pour chaque épaisseur de FRP considérée dans l'analyse paramétrique précédente. Pour cela, quatre espacements de bandes GFRP ont été pris en compte :  $S = 100$  mm,  $S = 200$  mm,  $S = 300$  mm et  $S = 400$  mm et le confinement total avec  $S = 0$  mm. Tous les autres paramètres ont été maintenus constants. Les courbes de capacité en fonction de la configuration d'espacement considérée de (FRC-2-0.35) et (FRC-2-0.7) sont présentées dans les Figures V.16 et V.17.

La confrontation des résultats montre que la diminution de l'espacement des bandes GFRP de 400 à 100 mm améliore considérablement la capacité de chargement des colonnes confinées d'environ 12%. De même, pour les résultats des modèles (FRC-2- 0,7-100), (FRC-2- 0,7-400),

une amélioration de 16% par rapport à 0,35 mm d'épaisseur est observée. Il est évident que la résistance des colonnes confinées augmente avec la réduction de l'espacement, plus l'espacement est plus petit et tend à zéro la résistance au béton est plus grande.



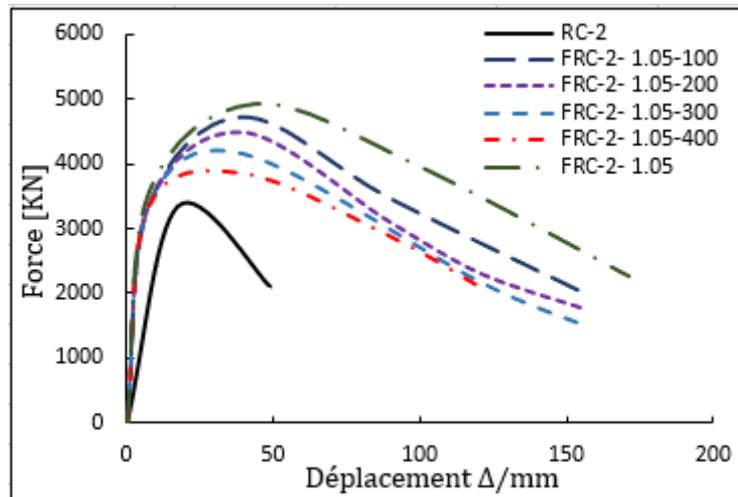
**Figure V. 16.** Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 0.35mm des FRP.



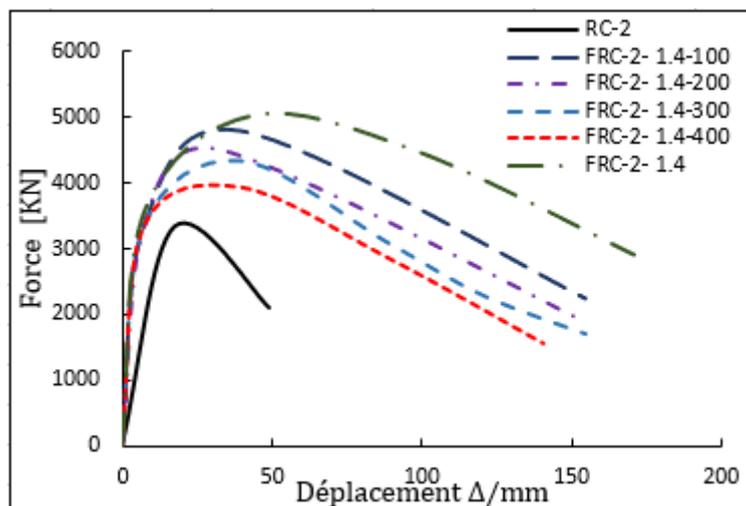
**Figure V. 17.** Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 0.7 mm des FRP.

Les Figures V. 18 et V. 19 présentent la comparaison des courbes force-déplacement des modèles (FRC-2-1.05) et (FRC-2-1.4) selon l'espacement des bandes. La comparaison confirme que l'augmentation de l'épaisseur du GFRP combinée avec la diminution de l'espacement améliore considérablement la capacité de charge des colonnes confinées. En effet, à mesure que

l'espacement diminuait, l'expansion latérale du béton a été empêchée, ce qui a considérablement affecté le comportement des colonnes renforcées et a conduit à une résistance et une ductilité améliorée. Cependant, lorsque l'espacement a tend vers zéro et que la quantité de composite FRP est plus élevée (espacement de 100 mm et l'épaisseur 1,4 mm), l'effet de confinement total est quasiment important.



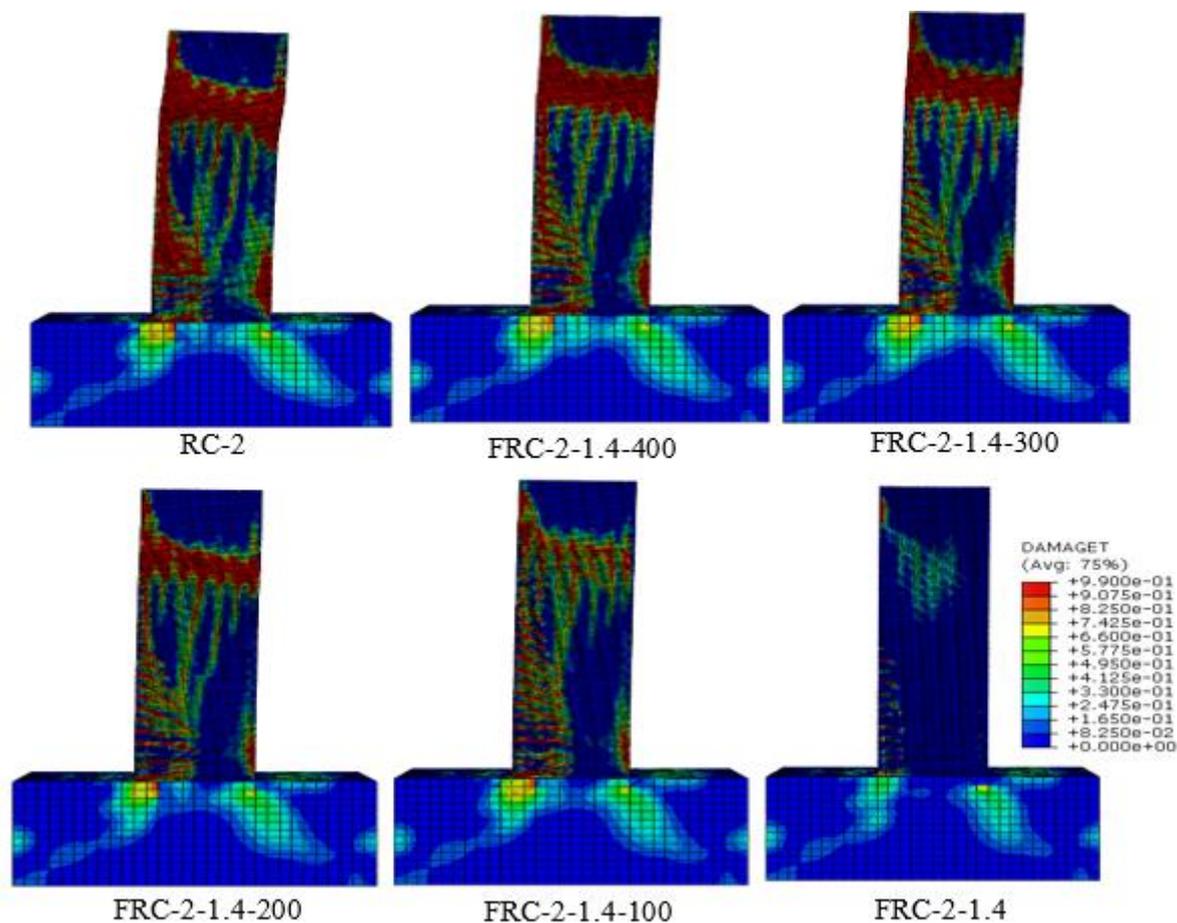
**Figure V. 18.** Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 1.05mm des FRP.



**Figure V. 19.** Courbe force-déplacement de la colonne (FRC-2) avec une épaisseur de 1.4 mm des FRP.

La figure V. 20 illustre les cartographies des dommages en traction dans les colonnes en béton correspondant à un temps de chargement de 0,35 s. Selon la figure V.14, l'épaisseur des bandes FRP de 1,4 mm a fourni de meilleures performances des colonnes confinées, pour cela, cette épaisseur (1,4 mm) a été considérée pour toutes les dispositions d'espacement des bandes.

Une réduction significative de l'évolution des dommages est enregistrée. Le modèle totalement confiné (FRC-2-1.4) est plus efficace en termes de prévention de comportement local. En effet, lorsque l'espacement entre les bandes GFRP est suffisamment réduit, l'écrasement du béton entre deux bandes GFRP adjacentes est empêché. La présence d'une zone de confinement inefficace a conduit à une défaillance du béton.



**Figure V. 20.** Représentation des dommages en traction du béton pour les différents espacements du GFRP.

Les tableaux V.3 et V.4 résument les résultats de l'analyse paramétrique de toutes les colonnes simulées. La ductilité des échantillons est calculée comme étant le rapport du déplacement latéral à la charge ultime au déplacement qui correspond au pic.

L'analyse des résultats des tableaux V.3 et V.4 confirme que les colonnes en béton confinées (FRC) présentent une augmentation significative de la charge au pic et de la ductilité par rapport aux résultats des colonnes témoins (RC). En effet, en incorporant des bandes GFRP avec un espacement réduit, la charge et la ductilité des colonnes confinées ont été considérablement augmentées.

**Tableau V. 3.** Récapitulation des résultats de l'étude paramétrique pour les différentes épaisseurs des FRP.

Types de colonne	Épaisseur FRP (mm)	Déplacement au pic (mm)	Déplacement ultime(mm)	Force (KN)	Ductilité
RC-1	/	48.92	122.07	831.76	2.49
RC-2	/	17.39	48.92	3348.40	2.81
FRC-1- 0.35	0.35	61.99	190.06	951.44	3.06
FRC-2- 0.35		41.416	162.77	3975.78	3.93
FRC-1- 0.7	0.7	61.97	192.71	1004.07	3.11
FRC-2- 0.7		43.49	170.95	4656.83	3.92
FRC-1- 1.05	1.05	68.52	208.98	1030.71	3.05
FRC-2- 1.05		43.49	171.36	4908.60	3.94
FRC-1- 1.4	1.4	73.43	228.56	1069.19	3.06
FRC-2- 1.4		43.48	170.89	5022.04	3.93

**Tableau V. 4.** Récapitulation des résultats de l'étude paramétrique pour les différents espacements des FRP.

Types de colonne	Espacement FRP (mm)	Déplacement au pic (mm)	Déplacement ultime(mm)	Force (KN)	Ductilité
RC-2	/	17.39	48.86	3348.40	2.81
FRC-2- 0.35-100	100	36.24	109.08	3775.54	3.01
FRC-2- 0.7-100		41.42	147.46	3998.19	3.56
FRC-2- 1.05-100		39.35	150.71	4712.36	3.83
FRC-2- 1.4-100		39.34	156.18	4798.65	3.97
FRC-2- 0.35-200	200	41.42	126.74	3571.03	3.06
FRC-2- 0.7-200		20.27	69.32	3814.20	3.42
FRC-2- 1.05-200		39.34	146.74	4473.43	3.73
FRC-2- 1.4-200		32.03	126.52	4529.14	3.94

FRC-2- 0.35-300	300	18.54	72.86	3394.15	3.93
FRC-2- 0.7-300		18.54	74.72	3581.93	4.03
FRC-2- 1.05-300		39.35	215.24	4157.88	5.47
FRC-2- 1.4-300		39.35	261.28	4348.51	6.64
FRC-2- 0.35-400	400	17.37	70.52	3379.32	4.06
FRC-2- 0.7-400		18.54	84.73	3429.03	4.57
FRC-2- 1.05-400		39.36	276.31	3844.75	7.02
FRC-2- 1.4-400		39.34	276.56	3949.33	7.03

#### IV.6. Conclusion

À travers ce chapitre, les différents résultats et apports de la conception de confinement proposée sur des cylindres en béton a été appliqué et mis en pratique sur un poteau réel en béton armé. En effet, un modèle numérique capable de prédire la réponse globale et locale des poteaux en béton armé confinés par intégration de bandes FRP sous chargement horizontal est développé, appliqué et validé.

La confrontation des résultats obtenus nous renseigne sur l'efficacité du confinement interne sur l'amélioration de la capacité de charge latérale et de la ductilité des poteaux en béton armé. En outre, un bon accord est obtenu entre les résultats du modèle numérique sur des cylindres à échelle réduit et les résultats prédits pour les poteaux à échelle réelle.

En conclusion, le procédé de confinement par intégration interne de bandes hexagonales en FRP peut être étendu en vue de son application sur des structures réelles en béton armé soumises à des charges horizontales et axiales.

# **Conclusion générale et perspectives**

L'analyse critique des travaux de recherche menés sur des colonnes confinées par intégration des FRP a montré que leurs comportements axiaux nécessitent plus de compréhension, notamment, en terme de transmission des efforts subis par la structure aux renforts. En effet, l'efficacité et la durabilité du renforcement dépendent des propriétés géométriques et mécaniques des constituants et surtout de la qualité des interfaces. Afin, de faire face aux problèmes liés au décollement des renforts et la concentration des contraintes radiales sur la circonférence des bandes de forme circulaire, un procédé le confinement par intégration partielle de cerces composites FRP est proposé dans le cadre de ce travail de recherche.

En effet, l'objectif de la thèse était de développer et de mettre en œuvre une technique de conception des colonnes en béton composite, qui consiste à intégrer des cerces discontinues hexagonales en GFRP et en grille métallique. Pour cela un ensemble d'essais expérimentaux permettant d'une part de caractériser les propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux, et d'autre part d'étudier le comportement en compression axial des colonnes partiellement confinées a été réalisé. En complément de cet aspect expérimental, des modèles analytiques et numériques capables de décrire le comportement local et global des colonnes ont été également développés et validés.

Dans la première partie, l'étude bibliographique a permis de rappeler les caractéristiques des matériaux constitutifs des colonnes composites et de dresser un état de l'art exhaustif sur le confinement interne par matériaux composites. Cependant, la deuxième partie est divisée en plusieurs sections qui comporte les méthodes d'évaluation des contributions apportées par la technique proposée, dont la première section est consacrée à l'étude expérimentale. Par ailleurs, les conclusions et les principaux résultats suivants peuvent être tirés à partir des essais menés au laboratoire :

- La résistance des colonnes en béton partiellement confinées avec la conception proposée est améliorée d'environ 30 %, tandis que la déformation correspondante est améliorée d'environ 140 %. Cette amélioration considérable est due à l'effet de confinement fournie par l'incorporation des cerces GFRP et en grille métallique ;
- La grille métallique a fourni aux colonnes une faible efficacité de confinement car les propriétés de traction de la grille utilisée étaient inférieures à celle des FRP, ce qui a réduit l'effet de confinement des éprouvettes de béton. En fait, la résistance et la ductilité des colonnes peuvent être améliorées en augmentant la quantité de la grille en acier ;
- Les résultats à différents niveaux de confinement ont clairement montré le passage d'un mécanisme de rupture fragile à un mode de rupture ductile. Les composites étant intégrés dans de la matrice béton, le comportement n'est plus adoucissant.

Dans la section suivante, un modèle de confinement empirique de type résistance-déformation a été proposé. Ce modèle est validé par les résultats expérimentaux et permet de tenir compte de la forme et des caractéristiques géométriques de la grille métallique et des bandes composites. De plus, une étude paramétrique a été réalisée pour étudier l'influence des paramètres de conception des bandes FRP sur le comportement axial des colonnes confinées. Ces analyses paramétriques menées à base du modèle analytique proposé, indiquent que :

- Une bonne concordance est obtenue entre les résultats prédits par le modèle analytique et ceux obtenus lors des essais expérimentaux ;
- Tous les paramètres étudiés ont des effets significatifs sur le comportement axial des colonnes étudiées. En effet, l'efficacité du confinement dépend effectivement de plusieurs facteurs, y compris l'espacement des bandes FRP, la largeur et l'épaisseur du FRP, la résistance à la compression du béton non confiné et le taux de confinement ;
- La contrainte ultime et la déformation axiale des colonnes confinées peuvent être considérablement améliorées en augmentant la quantité et le nombre de couche des GFRP et en diminuant l'espacement entre les bandes hexagonales.

Par ailleurs, une simulation numérique de comportement non-linéaire des colonnes partiellement confinées par intégration des composites a été menée dans la section suivante. Cette modélisation a été réalisée au moyen d'un code de calcul par éléments finis ABAQUS a permis de tenir compte du comportement réel des matériaux constitutifs de la conception proposée. Ensuite on s'est proposé d'élargir et d'appliquer le procédé de confinement proposé sur des poteaux en béton armé à échelle réelle soumis à des chargements latéraux. Les modèles éléments finis proposés et validés fournissent un moyen numérique de simuler les poteaux en béton armé confinés, ce qui aidera les chercheurs à bien comprendre leur comportement sous charge axiale et latérale lorsqu'un renforcement interne en FRP est considéré. Sur la base des résultats numériques, les conclusions et les résultats suivants peuvent être tirés :

- Le modèle numérique développé pour simuler le comportement axial et latéral des colonnes en béton et en béton armé partiellement confinées a montré une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux, indiquant que les modèles de plasticité-endommagement du béton et élastique-orthotrope des FRP semblaient être en mesure de modéliser le comportement inélastique du béton confiné avec GFRP.
- La confrontation des résultats numériques des différentes dispositions de confinement considérées avec les résultats expérimentaux a confirmé que le modèle numérique peut

convenablement prédire la résistance à la compression et la capacité de charge latérale des colonnes confinées en GFRP.

- Il est clairement observé lors des simulations que la grille métallique n'apporte pas plus d'efficacité au comportement des colonnes confinées, et uniquement les bandes GFRP qui garantissent l'augmentation et l'amélioration des performances du béton.
- Les bandes FRP hexagonales conçues comme confinement interne, offre une amélioration de la résistance et de la ductilité pour les colonnes à petite et grande échelle sous charge axiale ou latérale. En effet, les FRP ont été efficace sous plusieurs aspects à savoir ; la capacité de charge latérale, les dommages en traction et les modes de rupture.

Les conclusions encourageantes tirées de ce travail de thèse ont été obtenues sur des données expérimentales et numériques limitées, notamment en terme du nombre d'échantillon testés et d'hypothèses formulées. À cet effet, il est nécessaire de compléter le travail entrepris afin de pouvoir obtenir amples résultats et de tirer des conclusions complètes et plus précise sur le comportement axial et latéral des colonnes confinées. Par conséquent, afin de mieux comprendre le comportement du béton partiellement confiné par intégration des composites FRP, il serait intéressant dans les recherches futures de :

### **Sur le plan expérimental :**

- Conduire des essais expérimentaux sur des colonnes confinées à l'échelle réelle sous chargement axial et latéral, et mener des essais avec des nombres de couche et forme différentes des bande FRP afin d'optimiser la conception proposée.
- Étudier l'efficacité différée du confinement apporté par les bandes FRP au cours du temps aux diverses agressions et sollicitations à travers une étude de durabilité

### **Sur le plan analytique et numérique :**

- Réaliser un couplage entre le modèle analytique proposé et la théorie de fiabilité afin de déterminer l'effet de la variabilité statistique des paramètres conceptuels du modèle sur la réponse des colonnes confinées ;
- Sachant que le mode de rupture le plus fréquent observé durant les essais est la rupture des bandes FRP, nous proposons d'intégrer dans les simulations des modèles qui tiennent compte de l'endommagement des composites ;
- Modéliser les interfaces entre tous les matériaux constitutifs à travers des modèles de glissement pour améliorer la précision des modèles numériques.

## **Références bibliographiques**

- [1] Bradberry, T.E. (2001). “FRP-Bar-Reinforced Concrete Bridge Decks.” Transportation Research Board Proceedings, 80th Annual Meeting., TRB, Washington, D.C.
- [2] A. Si Salem, S. Ait Taleb, K. Ait Tahar. Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 9(2) (2015) 154–162.
- [3] M. Kaya et al. Repair of corroded and buckled short steel columns using concrete-filled GFRP jackets, *Construction and Building Material*. 94 (2015) 20–27.
- [4] A. Kashi, A.A. Rarnezanianpour, F. Moodi, Durability evaluation of retrofitted corroded reinforced concrete columns with FRP sheets in marine environmental conditions, *Construction and Building Material*. 151 (2017) 520–533.
- [5] M. Jesus, P.S Lobo, P. Faustino, Design models for circular and square RC columns confined with GFRP sheets under axial compression, *Composite Part B*. 141 (2018) 60–69.
- [6] Pham, T.M., Doan, L.V. and Hadi, M.N. “Strengthening square reinforced concrete columns by circularisation and FRP confinement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, (2013), pp 490-499.
- [7] Padanattil A, Lakshmanan M, Jayanarayanan K, Mini KM. “Strengthening of Plain Concrete Cylinders with Natural FRP Composite Systems “, *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, Vol 43, p.381-389 (2019).
- [8] R.Y. Chengala, D. Vigneshkumar, B. Soundara, External strengthening of reinforced concrete column with CFRP, *International Research Journal of Engineering and Technology*. 05 (2018) pp 2395-0072.
- [9] Campione, G., La Mendola, L., Monaco, A., Valenza, A. and Fiore, V. “Behavior in compression of concrete cylinders externally wrapped with basalt fibers”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 69, (2015), pp. 576-586.
- [10] Zeng, J.J., Guo, Y.C., Gao, W.Y., Li, J.Z. and Xie, J.H. “Behavior of partially and fully FRP-confined circularized square columns under axial compression”, *Construction and Building Materials*, Vol. 152, (2017), pp. 319-332.
- [11] Zeng J-J, Duan Z-J, Guo Y-C, Xie Z-H, Li L-J. “Novel fiber-reinforced polymer cross wrapping strengthening technique: A comparative study”, *Adv Struct Eng*, Vol. 23, (2020), 979–96.

[12] Hadi M. N. S, et al. Axial compressive behaviour of GFRP tube reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, Vol 81, (2015), 198-207.

[13] Liu Y. J, et al. Effect of thickness of inner carbon fibre reinforced polymer tubes on axial compressive behaviour of steel-concrete-carbon fibre reinforced polymer concrete columns”, *Materials Research Innovations*, Vol. 19, (2015), S8-60-S8-64.

[14] Wang W, Sheikh MN, Hadi MNS. “Axial compressive behaviour of concrete confined with polymer grid”, *Mater Struct/Mater Constr* 2016; 49:3893–908.

[15] Chen J. et Chou N. « Compressive behaviour of flax FRP double tube confined coconut fibre reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol 112, (2016), 666–673.

[16] Long Y.L, et al. “Experimental study of concrete-filled CHS stub columns with inner FRP tubes”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 122, (2018), 606–621.

[17] Guo Y.C, Liang S. D, Xiao S.H, Zeng J.J et Sun Y. “Behavior of FRP-confined sea-sand concrete columns with a prefabricated concrete-filled FRP-steel core”, *Composites Part C: Open Access*, 2 (2020) 100042.

[18] Abaqus Version 6.14 & Sorensen. Inc. Abaqus. Simulia, HKS Inc Providence, RI, 2014.

[19] ACI 440R-96. “State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures”. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, USA, 1996 p, 68.

[20] Cudeville A. Recycler le béton. *Pour la Science*, N°408 -octobre 2011, pp. 17-18.

[21] S. Medjmadj, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials* 344 (2022) 128257

[22] Hornain, H., (2007). *GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons*. Presses des Ponts.

[23] Blach B., Merlet J.D. Comment réparer le béton armé. FRE, cahiers techniques du bâtiment, FRA. 1993, N°143.

[24] Resse C. et Venaut M., *Projection des mortiers béton et plâtres*, Techniques et applications bâtiment et TP, 1981.

[25] Poineau D, Calgaro J-A. Projet de renforcement ou de réparation d'un pont - Par armatures additionnelles - Ajout de forces par armatures de précontrainte additionnelle et/ou déformations imposées. Techniques de l'Ingénieur. Réf : C7805. Publié : 10 mai 2010.

[26] Hermite R.L. et al., Concrete reinforced with glued plates, RILEM, International Symposium on synthetic resin in building constructions, p. 175-203, 1967.

[27] Theillout J. N., Le projet de renforcement ou de réparation des ponts en béton, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p.425-459, 1997.

[28] Luyckz J. Composites à fibres de carbone dans le Génie civil. Techniques de l'Ingénieur – Traité Plastiques et Composites. Réf : AM 5 620, Publié : 1999.

[29] S. Chataigner, Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil : contributions théoriques et applications. HDR, Université Paris Est, 2016.

[30] Bai YL, Dai JG, Mohammadi M, et al. Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large rupture- strain (LRS) FRP-confined concrete. Composite Structures, 223, (2019): 110953.

[31] (Fib Bulletin 14) Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Bulletin No. 14. Technical report 2001. Fédération Internationale du Béton (FIB)- (2001), Lausanne, Suisse. ISBN: 978-2-88394-054-3.

[32] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002) "FRP strengthened RC structures», John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245 p.

[33] Hamelin P. Polymères renforcés de fibres (FRP) – Identification et champs d'application. Techniques de l'Ingénieur, Réf : C950, Publié : 10 août 2010.

[34] AFGC, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites. Association Française de Génie Civil, France (2011).

[35] CRC Construction innovation. "Review of strengthening techniques using externally bonded fiber reinforced polymer composites". Decision support tools for concrete infrastructure rehabilitation, 2002. Report 2002-005-C-01.

[36] J. Chen, Y. Lv, Z. X. Li and N. Chouw. "Investigation of the Properties of Natural Fibre Reinforced Polymer-Concrete Composite", Investigation of the Properties of Natural Fiber, (2020), 437-447.

[37] Zeng, J.J., Guo, Y.C., Li, L.J. and Chen, W.P. “Behavior and three-dimensional finite element modeling of circular concrete columns partially wrapped with FRP strips”, *Polymers*, Vol. 10, (2018), No. 3, 253.

[38] H.N. Garden. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. *composites Part B* (1998) 411-424.

[39] Zhishen Wu, Wenxiao Li: « Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members ». *Composite Structures* 72 (2006) 289–300.

[40] Jialai Wang, Chao Zhang « Nonlinear fracture mechanics of flexural–shear crack induced debonding of FRP strengthened concrete beams » *International Journal of Solids and Structures* 45 (2008) 2916–2936.

[41] W. Wang, M.N. Sheikh, M.N.S. Hadi, D. Gao, G. Chen, Behaviour of concrete-encased concrete-filled FRP tube (CCFT) columns under axial compression, *Engineering Structures*. 147 (2017) 256–268.

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

[43] Volety, I. Y. (2006) “Modeling of fiber reinforced polymer confined concrete cylinders”, Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, 101 p.

[44] Young Q., Qin Q., Zheng D. analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concrete hybrid structure. *Composite structure*, 57(2002) 221-226.

[45] Wu G, Lu Z and Wu Z. “Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites”, *Construction and Building Materials*, 20(3): (2006), 134–148.

[46] Wu G. Experimental study and theoretical analysis on strengthening concrete structures with FRP. Phd thesis, Southeast University, Nanjing, China; 2002 [in Chinese].

[47] Xiao Y, Wu H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *J Mater Civil Eng, ASCE* 2000;12(2):139–46.

[48] Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses." *Engrg. Experimental Station Bull. No. 185*, University of Illinois, Urbana, III (1928).

[49] Bentayeb et al. "New technique for reinforcement of concrete columns confined by embedded composite grid", *Construction and Building Materials* 22(8): (2008), 1624–1633.

[50] Saafi M, Toutanji HA, Li Z. Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. *ACI Struct J* 1999;96(4):500–9.

[51] Pham, T. M., Hadi, M. N. S. and Youssef, J. "Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 19, (2015), No. 6, 04015015.

[52] Lam, L., and Teng, J. G. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete." *Constr. Build. Mater.*, 17(6–7), 471–489.

[53] Pham, T. M., and Hadi, M. N. S. (2013). "Strain estimation of CFRP confined concrete columns using energy approach." *J. Compos. Constr.* 04013001-1–04013001-11.

[54] Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M. (1980). "Strength and ductility of tied concrete columns." *J. Struct. Div.*, 106(5), 1079–1102.

[55] Lam L, Teng JG. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Constr Build Mater* 2003;17(6–7):471–89.

[56] Ozbakkaloglu T, Lim JC, Vincent T. FRP-confined concrete in circular sections: review and assessment of stress-strain models. *Eng Struct* 2013; 49:1068–88.

[57] Sheikh SA, Uzumeri SM. Analytical model for concrete confinement in tied columns. *J Struct Div* 1982;108(12):2703–22.

[58] Abd El Fattah A, Rasheed H. "Passive dry fiber confinement for reinforced concrete stub columns", *Composite Structures*, Vol. 2020, (2018), 1051-1058.

[59] Mander J, Priestley M, Park R. Theoretical stress–strain model for confined concrete. *ASCE J Struct Eng* 1988;114(8):1804–26.

[60] Cao Q, Li H, Lin Z. (2019). "Study on the active confinement of GFRP-confined expansive concrete under axial compression", *Construction and Building Materials*, Vol. 227, (2019), 116683.

[61] Totonchi A, Ansaripour A, Shivaei S. “Effect of Different Arrangements of CFRP Wraps on the Axial Stress–Strain Behaviour of Confined Concrete Cylinders: Experimental Study and Numerical Modelling”, *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, Vol 44, 1087–1100 (2019).

[62] A. Daou, G. Chehab, G. Saad, B. Hamad, Experimental and numerical investigations of reinforced concrete columns confined internally with biaxial geogrids, *Construction and Building Materials*. 263 (2020) 120115.

[63] J.K. Wight, J.G. Macgregor, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, Pearson Education Limited, Harlow, 2016.

[64] R. Park, T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York - London - Sydney - Toronto, 1975.

[65] Zeng, J.J., Chen, S.P., Zhuge Y, Gao W.Y, Duan Z.J, Guo Y.C. “Three-dimensional finite element modeling and theoretical analysis of concrete confined with FRP rings”, *Engineering Structures*, Vol. 234, (2021), 111966.

[66] Y.Y. Ye, Y. Zhuge, S.T. Smith, J.J Zeng et Y.L Bai. Behavior of GFRP-RC columns under axial compression: Assessment of existing models and a new axial load-strain model, *Journal of Building Engineering*. 47 (2022) 103782.

[67] Y.C. Guo, W.Y. Gao, J.J. Zeng, Z.J. Duan, X.Y. Ni, K.D. Peng, Compressive behavior of FRP ring-confined concrete in circular columns: effects of specimen size and a new design-oriented stress-strain model, *Construct. Build. Mater*. 201 (2019) 350–368.

[68] J.J. Liao, J.J. Zeng, Y.L. Bai, L.H. Zhang, Bond strength of GFRP Bars to high strength and ultra-high strength fiber reinforced seawater sea-sand concrete (SSC), *Compos. Struct.* (2022), 115013, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115013>.

[69] Y. Wei, J.W. Bai, Y.R. Zhang, K.T. Miao, K.Q. Zheng, Compressive performance of high-strength seawater and sea sand concrete filled circular FRP-steel composite tube columns, *Eng. Struct.* 240 (8) (2021), 112357.

[70] B. Benmokrane, A.H. Ali, H.M. Mohamed, A. ElSafty, A. Manolo, Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass- FRP bars for concrete structures, *Compos. B Eng*. 114 (2017) 163–174.

[71] Y.R. Zhang, Y. Wei, J.W. Bai, G. Wu, Z.Q. Dong, A novel seawater and sea sand concrete filled FRP-carbon steel composite tube column: concept and behavior, *Compos. Struct.* 246 (8) (2020), 112421.

[72] Chen, G.M.; He, Y.H.; Jiang, T.; Lin, C.J. Behavior of CFRP-confined recycled aggregate concrete under axial compression. *Constr. Build. Mater.* 2016, 111, 85–97.

[73] Guo, Y.C.; Xie, J.H.; Xie, Z.H.; Zhong, J. Experimental study on compressive behavior of damaged normal and high-strength concrete confined with CFRP laminates. *Constr. Build. Mater.* 2016, 107, 411–425.

[74] Zhou, Y.W.; Hu, J.J.; Li, M.L.; Sui, L.L.; Xing, F. FRP-confined recycled coarse aggregate concrete: Experimental investigation and model comparison. *Polymers* 2016, 8, 375.

[75] Barros, J.A.O.; Ferreira, D.R.S.M. Assessing the efficiency of CFRP discrete confinement systems for concrete cylinders. *J. Compos. Constr.* 2008, 12, 134–148.

[76] Wei, H.; Wu, Z.; Guo, X.; Yi, F. Experimental study on partially deteriorated strength concrete columns confined with CFRP. *Eng. Struct.* 2009, 31, 2495–2505.

[77] Choi, E.; Kim, J.W.; Rhee, I.; Kang, J.W. Behavior and modeling of confined concrete cylinders in axial compression using FRP rings. *Compos. B Eng.* 2014, 58, 175–184.

[78] T. Pi, Y. Chen, K. He, S Han, J. Wan, Study on circular CFST stub columns with double inner square steel tubes, *Thin-Walled Structures.* 140 (2019) 195–208.

[79] A. Rahman, M. Mallick, S. Ghosh, Experimental behavior of FRP confined concrete cylinder wrapped by two different FRPs, *Journal of Materials Science Research.* 7 (2018) 18–25.

[80] NF EN 12390-1 « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules » AFNOR 91.100.30 Béton et produits en béton, 2019.

[81] NF EN 12390-2 "Essais du béton durci - Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance" AFNOR 91.100.30 Béton et produits en béton, p15, 2019.

[82] NF EN 12390-3 « Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes » AFNOR 91.100.30 Béton et produits en béton, 2019.

[83] NF EN 12390-4 « Essais pour béton durci - Partie 4 : : Résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essais » AFNOR 91.100.30 Béton et produits en béton, 2019.

[84] ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, 2014.

[85] A. Si Salem. « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation », thèse de doctorat LMD en génie civil, université de Tizi ouzou, année 2016.

[86] S. Ait Taleb. « Analyse du comportement des poutres non – homogènes renforcées par des plaques composites », thèse de doctorat LMD en génie civil, université de Tizi ouzou, année 2016.

[87] Li, Y-F., Lin, C-T. et Sung Y-Y. (2003) “A constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics”, *Mechanics of Materials*, Vol. 35, pp. 603-619.

[88] Nanni, A., et Bradford, N.M. (1995) “FRP jacketed concrete under uniaxial compression”, *Construction and Building Materials*,

[89] Cao Q, Li X, Lin Z, Wu Z. « Compression behavior of expansive concrete-encased steel filled square CFRP tubes», *Composite Structures*, Vol. 225, (2019), 111106.

[90] Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1981) « Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic », *ACI Material Journal, Proceedings* Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.

[91] M. Samaan, A. Mirmiran et M. Shahawy. « Model of concrete confined by fiber composites », *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, (1998), 14677.

[92] Spoelstra, M.R. et Monti, G. (1999) “FRP-confined concrete model” *Journal of Composites for Construction*.

[93] W. Wang, M.N. Sheikh, A.Q. Al-baali et M. N. S. Hadi. “Compressive behaviour of partially FRP confined concrete: Experimental observations and assessment of the stress strain models”, *Construction and Building Materials*, 192, (2018), 785-797.

[94] Lam, L. and Teng, J.-G. Strength Models for Fiber-Reinforced-Plastic-Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 128 (5): (2002), 612–623.

[95] Campione, G., Miraglia, N., “Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No 1, (2003), pp. 31-41.

[96] Y.Y. Ye, D.H. Zhu, J.J. Zeng, G. Lin et W.Q. Wang. “Rectangular double-tube concrete columns with an internal elliptical high strength steel tube: Concept and behavior”, *Engineering Structures* 216 (2020) 110742.

[97] Zeng, J.J., Lv, J.F., Lin, G., Li, J.Z., Guo, Y.C, Li L.J. “Compressive behavior of double tube concrete columns with an outer square FRP tube and an inner circular high-strength steel tube”, *Construction and Building Materials*, Vol. 184, (2018), pp. 668-668.

[98] Zeng, J.J., Guo, Y.C., Li, L.J. and Chen, W.P. “Behavior and three-dimensional finite element modeling of circular concrete columns partially wrapped with FRP strips”, *Polymers*, Vol. 10, (2018), No. 3, 253.

[99] Yang J, Wang J, Wang Z. “Design-oriented axial stress–strain model for partially fiber reinforced polymer- confined normal strength concrete”, *Advances in Structural Engineering*, Vol 23, Issue 16, (2020).

[100] O. Ali, A. Abbas, E. Khalil et H. Madkour. « Numerical investigation of FRP-confined short square RC columns”, *Construction and Building Materials*, 275, (2021), 122141.

[101] M.F. Ferrotto, et al. A strategy for the finite element modeling of FRP-confined concrete columns subjected to preload, *Engineering Structures*. 173 (2018) 1054–1067.

[102] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Onate, A plastic-damage model for concrete”, *International Journal of Solids and Structures*. 25(3) (1989) 299–326.

[103] J. Lee, G L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures”, *Journal of Engineering Mechanics*. 124 (8) (1998) 892–900.

[104] ACI 318-14 Committee, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*. 2014.

[105] CEB-FIP: *Model Code 1990*, Thomas Telford, 1993, London.

[106] Règlement BAEL 91 révisé 99 (DTU P18-702) (mars 1992) : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé selon la méthode des états limites (CSTB février 2000 ISBN 2-86891-281-8).

[107] A. Kezmane, S. Boukais M. Hamizi, Numerical simulation of squat reinforced concrete wall strengthened by FRP composite material, *Front. Struct. Civ. Eng.* 10(4) 2016 445–455.

[108] Y. Xie, Z. Li, L. Jia, H. Zhou, W. Bai Y. Li, Flexural behavior and size effect of normal strength RC columns under monotonic horizontal loading, *Engineering Structures*. 166 (2018) 251–262.

[109] Si Salem A, Ait Taleb Souad & Ait tahar K « Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components » *Procedia Engineering*, 114C, 2015, 173-180

[110] Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem and Kamal Ait tahar. “Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double-confined with FRP-jacket”, *Procedia Engineering*, 114(C), 2015, Pages 165-172.

[111] Sonia Djenad, Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem and M. Amin Bouzidi “NLFEA based design optimization of GFRP strips in partially confined concrete” *Procedia Structural Integrity* (2022) 37 321-329

[112] Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem & Kamal Ait tahar “Behaviour of a new graded beam reinforced with externally bonded composite sheets”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 2016 1171-1185

[113] Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem and Kamal Ait tahar. “Experimental and theoretical modeling coupled to a reliability approach for flexural failure prediction in hybrid composite beams” *Asian Journal of Civil Engineering* (2020) 21:495–504

[114] Abdelmadjid SI SALEM, Fatma TAOUCHE-KHELOUI, Kamal AIT TAHAR, “Experimental investigation on the bending and buckling behavior of bio-based core innovative sandwich panels” *International journal of structural integrity* 2020, Vol. 12 No. 2, pp. 226-240.

[115] L. Boussaa, M. Chemrouk, A. Si Salem and A. Nekkrouche “Seismic Behaviour Factor of Reinforced Concrete Framed Structures” *Asian Journal of Civil Engineering* (2020) 23: 153-171 <https://doi.org/10.1186/s10045-020-00000-0>

[116] Chafika Ali Ahmed, Abdelmadjid Si Salem, Souad Ait Taleb and Kamal Ait tahar. Experimental behavior and reliability of pre-damaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression/ *World journal of engineering* 2022 (Article in press) <https://doi.org/10.1108/WJE-06-2022-0248>

[117] R. SADONE. « Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement », thèse de doctorat, université Paris-Est, année 2011.

[118] C. Farahmandpour. « Modélisation et simulation du comportement des bétons Confinés », thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie, année 2017.

[119] F. Abou Chakra. « Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de Polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes », Mémoire d'ingénieur CNAM, centre associé du Liban, année 2016.

[120] S. Kherkhache. « Contribution à l'étude des matériaux composites pour le confinement externe des colonnes en béton », mémoire magister en génie civil, Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi.

## Résumé

L'amorçage et la propagation des fissures au cours de la durée de vie des ouvrages en béton entraînent des pertes de rigidité et de résistance. Les techniques de renforcement et de réhabilitation par collage extérieur et intégration de matériaux composites peuvent restaurer et restituer leurs performances mécaniques, permettant ainsi de prolonger la durée de service de ces éléments structuraux. En effet, la synthèse des travaux de recherche menés sur le comportement axial des colonnes confinées par des FRP a montré qu'il nécessite plus de compréhension, notamment, en termes de transmission des efforts subis par la structure aux composites. Dans ce contexte, une nouvelle technique de confinement des colonnes en béton par intégration partielle des composites FRP est proposée dans ce travail de thèse afin de faire face aux problèmes liés au décollement des renforts et la concentration des contraintes radiales sur la circonférence des bandes de forme circulaire sous charges de compression axiale. Ce nouveau procédé consiste à incorporer dans la matrice béton des bandes hexagonales en fibre de verre (GFRP) et des cerces circulaires en grille métallique.

L'apport en résistance à la compression et en ductilité des structures composites proposées comparativement aux structures non confinées est quantifié et investi expérimentalement, théoriquement et numériquement. La première partie de l'étude est consacrée à la caractérisation expérimentale du comportement des cylindres chargés en compression, pour mettre en évidence l'effet du confinement interne et partiel par des bandes composites. En complément de l'étude expérimentale, une modélisation analytique et numérique est réalisée en vue de simuler et d'appréhender plus finement le comportement et les mécanismes de rupture des colonnes confinées. Par ailleurs, la réponse globale et locale des colonnes à grande échelle a été modélisée pour mettre l'accent sur l'applicabilité de la conception proposée sur des colonnes réelles en béton armé partiellement confinées soumises à un chargement latéral. Enfin, des analyses paramétriques en se basant sur les modèles analytiques et numériques sont réalisées pour étudier l'effet des différents paramètres de conception des bandes FRP sur le comportement des colonnes confinées. Ces analyses mettent en évidence l'influence des facteurs étudiés et indiquent que l'efficacité du confinement dépend effectivement des paramètres mécaniques et géométriques des composites.

**Mots clés:** Cylindres composites confinés ; Intégration partielle, Bandes hexagonales en GFRP; Analyse expérimentale; Modélisation analytique et numérique ; Résistance axiale.

## Abstract

Cracks initiation and propagation during the service life of concrete structures may result a significant stiffness and strength decreasing. Repair and rehabilitation technology using external and encased composite materials lead to recovery and retrofit their mechanical performances, thus enhancing the service life of structural concrete members. Indeed, the analysis of the literature investigations carried out on the axial behavior of FRP confined columns have revealed more understanding requirements, in particular, in terms of the transmission of the loads supported by the structure to the composite reinforcement. In this context, a new confinement technology of confined-concrete columns with embedded partial FRP composites is proposed in the present thesis in order to avoid the debonding of the FRP/concrete interaction and the concentration of the hoop stresses within the circumference of the circular reinforcement stirrups under axial compression. The design proposal consists to embed hexagonal GFRP strips and circular steel grid within the concrete matrix.

The contribution in terms of compressive strength and ductility of the designed composite structures compared to unconfined ones was experimentally, theoretically and numerically quantified and investigated. Firstly, an experimental characterization was carried out to testify and to highlight the effect of partial FRP-encased confinement under centered axial loads. In addition, an analytical and numerical modelling was emphasized to simulate and to more precisely understand the behavior and the failure mechanisms of the confined columns. Furthermore, the overall and local response of large-scale columns has been modeled to emphasize the applicability of the proposed design on real reinforced concrete columns with partially inner confinement under horizontal loading. Finally, parametric analyses based on the analytical and numerical models were performed to investigate the effect of the FRP strips design parameters on the behavior of confined columns. These analyses highlight the influence of the studied features and indicate that the confinement efficiency effectively depends on the mechanical and geometrical parameters of used composites.

**Key words:** Partially-confined cylinders; FRP-encased concrete; Hexagonal strips; Experimental design; Analytical and numerical modeling; Axial compressive strength.

## ملخص

يؤدي بدء الشقوق وانتشارها خلال عمر خدمة الهياكل الخرسانية إلى فقدان الصلابة والمقاومة. يمكن لتقنيات التعزيز وإعادة التأهيل عن طريق الترابط الخارجي ودمج المواد المركبة أن تستعيد وتستعيد أدائها الميكانيكي، وبالتالي إطالة عمر أنه يتطلب مزيداً من الفهم، على وجه الخصوص، من حيث انتقال القوى التي يمر بها الهيكل إلى FRP خدمة هذه العناصر الهيكلية. في الواقع، أظهر توليف العمل البحثي الذي تم إجراؤه على السلوك المحوري للأعمدة المحصورة بواسطة في هذا العمل من أجل التعامل مع المشاكل المتعلقة بفصل التعزيزات وتركيز الضغوط الشعاعية على محيط نطاقات الشكل FRP المركبات. في هذا السياق، تم اقتراح تقنية جديدة لحصر الأعمدة الخرسانية عن طريق التكامل الجزئي لمركبات وحلقات الشبكة المعدنية الدائرية في مصفوفة الخرسانة (GFRP) دائرية تحت الأحمال الانضغاطية المحورية. تتكون هذه العملية الجديدة من دمج شرائط الألياف الزجاجية السداسية

المساهمة في مقاومة الانضغاط والليونة للهياكل المركبة المقترحة مقارنة بالتركيبات غير المحصورة يتم قياسها وفحصها تجريبياً ونظرياً وعددياً. تم تخصيص الجزء الأول من الدراسة للتوصيف التجريبي لسلوك الأسطوانات المحملة بالضغط، لتسليط الضوء على تأثير الحبس الداخلي والجزئي بواسطة العصابات المركبة. بالإضافة إلى الدراسة التجريبية، يتم إجراء النمذجة التحليلية والرقمية من أجل محاكاة وفهم آليات السلوك والفشل للأعمدة المحصورة بشكل أفضل. علاوة على ذلك، تم تصميم الاستجابة العالمية والمحلية للأعمدة كبيرة الحجم للتأكيد على قابلية تطبيق التصميم المقترح على أعمدة خرسانية مسلحة محصورة جزئياً تخضع للتحميل الجانبي. أخيراً، يتم إجراء التحليلات البارامترية بناءً على على سلوك الأعمدة المحصورة. تسلط هذه التحليلات الضوء على تأثير العوامل المدروسة وتشير إلى أن فعالية الحبس تعتمد بالفعل على المعلمات الميكانيكية FRP النماذج التحليلية والرقمية لدراسة تأثير معلمات التصميم المختلفة لنطاقات والهندسية للمركبات

**الكلمات الأساسية:** أسطوانات؛ شرائط سداسية تصميم تجريبية؛ النمذجة التحليلية والرقمية. قوة الانضغاط المحوري FRP محصورة جزئياً؛ الخرسانة المغلفة