REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et matériaux

Présentée par :

Chafika ALI AHMED

Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation

Devant le jury composé de :

MELBOUCI Bachir	Professeur	U.M.M.T.O	Président
AIT TAHAR Kamal	Professeur	U.M.M.T.O	Rapporteur
ZERIZER Abdellatif	Professeur	U.M.B Boumerdès	Examinateur
KADRI Mohamed	Professeur	U.M.B Boumerdès	Examinateur

Soutenue en 2016

A la mémoire de celui qui nous a appris l'amour du savoir
et de la recherche, mon oncle Belkacem.
A ma famille.

Remerciements

Mes vifs remerciements s'adressent, naturellement, en premier lieu au Professeur AIT TAHAR K., pour avoir proposé et dirigé ce travail de recherche, pour ses orientations, ses précieux conseils ainsi que ses idées limpides qui m'ont été d'une grande utilité. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude, également, pour avoir été toujours à l'écoute et répondu présent à chaque fois que je le sollicitais, malgré ses multiples engagements, ainsi que pour la confiance qu'il a su m'accorder pour mener à bien ce travail.

Je remercie vivement les membres du jury, Pr MELBOUCI B., Pr ZERIZER A., et Pr KADRI, pour avoir accepté de composer ce jury et d'avoir consacré de leur temps pour expertiser ce travail.

Je tiens également à remercier Pr OULD OUALI M ., ainsi que Dr SI SALEM A.,qui m'ont beaucoup apporté dans la partie 'simulation numérique'.

Mes remerciements vont aussi à Mr MAMMOU, responsable du laboratoire de matériaux, pour sa disponibilité lors de la réalisation de la partie expérimentale.

Je souhaite également remercier Fatma, Souad et Youssef, ces bons amis comme on en rencontre que rarement dans la vie, pour toute l'énergie positive qu'ils dégagent et qui influence directement leur entourage, pour leur soutien ainsi que pour les bons moments que nous avons partagés.

Enfin, mes vifs remerciements s'adressent à Djamila, Karima, Samira, Hafidha, Chabha et Hamid pour leur aide, pour les échanges enrichissants aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan humain, ainsi que pour les discours positifs qu'ils ont toujours su me tenir.

RESUME

Une nouvelle technique de confinement des cylindres en béton confinés avec des bandes composites hélicoïdales continues 'GFRP', est proposée dans cette étude. Les gains en résistance à la compression et en ductilité ont été quantifiés et analysés, expérimentalement et théoriquement, en fonction de la largeur de la bande en 'GFRP' et du pas de l'hélice qu'elle forme en circonférence du cylindre en béton.

L'objectif consiste à rechercher une solution optimale de réhabilitation, en considérant en plus de la largeur et du pas de l'hélice, la résistance à la compression initiale du béton non confiné ainsi que la résistance à la traction du composite 'GFRP'.

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

L'estimation de la résistance pour une quelconque combinaison des paramètres de confinement est obtenue à partir d'un modèle analytique basé sur la régression linéaire des résultats expérimentaux.

Par ailleurs, une simulation numérique à base des éléments finis du comportement global des cylindres en béton confinés par 'GFRP' est également réalisée. Les résultats de cette analyse mettent en évidence l'influence de la variabilité des paramètres considérés sur la résistance au pic et sur les modes de rupture des cylindres considérés.

Une optimisation mathématique à base de l'algorithme génétique, réalisée sous contraintes est conduite dans le but de sélectionner la meilleure combinaison possible des variables de confinement considérées, à savoir : la largeur de la bande du 'GFRP', le pas de l'hélice que forme la bande composite en 'GFRP' autour du cylindre, la résistance du béton non confiné et la résistance à la traction du 'GFRP'. L'intérêt est de trouver la bonne combinaison de paramètres qui permettrait la réhabilitation de l'élément en connaissant son degré d'endommagement, ce qui présente un intérêt économique certain.

Enfin, une étude théorique sur l'effet d'une force de traction appliquée aux extrémités de la bande en 'GFRP' est également présentée. Elle vise à mettre en évidence l'effet de l'enroulement de la bande composite soumise à une tension lors du tirage autour du cylindre en béton, provoquant ainsi une contrainte de confinement additionnelle.

Mots clés : Cylindres en béton - confinement hélicoïdal - compression - bandes continues en 'GFRP' - réhabilitation – optimisation.

ABSTRACT

A new technique of confinement of concrete cylinders by continuous helical composite strips 'GFRP', is proposed in this study. The gains in compression strength and ductility were quantified and analyzed, experimentally and theoretically, in terms of width of the strip 'GFRP' and the pitch of the helix it forms in circumference of the concrete cylinder. The main objective is to seek optimal rehabilitation solution, considering in addition to the width and the pitch of the helix, the initial compressive strength of unconfined concrete and the tensile strength of the composite 'GFRP'.

The experimental results showed an improvement, both of the compressive strength and ductility of tested specimens. The compressive strength of concrete is proportional to the width of the strip and inversely proportional to the pitch of the helix it forms around the cylinder..

The resistance estimation of to any one combination of confining parameters is obtained from an analytical model based on the linear regression of the experimental results. Moreover, a numerical simulation, based on the finite elements, of the behavior of the confined concrete cylinders is also performed. The results analysis highlights the influence of the variability of the parameters on the ultimate strength and the modes of rupture of the considered cylinders.

A mathematical optimization based on genetic algorithm, performed under constraints is conducted in order to select the best combination of the considered variables of confinement, as the belt width of the 'GFRP', the pitch of the helix that form the composite band 'GFRP' around the cylinder, the strength of unconfined concrete and tensile strength of 'GFRP'. The interest is to find the right combination of settings that allow the rehabilitation of the element by knowing the amount of damage, which has some economic interest.

Finally, the effect of a tensile force applied to the ends of the band 'GFRP for improving the compressive strength of confined concrete cylinders is also presented. It aims to highlight the effect of winding the prestressed composite strip by pulling the composite strip around the concrete cylinder, causing an additional confining stress.

Keywords: Concrete cylinder – helical confinement – compression – continuous strips of **'GFRP'** – rehabilitation – optimization.

Sommaire

Principales notations i

Liste des figures ii

Liste destableaux iii

Introduction générale 1

Chapitre I. Synthèse bibliographique sur le confinement de cylindres en béton

I.1.Introduction 8
I.2. Nécessité de la réhabilitation d'une structure 8
I. 3.Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites 10
I.3.1.Application des matériaux composites par collage aux éléments de structures 11
I.3.2. Renforcement de colonnes par les Polymères Renforcés de Fibres (FRP) 11
I.3.3. Matériaux constituant l'assemblage support béton/FRP 14
I.3.3.1. Béton 14
I.3.3.1.1.Comportement du béton en compression uni axiale 14
I.3.3.2.Polymère Renforcé de Fibres (FRP) 16
I.3.3.2.1. Composites 16
I.3.3.2.2. Comportement mécanique des FRP 19
I.3.3.3. Comportement en compression du béton confiné par FRP 20
I.4.Revue des travaux antérieurs 23
II.5. Conclusion 35

Chapitre II. Étude expérimentale et proposition d'un modèle.

II.1. Étude expérimentale 38
II.1.1.Introduction 38
II.1.2.Programme expérimental 38
II.1.3. Caractérisation des matériaux 39
II.1.3.1. Élaboration des spécimens cylindriques 39
II.1.3.2. Essai de compression simple du béton 40
II.1.4. Matériau composite « GFRP » 42
II.1.4.1.Tissu de verre 42
II.1.4.2. préparation de l'adhésif (résine époxy) 43

II.1.4.3.Caractérisation mécanique du GFRP 44
II.1.5. Confinement externe avec le composite GFRP 45
II.1.5.1.Préparation des bandes composites en GFRP 45
II.1.5.2.Application du composite GFRP 46
II.1.5.3. Nomenclature des éprouvettes 48
II.1.6. Résultats expérimentaux 48
II.1.6.1. Courbes contraintes-déformation 50
II.1.6.2. Mode de rupture des spécimens confinés 53
II.2. Proposition d'un modèle de résistance à la rupture du béton confiné avec GFRP 55
II.2.1. Introduction 55
II.2.2. Proposition d'un nouveau modèle 56
II.3. Conclusion du chapitre 58

Chapitre III. Simulation numérique du comportement des cylindres en béton sous confinement hélicoïdal.

III.1. Introduction 61
III.2. Méthode des éléments finis 61
III.3. Présentation du modèle numérique 64
III.3.1.Géométrie du modèle 64
III.3.2.Maillage et conditions aux limites 65
III.4. Modèles décrivant les matériaux 67
III.4.1. Modèle éastoplastique endommageable pour le béton 67
III.4.1.1. Relation contraintes-déformations 67
III.4.1.2. Identification des paramètres du modèle 71
III.4.2. Modèle élastique pour le matériau composite orthotrope 73
III.5. Résultats de l'analyse numérique 75
III.5.1.Courbes contraintes-déformations 75
III.5.2. Confrontation des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux 78
III.5.3. Distribution des contraintes et des déformations 79
III.5.3.1. Cartographie des contraintes 79
III.5.3.2. Cartographie des déplacements 80
III.5.3.3. Cartographie des dommages en compression et en traction 81
III.5.4. Déformée des cylindres 82
III. 6. Conclusion 83

Chapitre IV. Optimisationdes paramètres du confinement hélicoïdal.

IV.1. Optimisation mathématique, à l'aide des algorithmes génétiques, des paramètres de confinement hélicoïdal avec FRP 86
IV.1.1.Introduction 86
IV.1.2.Algorithmes génétiques 86
IV.1.3. Explications des éléments d'un algorithme génétique 88
IV.1.4.Opérateurs génétiques 89
IV.1.4.1.Sélection 89
IV.1.4.2.Croisement 90
IV.1.4.3.Mutation 91
IV.1.5. Application de l'algorithme génétique pour l'optimisation de la résistance à la compression du cylindre confiné 92
IV.2. Analyse en Composantes Principales 95
IV.2.1.Principe de L'ACP 95
IV.2.2.Détermination des axes factoriels 96
IV.2.3.Formulation mathématique de l'ACP 97
IV.2.4.Choix du nombre de composantes principales à extraire 98
IV.2.5. Application de l'ACP aux solutions de l'optimisation des paramètres de confinement hélicoïdal par FRP 99
IV.2.5.1. Variables considérées dans l'ACP 99
IV.2.5.2.Résultats de l'ACP 99
IV.2.6. Classification hiérarchique ascendante (CAH) 102
IV.2.6.1. Principe de la CAH 102
IV.2.6.2. Etapes de l'algorithme d'une classification hiérarchique ascendante 104
IV.2.6.3.Calcul du dendrogramme 105
IV.2.6.4. Interprétation du dendrogramme 107
IV.3. Effet de la précontrainte exercée sur la bande en FRP : approche théorique 107
IV.3.1.Introduction 107
IV.3.2. Configuration de l'ancrage 107
IV.3.3. Bases de calcul des contraintes dans le corps d'un ressort de traction 108
IV.3.3.1. Efforts internes 108
IV.3.3.2. Calcul des contraintes dans le ressort 109
IV.3.4. Effet de la largeur de la bande et du pas de l'hélice sur la contrainte de cisaillement 111
IV.3.5. Estimation de la résistance à la compression, au pic, d'un cylindre confiné en tenant compte de l'effet de la précontrainte 112
IV.4. Conclusion du chapitre 114

Conclusion générale 117

Références bibliographiques 122

Principales notations

f_{cc}	Résistance à la compression du béton confiné.
f_{co}	Résistance à la compression du béton non confiné.
f_l	Pression de confinement latérale.
t_{frp}	Épaisseur du FRP.
f_{frp}	Résistance à la traction du FRP.
E_{frp}	Module d'élasticité du FRP.
L	Largeur de la bande en FRP.
S	Pas de l'hélice que forme la bande en FRP autour du cylindre en béton.
D	Diamètre du noyau de béton.
h	Hauteur du cylindre
ε_{cc}	Déformation axiale maximale du béton confiné.
ε_{co}	Déformation axiale maximale du béton non confiné.
P	Pression de confinement active.
E_1, E_2	Modules d'élasticité du tissu de verre.
υ_1, υ_2	Coefficients de Poisson du tissu de verre.
G_{12}	Module de cisaillement du tissu de verre.
υ_{frp}	Coefficient de Poisson du FRP.
E	Module de Young instantané du béton.
ψ	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
a_f	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale du béton.
a_c	Paramètre pilotant la courbe de compression de béton avant le pic

b_c	Paramètre pilotant la courbe de compression après le pic.
a_t	Paramètre pilotant la courbe de traction avant le pic
b_t	Paramètre pilotant la courbe de traction après le pic
d_t	Variables d'emdommagement de traction.
d_c	Variables d'emdommagement en compression.
f_b	Force de compression du béton
ρ_f	Fraction volumique des bandes composites.
A_f	Section du composite.
$\tau_{\max}$	Contrainte de cisaillement dans la bande en FRP, due à la contrainte de traction.
$\frac{f_l}{f_{co}}$	Rapport de confinement.
$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	Rapport de résistance.
FRP	Polymère Renforcé de Fibres.
GFRP	Polymère Renforcé de Fibres de verre.
AG	Algorithme génétique.
ACP	Analyse en Composantes Principales.
CHA	Classification Hiérarchique Ascendante.

Liste des figures

Figure I.1. Renforcement par enroulement filamentaire (CRC,2002) 12
Figure I.2. Renforcement par collage direct (Pantelides et al. 2002). 13
Figure I.3. Renforcement par chemisage avec une coquille préfabriquée en FRP, (Monti 2003). 14
Figure I.4. Comportement du béton en compression simple (Adam et Neville, 2000) 15
Figure I.5. Différents matériaux de renfort (Berreur et al.,2002) 17
Figure I.6. courbes contraintes-déformations pour l'acier doux et les FRP à base de carbone et de verre (Teng et al.,2002, Rizkalla et al. 2003)..... 19
Figure I.7.Effet de la pression de confinement comportement du béton (Young et al. 2002) 21
Figure I.8. Courbes contraintes-déformations béton confiné (Wu et al., 2006)..... 22
Figure I.9. Modèle contrainte-déformation pour béton non confiné et confiné (Saadatmanesh et al, 1994)..... 25
Figure I.10. Modèle contrainte-déformation pour béton non confiné et confiné (Mirmiran et al, 1998) 27
Figure I.11. Modèle contrainte-déformation (Toutanji, 1999). 28
Figure I.12.Courbes contraintes-déformations des cylindres en béton armé (Benzaid et al. 2010)..... 32
Figure I.13. Segments circulaires en béton (Thong et al, 2013) 33
Figure I.14. Changement de section de la colonne (Thong et al, 2013) 33
Figure I.15. Modes de rupture des colonnes confinées avec CFRP (Zain Saeed et al., 2016)..... 34

Figure II.1. Cure d'hydratation des cylindres en béton. 40
Figure II.2. Essai de compression sur cylindre en béton 41
Figure II.3.Comportement du béton en compression. 41
Figure II.4. Tissu de fibres de verre. 42
Figure II.5. Composants de l'adhésif : résine et durcisseur..... 43
Figure II.6. Bandes de tissu de verre pour différentes largeurs. 45
Figure II.7. Etapes de préparation des bandes composites en GFRP..... 46
Figure II.8. Longueur de chevauchement (Benzaid R.,2010) 46
Figure II.9. Procédé de confinement hélicoïdal des cylindres en béton 47
Figure II.10. Différentes configurations de confinement hélicoïdal des cylindres en béton .. 47
Figure II.11. Essai de compression sur un cylindre confiné. 48
Figure II.12. **C**ontraintes limites en compression des cylindres confinés 49
Figure II.13. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés avec des bandes GFRP de 3cm de largeur pour différents nombres de spires de l'hélice..... 51
Figure II.14. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés avec des bandes GFRP de 4cm de largeur pour différents nombres de spires de l'hélice..... 51

Figure II.15. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés, selon des hélices à 3 spires, avec des bandes de GFRP de différentes largeurs 52
Figure II.16. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés, selon des hélices à 4 spires, avec des bandes de GFRP de différentes largeur 53
Figure II.17. Mode de ruptures des cylindres confinés avec le GFRP 54
Figure. II.18. Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée durant le processus de chargement (Mazzucco G. et al.,2016) 54
Figure II.19. Régression polynomiale estimant la contrainte ultime des spécimens confinés 57
Figure II.20. Régression linéaire estimant la contrainte ultime des spécimens confinés…....57
Figure II.21.Confrontation des valeurs expérimentales et des valeurs prévues par le modèle de résistance 58

Figure.III.1.Différentes parties constituant le modèle. 64
Figure III.2. Différents éléments de Abaqus (Abaqus manual, 2010)..... 65
Figure III.3. Maillage du cylindre confiné. 66
Figure.III.4. Conditions aux limites du cylindre confiné..... 66
Figure.III.5.Comportement du béton sous traction (a) et compression (b)uni-axiales (Abaqus manual,2010) 69
Figure III. 6. Cycle uniaxial de chargement (Abaqus manual, 2010)..... 71
Figure III.7. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 4cm pour différents pas de l'hélice..... 75
Figure III.8. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 3cm pour différents pas de l'hélice..... 76
Figure III.9. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 2cm pour différents pas de l'hélice..... 76
Figure III.10. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés des bandes de GFRP faisant des hélices de 4 spires pour différentes largeurs 77
Figure III.11. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP faisant des hélices de 3 spires pour différentes lar 78
Figure.III.12. Confrontation des courbes moyennes numérique et expérimentales 78
Figure III.13. Cartographie des contraintes pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné. 79
Figure III.14.Cartographie des déplacements pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné. 80
Figure III.15.Cartographie des dommages en compression et en traction pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné..... 81
Figure III.16. Déformée du cylindre non confiné. 82
Figure III.17. Déformée du cylindre confiné. 83
Figure III.18. Pression de confinement exercée par la bande en GFRP ……83

Figure IV.1. Croisement des individus. 91
Figure IV.2. Mutation des individus … 91
Figure IV.3. Etapes d'un algorithme génétique 92

Figure IV.4. Graphe des variables donné par l'ACP..... 100
Figure IV.5. Graphe des individus donné par l'ACP 101
Figure IV.6. Détermination du nombre de classes 104
Figure IV.7. Dendrogramme calculé pour les résultats de l'ACP. ……106
Figure IV.8. Représentation des efforts internes. 108
Figure IV.9. Section droite d'un ressort cylindrique. 110
Figure IV.10. Section droite d'un ressort cubique. 111
Figure IV.11. Contrainte de cisaillement dans le FRP pour différentes largeurs d'une bande formant des hélices à 5 spires 111
Figure IV.12. Contrainte de cisaillement dans le FRP pour différents pas d'hélice formée par une bande de 3 cm de largeur 112
Figure IV.13. Résistance à la compression, au pic, de cylindres confinés sans et avec l'effet de la précontrainte 113
Figure IV.14. Gains en résistance pour différentes variantes de confinement..... 114

Liste des tableaux

Tableau. I.1. Caractéristiques mécaniques de différentes fibres (Hamelin,2002)……18

Tableau. I.2. caractéristiques mécaniques des résines epoxy (Bardonnet 1992)…….....19

Tableau. I.3.Caractéristiques mécaniques de FRP de verre, de carbone et d'aramide (Teng et al., 2002). ……...20

Tableau II.1. Composition du béton……39

Tableau II.2: Caractéristiques mécanique du béton…….....41

Tableau II.3 : Caractéristiques élastiques du tissu de verre…….42

Tableau II.4 : Caractéristiques de la résine. ……44

Tableau II.5. Caractéristiques mécaniques et élastiques du GFRP. ……44

Tableau II. 6. Caractéristiques géométriques des bandes de tissu de verre…… 45

Tableau II.7. Références des cylindres confinés. ……48

Tableau II.8. Charges et contraintes ultimes des cylindres. ……49

Tableau III.1.Paramètres du modèle CDP…….....73

Tableau IV.1. Valeurs des variables de l'optimisation……93

Tableau IV.2. Résultats de l'optimisation des paramètres de confinement hélicoïdal par FRP…….94

Tableau IV.3. Gains en résistance pour différentes valeurs de la largeur de la bande et du pas de l'hélice……...113

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de leurs durées de vie prévisionnelles, un nombre élevé de constructions subissent des désordres qui mettent en danger la sécurité de leurs usagers, et nécessitent de ce fait des travaux de maintenance. Il devient alors nécessaire de trouver les solutions de réhabilitation adaptées aux ouvrages déficients afin de les mettre en conformité avec les exigences de sécurité dictées par les règlements en vigueur.

Le terme 'réhabilitation' peut s'appliquer à des opérations de réparation ou de Renforcement ; la réparation visant à retrouver les performances initiales d'une structure endommagée, alors que le renforcement consiste en l'amélioration des performances d'une structure, endommagée ou non, pour répondre à de nouveaux besoins ou pour répondre à un besoin de remise en conformité.

L'étude du comportement pathologique des ouvrages en béton met en évidence les dommages subis par ceux-ci, qui sont généralement dus à des erreurs de dimensionnement, au vieillissement des matériaux ou simplement à des modifications des conditions d'exploitation de ces ouvrages.

Les méthodes classiques de renforcement et de réparation des colonnes se résument essentiellement à la pose de chemises en acier ou l'augmentation de la section qui nécessite le rajout de nouvelles armatures et le coulage d'un nouveau béton autour de l'ancienne colonne. Néanmoins, ces méthodes traditionnelles se trouvent confrontées à plusieurs problèmes comme la corrosion de l'acier et la difficulté de mise en œuvre ou le recours à de lourds équipements de chantier.

C'est vers la fin des années 80 qu'il y a eu cette prise de conscience des ingénieurs en génie civil du potentiel des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des ouvrages en béton.

En effet, de par leurs performances mécaniques remarquables, surtout en traction, leur légèreté et leur adhérence au béton, ces matières présentent une solution alternative très intéressante.

Le renforcement ou la réparation par collage externe de matériaux composites, est un procédé innovant développé à partir des années 90. Il s'est ainsi progressivement imposé au détriment de la technique de réparation classique par tôles d'acier collées (Houhou, 2012).

Ainsi, la technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles stratifiées à base de fibres de carbone est aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue dans le monde entier (ACI, 2008; Cromwell et al.,2011 ;Quiertant M., 2011).

Bien que leur prix soit élevé, les matériaux composites présentent un avantage économique certain, puisqu'ils permettent une nette réduction des coûts liés à la mise en œuvre, du moment qu'ils peuvent être posés par stratification directe sur le support à réparer. D'autant plus que le coût des ouvrages neufs est en nette progression.

Le comportement des structures confinées à l'aide de matériaux composites est complètement différent de celui des structures qui subissent un confinement conventionnel. En effet, à la rupture, le matériau composite présente un comportement fragile en opposition avec le comportement ductile de l'acier. Il devient alors nécessaire de bien comprendre le comportement du béton ainsi confiné.

L'intérêt sera porté, dans le cadre de ce travail, sur le confinement ou la réparation des colonnes en béton. Ce confinement est généralement réalisé à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. L'application de ces enveloppes aux colonnes permet l'amélioration de la résistance en compression, ainsi que la ductilité du béton confiné.

Originalité

Le confinement par collage de matériaux composites est souvent réalisé par la pause d'enveloppes entières. De nombreuses études ont été menées pour étudier les comportements et estimer les capacités des colonnes entièrement enveloppées avec des polymères renforcés de fibres «FRP » (De Luca et Nanni, 2011 ; Pham and Hadi, 2014a ; Pham and Hadi, 2014b ; Teng et al.,2009 ; Wu and Zhou, 2010). Il existe néanmoins des travaux effectués sur le confinement partiel de colonnes avec FRP, sous forme de bandes discontinues (cerces) comme ce fut le cas de celui de Thong M. Pham et al.(2016).

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche de réhabilitation par les matériaux composites de structures en béton endommagées. Il se veut une solution intermédiaire aux deux cas sus-

cités, à savoir le confinement par enveloppe entière et le confinement par cerces en FRP. Le procédé proposé dans cette étude consiste en le collage de bandes hélicoïdales continues en polymère renforcé de fibres de verre « GFRP » autour de cylindres en béton.

Les gains en résistance et en déformation axiale sont alors évalués et analysés en tenant compte de la largeur de la bande de GFRP et du pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre en béton.

Une solution optimale de réhabilitation est recherchée en considérant en plus de la largeur et du pas de l'hélice, la résistance à la compression initiale du béton non confiné ainsi que la résistance à la traction du FRP.

Objectifs

Le procédé proposé est un travail, en amont, en vue de la réhabilitation de colonnes en béton avec des FRP. Les objectifs visés par cette recherche sont :

- Mettre en évidence l'effet du confinement partiel par bandes hélicoïdales continues ;
- mise en évidence de l'effet de la largeur de la bande ainsi que du pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre sur la résistance et la ductilité du béton confiné ;
- proposition d'un modèle de résistance en compression au pic calibré à partir de résultats expérimentaux ;
- optimisation des paramètres de réhabilitation, à savoir : la largeur de la bande de FRP, sa résistance à la traction, le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre, ainsi que de la résistance à la compression du béton non confiné. L'optimisation vise à trouver la meilleure combinaison de ces variables qui donnerait le gain souhaité en résistance à la compression;
- prise en compte, par une approche théorique, de l'effet d'une précontrainte induite par application d'une force de traction aux extrémités de la bande, sur la valeur de la résistance maximale en compression du béton confiné.

Problématique

La réparation par collage de composites est une technique qui a désormais fait ses preuves. Le procédé le plus répandu pour le renforcement ou la réhabilitation des colonnes en béton demeure le chemisage avec enveloppes en FRP.

Nous nous sommes, par ailleurs, posés la question suivante : est-il possible de réhabiliter une colonne, en la confinant partiellement, et rehausser sa capacité portante et sa capacité à la déformation, pour un gain en résistance visé, sans avoir à recourir à l'enveloppe entière ?

Pour répondre à cette interrogation nous avons scindé la thèse en quatre chapitres, présentant chacun un aspect bien défini de la thématique étudiée qui porte sur les paramètres de réhabilitation par collage de matériaux composites sur le béton.

Le **premier chapitre** constitue une synthèse bibliographique exhaustive qui retrace le confinement par matériaux composites collés, ainsi que les propriétés d'un FRP. Un aperçu du comportement, sous compression uni axiale, des bétons confiné et non confiné est également donné dans le but de montrer la tendance des courbes contrainte-déformation et de comprendre le mécanisme de rupture d'un béton confiné avec matériaux composites sous ce type de chargement.

Une revue de littérature sur les travaux antérieurs portant sur le confinement des colonnes en béton est également présentée. Elle résume l'ensemble des travaux expérimentaux réalisés par plusieurs chercheurs en précisant à chaque fois les dimensions des spécimens étudiés ainsi que les paramètres considérés dans chaque recherche. Ajouter à cela, le modèle de résistance maximale en compression axiale du béton confiné avec FRP élaboré par chaque chercheur.

Le **second chapitre** est dédié à l'étude expérimentale réalisée dans le cadre de cette thèse. Le confinement partiel avec bandes hélicoïdales continues de GFRP y est bien détaillé. Les différents spécimens sont bien décrits en matière de dimensions, de résistance en compression du béton, de largeur de la bande de GFRP qui leur est appliquée ainsi que du pas de l'hélice qu'elle forme en circonférence du cylindre. Les moyens d'essais ainsi que les étapes de confection des éprouvettes y sont également définis.

Les caractérisations physique et mécanique des matériaux utilisés sont présentées. La connaissance des propriétés du comportement mécanique de ces matériaux fournit une aide à la compression du comportent mécanique des éléments confinés.

Les résultats des essais sur les cylindres confinés sont par la suite donnés, numériquement, sous forme de tableaux et graphiquement sous forme de courbes

contrainte-déformation. Ils montrent clairement les gains en résistance à la compression et à la ductilité.

Le mode de rupture des spécimens testés est également rapporté. Ces résultats sont analysés par rapport aux paramètres de confinement considérés dans l'expérimentation, à savoir la largeur de la bande de GFRP ainsi que le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre.

Cette partie sera ponctuée par la proposition d'un modèle de confinement type résistance maximale en compression élaboré en calculant une régression linéaire des résultats expérimentaux des cylindres confinés.

Le **troisième chapitre** est consacré à la simulation numérique moyennant le code de calcul par éléments finis « Abaqus », des cylindres confinés avec des bandes hélicoïdales continues en GFRP. Le modèle numérique est décrit, en précisant les paramètres géométriques, les éléments considérés dans son maillage ainsi que les conditions aux limites auxquelles sont soumis ces éléments.
Un aperçu du modèle constitutif du comportement plastique endommageable du béton ainsi que du modèle orthotrope du GFRP est également donné.
Les résultats de la simulation numérique sont présentés sous forme de courbes contrainte-déformation qui décrivent le comportement du béton confiné numérique et sous forme de cartographies des contraintes et de déplacements des cylindres confinés. Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce confinement en matière de résistance à la compression et de ductilité.

Le **quatrième chapitre** concerne l'optimisation des paramètres de confinement ou de réhabilitation. Une optimisation mathématique est conduite dans le but de définir la meilleure variante des paramètres de confinement susceptible de donner un gain souhaité en résistance. L'intérêt est de trouver la bonne combinaison de paramètres qui permettrait la réhabilitation de l'élément en connaissant son degré d'endommagement, ce qui présente un intérêt économique certain.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, une étude théorique incluant l'effet d'une force de traction appliquée aux extrémités de la bande en FRP est présentée. Elle vise à mettre en évidence l'effet de l'enroulement de la bande autour du cylindre tout en soumettant la

bande composite à une tension, provoquant ainsi une contrainte de confinement additionnelle.

L'accent est mis sur l'apport de cette approche en matière de gain en résistance à la compression du béton confiné sous compression axiale.

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le confinement de cylindres en béton

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le confinement de cylindres en béton

I.1. Introduction

Les ouvrages en béton peuvent nécessiter, durant leurs durées de vie, des opérations de renforcement ou de réparation.

Il existe à présent, de nombreuses solutions techniques bien maîtrisées ayant fait preuve de leur efficacité et de leur aptitude à résoudre les problèmes potentiels rencontrés sur les structures en béton.

La solution technique à adopter sera fonction de la pathologie à traiter. Elle est fixée après avoir fait un diagnostic scrupuleux et précis des désordres survenus dans la structure, de leurs causes et de leurs évolutions.

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.

La réparation ou le renforcement par matériaux composites, est une technique largement utilisée, qui vise l'augmentation de la résistance des structures dégradées ou présentant des défauts de conception ou d'exécution et l'adaptation des structures à de nouvelles conditions d'exploitation ainsi que leur mise en conformité vis-à-vis des règlements en vigueur.

I.2. Nécessité de la réhabilitation d'une structure

Les causes qui peuvent induire la réhabilitation d'une structure sont nombreuses. Les plus fréquentes d'entre elles, peuvent se résumer à ce qui suit :

- Un accroissement des charges qui sollicitent la structure, induit par :
  - Un changement d'usage de la structure,
  - une augmentation du niveau d'activité dans la structure (c'est le cas, par exemple, d'anciens ponts soumis au trafic actuel)
  - une installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

- Des défauts dans le projet ou dans l'exécution, qui résultent :
  - D'une mauvaise qualité des matériaux,
  - des dimensions insuffisantes des éléments structurels

- de la mise en place d'armatures insuffisantes ou mal placées.

➢ Une rénovation des structures anciennes, suite à :

- Un vieillissement des matériaux induisant une perte des caractéristiques initiales,
- une connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception,
- des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou une période,
- une prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres).

➢ Un changement de la forme de la structure, survenu après :

- Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs,
- élargissement de portées de calcul ou autre ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.

➢ Des dégâts dans la structure, causés par corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton ou suite à des chocs ou des incendies.

➢ Une nécessité d'améliorer les conditions en service, de façon à :

- Diminuer les déformations et flèches,
- réduire l'intensité des contraintes sur les armatures,
- diminuer l'ouverture des fissures.

Par ailleurs, un renforcement sismique est nécessaire, lorsque des désordres survenus suite à un séisme sont observés.

➢ Ces désordres se manifestent dans le cas des ponts par :

- L'échappement du tablier de ses appuis,
- la rupture fragile des piles,
- l'endommagement des culées, des murs de soutènement ou encore des fondations, etc.

➢ En ce qui concerne les bâtiments, on assiste souvent, suite à un séisme, à :

- La désolidarisation des façades,
- la fissuration des poutres, poteaux et dalles,

- la rupture des têtes de poteaux pouvant entraîner la ruine totale surtout si les poutres ont été dimensionnées plus largement que les poteaux,

I.3.Réparation et renforcement 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. En effet, l'application des matériaux composites en FRP a connu un grand essor notamment dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, du fait de l'évolution des techniques de fabrication de ces matériaux et donc la diminution de leur coût sans oublier la facilité de leur mise en œuvre. Ils constituent une solution alternative très intéressante à l'utilisation des tôles d'acier pour le renforcement ou la réparation de par leurs caractéristiques mécaniques qui sont bien meilleures que celles de l'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.
Le renforcement ou la réparation de structures en béton avec les matériaux composites, est réalisé principalement par le collage de plats, de plaques, de lamelles ou de textiles.
Les matériaux composites sont notamment utilisés pour le renforcement ou la réparation, de colonnes, de poteaux ou de piles.

La mise en œuvre de ces techniques de réparation et de renforcement, nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect des conditions climatiques adaptées en matière de température et d'humidité ainsi que les conditions relatives à l'emploi des différents matériaux comme la durée d'utilisation de la résine, par exemple.
Les tissus ou les lamelles sont collées au support à réparer à l'aide d'une résine d'imprégnation. Le composite subit par la suite un marouflage dans le but d'éliminer toute incursion d'air.
L'utilisation de FRP pour confiner les supports présente de nombreux avantages comparée à l'emploi d'acier. Tandis que l'acier maintient une tension de confinement constante, le FRP présente un comportement élastique qui provoque un accroissement de l'action de confinement sous dilatation.

I.3.1.Application des matériaux composites par collage aux éléments de structures

De nombreux travaux de recherche ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisés comme renforcement externe (Lam et Teng 2003 et Mirmiran et Shahawy 1997).
Toutes les parties d'une structure sont susceptibles d'être renforcées ou réparées par collage de matériaux composites. Il existe deux applications de renforcement :

- Les dalles et les poutres qui sont renforcées en flexion par collage de renforts composites sur la face tendue, et à l'effort tranchant en appliquant le composite sur les faces latérales des éléments ;
- Les colonnes qui sont renforcées par rapport aux efforts axiaux par le collage d'enveloppes de FRP sur la circonférence des éléments.

Le confinement avec une enveloppe composite est très avantageux, puisqu'il est immédiat, peu sensible aux déformations axiales, l'enveloppe ne décolle pas et sa mise en place est simple. Par ailleurs, les matériaux composites ont d'excellentes résistances à la fatigue et à la corrosion, ainsi qu'un faible poids spécifique, ce qui évite de surcharger la structure.

I.3.2. Renforcement de colonnes par les Polymères Renforcés de Fibres (FRP)

Les techniques de renforcement et de réparation de colonnes avec des matériaux composites, sont classées en trois catégories :

- ***Par enroulement filamentaire*** :

Il s'agit de l'enroulement autour de la circonférence de la colonne de renforts sous forme de fibres continues imprégnées de résine comme illustré par la figure I.1.

Figure I.1. Renforcement par enroulement filamentaire (CRC,2002).

Fardis et Khalili (1981) sont les premiers chercheurs à avoir pensé au confinement du béton par enroulement de fibres continues imprégnées de résine.

- ***Par stratification directe*** :

C'est un système de renforcement in-situ qui consiste à appliquer une feuille ou un tissu de fibres, unidirectionnel ou orientable, sur le support à réparer déjà imprégné de résine.
Le composite subit par la suite un marouflage pour évacuer les bulles d'air qui se forment dans l'adhésif. Cette technique peut être utilisée pour des éléments de différentes formes, même les plus complexes, grâce à la souplesse des tissus.

C'est un procédé assez simple qui consiste en la pose d'une ou plusieurs enveloppes en FRP comme le montre la figure I.2 pour couvrir la colonne soit entièrement ou partiellement, auquel cas, des lanières sont utilisées.

Figure I.2. Renforcement par collage direct (Pantelides et al. 2002).

Une stratification au contact est également utilisée. Elle consiste en le collage de lamelles préfabriquées en surface, à l'aide d'une résine. Le domaine d'utilisation de cette technique se limite aux surfaces planes ou présentant de grands rayons de courbure, en raison de la rigidité des lamelles qui les empêche d'épouser les formes des éléments à réparer.

- ***Par chemisage avec coquilles préfabriquées en FRP :***

Pour que les coquilles puissent être placées sur la circonférence de la colonne comme le montre la figure I.3, il faudrait qu'elles soient fabriquées en cercles avec fentes ou en rouleaux continus (Xiao et Ma, 1997), elles sont liées à la colonne par des adhésifs. Elles se présentent également sous forme de demi cercle ou demi rectangle (Nanni et Norris 1995, Ohno et al., 1997) et l'adhérence à la colonne est assurée par injection d'un coulis de ciment entre l'enveloppe et la colonne.

Cette application s'avère être interessante dans le cas où l'on cherche , en plus du confinement, à modifier la forme de la colonne en introduisant une coquille ayant la forme visée. Teng et Lam (2003), ont suggéré que les colonnes carrées ou rectangulaires peuvent etre renforcées par des coquilles circulaires ou elliptiques.

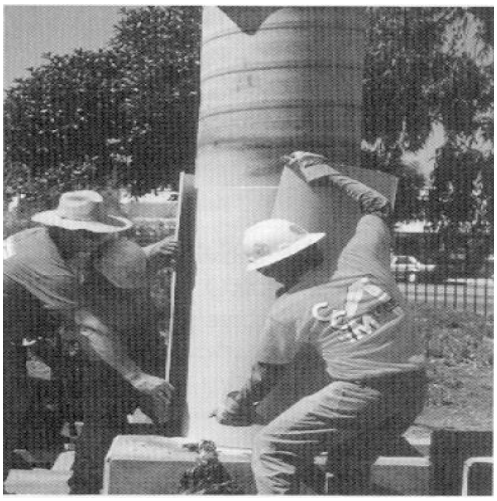


Figure I.3. Renforcement par chemisage avec une coquille préfabriquée en FRP, (Monti 2003).

Il existe, néanmoins, des techniques dites particulières, qui sont fonction de la géométrie de l'élément à renforcer. Parmi ces techniques d'application on peut mentionner celles liées à l'application d'une enveloppe automatique, de FRP précontraint, de FRP chauffé, de FRP préfabriqués de manière complexe, ou encore l'enchemisement par mortier.

I.3.3. Matériaux constituant l'assemblage support béton/FRP

I.3.3.1. Béton

Le béton est un matériau complexe constitué d'une phase dispersée formée de granulats de différentes classes de diamètres (sable, gravier, cailloux).Le squelette granulaire ainsi constitué confère en grande partie au béton sa résistance. Il est formé également d'une phase continue obtenue suite à la réaction d'hydratation entre le liant hydraulique qu'est le ciment et l'eau de gâchage. A ce mélange s'ajoutent, selon le besoin, des adjuvants destinés principalement à modifier le comportement rhéologique du béton frais (plastifiants, accélérateurs /retardateurs de prise, etc.).

I.3.3.1.1.Comportement du béton en compression uni axiale

Le comportement mécanique du béton est assez complexe vu que le béton, de par sa composition, est un matériau hétérogène. De plus, il présente des microfissures à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment, avant même l'application d'une quelconque charge.ces fissures, dites d'adhérence, sont dues au retrait, à la variation précoce du volume du béton

sous l'effet de l'hydratation ou du séchage ou bien à une consolidation incomplète du ciment. Ces fissures causent une anisotropie initiale du matériau et par conséquent, une réponse différente dans chaque direction.

Lorsque le béton est soumis au chargement, les microfissures se développent lorsque le chargement augmente, puis se connectent entre elles donnant ainsi naissance à de macro fissures qui conduisent à la rupture du matériau. Les courbes contraintes-déformations présentent l'allure indiquée sur la figure I.4.

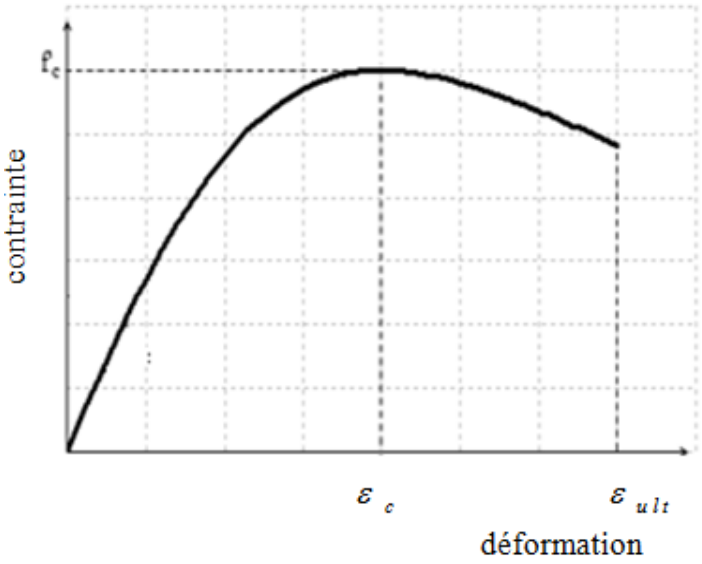


Figure I.4. Comportement du béton en compression simple (Adam et Neville, 2000).

Le béton présente un comportement linéaire élastique, où le matériau retrouve sa configuration initiale s'il est déchargé, jusqu'à 30% de résistance à la compression (f_c). Au-delà de cette valeur, la courbe augmente graduellement et devient de plus en plus non linéaire jusqu'aux alentours se 75% de f_c . Cette phase s'accompagne par l'apparition de nouvelles fissures, alors que d'autres fissures continuent à s'étendre lentement. Elle décrit le comportement non fissuré (présence uniquement de microfissures), le déchargement durant cette phase montre la présence de déformations irréversibles.

La courbe se termine par une branche descendante correspondant à un comportement adoucissant où les fissures augmentent notablement et se connectent aux fissures d'adhérence. Celles-ci vont croître et se propager jusqu'à la rupture du matériau. Cette dernière phase s'accompagne d'une forte déformation latérale du matériau.

Cette interprétation à l'échelle microscopique du comportement mécanique du béton a fait l'objet de nombreuses études (Lorrain 1974, Mazars 1984, Berthand 1988) qui ont montré que c'est le développement des micro fissures qui provoque la dégradation de la rigidité du matériau.

I.3.3.2. Polymère Renforcé de Fibres (FRP)

I.3.3.2.1. Composites

Un matériau composite est tout matériau comportant des charges. Il résulte du mélange d'au moins deux matériaux différents de par leur nature, leur forme et leur fonction, donnant un matériau dont les caractéristiques sont bien meilleures que celles des matériaux le constituant. Le composite est considéré comme constitué d'une matrice (phase continue) et d'un renfort (phase discontinue).

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures (Berthelot,2005).
Un matériau composite en FRP, est constitué essentiellement de fibres noyées dans une matrice. Ces fibres confèrent au composite leur comportement anisotrope élastique linéaire, de par leurs propriétés directionnelles.

a- Fibres

Elles fournissent la résistance et la rigidité au composite. De ce fait, les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres (Teng et al.,2002, Carolin 2003). Il existe actuellement une large gamme de fibres, mais les plus utilisées demeurent les fibres de carbone, de verre et d'aramide.

En plus de leurs propriétés mécaniques élevées, d'autres caractéristiques de ces renforts sont recherchées comme une faible masse volumique , une compatibilité avec les matrices, une facilité de mise en œuvre, etc.

- **Carbone**

Les fibres présentent un haut module d'élasticité (200 à 800 GPa) et un allongement ultime de 0,3 à 2,5%. Elles résistent remarquablement à la fatigue et ont une faible relaxation et résistent bien à l'humidité.

On distingue plusieurs types de fibres de carbone, selon le taux de carbone qu'elles contiennent : des fibres à haute résistance « HR », des fibres à haut module, « HM », des fibres à très haut module « THM » et des fibres intermédiaires (Chatain,2001).

- **Verre**

Les fibres sont très utilisées dans plusieurs domaines en raison de leur coût , moins élevé par rapport à celui du carbone (environ 1/10 du prix du carbone). leur module d'élasticité varient de 70 à 85 GPa et leur allongement ultime varie de 2 à 5%. Leur association à une matrice adéquate, réduit leur sensibilité à l'humidité.

- **Aramide**

Les 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 et aux températures élevées ainsi qu'aux radiations 'UV'.

Les différents matériaux de renfort sont représentés par la figure I.5.

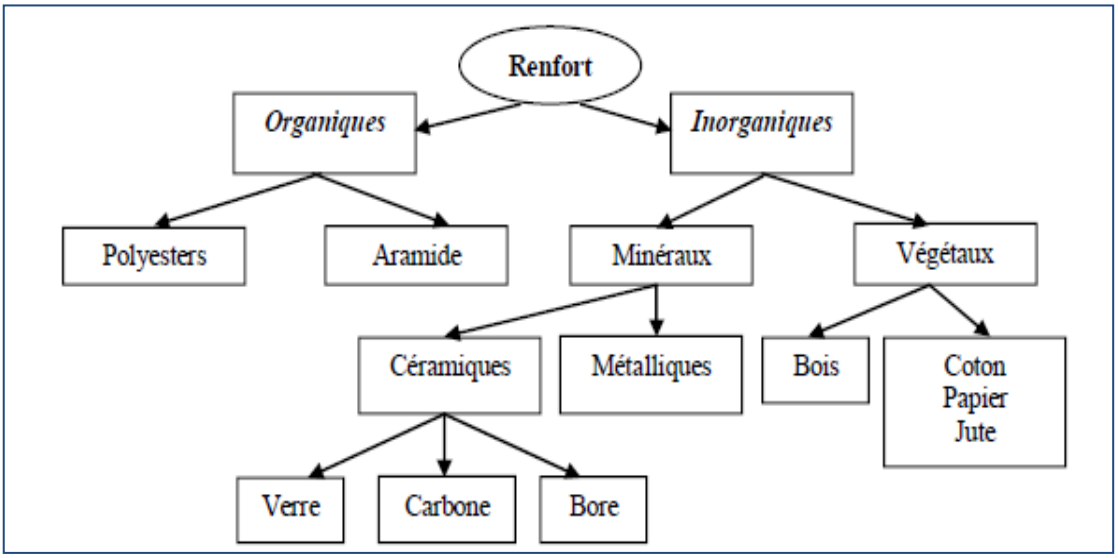


Figure I.5. Différents matériaux de renfort (Berreur et al.,2002)

L'ensemble des propriétés mécaniques des différentes fibres sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau. I.1. Caractéristiques mécaniques de différentes fibres (Hamelin,2002)

Type de fibre	**Diamètre (µm)**	**densité**	**Résistance en traction (MPa)**	**Module de traction (MPa)**	**Allongement à la rupture (%)**	**Température de fusion(°C)**
Verre E	3 à 30	2,54	3400	73000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2500	55000	4,5	-
Verre R	3 à 30	2,48	4400	86000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1,8	2200	400000	0,5	2500
Aramide HR	12	1,45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3100	130000	2	480

b- Matrices

En plus du rôle important que jouent les fibres dans le FRP, la matrice à son tour, a son importance dans le fonctionnement de celui-ci. En effet, la matrice permet de transférer des charges entre les différentes fibres, assurent la liaison de celles-ci et leur répartition sur l'ensemble du composite. Elle protège également les fibres des risques d'abrasion et des autres attaques environnementales et chimiques (Foo et al., 2001).

Les polymères les plus utilisés restent les polyesters, de par leur facilité de fabrication et surtout de leur faible prix de revient.

Les vinylesters qui présentent un coût plus élevé que ce celui des polyesters, présentent une aptitude à la protection des fibres de verre du milieu cimentaire en évitant les réactions acide-base qui risquent de les détériorer.

Néanmoins, les matrices époxydes sont largement utilisées, notamment pour l'imprégnation in situ des feuilles de FRP lors du procédé de stratification au contact, en raison de leurs qualité d'adhérence même si leur coût dépasse encore celui des vinylesters.

L'ensemble des caractéristiques mécaniques des résines époxy sont résumées dans le tableau.1.2.

Tableau. I.2. Caractéristiques mécaniques des résines epoxy (Bardonnet 1992).

Résistance à la traction	(MPa)	50 à 80
Module de traction	(GPa)	3 à 10
Allongement à la rupture	(%)	1 à 1,5
Résistance à la compression	(MPa)	140 à 150
Enegie de rupture au choc	(kJ/m^2)	7 à 10

I.3.3.2.2. Comportement mécanique des FRP

Ils présentent un comportement linéaire plastique fragile en traction et ce pour les différents types de fibres (carbone, verre et aramide).

C'est une propriété très importante en termes d'utilisation structurale de composites «FRP» (Teng et al., 2002). La figure I.6, montre le comportement typique des FRP de verre et de carbone en comparaison avec celui de l'acier. Le comportement fragile des matériaux composites diffère du comportement ductile de l'acier doux.

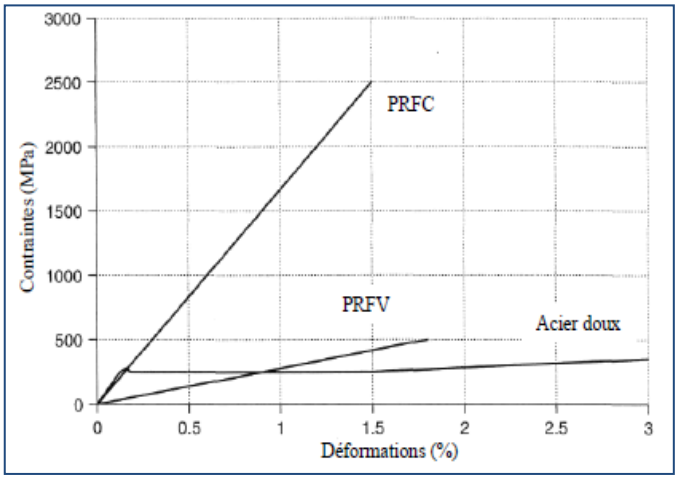


Figure I.6. Courbes contraintes-déformations pour l'acier doux et les FRP à base de carbone et de verre (Teng et al.,2002, Rizkalla et al. 2003).

Les propriétés des FRP sont fonction de la quantité, type et de la direction des fibres qu'ils contiennent. Ils dépendent également de la matrice utilisée ainsi que du rapport du volume des fibres par rapport au volume du composite. A titre indicatif, sont données les propriétés mécaniques de plusieurs FRP dans le tableau 1.3.

Tableau. I.3.Caractéristiques mécaniques de FRP de verre, de carbone et d'aramide (Teng et al., 2002).

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

Ces auteurs donnent des plages de valeurs pour les résistances et les rigidités de différents FRP. Il existe d'autres produits particuliers dont les caractéristiques ne figurent pas dans ce tableau.

I.3.3.3. Comportement en compression du béton confiné par FRP

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 (soit par des étriers peu espacés ou bien par collage de composites) de façon à réduire, voir empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité augmentent.

Cette amélioration est due à la pression de confinement latérale qui s'exerce sur le béton. Ce procédé est communément appelé confinement du béton en compression.

Dans ce cas, le béton résiste à la compression alors que le composite est sollicité par des efforts de tension et de cisaillement.

La figure I.7, montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton.

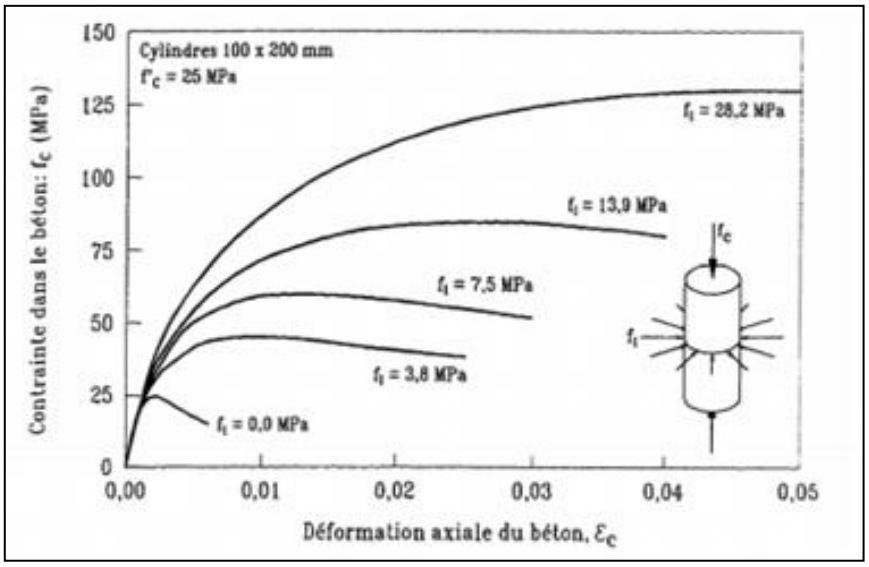


Figure I.7.Effet de la pression de confinement comportement du béton (Young et al. 2002).

Young et al. (2002) ont montré que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres en béton, ainsi que leur ductilité.

Par ailleurs, le comportement du béton confiné avec FRP, dépend fortement du niveau de confinement. Ainsi, pour de faibles valeurs de la contrainte axiale, le béton confiné présente un comportement similaire à celui du béton non confiné. L'expansion latérale du béton confiné par FRP, croit considérablement sous l'effet de la contrainte axiale qui aura atteint la résistance maximale du béton non confiné. Le gonflement du béton est accompagné d'un accroissement des microfissures.

Sous un faible confinement, la contrainte se dégrade après avoir atteint la contrainte maximale du béton non confiné, jusqu'à la rupture du FRP (Miyauchi et al., 1999 ; Nakatsuka et al., 1998).

La courbe contraintes-déformations présente une branche post-pic descendante (tronçon AC) comme montré par la figure I.8.

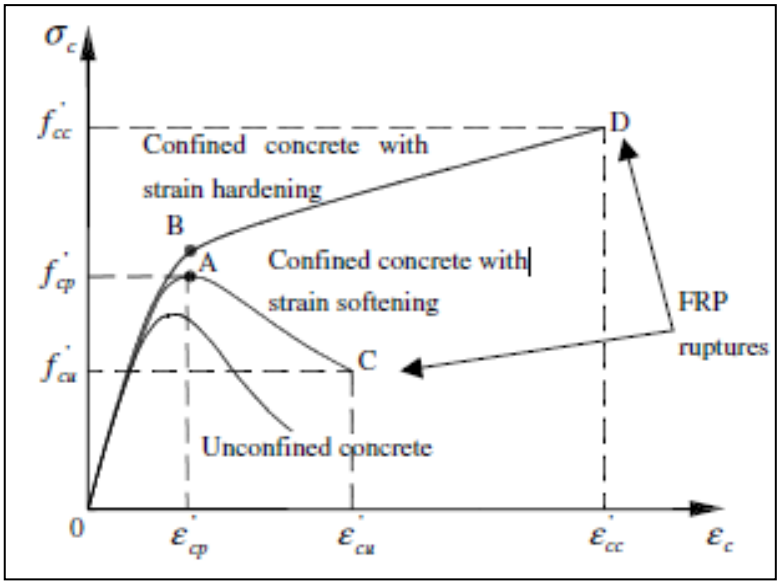


Figure I.8. Courbes contraintes-déformations béton confiné (Wu et al., 2006)

Par ailleurs, lorsque le confinement est assez fort, le FRP est sollicité après avoir atteint la contrainte maximale du béton non confiné et applique sur le noyau de béton une pression qui augmente continuellement jusqu'à la rupture du FRP.

La courbe contraintes-déformations du béton confiné avec suffisamment de FRP, présente une réponse bilinéaire distincte (Mirmiran et al.,1997 ; Toutanji HA,1999 ; Xiao et Wu,2001) comme indiqué sur la figure I.8 (tronçon BD). La courbe présente un brusque adoucissement après une zone transitoire qui apparait lorsque la résistance en compression du béton non confiné est atteinte.

De nombreuses recherches ont montré que le confinement, par FRP, augmentait significativement la résistance en compression et la ductilité des colonnes en béton.
En effet, d'après Mander et al. (1988), les FRP s'opposent aux déformations dues aux charges axiales, ce qui améliore à la fois l'effort et la contrainte de compression ultime du béton. Le confinement augmente également la ductilité des colonnes renforcées (Shahawy et al. 2000 et Volety, 2006). Néanmoins, l'amélioration de la force de compression du béton après confinement externe de FRP a été d'bord enregistrée par Fardis et Khalili (1981 et 1982).

I.4. Revue des travaux antérieurs

- Fardis et Khalili (1982)

Ils ont réalisé un confinement avec des enveloppes différentes de tissus de matériaux composites à base de fibres de verre sur des cylindres de dimensions Ø76 mm x152 mm et Ø102 mm x204 mm qu'ils ont soumis à des essais de compression uni axiale.
Ils notent alors, une amélioration de la résistance à la compression et de la ductilité. Ils s'inspirent des formules de Richart et al. (1928).

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4{,}1\frac{P}{f'_{co}} \qquad \text{(I.1)}$$

et de Newmann et Newmann

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3{,}7\left(\frac{P}{f'_{co}}\right)^{0{,}86} \qquad \text{(I.2)}$$

pour établir deux modèles qui permettent d'estimer l'augmentation de la résistance à la compression du béton confiné en remplaçant la pression de confinement active (P) par la pression de confinement latérale (f_l) qui se développe au sein du FRP avant sa rupture. Elle s'écrit comme suit :

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{D} \qquad \text{(I.3)}$$

Les modèles proposés par ces auteurs, s'écrivent sous la forme suivante:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4{,}1\left(\frac{2 f_{frp} t_{frp}}{f'_{co} D}\right)^{0{,}86} \qquad \text{(I.4)}$$

Ils ont par ailleurs montré qu'il y avait une bonne concordance entre les prédictions de leurs modèles et les résultats expérimentaux des essais précédemment cités et ce pour un rapport de confinement $\frac{f_l}{f'_{co}}$ allant de 0,1 à 0,6.

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale du béton confiné par FRP est donnée par :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,001\frac{E_{frp}t_{frp}}{D.f_{co}^{'}} \quad \text{(I.5)}$$

où ε_{co} = 0,002 est la déformation maximale correspondant à la résistance maximale du béton non confiné.

- **Saadatmanesh et al. (1994)**

Ils s'inspirent du modèle de Mander et al. (1988), pour modéliser le confinement avec lamelles en matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone collées en surface de colonnes circulaires et de colonnes rectangulaires.

Leur étude tient compte des paramètres suivants : l'épaisseur de la lamelle, l'espacement des lamelles ainsi que leurs propriétés et la résistance du béton de référence. Ils formulent leur modèle en substituant à la contrainte de confinement dûe aux armatures transversales (P) dans la formule de Mander et al.

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 2,254\sqrt{1+7,94\frac{P}{f_{co}^{'}}} - 2\frac{P}{f_{co}^{'}} - 1,254 \quad \text{(I.6)}$$

La pression de confinement maximale du FRP (f_l) donnée précédemment. Ils obtiennent, le modèle suivant :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 2,254\sqrt{1+7,94\frac{f_{frp}t_{frp}}{f_{co}^{'}.D}} - 4\frac{f_{frp}t_{frp}}{f_{co}^{'}.d} - 1,254 \quad \text{(I.7)}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1+5\left(\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} - 1\right) \quad \text{(I.8)}$$

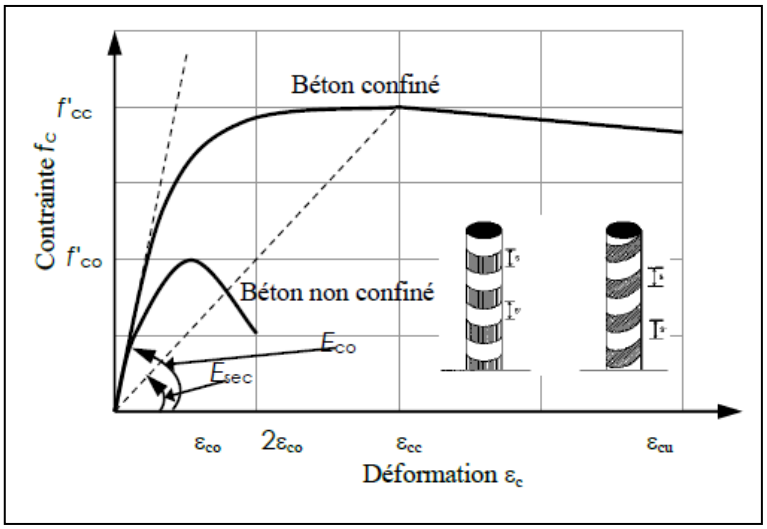


Figure I.9. Modèle contrainte-déformation pour béton non confiné et confiné (Saadatmanesh et al, 1994).

Dans le cas des colonnes partiellement confinées avec un grand espacement entre les bandes FRP , les auteurs suggèrent d'utiliser le même modèle, mais en remplaçant (f_l) par la pression de confinement effective (f'_l) tel que

$$f_l^{'} = k_g f_l$$

où k_g : coefficient d'espacement qui est donné par :

$$k_g = \frac{(1 - S_{frp}/2D)^2}{1 - \rho_{sc}}$$

où S_{frp} : espacement vertical entre les bandes de FRP

ρ_{sc} : rapport de la section des armatures longitudinales à la section du béton.

- **Miyauchi et al.(1997)**

Ils réalisent des essais de compression sur des colonnes renforcées par tissu de fibres de carbone. Les essais sont conduits sur des colonnes de dimensions Ø100 mm x200 mm et Ø150 mm x300 mm, en faisant varier la résistance à la compression du béton (30 et 50 MPa) ainsi que le nombre de couches (de 1 à 3).

Ils ont conclu que la résistance du béton ainsi renforcé, augmente linéairement avec le nombre de couches du matériau composite, ce qui n'est pas le cas avec les dimensions des colonnes et la résistance en compression du béton de référence.

Ils ont également montré que la déformation correspondant à la contrainte maximale du béton confiné, augmente de façon exponentielle avec le nombre de couches du composite. Elle est également fonction de la résistance du béton de référence.

Ces auteurs ont proposé d'estimer la résistance maximale du béton confiné à la compression axiale, à partir de la formule suivante :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + 3,485\left(\frac{2 f_{frp} t_{frp}}{f_{co}^{'} D}\right) \qquad \text{(I.9)}$$

Ce modèle a été revu en 1999 pour avoir la forme suivante :

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'}\left(1 + 2,98\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right) \qquad \text{(I.10)}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression axiale est donnée selon la résistance à la compression du béton de référence par :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1 + 10,6\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{0,373}\right) \qquad si \qquad f_{co}^{'} = 30MPa \qquad \text{(I.11.}a\text{)}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1 + 10,5\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{0,525}\right) \qquad si \qquad f_{co}^{'} = 50MPa \qquad \text{(I.11.}b\text{)}$$

-Mirmiran et al.(1998)

Mirmiran et shahawy ont testé, en 1997, des spécimens formés par des tubes en FRP remplis de béton. Le tube assure alors deux fonctions à savoir, le confinement et le coffrage. Ils établissent le modèle suivant :

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} + 4,269\, f_l^{0,587} \qquad \text{(I.12)}$$

En 1998, Mirmiran et al.ont testé d'autres spécimens en tenant compte de l'élancement (L/d).

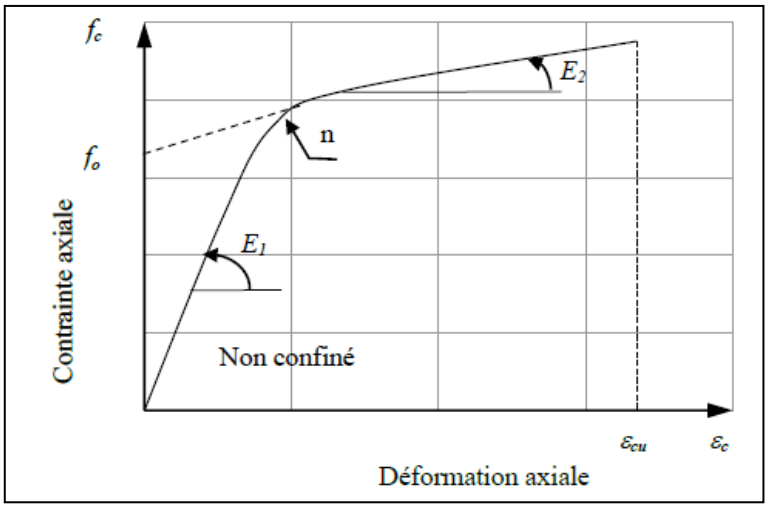


Figure I.10. Modèle contrainte-déformation pour béton non confiné et confiné (Mirmiran et al, 1998).

Ils ont proposé un nouveau modèle de résistance à la compression du béton confiné et qui est fonction de la résistance à la compression d'un specimen de référence ayant un élancement de $\frac{l}{D}=2\left(f'_{cc2:1}\right)$.Le modèle s'écrit comme suit :

$$f'_{cc}=f'_{cc2:1}\left[0,0288\left(\frac{l}{D}\right)^2-0,263\left(\frac{l}{D}\right)+1,418\right] \qquad \text{(I.13)}$$

- **Toutanji (1999)**

Il a étudié des éprouvettes cylindriques en béton confinées par stratification manuelle de composites FRP. L'auteur se base sur le sur le modèle de Richart et al., (1928) pour le béton confiné avec des FRP et formule son modèle comme suit :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}=\left(1+3,5\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{0,85}\right) \qquad \text{(I.14)}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + \left(310,57\varepsilon_{r,rup} + 1,9\right)\left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1\right) \qquad \text{(I.15)}$$

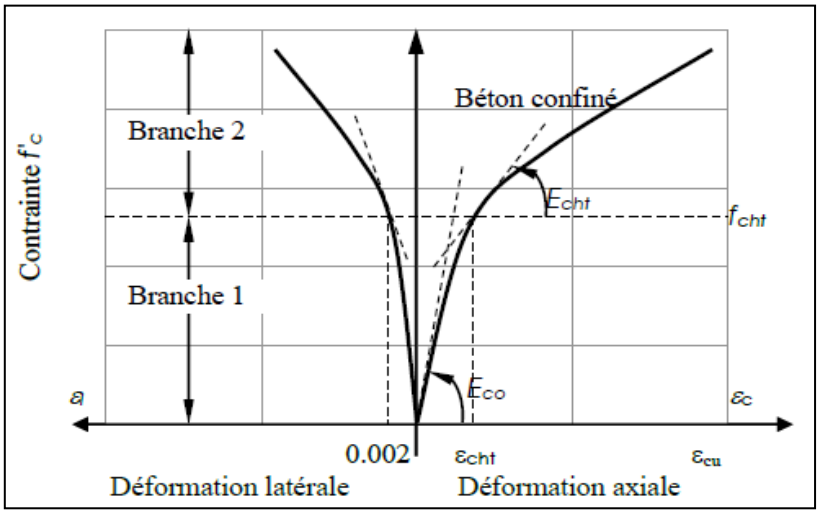


Figure I.11. Modèle contrainte-déformation (Toutanji, 1999).

Le modèle de résistance à la compression axiale a été révisé en 2005 par Matthys et al. Pour avoir la forme suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \left(1 + 2,3\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{0,85}\right) \qquad \text{(I.16)}$$

- Saafi et al. (1999)

Ils ont conduit des essais sur des tubes en FRP remplis de béton. Ils obtiennent un modèle peu différent de celui de Toutanji. La différence est due au fait que l'adhérence du FRP est meilleure comparée à celle des tubes.

Ils élaborent le modèle suivant :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \left(1 + 2,2\left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{0,84}\right) \qquad \text{(I.17)}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + \left(537\varepsilon_{fu} + 2,6\right)\left(\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} - 1\right) \qquad \text{(I.18)}$$

- **Xiao et Wu (2001)**

Ils ont mené une étude de réhabilitation de trois spécimens de dimensions :
Ø610 mm x240 mm enveloppées avec des coques en composite préfabriqué GFRP.
Les coques sont placées sur la circonférence des colonnes en séquences, puis collées ensemble formant ainsi une enveloppe continue.
Les spécimens sont soumis à un chargement horizontal et à une force de compression. Ils ont noté une amélioration de la capacité portante de la colonne réhabilitée qui a atteint celle de la section de référence.
En 2000, ces auteurs proposent le modèle suivant :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1,1 + K_1 \frac{f_l}{f_{co}^{'}} \qquad \text{(I.19)}$$

qui s'écrit finalement comme suit :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1,1 + \left(4,1 - 0,75\frac{f_{co}^{'2}}{C_j}\right)\frac{f_l}{f_{co}^{'}} \qquad \text{(I.20)}$$

Où C_j est le module de confinement donné par la formule suivante :

$$C_j = 2\frac{t_{frp}}{d}E_{frp}$$

Ce modèle a montré une bonne concordance avec les résultats expérimentaux obtenus par ces auteurs pour un rapport de confinement allant de 0,14 à 0,7.
Xiao et Wu ont révisé, en 2003, le coefficient K_1 après avoir mené une autre série d'essais, pour lui donner la forme suivante :

$$k_1 = 4,1 - 0,45\left(\frac{f_{co}^{'2}}{C_j}\right)^{1,4} \qquad \text{(I.21)}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\varepsilon_{fu} - 0,0005}{7\left(\frac{f_{co}^{'}}{C_j}\right)^{0,8}} \qquad (I.22)$$

- **Lam et teng (2002)**

Ils mènent une étude sur les résultats de 199 éprouvettes en béton testées par plusieurs chercheurs présentant une résistance à la compression du béton non confiné allant de 18 à100 MPa.

Ces spécimens étaient confinés avec des FRP de carbone, de verre et d'aramide. Ces auteurs ont montré l'existence d'une relation linéaire entre le gain en résistance et le niveau de confinement. Ils ont proposé le modèle suivant :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1,15 + 2,16\frac{f_l}{f_{co}^{'}} \qquad (I.23)$$

Ils ont par la suite déduit que ce modèle surestime légèrement la résistance à la compression du béton confiné avec des FRP. Ils ont alors révisé leur modèle en lui donnant la forme suivante :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + 2\frac{f_l}{f_{co}^{'}} \qquad (I.24)$$

Cette équation a été encore revue en remplaçant la pression de confinement f_l par la valeur réelle $f_{l,r}$ telle que : $f_{l,r} = \frac{2t_{frp}E_{frp}}{D}$

Ils le modèle s'écrit finalement comme suit :

$$\frac{f_{cc}^{'}}{f_{co}^{'}} = 1 + 3,3\frac{f_{l,r}}{f_{co}^{'}} \qquad (I.25)$$

Ce modèle donne une amélioration de la résistance pour des rapports de confinement $f_{l,r} / f_{co}^{'} \geq 0,07$.

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 15\frac{f_l}{f_{co}^{'}} \qquad pour \quad CFRP \tag{I.26.a}$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 27\left(\frac{f_l}{f_{co}^{'}}\right)^{0,7} \qquad pour \quad GFRP \tag{I.26.b}$$

- **Berthet et al.(2005)**

Ils réalisent des essais sur des éprouvettes cylindriques de dimensions Ø70 mm x140 mm préfabriqués à partir de béton de résistance à la compression de 100 et 200 MPa, ainsi que des éprouvettes de dimensions Ø160 mm x320 mm ayant des résistances caractéristiques de 25, 40 et 50 MPa.

Les éprouvettes ont été confinées à l'aide d'enveloppes FRP à base de fibres de carbone ou de verre en faisant varier le nombre de plis de 2 à 12.

Ils ont montré que le coefficient d'efficacité du confinement k_1 baisse pour des résistances > 50 MPa. Le gain de résistance est fonction du rapport de confinement et de la résistance à la compression maximale du béton $f_{co}^{'}$.

Cependant, pour les bétons de résistance à la compression comprise entre 25 et 50 MPa, le gain en résistance dépend seulement de la pression de confinement due au FRP.

Berthet et al. proposent en 2006, le modèle suivant :

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} + 3,45\, f_{l,r} \qquad pour \quad 20 \le f_{co}^{'} \le 50MPa \tag{I.27.a}$$

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} + \frac{9,5}{\left(f_{co}^{'}\right)^{1/4}} f_{l,r} \qquad pour \quad 50 \le f_{co}^{'} \le 200MPa \tag{I.27.b}$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec FRP est donnée par :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + \sqrt{2}\left(\frac{E_l}{f_{co}^{'2}}\right)^{2/3}\left(\varepsilon_{fu} - \upsilon_c \varepsilon_{co}\right) \tag{I.28}$$

avec : $E_l = \frac{t_{fp}}{r} E_{fp}$

υ_c : coefficient de poisson du béton

- **Benzaid et al. (2010)**

L'étude a porté sur l'effet du confinement par enveloppes en CFRP, en considérant différents nombres de plis allant de 1 à 3 plis, sur des cylindres en béton. Au total, 30 spécimens ϕ 160 x 320 mm et présentant des résistances caractéristiques de 26 MPA, 50 MPa et 62 MPa ont été fabriqués.

Les cylindres en béton armés ont été confectionnés en introduisant 4 HA12 comme armatures longitudinales et 3 ϕ8 mm comme armatures transversales avec un espacement de 140 mm.

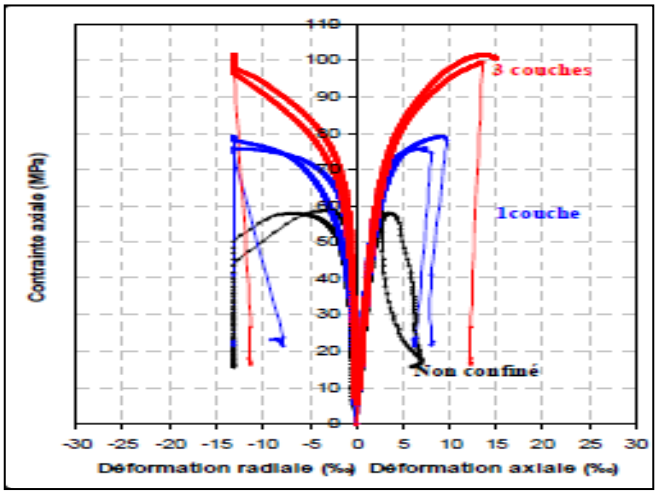


Figure I.12.Courbes contraintes-déformations des cylindres en béton armé (Benzaid et al. 2010).

Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité en fonction de l'augmentation du nombre de plis de CFRP.

Les auteurs ont proposé par ailleurs un modèle de résistance au pic du béton confiné, donné par :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1,6 \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \qquad (I.29)$$

La déformation axiale ε_{cc} correspondant à la résistance maximale en compression du béton confiné avec CFRP est donnée par :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 5,48\frac{f_l}{f'_{co}} \qquad \text{(I.30)}$$

- **Thong et al. (2013)**

Ils ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de coté.

Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales Ø12mm et 4 barres transversales lisses Ø6mm, espacées de 60 mm. Trois valeurs de la résistance caractéristique du béton non confiné sont considérées (40 MPa, 80 MPa et 100 MPa).

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

La figure I.13, montre que les colonnes ont été collées à 4 segments circulaires en béton de même résistance caractéristique afin de modifier la forme de la section transversale du carré au cercle, comme indiqué par la figure I.14.

Figure I.13. Segments circulaires en béton (Thong et al, 2013).

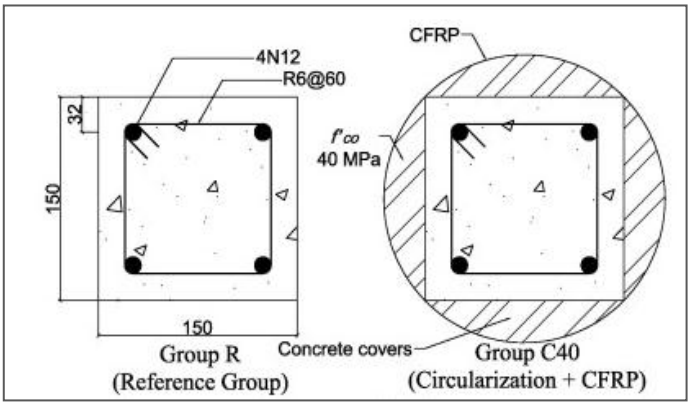


Figure I.14. Changement de section de la colonne (Thong et al, 2013).

Les colonnes modifiées ont été par la suite enveloppées avec 3 couches de CFRP. Une série de spécimens a été soumise à une charge axiale concentrique, tandis que les autres colonnes ont été soumises à une charge excentrée.

Les auteurs ont montré que la capacité portante ainsi que la ductilité des différents spécimens testés augmentent significativement.

Il a été aussi montré que le CFRP avait le même effet de confinement sur les colonnes testées que sur les colonnes circulaires testées.

- **Zain Saeed et al. (2016)**

Les auteurs se sont intéressés à l'évaluation de la performance du confiement avec un CFRP, à haute résistance, de cylindres en béton présentant de faibles résistances caractéristiques à la compression. Les essais de compression uniaxiale ont été conduits sur 18 cylindres .Les paramètres considérés dans cette recherche, sont la faible résistance caractéristique du béton non confiné (12,41 MPa et 16,55 MPa) et l'épaisseur de l'enveloppe de CFRP (1 et 2 plis). La figure I.15 montre le mode de rupture des spécimens confinés.

Figure I.15. Modes de rupture des colonnes confinées avec CFRP (Zain Saeed et al., 2016).

Les résultats obtenus montrent que le confinement avec CFRP peut améliorer d'une façon appréciable la résistance et la déformation ultimes même de cylindres en béton à faible résistance caractéristique.

Il a été constaté que les gains en résistance atteignent 70,9% et 121,81% (pour 1 et 2 plis) respectivement pour le béton ayant une résistance de12, 41 MPa, tandis qu'ils présentent des

valeurs moindres pour le béton de résistance de 16,55 MPa puisqu''ils atteignent 59,74% et 109,91% pour 1 et 2 plis de CFRP respectivement.
Ainsi, les structures en béton qui présentent des déficiences sismiques, peuvent retrouver leur état d'origine et même survivre à d'autres séismes grâce à l'amélioration de la résistance et de la ductilité obtenue après leur réparation avec des CFRP à haute résistance.

I.5. Conclusion

La réparation ou le renforcement, par matériaux composites, vise l'augmentation de la résistance et de la ductilité des structures dégradées ou présentant des défauts de conception ou d'exécution et l'adaptation des structures à de nouvelles conditions d'exploitation ainsi que leur mise en conformité vis-à-vis des règlements en vigueur.
La technologie de renforcement ou de réparation avec des Polymères Renforcés de Fibres (FRP), est l'un des procédés les plus utilisés dans le monde. En plus de leur résistance à la corrosion et aux attaques chimiques, les matériaux composites présentent la particularité d'être résistants et légers à la fois.

Ils constituent une solution alternative, très intéressante, à l'emploi de l'acier. La mise en œuvre des FRP est très simple, elle est réalisée soit par collage, à l'aide d'une résine, de plaques composites comme c'est le cas lors du renforcement d'une poutre ou d'une dalle, ou bien par l'enchemisement avec un tissu composite, imprégné d'une résine, des structures comme c'est le cas des colonnes.

Ces matériaux composites, conçus le plus souvent, à base de fibres de verre, ou de carbone, confèrent au béton confiné leurs caractéristiques mécaniques très élevées et modifient ainsi le comportement axial et radial de celui-ci.

L'enchemisement par un FRP permet donc de retarder la dilatation latérale de l'éprouvette de béton en la confinant, limitant la propagation de fissures internes, ce qui repousse la charge nécessaire à la rupture du béton et augmente sa déformabilité.

La réponse contrainte-déformation du béton passe d'un comportement élastique endommageable avec un post pic insignifiant à un comportement quasi bilinéaire jusqu'à la rupture; dont la première branche est quasiment identique à celle du béton non confiné, tandis

que la pente de la seconde branche dépend de l'épaisseur et de la rigidité de l'enveloppe de CFRP.

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

Néanmoins certains travaux ont été conduits sur le collage des cerces en composites en circonférence de cylindres en béton. C'est à partir de ce constat, qu'est née l'idée d'un confinement partiel avec des bandes continues en FRP, comme solution intermédiaire par rapport aux cas de confinement de colonnes existants.

Une étude expérimentale s'avère alors nécessaire pour mesurer l'effet du confinement partiel avec des bandes hélicoïdales en FRP et mettre en évidence l'importance de ce type de confinement et son apport quant à l'amélioration de la résistance et de la ductilité du béton.

Chapitre II : Etude expérimentale et proposition d'un modèle

Chapitre II : Etude expérimentale et proposition d'un modèle

II.1. Étude expérimentale

II.1.1.Introduction

Cette partie est consacrée totalement à la caractérisation expérimentale des cylindres en béton confinés hélicoïdalement par des bandes composites sous une charge axiale de compression. L'objectif consiste à mettre en exergue les performances de ce nouveau procédé de confinement comparativement aux techniques usuelles, proposées dans la littérature spécialisée, à travers l'analyse des résultats en termes de résistances, de ductilités et de modes de rupture des éléments cylindriques confinés .

Les caractéristiques mécaniques du FRP y sont également données. Les résultats obtenus ont permis de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés. Dans cette partie, nous présentons les matériaux utilisés, les éprouvettes, les différentes configurations de disposition des bandes composites, le mode d'essai et les résultats obtenus. En se basant sur les résultats expérimentaux, un modèle de confinement propre à ce procédé de confinement est développé.

II.1.2.Programme expérimental

Le programme expérimental contient un ensemble d'éprouvettes cylindriques dont certaines sont confinées avec un polymère renforcé de fibres de verre « GFRP» et d'autres non confinées (cylindres de référence) destinées à la caractérisation du béton. Les éprouvettes sont confectionnées au laboratoire de matériaux de l'université de Tizi-ouzou. Toutes les démarches et les étapes principales réalisées sont présentées.

Les cylindres sont de dimensions Ø150 mm x300 mm. La série d'éprouvettes est réalisée à partir de la même gâchée. Six cylindres, considérés de référence, ont été testés jusqu'à la rupture pour mesurer la résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours.

Les autres cylindres ont été confinés partiellement par des bandes composites disposées hélicoïdalement le long de l'éprouvette selon deux sens contraires. Deux paramètres ont été considérés, à savoir : la largeur de la bande composite en GFRP et le pas de l'hélice que forme le composite en circonférence du cylindre, qui traduit l'angle d'inclinaison de la bande. Les résultats obtenus, sur la série d'essais, ont permis de mettre en évidence l'importance des

deux paramètres considérés dans cette étude dans la mobilisation de la pression latérale de confinement.

II.1.3. Caractérisation des matériaux

II.1.3.1. Élaboration des spécimens cylindriques

Le béton utilisé est formulé à partir de la méthode de Dreux-Gorisse. Il est constitué par le mélange de sable naturel, de graviers lavés et séchés à l'étuve à une température de 105°c, de ciment de type CEM II, 32,5 de résistance réelle de 420 bars, d'eau et d'un superplastifiant (MedaFlow-30) fabriqué par Granitex. Les fractions massiques des différents constituants, pour $1m^3$ de béton, sont mentionnées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Composition du béton.

Constituants	**Masse en (Kg) pour $1m^3$**
Ciment	350
Sable	680
Gravier	1500
Eau	200
Super-plastifiant	5.4 l
Air occlus	2.3%
Slump test	7.2 cm

Les cylindres ont été coulés dans des moules normalisés, puis décoffrés au bout de 48 heures plus tard. Ils ont subi par la suite, une cure d'hydratation à température modérée et constante pendant 28 jours selon la norme NF EN12390-4 comme indiqué sur la figure II.1.

Figure II.1. Cure d'hydratation des cylindres en béton.

Les éprouvettes ont été séchées en surface et ont subi un surfaçage à base de soufre liquide, pour éviter que la force de compression ne soit excentrée pendant les essais.
Les cylindres destinés au confinement ont été, par ailleurs, soumis à un traitement de la surface latérale. Ils ont été nettoyés à l'aide d'une brosse métallique et autre papier verre, dans le but d'obtenir une surface à la fois légèrement rugueuse et propre de toute impureté, pouvant provenir de produits de coffrage ou de laitance du béton.
La surface ainsi traitée, serait prête à recevoir les bandes de GFRP. Ce procédé permet l'obtention d'une très bonne adhérence entre le GFRP et le béton.

II.1.3.2. Essai de compression simple du béton

L'essai de compression uni axiale du béton permet de déterminer les caractéristiques du béton, notamment sa résistance à la compression à 28 jours ainsi que l'allure de la courbe d'évolution des contraintes en fonction des déformations (loi de comportement).

Des éprouvettes cylindriques ϕ150mm x 300mm sont testées selon la norme ASTM C39/C39 M-03. L'essai illustré par la figure II.2, est conduit sous un chargement quasi-statique avec un pas de 0,5 KN/m. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique, de type ELE, avec une étendue de capacité de 3000 KN.

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

Figure II.2. Essai de compression sur cylindre en béton.

La figure II.3, présente la courbe moyenne des contraintes- déformations des cylindres en béton sous une charge de compression simple.

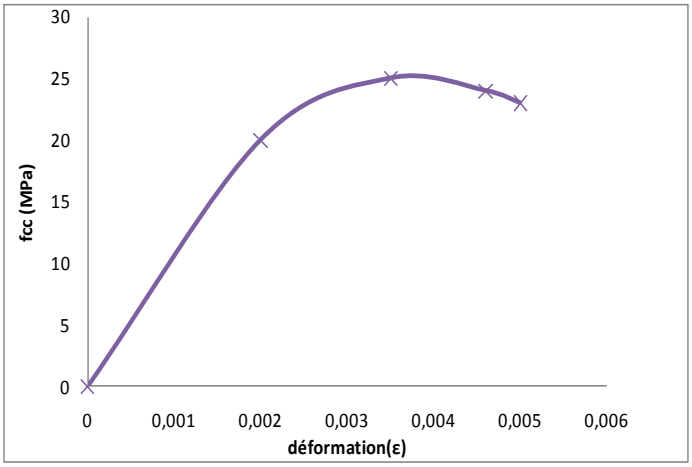


Figure II.3.Comportement du béton en compression.

L'essai est conduit sur 06 cylindres. La valeur moyenne de la résistance caractéristique à 28 jours est de 25,1 MPa. Les différentes caractéristiques du béton utilisé dans ce programme expérimental sont récapitulées dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Caractéristiques mécanique du béton.

Paramètres mécaniques	**Valeur**
Resistance à la compression à 28 jours (Mpa)	25.1
Déformation axiale de rupture (‰)	3.52
Module d'élasticité (Mpa)	29126
Coefficient de poisson	0.18

II.1.4. Matériau composite « GFRP »

L'utilisation des matériaux composites pour le confinement des cylindres en béton améliore les caractéristiques mécaniques à savoir : la résistance ultime à la rupture, la déformation correspondante et la rigidité.

II.1.4.1.Tissu de verre

Le tissu utilisé dans le composite ,est un tissu bidirectionnel de fibres de verre. Il se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope dont les caractéristiques mécaniques, sont données par le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques élastiques du tissu de verre.

Masse volumique (Kg/m^3)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	υ_{12}	υ_{13}	G_{12} (Mpa)
2600	72000	13600	0.31	0.33	4700

Les renforts en fibres de verre, se caractérisent par : une résistance élevée, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec la résine, une facilité de mise en œuvre, et un faible coût.

Le tissu composite utilisé est un ensemble de filaments surfacique de fils et de mèches, comme le montre la figure II.4. Il est constitué de chaines (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et de trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaines).

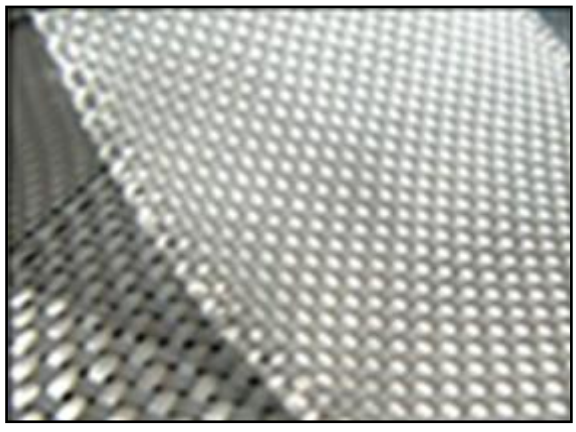


Figure II.4. Tissu de fibres de verre.

Le tissu de verre est utilisé pour le confinement des cylindres, sous forme de bandes de différentes largeurs et de différentes longueurs.

II.1.4.2. préparation de l'adhésif (résine époxy)

L'adhésif est formé en malaxant deux composants, montrés sur la figure II.5, à savoir : la résine organique (A) à performances élevées, de type époxyde, conçue par Granitex Algérie et un durcisseur (B) dans une proportion de 25% en masse .

Le mélange est effectué pendant 3 minutes, afin d'obtenir une teinte uniforme de couleur marron claire, à l'aide d'un agitateur à hélice électrique, avec une vitesse de rotation lente (300t/min maximum). Le malaxage se fait par petites quantités et à faible vitesse pour empêcher l'inclusion de l'air dans le mélange, tout en tenant compte des recommandations du fabriquant quand aux conditions de température et d'humidité.

On obtient ainsi, un mélange homogène à utiliser dans un délai variant de 30 à 60 minutes, selon la température ambiante. Au-delà de ce délai, l'adhésif n'est plus utilisable.
Le temps nécessaire au durcissement de la résine est d'environ 48 heures à une température modérée avoisinant 25°C.

Ces valeurs étant données à titre indicatif, et par prévention la cure de murissement de l'adhésif a été prolongée pour atteindre une dizaine de jours. Cette mesure a été adoptée du fait que la température n'est pas forcément constante lors de toutes les opérations de malaxage.

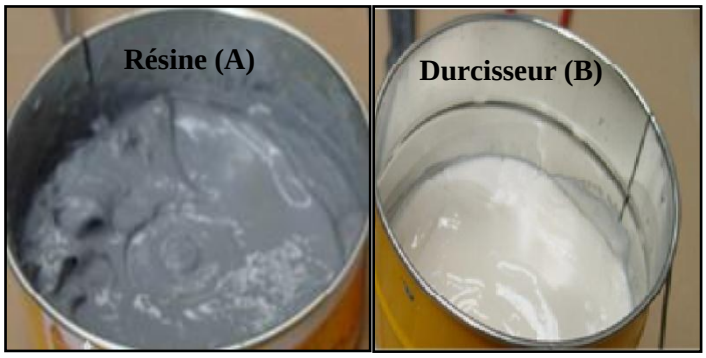


Figure II.5. Composants de l'adhésif : résine et durcisseur .

Le tableau (II.4) résume les caractéristiques de la résine fournies par le fabricant.

Tableau II.4 : Caractéristiques de la résine.

Paramètres	Valeur
Masse volumique (ISO 758)	1.1 $\pm$ 0.05 (kg/m3)
Viscosité (NF T76-102)	11000 (mPaS) à 25°C
DPU : durée pratique d'utilisation (NFP18 810)	1h15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse 6h Dur 16h
Resistance en compression (NA427)	> 70 (Mpa)
Resistance en flexion (NA 234)	> 25 (Mpa)
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 (Mpa)
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale (A/B)	Résine : 1 Kg Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20 °C	1010 à 1013 (Ω · m)

II.1.4.3.Caractéristiques mécaniques du GFRP

Les bandes composites en GFRP sont obtenues en imprégnant le tissu de fibres de verre d'une résine époxy, formant ainsi un composite qui sera appliqué sur les surfaces latérales des cylindres en béton, selon différentes configurations.

Les propriétés mécaniques et élastiques du GPRF sont fournies par le fabricant . Elles sont consignées dans le tableau II.5.

Tableau II.5. Caractéristiques mécaniques et élastiques du GFRP.

Grandeur	valeur
Résistance à la traction (f_{frp})	395 MPa
Modules d'élasticité en traction (E_{frp})	23950 MPa
Coefficient de poisson (υ_{frp})	0,3

II.1.5. Confinement externe avec le composite GFRP

II.1.5.1.Préparation des bandes composites en GFRP

Les bandes de tissu de verre de différentes largeurs sur différentes longueurs, selon l'angle d'enroulement, telles que montrées sur la figure II.6, sont découpées. Elles sont par la suite imprégnées de l'adhésif formé d'une résine époxy et de son durcisseur.

Figure II.6. Bandes de tissu de verre pour différentes largeurs.

Le tableau II.6 résume l'ensemble des caractéristiques des différentes bandes utilisées.

Tableau II. 6. Caractéristiques géométriques des bandes de tissu de verre.

bande	Pas de l'hélice	largeur	longueur	Rapport $2S_b/S_t$
B1	7,5 cm	4 cm	192,6 cm	1,08
B2	10 cm	4 cm	146,85 cm	0,82
B3	6 cm	3cm	237,4 cm	1
B4	7,5 cm	3 cm	190,77 cm	0,8
B5	10 cm	3 cm	144,45 cm	0,6
B6	6 cm	2 cm	236,35 cm	0,66
B7	7,5 cm	2 cm	189,46 cm	0,54
B8	10 cm	2 cm	142,71 cm	0,4

S_b et S_t sot les surfaces de la bande en GFRP et l'enveloppe entière GFRP respectivement

Les différentes étapes de préparation des bandes composites en GPRF sont résumées sur la figure II.7.

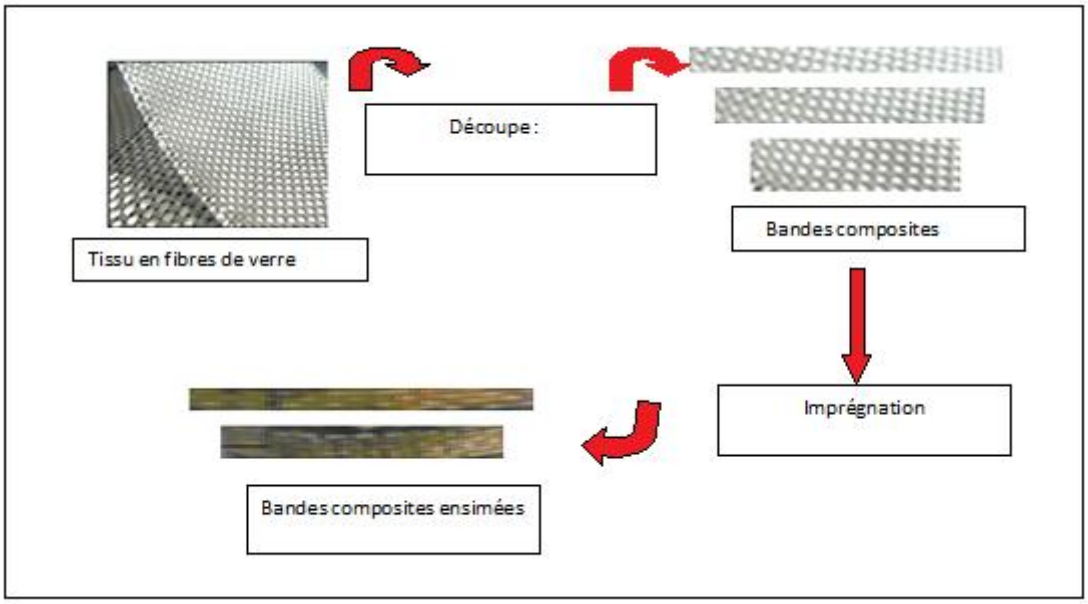


Figure II.7. Etapes de préparation des bandes composites en GFRP.

II.1.5.2.Application du composite GFRP

Après avoir préparé les bandes en GFRP à poser en circonférences des cylindres, en considérant différentes largeurs pour différentes valeurs du pas de l'hélice dictées par l'angle d'enroulement de la bande, des bandes supplémentaires de GFRP de 10 cm de largeur ont été également découpées. Elles sont destinées au collage en tête et bas de chaque cylindre confiné, en assurant un chevauchement de cette bande sur le quart du périmètre du cylindre, comme montré par la figure II.8. Elles ont pour rôle d'éviter le décollement du GFRP ainsi que la rupture prématurée aux extrémités du cylindre. Elles forment une sorte d'ancrage aux bandes hélicoïdales, leur permettant de développer pleinement leur résistance à la traction.

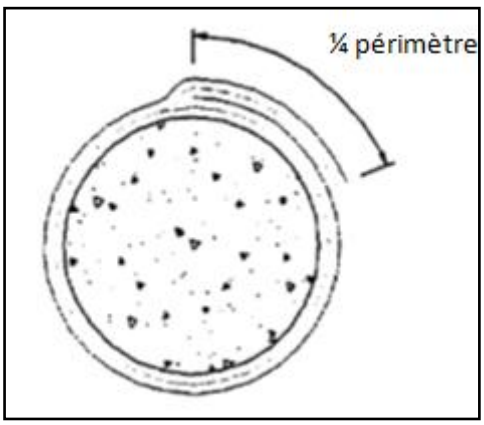


Figure II.8. Longueur de chevauchement (Benzaid R.,2010).

La figure II.9, illustre le procédé de collage des bandes en GFRP selon deux hélices, l'une dextre et l'autre senestre.

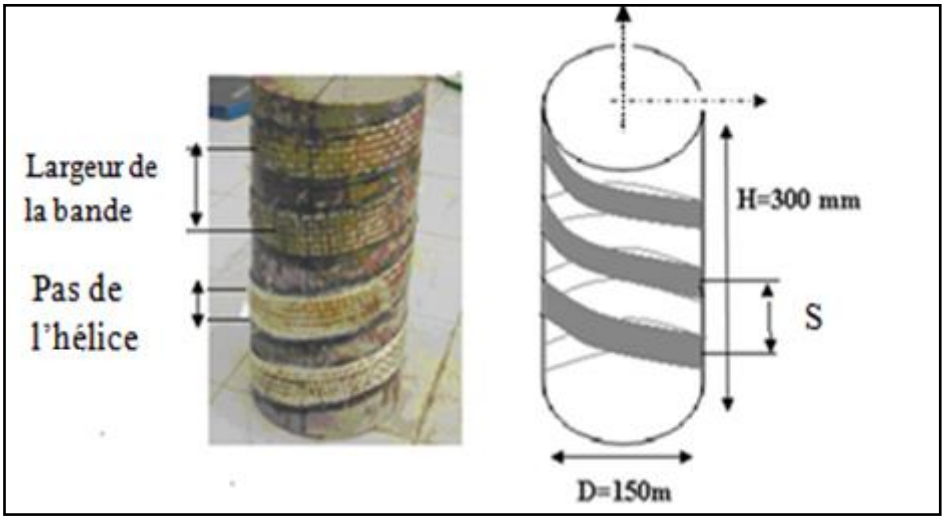


Figure II.9. Procédé de confinement hélicoïdal des cylindres en béton.

Après sa pose, le composite GFRP a subi un marouflage à l'aide d'un rouleau, afin d'éliminer les bulles d'air qui pourraient se former lors du collage. La figure II.10 montre, à titre indicatif, des cylindres confinés avec des bandes de différentes largeurs formant des hélices à différents nombres de spires.

Figure II.10. Différentes configurations de confinement hélicoïdal des cylindres en béton.

II.1.5.3. Nomenclature des éprouvettes

Un système d'identification des éprouvettes a été adopté. Les cylindres confinés sont désignés par : CCab, où C refère à Cylindre, C à Confiné, a au nombre de spires de l'hélice et b à la largeur de la bande de FRP.

A titre d'exemple, CC34 est la référence du cylindre confiné avec des bandes de 4cm de largeur formant des hélices de 3 spires (de 10 cm de pas) autour du cylindre. Par ailleurs, le cylindre de béton non confiné est désigné par : CBO.

Le tableau II.7, résume l'ensemble des références des cylindres étudiés.

Tableau II.7. Références des cylindres confinés.

Désignation	**Nombre de spires de l'hélice**	**Largeur de la bande de FRP**
CC53	5	3
CC52	5	2
CC44	4	4
CC43	4	3
CC42	4	2
CC34	3	4
CC33	3	3
CC32	3	2

II.1.6. Résultats expérimentaux

Les cylindres confinés sont soumis à la compression uniaxiale comme le montre la figure II.11. Les résultats sont enregistrés après rupture totale des spécimens.

Figure II.11. Essai de compression sur un cylindre confiné.

Le tableau II.8, donne les forces ultimes et les contraintes limites en compression des cylindres confinés.

Tableau II.8. Charges et contraintes ultimes des cylindres.

	Force ultime (KN)		**Contrainte à la rupture (MPa)**	
Cylindre testé	**Cylindre confiné**	**Cylindre non confiné**	**Cylindre confiné**	**Cylindre non confiné**
CC53	614,3		34,78	
CC52	560,3		31,73	
CC44	600,5		34	
CC43	566,6	441.56	32,08	25.1
CC42	504,8		28,6	
CC34	524,6		29,7	
CC33	471,3		26,7	
CC32	451,4		25,56	

Ces résultats sont représentés par un histogramme donné par la figure II.12.

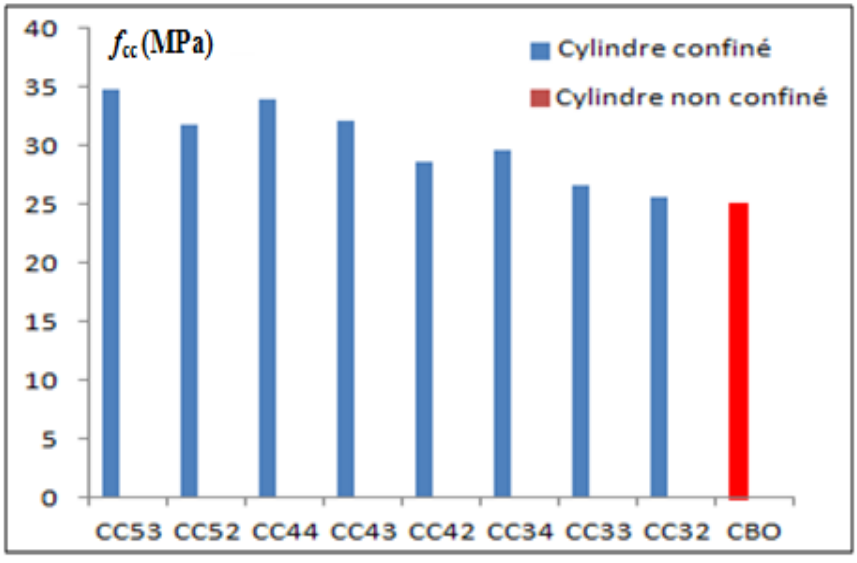


Figure II.12. **C**ontraintes limites en compression des cylindres confinés.

II.1.6.1. Courbes contraintes-déformations

la réponse globale force-déplacement de l'éprouvette en compression sous différents taux de confinement avec le GFRP est décrite par les courbes contraintes- déformations. Ces courbes sont données pour apporter plus de clarté par rapport au comportement des cylindres confinés.

Ce comportement dépend en grande partie du niveau de confinement en FRP dicté par la largeur de la bande et l'angle de rotation traduit par le pas de l'hélice. Les courbes montrent clairement que la résistance et la ductilité des spécimens sont tributaires de la largeur de la bande et de la valeur du pas de l'hélice.

Le confinement hélicoïdal est réalisé en considérant différents niveaux de confinement, qui se traduisent par les largeurs de 2cm, 3cm et 4cm ainsi que des hélices à 3spires, 4spires et 5 spires. On constate que toutes les courbes de comportement post-élastique, du béton confiné, sont situées au dessus de celle du béton non confiné.

Les courbes contraintes–déformations montrent que les spécimens ayant subi un faible taux de confinement présentent un comportement analogue à celui du béton de référence et leur rupture est donc fragile.

Au fur et à mesure que le taux de confinement augmente, le comportement de l'éprouvette devient ductile. Lorsque le béton cède, le composite est sollicité pour reprendre la totalité de la charge de compression jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

a- Variable pas de l'hélice (nombre de spires)

Les figures II.13 et II.14, illustrent le comportement des cylindres confinés avec des bandes de GFRP de 3 cm et 4cm respectivement, en considérant différents pas de l'hélice.

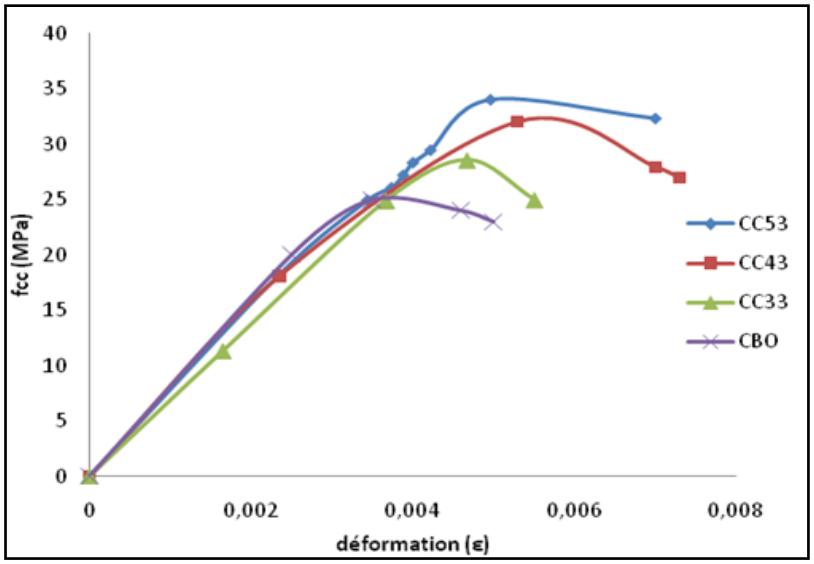


Figure II.13. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés avec des bandes GFRP de 3cm de largeur pour différents nombres de spires de l'hélice.

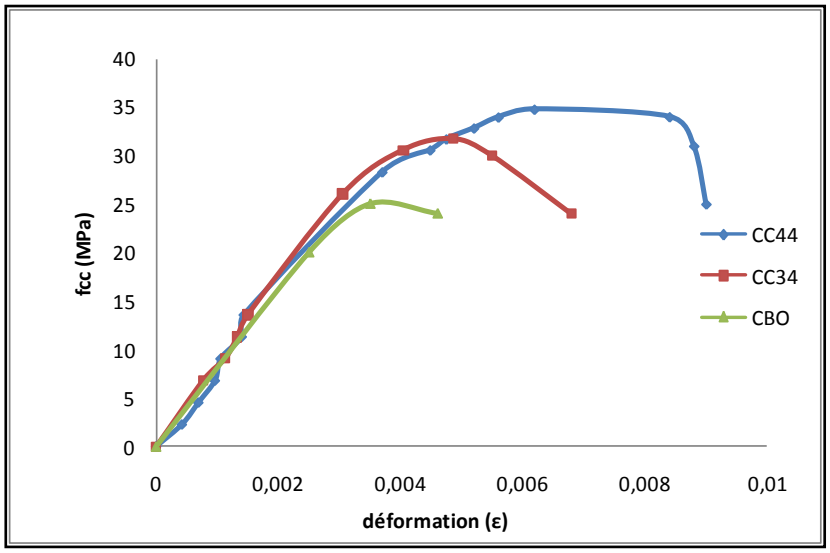


Figure II.14. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés avec des bandes GFRP de 4cm de largeur pour différents nombres de spires de l'hélice.

L'augmentation du nombre de spires ou la réduction de la valeur du pas de l'hélice, induit un gain en matière de résistance à la compression et de ductilité du spécimen.

On obtient ainsi des gains en résistance de 36% ,28.32% et 14,32% pour des cylindres confinés avec des bandes de 3cm de largeur et des hélices de 5 spires, 4spires et 3 spires respectivement.

De la même manière, on obtient des gains respectifs de 39,12% et 26,9% pour des hélices de 4 cm de largeur, formant des hélices à 4 spires et 3 spires respectivement.

La ductilité augmente également en augmentant le nombre de spires. La déformation axiale atteint un gain de 71,43% pour un cylindre confiné avec des bandes de 4 cm de largeur, formant des hélices de 4 spires.

b- Variable largeur de la bande

Pareillement, l'augmentation de la largeur de la bande du GFRP engendre une augmentation de la résistance et de la ductilité du spécimen comme le montrent les figures II.15 et II.16.

On obtient ainsi des gains en résistance de 26,9% ,14,32% et 2.24% pour des cylindres confinés avec des hélices de 3spires et des largeurs de 4cm, 3cm et 2cm respectivement.
On obtient également, des gains en résistance de 39,12% et de 28,32% pour des cylindres confinés avec des hélices de 4spires et des largeurs de 4cm et 3cm.

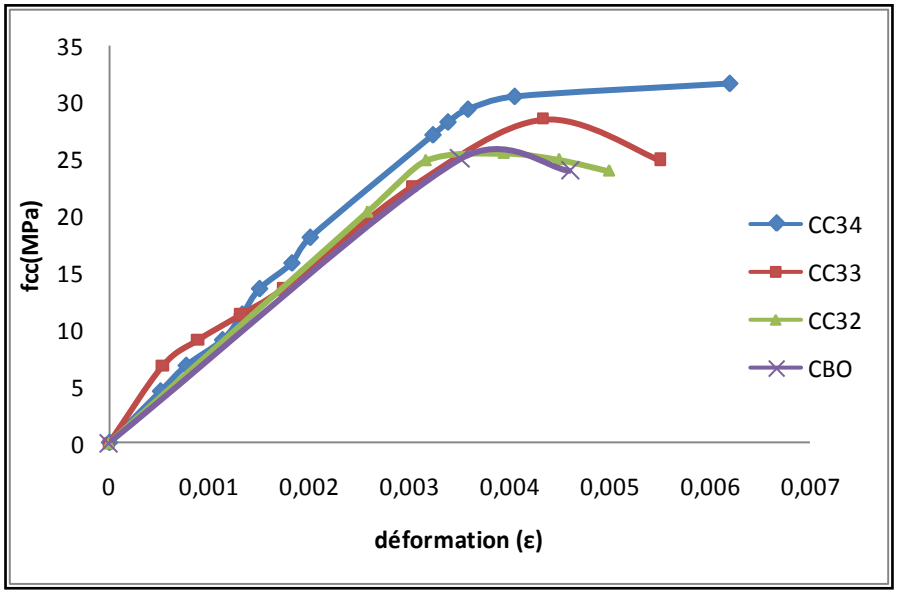


Figure II.15. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés, selon des hélices à 3 spires, avec des bandes de GFRP de différentes largeurs.

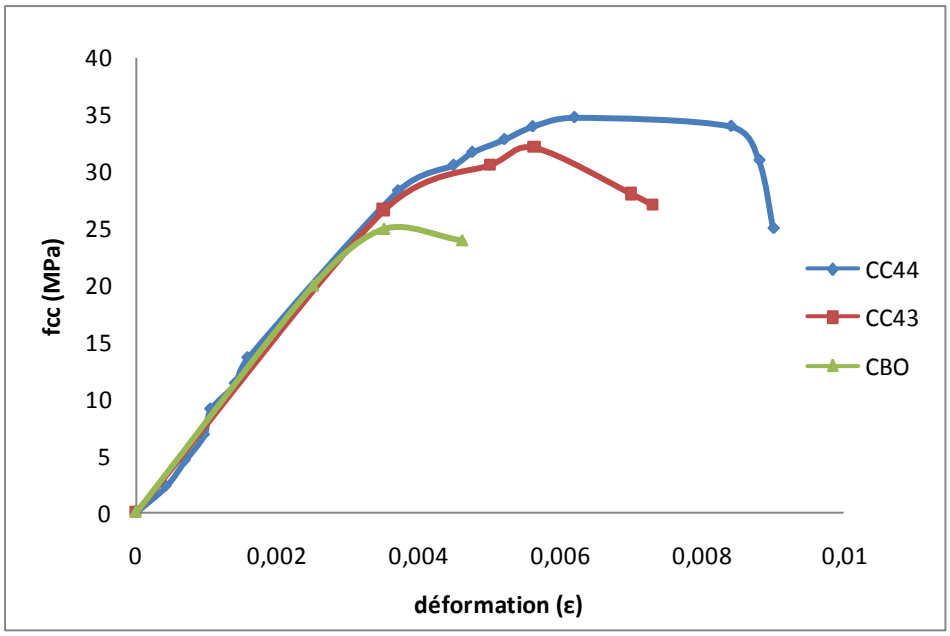


Figure II.16. Courbes contrainte-déformation des cylindres confinés, selon des hélices à 4 spires, avec des bandes de GFRP de différentes largeurs.

La ductilité varie dans le même sens que la largeur de la bande. On enregistre un gain, en déformation axiale, de 65,71% pour un cylindre confiné avec des bandes de 4 cm de largeur, formant des hélices de 3 spires.

II.1.6.2. Mode de rupture des spécimens confinés

Tous les spécimens confinés avec le GFRP présentent un comportement similaire et donc le même mode de rupture, tel que montré sur la figure II.17. La rupture ainsi produite a été fragile et brutale sans doute à cause de l'énergie emmagasinée par le GFRP durant le chargement des spécimens.

Cette rupture des cylindres confinés a été caractérisée par la rupture, dans le sens longitudinal, des bandes de GFRP.

Figure II.17. Mode de rupture des cylindres confinés avec le GFRP.

Après rupture, nous avons remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement hélicoïdal, jusqu'à la rupture totale des bandes composites. C'est le comportement classique d'un béton confiné sous compression axiale, tel que schématisé sur la figure II.18.

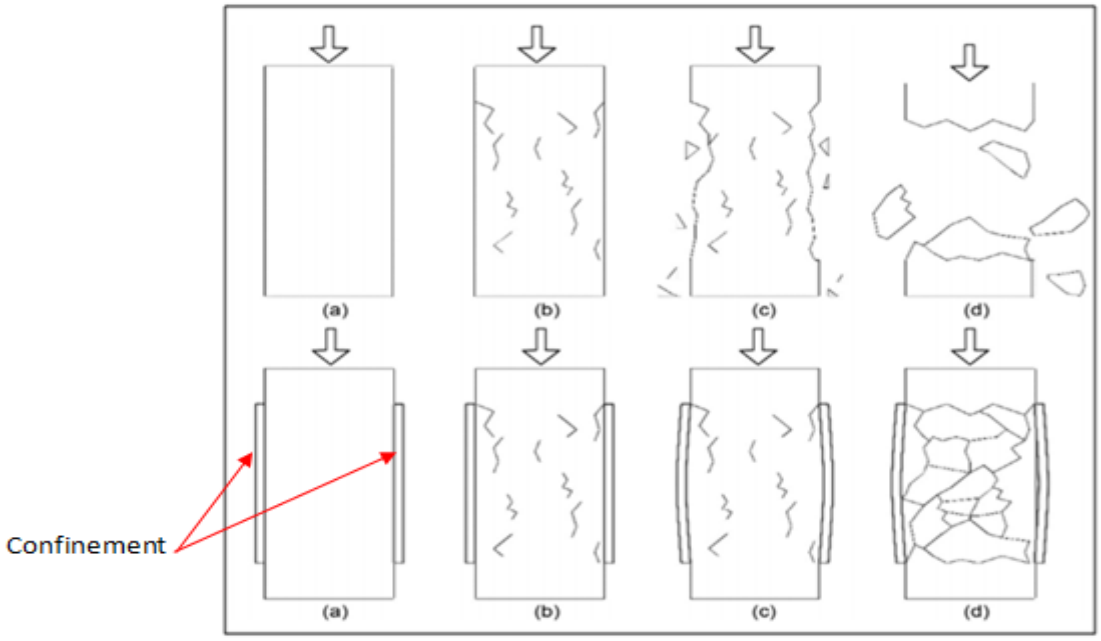


Figure. II.18. Evolution des dommages pour des colonnes confinée et non confinée durant le processus de chargement (Mazzucco G. et al.,2016).

L'analyse des résultats nous renseigne sur l'efficacité du nouveau procédé de confinement hélicoïdal proposé dans ce travail de recherche, en termes d'apport positif en résistance ultime et de déformation au pic correspondante.
Aussi, les différents résultats mettent en évidence l'influence des deux paramètres considérés dans cette étude à savoir la largeur de la bande composite et l'angle d'enroulement qui se traduit par le pas de l'hélice.

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

II.2. Proposition d'un modèle de résistance à la rupture du béton confiné avec GFRP

II.2.1. Introduction

En plus de l'enveloppe composite, on peut trouver dans la litérature specialisée beaucoup de nouvelles techniques de renforcement et de confinement(Spoelstra et Monti. G,.1999 ; Bradfort,. N M et Nanni. A., 1995) qui donnent naissance à des modèles théoriques de type résistance ou de type contrainte-déformation.

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

$$f_{cc} = f_{co} + kf_l \qquad \text{(II.1)}$$

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

II.2.2. Proposition d'un nouveau modèle

De nombreux modèles de confinement pour des colonnes en béton confinées avec FRP sont présentés (Berthet et al. ,2006 ; Jiang et Teng, 2007 ; Karabinis et Rousakis, 2002 ; Lam et Teng , 2003 ; Mathys et al., 2006 ; Wu et Zhou, 2010 ; yazici et hadi, 2012).

Les résultats expérimentaux des tests obtenus sur les cylindres confinés sont utilisés pour calibrer un modèle analytique de résistance au pic, du béton confiné, à la compression.

Le modèle analytique, qui décrit le confinement latéral à base d'armatures d'acier, développé par Mander et al. (1988) a été étendu et utilisé pour décrire l'effet du confinement procuré par le collage de bandes hélicoïdales en GFRP.

La pression latérale de confinement, pour une bande hélicoïdale, est calculée à partir de la formule suivante :

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{DS}$$

L: largeur de la bande de GFRP.
D : diamètre du cylindre en béton.
S : pas de l'hélice.
t_{frp} :épaisseur de la bande de GFRP.
f_{frp} : résistance ultime du GFRP à la traction.

Le modèle de résistance permet d'estimer la résistance au pic en compression du béton confiné à partir des résultats du calcul d'une régression du rapport de résistances $\left(\frac{f_{cc}}{f_{co}}\right)$ en fonction du rapport de confinement $\left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)$. La régression polynomiale des résultats expérimentaux représentée par la figure II.19, permet de prédire la résistance du béton confiné à partir de celle du béton non confiné et de la pression de confinement latérale.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = -1.33\left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^2 + 2.2\frac{f_l}{f_{co}} + 0.66 \qquad \text{(II.2)}$$

Néanmoins, par souci de simplification, l'équation de la régression linéaire représentée par la figure II.20, est donnée.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.35\frac{f_l}{f_{co}} + 0.79 \qquad \text{(II.3)}$$

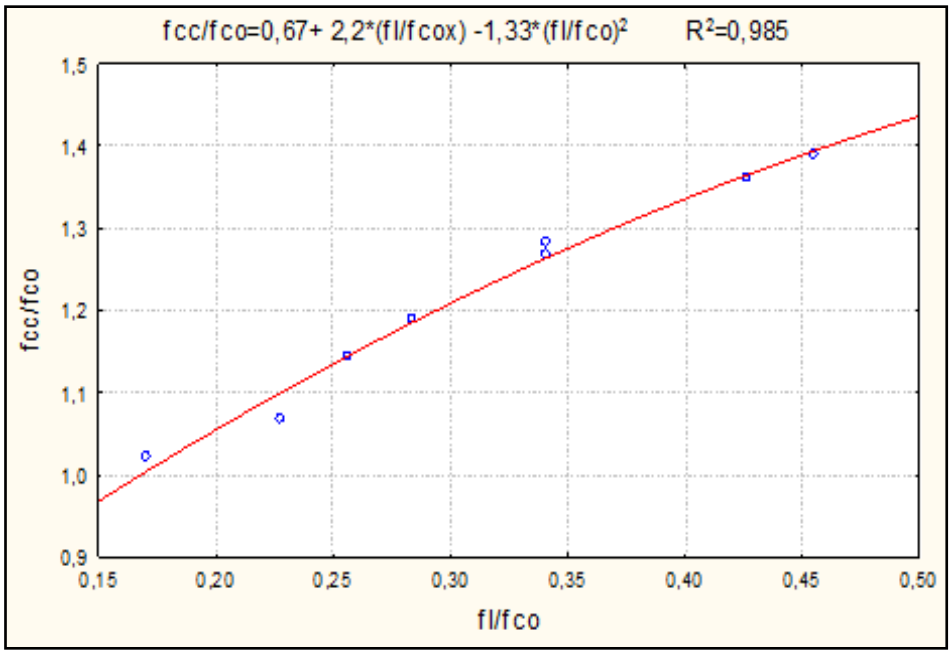


Figure II.19. Régression polynomiale estimant la contrainte ultime des spécimens confinés.

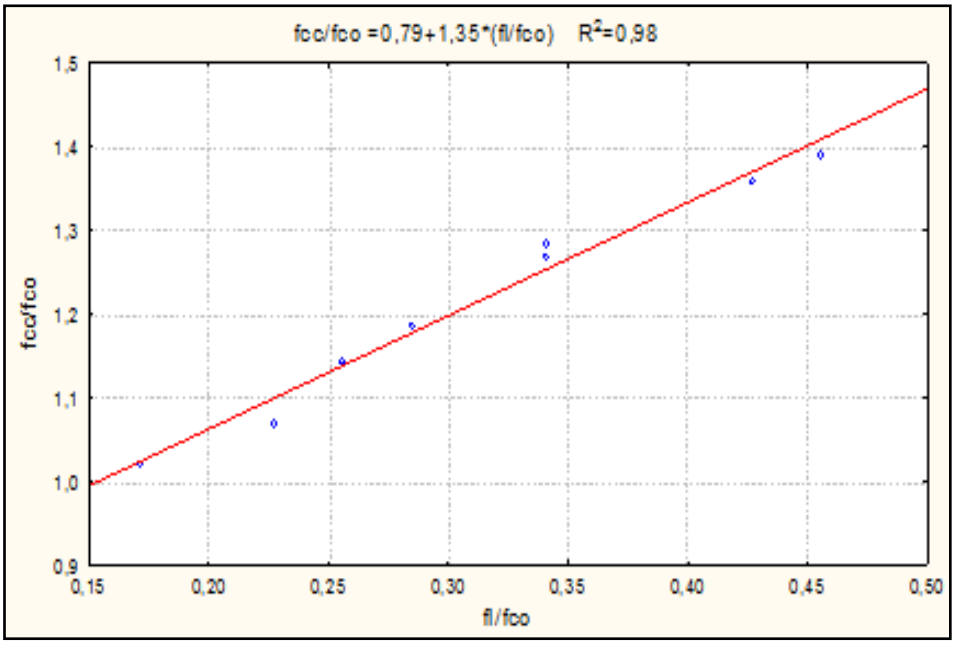


Figure II.20. Régression linéaire estimant la contrainte ultime des spécimens confinés.

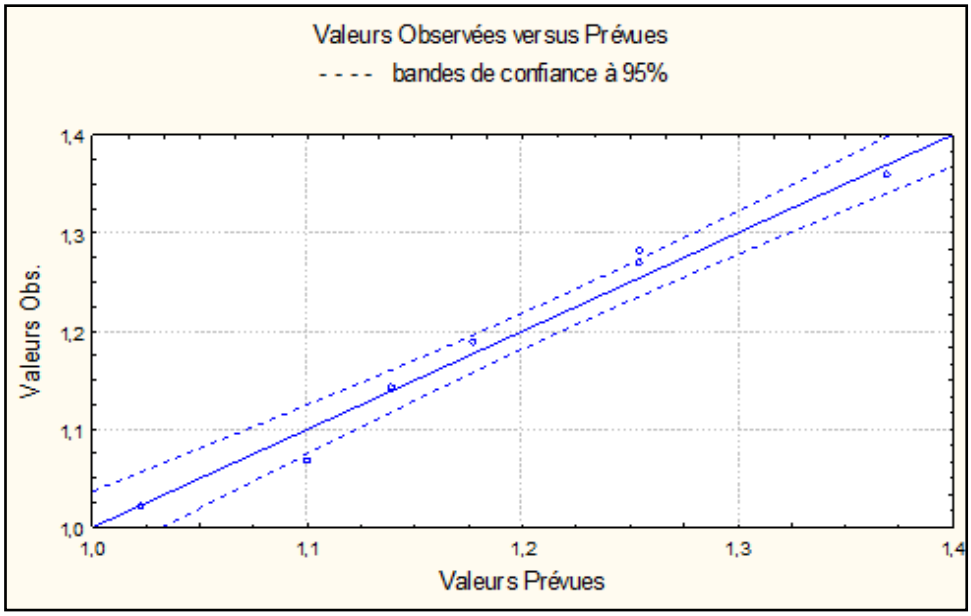


Figure II.21.Confrontation des valeurs expérimentales et des valeurs prévues par le modèle de résistance.

La figure II.21 montre que les points représentant les valeurs expérimentales et les valeurs prévues par le modèle de résistance, sont pratiquement tous dans l'intervalle de confiance à 95%, soit avec une erreur < 5%. En conclusion, le modèle analytique proposé permet de prédire d'une manière correcte la résistance au pic en compression du béton confiné à partir de celle du béton non confiné et de la pression de confinement latérale.

II.3. Conclusion du chapitre

Les différents résultats obtenus mettent en evidence, à travers l'analyse des courbes contraintes-déformations, l'influence des deux paramètres considérés dans cette étude , à savoir : la largeur de la bande et l'angle d'enroulement qui se traduit par le pas de l'hélice, dans l'amélioration de la résistance ultime et de la ductilité des cylindres en béton confinés helicoïdalement.

En effet, l'augmentation de la largeur de la bande en GFRP engendre une augmentation de la résistance et de la ductilité du spécimen. On obtient ainsi, à titre indicatif, des gains en résistance de 36% ,28.32% et 14,32% pour des cylindres confinés avec des bandes de 3cm de largeur et des hélices de 5 spires, 4spires et 3 spires respectivement.

Également, l'augmentation du nombre de spires ou la réduction de la valeur du pas de l'hélice, induit un gain en matière de résistance à la compression et de la ductilité du spécimen. On obtient ainsi des gains en résistance de 39,12% et de 28,32% pour des cylindres confinés avec des hélices de 4spires et des largeurs de 4cm et 3cm respectivement.

Ces résultats préliminaires confirment l'intérêt de ce procédé de confinement non seulement en termes de gains en résistances et en ductilité, mais également en économie de tissu composite. La surface du tissu est largement plus faible comparativement au cas de confinement par une enveloppe composite. Aussi, le mode de rupture est directement affecté par le procédé de confinement appliqué.

Le tissu composite confère au cylindre en béton une énergie de rupture très importante. Après rupture, nous avons remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement hélicoïdal, jusqu'à la rupture totale des bandes composites.

Enfin, un modèle de confinement qui permet une estimation de la résistance ultime des cylindres confinés est proposé dans ce travail, en se basant sur les résultats experimentaux obtenus. Le développement est établi en calculant une régression linaire des résultats expérimentaux pour un intervalle de confiance de 95%.

Néanmoins, d'autres essais seront nécessaires pour optimiser les paramètres de conception et affiner le modèle théorique pour le cas de confinement helicoïdal tel que considéré dans notre étude.
Pour conforter les gains obtenus en résistance et en ductilité, une simulation numérique à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis est coduite. Elle fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III :
Simulation numérique du comportement des cylindres en béton sous confinement hélicoïdal

Chapitre III : Simulation numériquedu comportement des cylindres en béton sous confinement hélicoïdal

III.1. Introduction

Une analyse numérique du comportement des c²ylindres confinés, est réalisée au moyen du code de calcul par éléments finis Abaqus. Elle permet de mettre au point, des études en réduisant le recours à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction qui est beaucoup plus couteuse. Elle sert également d'appui à l'investigation expérimentale.

Abaqus est un ensemble de programmes basés sur les éléments finis, destiné à la résolution des problèmes linéaires et non linéaires pour tout type de structures.Il possède une riche bibliothèque contenant des éléments qui peuvent modéliser n'importe quelle géométrie. Il contient également une multitude de lois de comportement caractérisant pratiquement tous les matériaux typiques en ingénierie tels que le béton, l'acier, les composites, les sols, etc.

Des confrontations avec les résultats expérimentaux sont effectuées pour vérifier la concordance des résultats expérimentaux obtenus,en matière de gains en résistance au pic et en déformation correspondante. Afin de mettre en évidence l'apport de la nouvelle conception proposée, en comparaison avec le béton non confiné, d'autres résultats en termes de contrainte, de déformation et de dommages présentés sous forme de graphiques sont analysés.

III.2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution d'équations différentielles. Le domaine étudié est subdivisé en sous-domaines ou éléments. La solution est donnée à l'intérieur de chaque élément pour une combinaison de fonctions et de paramètres connue.

La matrice de rigidité [K] relie le vecteur des incréments des déplacements nodaux $\{d\delta\}$ au vecteur des incréments de forces nodales $\{dF\}$ Cette relation est dérivée de façon à satisfaire la compatibilité des déformations et des déplacements, les équations d'équilibre ainsi que les relations constitutives.

Les fonctions d'interpolation [N] qui sont élaborées dans le but d'approximer les déplacements réels des éléments, sont utilisées pour donner le vecteur des incréments des déplacements internes $\{du\}$ pour tout point à l'intérieur de l'élément en fonction du vecteur des incréments des déplacements nodaux $\{d\delta\}$ comme suit :

$$\{du\} = [K]\{d\delta\} \tag{III.1}$$

Cette équation est dérivée dans le but d'obtenir le vecteur des déformations $\{d\varepsilon\}$, on obtient ainsi, une relation incrémentale qui relie les déformations aux déplacements, comme suit :

$$\{d\varepsilon\} = [B]\{d\delta\} \tag{III.2}$$

La matrice $[B]$ est formée des dérivées des fonctions d'interpolation.

Le vecteur des contraintes internesà n'importe quel point $\{d\sigma\}$ et le vecteur des incréments de forces nodales $\{dF\}$ sont reliés par la relation incrémentale d'équilibre, basée sur le principe des travaux virtuels.

Les forces extérieures $\{F\}$ qui agissent sur un élément donné, sont appliquées comme charges concentrées aux nœuds.

D'après Chen et al. (1988), lorsqu'une combinaison d'incréments de déplacements nodaux $\{d\bar{\delta}\}$ et de déformations $\{d\bar{\varepsilon}\}$ virtuels arbitraires sont imposés, l'équilibre est respecté si :

$$\{d\bar{\delta}\}^T \{dF\} = \int_v \{d\bar{\varepsilon}\}^T \{d\sigma\} dV \tag{III.3}$$

où $\{\sigma\}$: les contraintes à l'intérieur de l'élément.

Cette équation s'écrit également sous la forme ;

$$\{d\bar{\delta}\}^T \{dF\} = \{d\bar{\delta}\}^T \int_v [B]^T \{d\sigma\} dV \tag{III.4}$$

Cette relation étant vérifiée pour n'importe quelle combinaison de déplacements virtuels $\{d\bar{\delta}\}$, alors :

$$\{dF\} = \int_v [B]^T \{d\sigma\} dV \qquad \text{(III.5)}$$

Une relation entre le vecteur $\{d\sigma\}$ et le vecteur $\{d\varepsilon\}$ doit être définie. Les problèmes basés sur la théorie de la plasticité, la prise en compte de la non linéarité du matériau se traduit par la relation contrainte-déformation incrémentale suivante :

$$\{d\sigma\} = [C]^{ep} \{d\varepsilon\} \qquad \text{(III.6)}$$

Où $[C]^{ep}$ est la matrice de rigidité tangente élasto-plastique correspondant à l'état actuel des contraintes. La combinaison des équations (III.2), (III.5) et (III.6) conduit, pour chaque élément, à l'équation suivante:

$$\{dF\} = \left(\int_v [B]^T [C]^{ep} [B] dV \right) \{d\delta\} \qquad \text{(III.7)}$$

qui s'écrit aussi sous la forme :

$$\{dF\} = [k]\{d\delta\} \qquad \text{(III.8)}$$

où, $[k] = \int_v [B]^T [C]^{ep} [B] dV$

La matrice de rigidité globale de la structure $[K]$ est obtenue par addition systématique de la rigidité de tous les éléments. Elle relie le vecteur des incréments de charges $\{dR\}$ au vecteur des incréments des déplacements nodaux $\{d\delta\}$ par :

$$\{dF\} = [K]\{d\delta\} \qquad \text{(III.9)}$$

La résolution de cette équation donne le vecteur des déplacements nodaux $\{d\delta\}$.

Les contraintes à l'intérieur de chaque élément sont obtenues à partir de l'équation (III.6) en utilisant l'équation (III.2),par :

$$\{d\sigma\} = [C]^{ep}[B]\{d\delta\} \qquad \text{(III.10)}$$

III.3.Présentation du modèle numérique

L'étude numérique réalisée en utilisant le code Abaqus, consiste à appréhender le comportement,sous un chargement monotone axial de compression, de cylindres en béton confinés avec un GFRP, dans un espace tridimensionnel jusqu'à la rupture.
Le modèle numérique est formé d'un cylindre en béton, ainsi que de bandes hélicoïdales de FRP à base de fibres de verre.

III.3.1.Géométrie du modèle

Le modèle analysé est formé d'un cylindre en béton et de deux hélices de FRP tel que indiqué par la figure III.1. Le cylindre présente des dimensions fixes (Ø 150 mm x 300 mm), tant dis que la bande de GFRP, présente des dimensions variables ; une largeur qui prend les valeurs de 2cm, 3cm, 4cm et une longueur qui varie selon que l'on considère une hélice à 3 spires, 4 spires ou 5 spires.

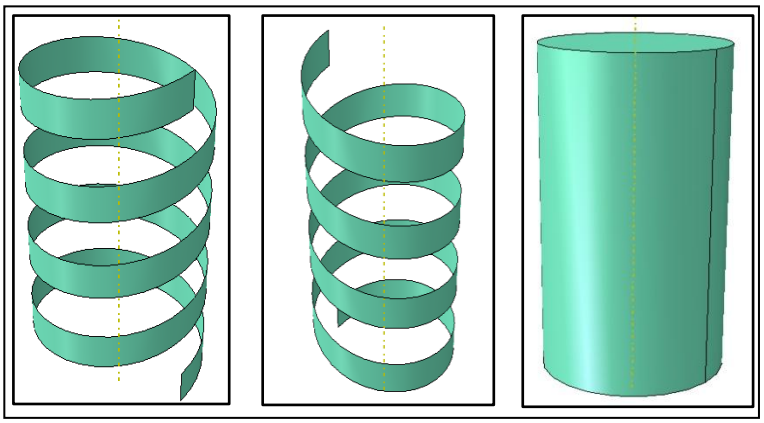


Figure.III.1.Différentes parties constituant le modèle.

Le cylindre et les deux hélices sont assemblés en considérant une adhérence parfaite entre ces trois éléments moyennant le module Assembly du logiciel. Le contact entre ces différents éléments est modélisé en se basant sur le principe 'surface maitresse / surface esclave'.
C'est une technique classique de pénalité (Lemaitre J. et al,2001), où les nœuds esclaves ne pénètrent pas dans la surface maitresse, du fait de la présence de l'effort normal pénalisant le long de la surface de contact .

III.3.2. Maillage et conditions aux limites

Le code de calcul Abaqus contient une large gamme d'éléments. Il contient des éléments linéiques, surfaciques et volumiques comme indiqué sur la figure III.2.

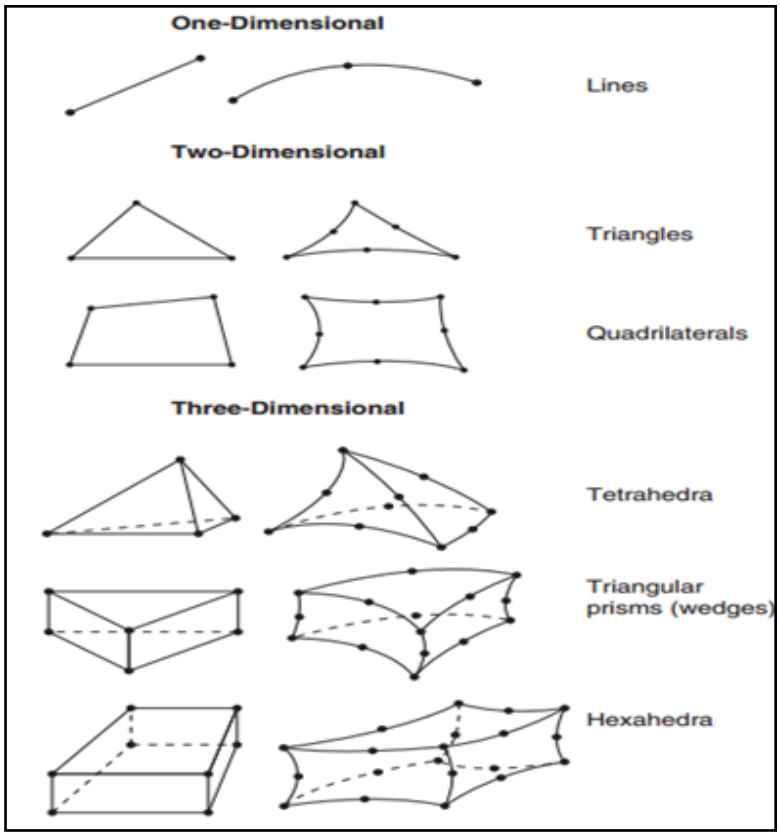


Figure III.2. Différents éléments de Abaqus (Abaqus Manual,2010).

Le cylindre confiné, représenté par la figure III. 3, est maillé avec des éléments à 3 dimensions qui sont des éléments tétraédriques de 20 mm de coté, présentant huit nœuds ayant chacun 3 degrés de liberté. Tandis que les bandes en FRP sont maillées avec des éléments surfaciques quadrilatéraux de 10 mm de coté présentant quatre nœuds ayant 8 degrés de liberté.

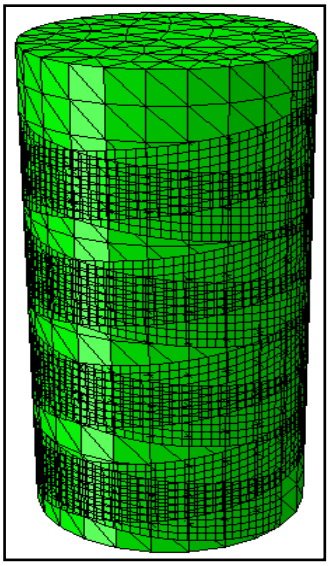


Figure III.3. Maillage du cylindre confiné.

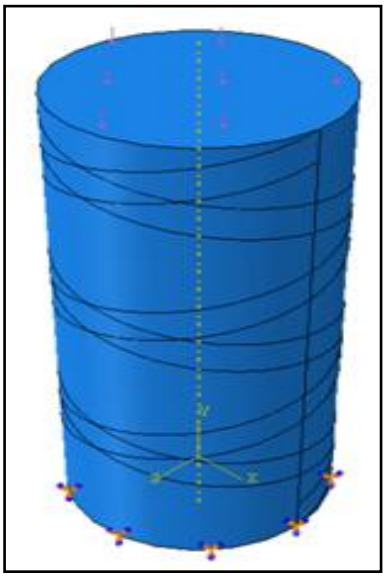


Figure.III.4. Conditions aux limites du cylindre confiné.

Les conditions aux limites se traduisent par un blocage de tous les déplacements de la surface inférieure du cylindre, tout en imposant un déplacement à sa surface supérieure, comme indiqué sur la figure III.4.

III.4. Modèles décrivant les matériaux

III.4.1. Modèle éastoplastique endommageable pour le béton

Le comportement non linéaire du béton est décrit par le modèle CDP (Concrete Damaged Plasticity)(Al-Rousan. R et al,2013 et Martinelli E. et al,2014). Ce modèle utilisé dans Abaqus, est une modification de l'hypothèse de Drucker-Prager(Kmiecik P .et al, 2011). Il est basé sur les modèles proposés par Lubliner et al.(1989) et Lee and Fenves (1998). Il est destiné àl'analyse des structures en béton ou autres matériaux fragiles, pour tous les types de structures (poutre, coque, solides).

Ce modèle suppose que sous de faibles pressions de confinement, les deux principaux mécanismes de rupture du béton, sont la fissuration en traction et l'éclatement en compression. Lorsque la pression de confinement est suffisante pour prévenir la propagation des fissures, le béton abandonne son comportement fragile et se comporte comme un matériau ductile.

Cette théorie constitutive vise à capturer les effets irréversibles de l'endommagement qui se produit dans le béton. Pour mieux cerner ce comportement, les hypothèses suivantes sontconsidérées:

- dégradation différente de la rigidité élastique en compression et en traction ;
- un comportement adoucissant en traction par opposition au comportement raidissant suivi d'un adoucissement en compression ;
- différentes résistances plastiques en compression et en traction (la contrainte initiale de plastification =10 fois celle de la traction) ;
- prise en compte de la vitesse de déformation.

III.4.1.1. Relation contraintes-déformations

Le modèle CDP est basé sur le principe de la décomposition de la vitesse de déformation totale $\dot{\varepsilon}$ en deux parties :une vitesse de déformation élastique $(\dot{\varepsilon}^{el})$ et une vitesse de déformation plastique $(\dot{\varepsilon}^{pl})$.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \qquad \textbf{(III.11)}$$

La relation contrainte-déformation s'écrit, dans ce cas, comme suit :

$$\sigma = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = (1-d) D_o^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \qquad \text{(III.12)}$$

où : D_o^{el} est la rigidité élastique initiale non endommagée du matériau.

D^{el} est la rigidité élastique endommagée.

d est la variable d'endommagement scalaire (ou de dégradation d'énergie).Elle prend les valeurs : $d = 0$ pour un matériau non endommagé et $d = 1$ pour un matériau complètement endommagé.

L'endommagement est donc représenté par une dégradation isotrope de la rigidité élastique caractérisée par une variable scalaire d .

Lorsque le dommage se produit, la contrainte effective $\bar{\sigma}$ devient plus représentative que celle de Cauchy, car elle représente l'aire effective qui résiste aux charges externes. Il serait alors préférable de poser le problème de plasticité en considérant $\bar{\sigma}$ tel que :

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \qquad \text{(III.13)}$$

$$\bar{\sigma} \overset{def}{=} D_o^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \qquad \text{(III.14)}$$

-Cas du chargement uni-axial

Dans ce cas, les relations contraintes-déformations s'écrivent, en traction et en compression reepectivement, comme suit :

$$\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \dot{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i) \qquad \textbf{(III.15.}a\textbf{)}$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \dot{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \qquad \textbf{(III.15.}b\textbf{)}$$

où : f_i , représente les autres variables de plastification.

θ : température.

La déformation plastique équivalente en traction $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ et la déformation plastique équivalente en compression $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ sont les deux variables d'écrouissage qui caractérisent les états d'endommagement.

Ces variables contrôlent, en plus de la microfissuration et de l'éclatement du béton, l'évolution de la surface de plastification et la dégradation de la rigidité élastique. Elles sont également liées à l'énergie de fissuration requise pour générer des microfissures.

Pour $\sigma_c = -\sigma_{11}$, il ressort de la courbe contraintes-déformation, de la figure III.5, que pour n'importe quel point appartenant à la branche de la déformation adoucissante, la réponse des spécimens en béton est faible, ce qui veut dire que la rigidité élastique diffère entre la compression et la traction. Néanmoins, pour les deux cas, l'effet de cette dégradation est plus important d'autant que la déformation plastique est grande.

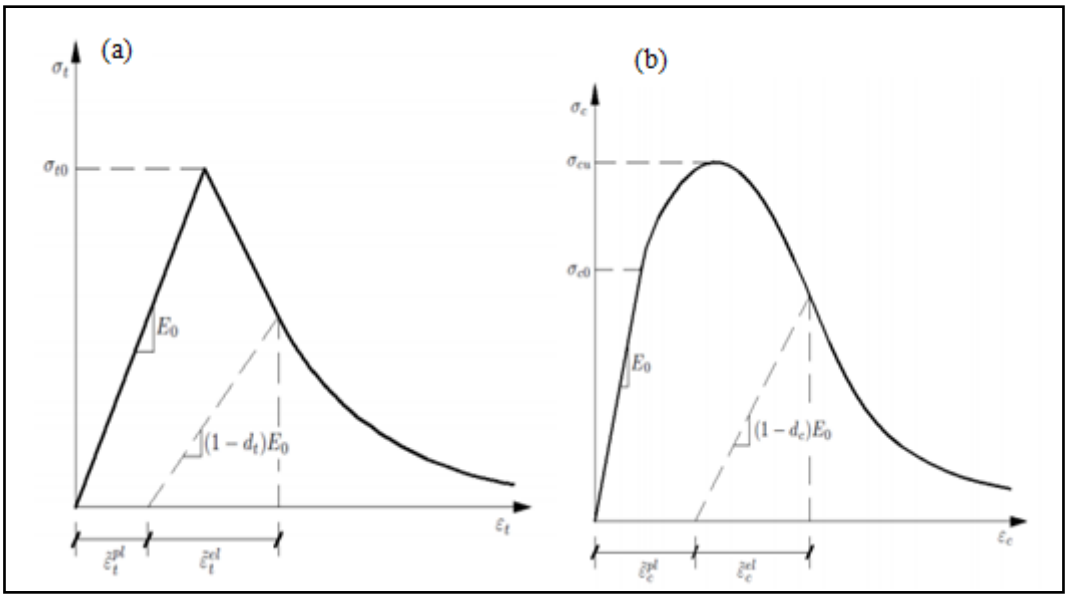


Figure.III.5.Comportement du béton sous traction (a) et compression (b) uni-axiales. (Abaqus manual,2010).

Cette dégradation du béton est caractérisée par deux variables d'endommagement d_t et d_c. Elles s'écrivent :

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i) \qquad 0 \le d_t \le 1 \qquad \text{(III.16.}a\text{)}$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \qquad 0 \le d_c \le 1 \qquad \text{(III.16.}b\text{)}$$

Les contraintes effectives de cohésion qui déterminent la taille de la surface de plastification, s'écrivent alors :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{1-d_t} = E_o(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \qquad \text{(III.17)}$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{1-d_c} = E_o(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \qquad \text{(III.18)}$$

Où E_o, représente la rigidité élastique non endommagée du matériau.

- Cas du chargement cyclique uniaxial

Lors d'un chargement cyclique uniaxial, la dégradation se déroule selon des mécanismes assez complexes. Elle engendre l'ouverture et la fermeture des micro-fissures constamment. Un recouvrement de la rigidité élastique est alors observé lorsque la charge change de signe en passant d'une traction à une compression.

Le module élastique sera alors donné par :

$$E = (1-d)E_O \qquad \text{(III.19)}$$

avec : $(1-d) = (1-S_t d_c)(1-S_c d_t)$

où S_t et S_c, représentent les effets du recouvrement de raideur associés aux inversions de la charge.

$$S_t = 1 - w_t r^*(\bar{\sigma}_{11}) \qquad \text{(III.20.}a\text{)}$$

$$S_c = 1 - w_c(1 - r^*(\bar{\sigma}_{11})) \qquad \text{(III.20.}b\text{)}$$

et $r^*(\bar{\sigma}_{11}) = H(\bar{\sigma}_{11}) = 1 \;\; si \;\; \bar{\sigma}_{11} > 0 \;\; et \;\; 0 \;\; si \;\; \bar{\sigma}_{11} < 0$.

$w_t \;\; et \;\; w_c$, sont des facteurs pondéraux décrivant les propriétés relatives au recouvrement de rigidité du matériau. Ils prennent leurs valeurs dans l'intervalle $[0,1]$, de manière à ce que lorsque le chargement passe de la traction vers la compression $w_t = 0$: le matériau recouvre la rigidité en compression lors de la fermeture des fissures. Ce qui n'est pas le cas lorsque le

chargement passe de la compression à la traction, une fois que l'éclatement de microfissures se produit, auquel cas $w_c = 1$ comme indiqué sur la figure III.6.

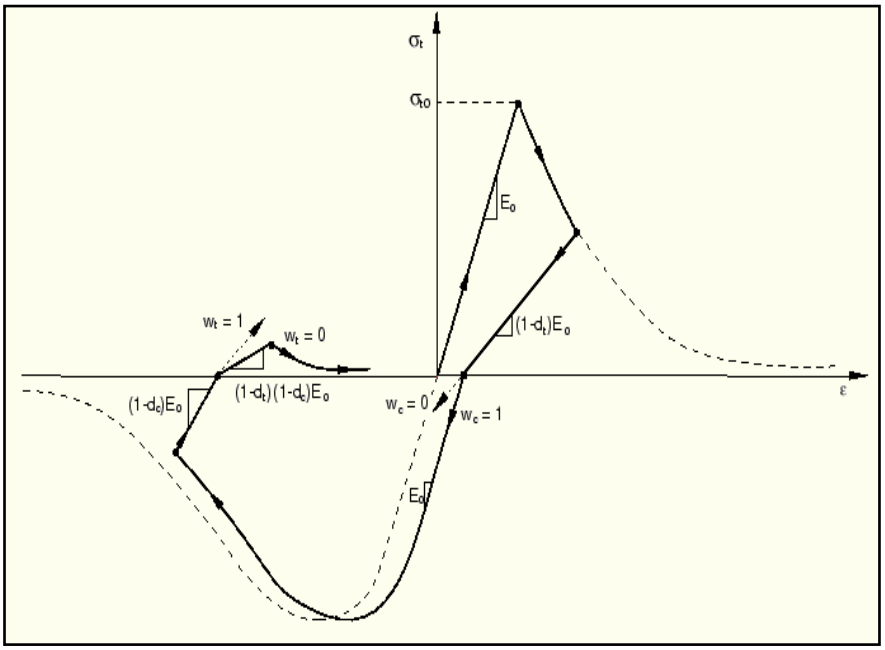


Figure III. 6. Cycle uniaxial de chargement (traction-compression-traction), (Abaqus Manual, 2010).

III.4.1.2.Identification des paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont ceux qui régissent la fonction de plastification et la règle d'écoulement. La fonction de plastification représente l'état de rupture pour le cas de la contrainte effective. Elle tient compte de l'évolution différente de la résistance en traction et en compression.

Elle s'écrit :

$$F(\bar{\sigma}, \dot{\varepsilon}^{pl}) = \frac{1}{1-\alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\dot{\varepsilon}^{pl})\left\{\hat{\bar{\sigma}}_{\max}\right\} - \gamma\left\{\hat{\bar{\sigma}}_{\max}\right\} \qquad \text{(III.21)}$$

$$F(\bar{\sigma}, \dot{\varepsilon}^{pl}) \leq 0$$

$$\hat{\bar{\sigma}}_{\max} = \begin{cases} 0, & \hat{\bar{\sigma}}_{\max} < 0 \\ \hat{\bar{\sigma}}_{\max}, & \hat{\bar{\sigma}}_{\max} \geq 0 \end{cases} et \quad -\hat{\bar{\sigma}}_{\max} = \begin{cases} 0, & \hat{\bar{\sigma}}_{\max} \geq 0 \\ \hat{\bar{\sigma}}_{\max}, & \hat{\bar{\sigma}}_{\max} < 0 \end{cases}$$

Où : $\bar{p} = -\frac{1}{3}\bar{\sigma} : I$, est la pression hydrostatique effective.

$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}\bar{S} : \bar{S}}$, est la contrainte effective équivalente de Mises.

$\bar{s} = \bar{p}I + \bar{\sigma}$, est la partie déviatorique du tenseur de la contrainte effective $\bar{\sigma}$.

$\hat{\bar{\sigma}}_{\max}$, est la valeur maximale de $\bar{\sigma}$.

La fonction $\beta(\dot{\varepsilon}^{pl})$ s'écrit : $\beta(\dot{\varepsilon}^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl})}(1-\alpha) - (1+\alpha)$.

α est un paramètre calculé à partir de la courbe de Kupfer, 1979.

Le coefficient σ_{bo}/σ_{co} peut être déterminé à partir des contraintes initiales de compression uniaxiale et biaxiale $\sigma_{bo} et \sigma_{co}$ respectivement, tel que :

$$\alpha = \frac{\sigma_{bo} - \sigma_{co}}{2\sigma_{bo} - t\sigma_{co}}$$

D'après Lubliner et al.(1989), le coefficient γ est calculé à partir d'essais triaxiaux sur le béton. Une valeur de 0.666 est admise pour ce paramètre (Jankowxiak et al.,2005).

Par ailleurs,Le potentiel d'écoulement G, qui est la fonction hyperbolique de Drucker-Prager, gouverne l'écoulement plastique par la relation suivante :

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\lambda}\frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \qquad \text{(III.22)}$$

Où : $\dot{\lambda}$ est un multiplicateur plastique non négatif.

Avec $G = \sqrt{(\varepsilon\sigma_{to}\tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}\tan\psi$

σ_{to} , est la résistance uniaxiale à la traction à la rupture.

Cette fonction dépend de deux paramètres ψ et ε .

ψ étant l'angle de dilatation mesuré dans le plan p-q sous haute pression de confinement. Du point de vue de la physique, il représente l'angle de friction interne du béton. Dans les simulations on considère souvent des valeurs égales à 36° ou 40° pour ce paramètre (Kmiecik P .et al, 2011).

ε , représente l'excentricité de la surface potentielle dans le domaine plastique. Le modèle CDP préconise une valeur de 0.1 pour ce paramètre. Ce facteur peut être calculé comme étant le rapport de la contrainte de traction à la contrainte de compression. Il décrit le taux pour lequel la fonction devient asymptotique (*G* tend vers une ligne lorsque $\varepsilon = 0$).

Les valeurs considérées dans cette simulation pour les différents paramètres du modèle CDP, sont consignées dans le tableau III.1.

Tableau III.1.Paramètres du modèle CDP.

paramètre	σ_{bo}/σ_{co}	γ	ψ	ε
Valeur considérée	1,16	0,666	36°	0,1

III.4.2. Modèle élastique pour le matériau composite orthotrope

Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope (Berthelot, 2005). Les directions selon la chaîne et la trame forment les directions principales (1 et 2) du matériau.

Le comportement d'un tel matériau est décrit en introduisant dans la loi de Hooke (III.23) une matrice de rigidité se résumant à 9 constantes.

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

Afin d'évaluer la résistance mécanique du GFRP qui correspond à une dégradation irréversible du matériau, le critère de rupture de tsai-Wuest considéré. Il fait partie de la famille des critères interactifs, lesquels contrairement aux critères en contraintes maximales ou en déformations maximales, tiennent compte de l'existence d'interactions entre les contraintes ou déformations dans les axes des matériaux (les mécanismes de rupture longitudinale, transversale ou en cisaillement sont supposés non indépendants).

Le critère de Tsai-Wu s'écrit :

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \qquad i, j = 1, 2, ..., 6. \qquad \text{(III.24)}$$

Les constantes $F_i$représentent des termes linéaires qui tiennent compte d'une éventuelle différence de comportement du matériau composite en compression, tandis que les constantes F_{ij} sont des termes quadratiques tenant compte des interactions entre les contraintes $\sigma_i$et σ_j.

Le critère de Tsai-Wu en contraintes planes s'écrit, lorsque les contraintes de rupture en traction sont identiques à celles en compression, sous la forme :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L\sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{S_{LT}}\right)^2 = 1 \qquad \text{(III.25)}$$

Le critère est alors confondu avec celui de Tsai-Hill.

III.5. Résultats de l'analyse numérique

III.5.1.Courbes contraintes-déformations

Pour la même largeur de la bande, les spécimens confinés présentent une meilleure résistance à la compression et un meilleur allongement par rapport aux spécimens non confinés comme montré par les figures III.7, III.8 et III.9.

Les bandes du GFRP permettent aussi de réduire les déplacements transversaux des cylindres. La résistance à la compression des cylindres confinés augmente avec l'augmentation du nombre de spires du GFRP, soit avec la diminution du pas de l'hélice.

a- variable pas de l'hélice

On enregistre, ainsi, pour un cylindre confiné avec des bandes de 4 cm de largeur, des apports en résistance à la compression de 15,83%, 38,54% et 78,21% pour 2 spires ,3 spires et 4 spires d'hélices respectivement.

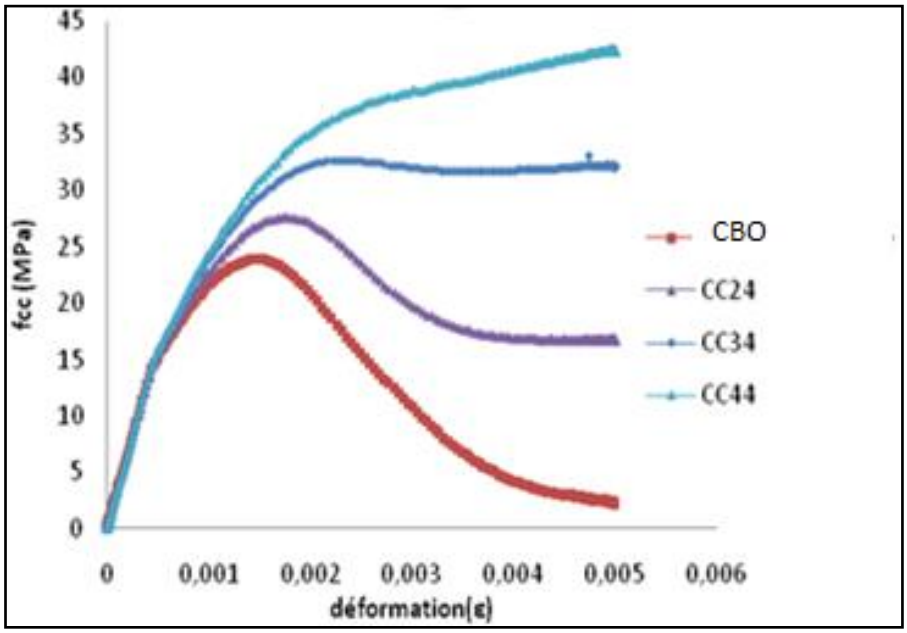
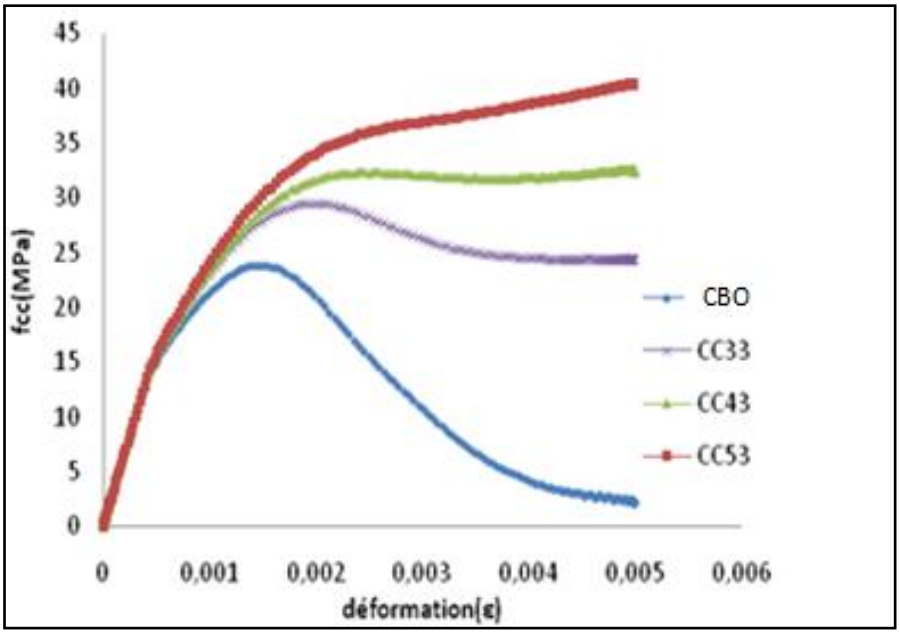


Figure III.7. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 4cm pour différents pas de l'hélice.



FigureIII.8. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 3cm pour différents pas de l'hélice.

Ces gains en résistance à la compression atteignent, pour une largeur de 3 cm de la bande, les valeurs 23,45%, 36,65% et 69,5 % pour 3spires,4 spires et 5 spires d'hélice respectivement.

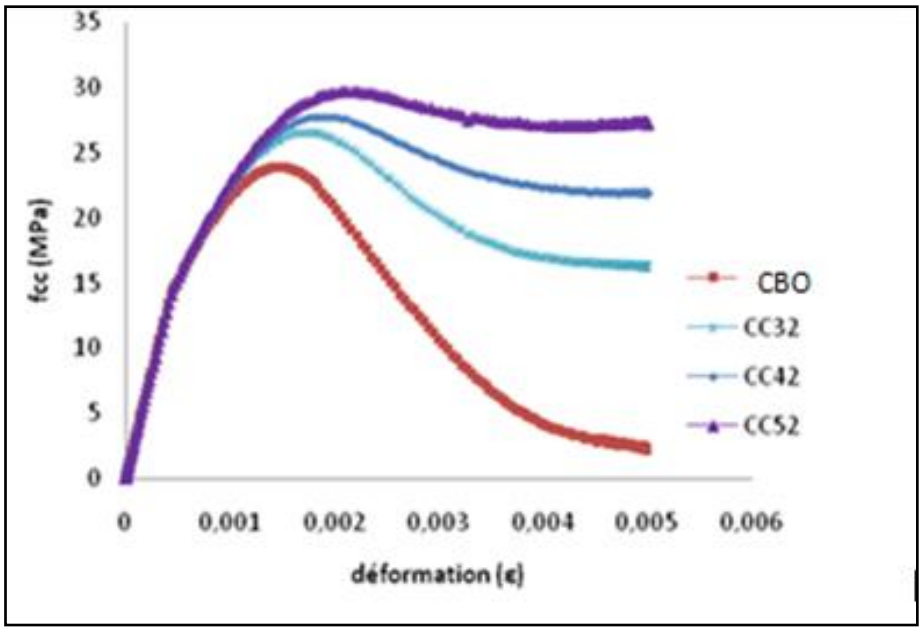


Figure III.9. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP ayant une largeur de 2cm pour différents pas de l'hélice.

Les valeurs des gains en résistance de 11,15%, 16,41% et 24,56% ont été atteintes pour un cylindre confiné avec des bandes de 2cm de largeur formant des hélices de 3 spires,4 spires et 5 spires, respectivement.

b- Variable largeur de la bande GFRP

Les figures III.10 et III.11 montrent que pour un même nombre de spires, la résistance à la compression du béton confiné ainsi que son allongement augmentent à chaque fois qu'augmente la largeur de la bande de GFRP.

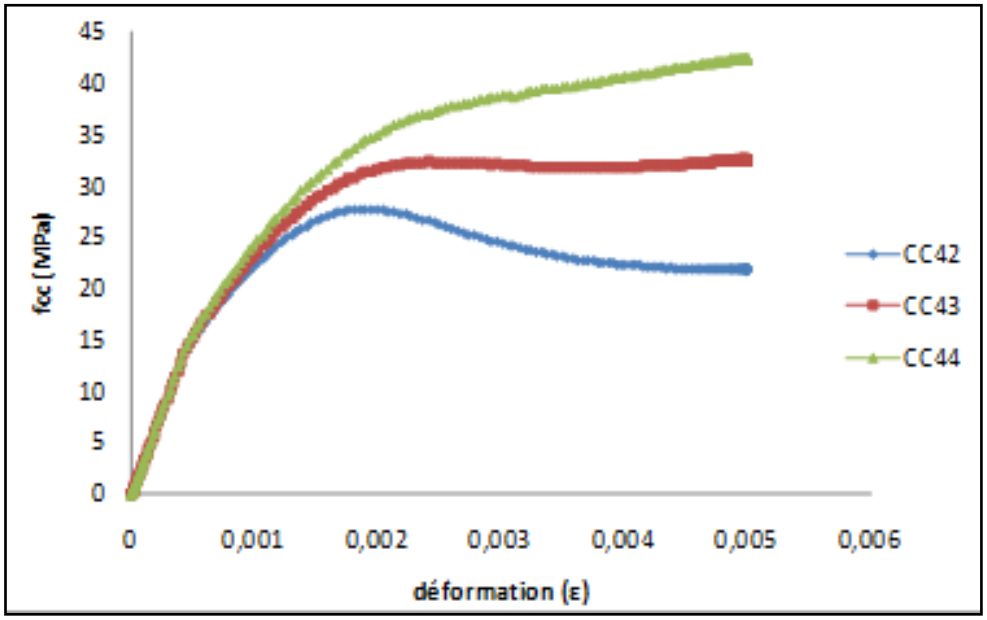


Figure III.10. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP faisant des hélices de 4 spires pour différentes largeurs.

Pour un cylindre confiné avec des bandes formant 4 spires, on enregistre des gains de 16,41%, 36,65% et 78,21% pour des largeurs de bandes de 2cm, 3cm et 4cm respectivement.
On enregistre par ailleurs, des gains de valeurs 11 ,15%, 23,45% et 38,54% pour des largeurs de bandes de 2cm,3cm et 4cm respectivement.

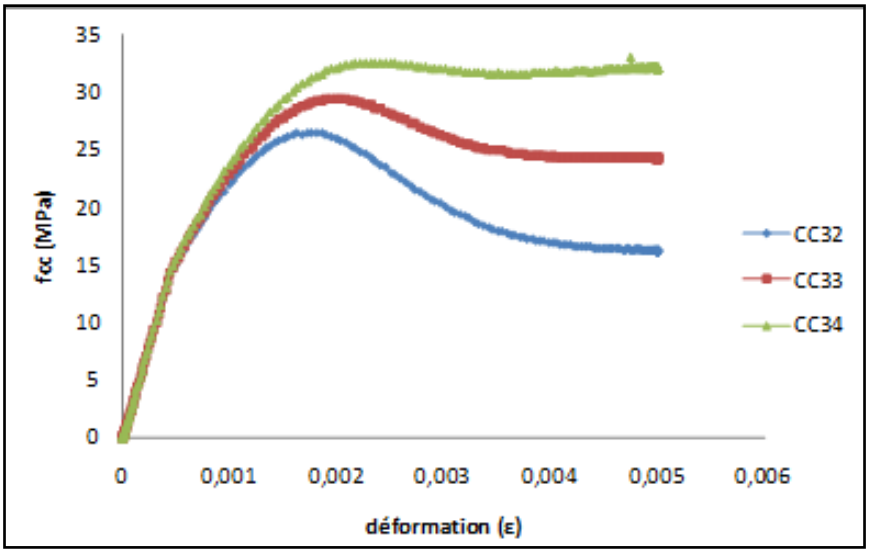


Figure III.11. Courbes contraintes-déformations pour des cylindres confinés avec des bandes de GFRP faisant des hélices de 3 spires pour différentes largeurs.

L'ensemble des courbes montre également un gain en ductilité des spécimens confinés. La déformation augmente à chaque fois que le niveau de confinement augmente. On enregistre ainsi, une déformation qui avoisine 6 ‰ pour un cylindre confiné avec des hélices de 4 spires pour des largeurs de bandes de 3cm et 4cm .

III.5.2. Confrontation des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux et les résultats issus de l'analyse numérique ont montré une bonne concordance comme indiqué sur la figure III.12.

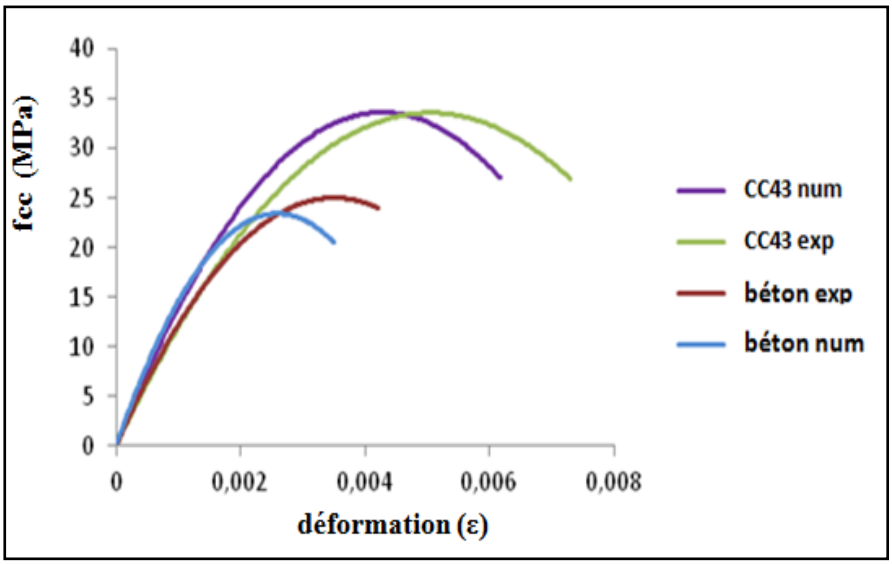


Figure.III.12. Confrontation des courbes numériques / expérimentales.

On enregistre ainsi un écart de 4.5% pour le béton non confiné et un écart de 1.5% pour le béton confiné avec des bandes de 3cm de largeur formant des hélices de 4 spires. On constate que dans les deux cas, l'écart reste inférieur à 5%.

III.5.3. Distribution des contraintes et des déformations

III.5.3.1. Cartographie des contraintes

La cartographie des contraintes pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné est donnée par la figure III.13. L'élément, non confiné analysé, est soumis à une compression uni-axiale. Il connait des concentrations de champs de contraintes dans la région centrale engendrant par la suite l'ouverture des fissures, qui conduira à la rupture du béton.

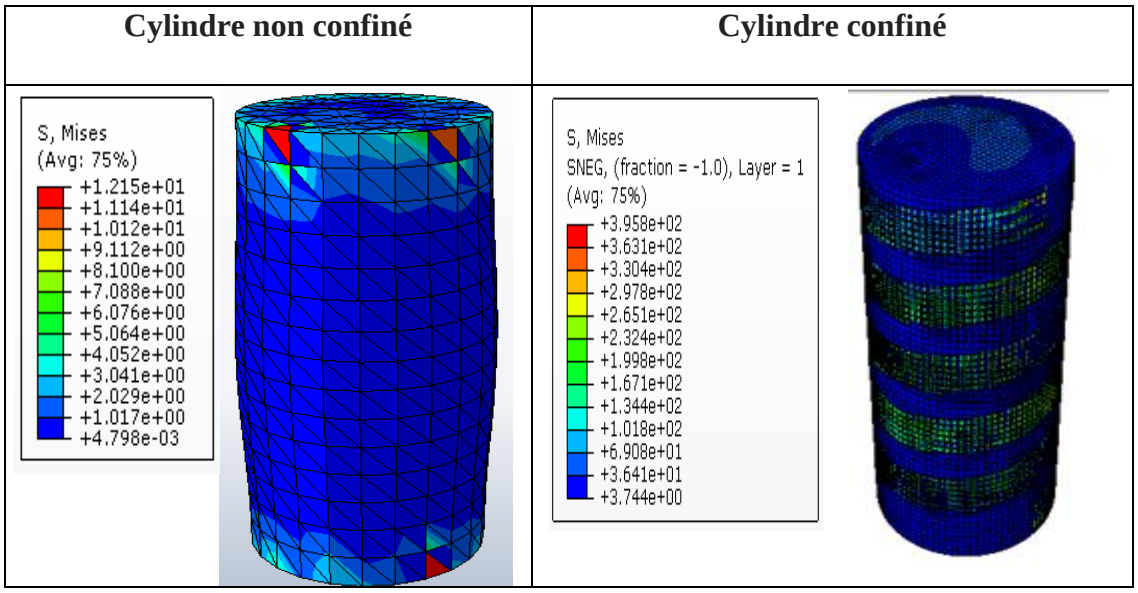


Figure III.13. Cartographie des contraintes pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné.

Comparativement au cylindre non confiné, l'évolution des contraintes dans le cas du cylindre confiné est lente. De plus, on assiste après la phase élastique à une concertation de contraintes dans la bande en GFRP suite la mobilisation du confinement du béton jusqu'à la rupture.

On constate que la charge nécessaire à la rupture de l'élément confiné est supérieure à celle de l'élément non confiné. Les tractions latérales sont plus importantes dans l'éprouvette témoin mais elles sont limitées par la présence des hélices dans l'éprouvette partiellement confinée.

III.5.3.2. Cartographie des déplacements

La cartographie des déplacements pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné est donnée par la figure III.14.

La quasi-totalité du volume du cylindrenon confiné présente des déplacements engendrant des déformations de traction. Par contre dans le cas du cylindreconfiné, les déplacements radiaux sont réduits grâce à la mobilisation de la pression de confinement du GFRP.

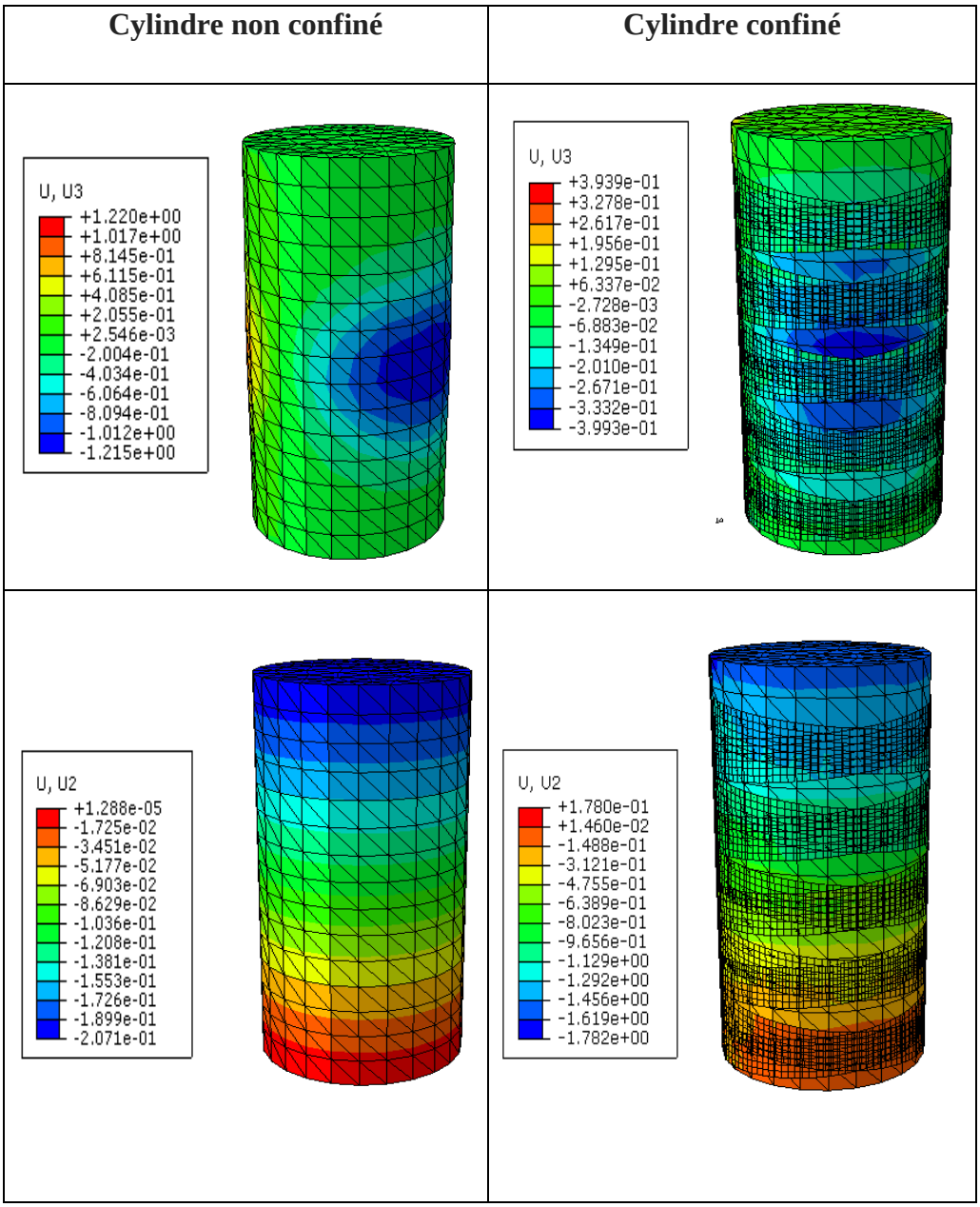


Figure III.14.Cartographie des déplacements pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné.

Les déplacements latéraux provoquant les déformations de traction sont empêchés laissant place à des déformations de compression qui se propagent de la surface du cylindre vers son intérieur.Par contre, lesdéplacements verticaux du cylindre confiné sont supérieurs à ceux du cylindre non confiné, ce qui confirme l'augmentation de la ductilité des spécimens confinés.

III.5.3.3. Cartographie des dommages en compression et en traction

L'analyse des dommages en compression et en traction fournit une aide à la compréhension du mode de rupture des cylindres confinés. Ces dommages sont représentés par la figure III.15.

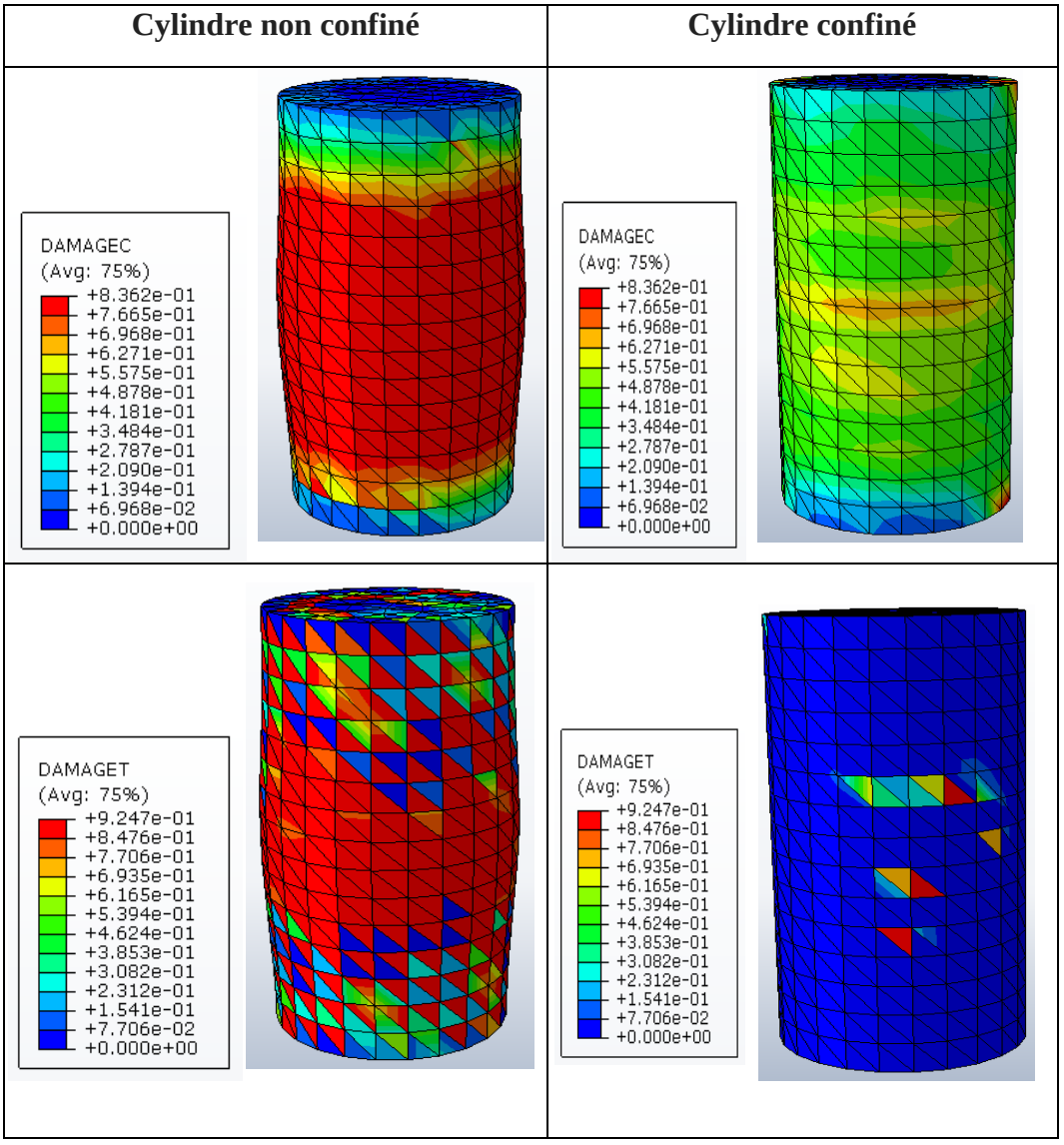


Figure III.15.Cartographie des dommages en compression et en traction pour un cylindre confiné et un cylindre non confiné.

Ainsi, des fissures apparaissent dans la zone centrale du cylindre et se propagent assez rapidement dans le cylindre non confiné. Dans le cas du cylindre confiné, par contre, les dommages sont moins importants, puisque les fissures se propagent plus lentement jusqu'à la rupture de la bande en GFRP, auquel cas, le béton fissuré reste toujours à l'intérieur du confinement hélicoïdal.

III.5.4. Déformées des cylindres

a- Cylindre en béton non confiné

Le cylindre en béton soumis à une compression axiale, présente un gonflement sur sa partie centrale, comme indiqué sur la figure III.16, qui traduit la déformation radiale du béton résultant de l'application de cette charge.

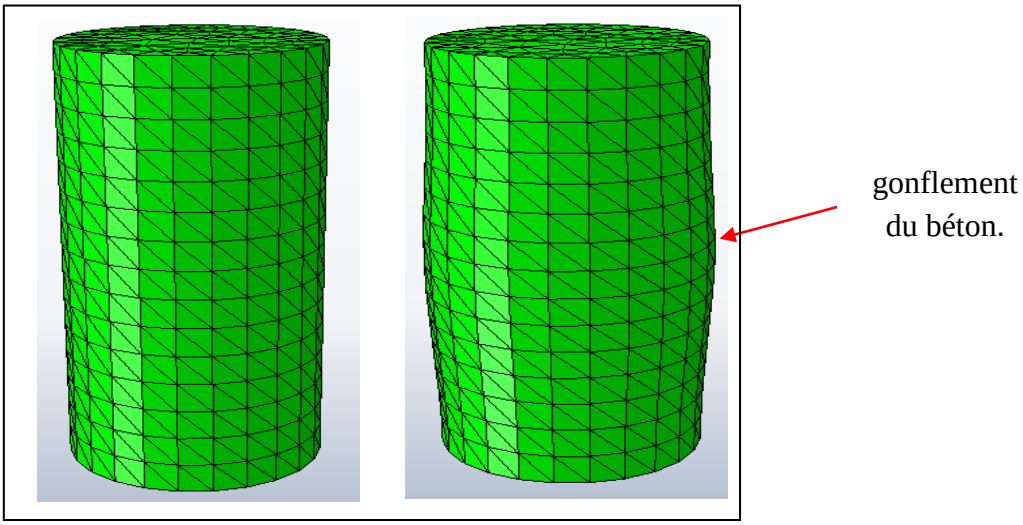


Figure III.16. Déformée du cylindre non confiné.

b- Cylindre en béton confiné

La figure III.17 montre la déformée du cylindre confiné avec des bandes hélicoïdales en GFRP. La déformation radiale est limitée,en comparaison avec le cylindre non confiné, grâce à la mobilisation de la pression de confinement latérale illustrée par la figure III.18.

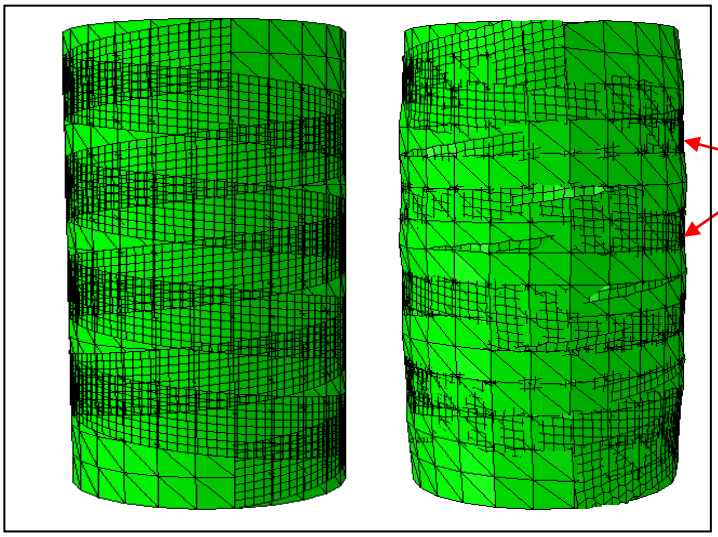


Figure III.17. Déformée du cylindre confiné.

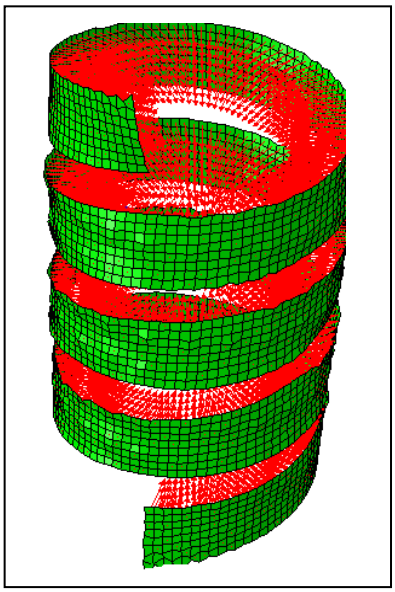


Figure III.18. Pression de confinement exercée par la bande en GFRP sur le béton.

La pression est exercée le long du chemin hélicoïdalqu'emprunte la bande en GFRPen circonférence dusupport béton. Il apparait ainsi des zones resserrées notamment sur la partie centrale du cylindre.

II. 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les détails de l'analyse numérique à base d'éléments finis en utilisant le code de calcul Abaqus. Le but de cette démarche, étant desimulerle comportement,sous un chargement monotone de compression uni axiale,de cylindres en béton confinés par des bandes continuesen GFRP formant des hélicesautour de l'élément.

Les étapes et les procédures sont succinctement, rappelées pour une meilleure compréhension du principe d'une simulation numérique mais surtout pour mieux choisir le modèle éléments finisqui permet d'estimer la résistance ultime et la déformation, au pic, correspondante.

La confrontation avec l'expérimental, à travers l'évolution des contraintes en fonction des déformations a permis de constater une bonne concordance et de valider les observations notées dans l'analyse expérimentale présentée dans le chapitre précédant.

La visualisation des cartographies d'évolution des contraintes et des déplacements montre clairement que lorsque le cylindre en béton est soumis à une compression uni-axiale, il connait des concentrations de champs de contraintes dans la région centrale engendrant par la suite l'ouverture des fissures, qui conduira à la rupture de l'élément. Par opposition,dans le cylindre confiné, l'évolution des contraintes est lente et gênée, grâce à la mobilisation de la pression latérale de confinement exercée par la bande composite.
La charge de rupture de l'élément confiné est largement supérieure à celle de l'élément non confiné. Aussi, les déplacements verticaux du cylindre confiné sont supérieurs à ceux du cylindre non confiné, ce qui confirme l'augmentation de la ductilité des spécimens confinés.

Enfin, les déplacements latéraux provoquant les déformations de traction sont empêchés laissant place à des déformations de compression qui se propagent de la surface du cylindre vers son intérieur.

En conclusion, les différents résultats obtenus par l'analyse numérique mettent en évidence l'intérêt du procédé de confinement proposé dans ce travail et également, l'influence des deux paramètres considérés, à savoir : la largeur de la bande en FRP et le pas d'hélice.

Par ailleurs, il serait alors intéressant, dès lors que l'étude expérimentale et l'analyse numérique ont montré des résultats satisfaisants quant à l'efficacité de cette nouvelle technique de confinement, de chercher la configuration de confinement optimale qui donnerait un gain visé en résistance à la compression du béton confiné.

Chapitre IV :
Optimisation des paramètres du confinement hélicoïdal

Chapitre IV : Optimisation des paramètres du confinement hélicoïdal

IV.1. Optimisation mathématique,à l'aide des algorithmes génétiques, des paramètres de confinement hélicoïdal avec FRP

IV.1.1.Introduction

Résoudre un problème d'optimisation, c'est rechercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient des contraintes données, la (ou les) solution(s) qui rend (ent) minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction objectif ou fonction évaluation. Les contraintes et la fonction objectif s'expriment à l'aide de relations mathématiques qui combinent les paramètres connus et les variables du problème.

Ces variables dites variables de conception correspondent souvent à des décisions à prendre de manière à obtenir l'optimum souhaité. Cette fonction permet de mesurer l'efficacité de la solution. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. En effet, quelle que soit sa définition, l'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction. Elle doit donc exprimer le plus fidèlement possible sous forme mathématique le ou les objectifs à atteindre.

IV.1.2. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont utilisés pour l'optimisation de fonctions (Jong, 1980).Ils fournissent donc des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique.

Un algorithme génétique (AG) est une méthode performante d'optimisation stochastique basée sur la génétique et le principe évolutif de la sélection naturelle de Darwin. Cette théorie de l'évolution, énonce que les meilleurs individus (les plus adaptés) de la population étudiée, survivent plus longtemps et se reproduisent fréquemment, ce qui engendre l'amélioration de la population. En d'autres termes, la sélection naturelle est définie comme étant la lutte d'une population pour la vie en tentant de s'étendre et ce en faisant face aux différentes contraintes environnementales et en disposant d'un espace et de ressources limités.

Pour résoudre un problème d'optimisation, les algorithmes génétiques qui sont développés par J. Holland (1992), travaillent sur un ensemble de n individus qui forment la population initiale de solutions *(chromosomes*)au problème.Ils feront évoluer cet ensemble de solutions

aléatoirement initialisé, dans le but de guider efficacement la recherche vers de bonnes solutions dans l'espace de recherche. La recherche se fait, en utilisant des opérateurs génétiques, en deux phases :

- *La phase de coopération* : où l'algorithme fait appel aux opérateurs de sélection et de croisement, après avoir évalué la qualité (fitness) des individus et leur chance de survie, afin de sélectionner les meilleurs individus. Les plus "adaptés" d'entre eux, c'est-à-dire les solutions au problème qui sont les plus optimales, survivent davantage que ceux qui le sont moins. Pendant cette phase, les solutions sont comparées puis combinées entre elles pour produire de nouvelles solutions admissibles qui héritent des caractéristiques prédominantes contenues dans les solutions de la population courante.

-*La phase d'adaptation individuelle* : qui fait appel à l'opérateur de mutation pour générer de nouveaux gènes.

La population évolue par générations successives en effectuant leur reproduction créant ainsi une nouvelle population de n solutions, formée par les parents sélectionnés et leurs enfants. L'algorithme remplace finalement l'ancienne population par la nouvelle population.

En répétant ce cycle plusieurs fois, on obtient une population composée de solutions meilleures. Ce procédé est relancé un certain nombre de fois afin d'essayer de tendre vers la solution optimale.

Au final, les algorithmes génétiques sont généralement utilisés pour trouver une solution, la meilleure solution après un certain nombre de générations. Finalement, ce processus contribue à produire une population ayant une meilleure adaptabilité, soit des solutions quasi-optimales du problème posé (Guenounou, 2009).

Les AG diffèrent des algorithmes classiques d'optimisation essentiellement en quatre points fondamentaux (Jones, 1995 ;Lerman et Ngouenet ,1995) :

- Les AG utilisent un codage des éléments de l'espace de recherche et non pas les éléments eux-mêmes.
- Les AG recherchent une solution à partir d'une population de points et non pas à partir d'un seul point.
- Les AG n'imposent aucune régularité sur la fonction étudiée (continuité, dérivabilité, convexité…). Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, c'est un des gros atouts des algorithmes génétiques.
- Les AG ne sont pas déterministes, ils utilisent des règles probabilistes de transition.

IV.1.3. Explications des éléments d'un algorithme génétique

Lorsque la population initialeP est générée, les valeurs des paramètres (gènes)sont attribuées aléatoirement,par une fonction, avec une distribution uniforme sur l'intervalle spécifié. Lorsqu'on cherche à optimiser *m* variables ($x_1,x_2,\ldots\ldots,x_m$), alors la population considérée est formée de n solutions .Chaque solution est un chromosome composé de *m* gènes représentant les m variables. La population prendra alors la forme suivante :

$$P=\begin{cases} I_1=(x_1^1,x_2^1,.....,x_m^1) \\ I_2=(x_1^2,x_2^2,.....,x_m^2) \\ I_3=(x_1^3,x_2^3,.....,x_m^3) \\ \\ I_n=(x_1^n,x_2^n,.....,x_m^n) \end{cases}$$

Chaque paramètre d'un individu a sa valeur propre :

$x_i^1 \neq x_i^2 \neq ..... \neq x_i^n \qquad où \qquad i=[1,2,....,m]$

Ces gènes sont en général de même type, donnant ainsi des chromosomes uniformes où les gènes homologues sont au même endroit sur leurs chromosomes respectifs. Les individus créés sont, donc, de même nature que la solution potentielle.

Les individus qui représentent les solutions du problème à optimiser, doivent être codés.
Chaque solution est représentée par un vecteur qui peut être binaire ou sous une autre forme discrète dénombrable. Il existe trois principaux types de codage : binaire, gray ou réel. Nous pouvons facilement passer d'un codage à l'autre (Michalewicz Z.,1992).

Les premières techniques d'utilisation de l'algorithme génétique étaient basées sur le codagebinaire pour coder les individus. Il fût remplacé, par la suite, par le codage réel qui est plus précis et dont la première application fût celle de Wright (1991), qui proposaune stratégie pour coder l'algorithme génétique en nombres réels.
Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.

La qualité d'un individu est évaluée par une valeur numérique donnée par la fonction d'évaluation (fonction objectif). Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Elle conditionne directement la chance qu'a l'individu d'être

sélectionné. Ainsi, plus l'individu est apte (de bonne qualité), plus il a de la chance de participer à l'élaboration de la future génération.

IV.1.4.Opérateurs génétiques

IV.1.4.1. Sélection

Cet opérateur est chargé de définir quels seront les individus de P qui vont être dupliqués dans la nouvelle population P' et vont servir de parents (application de l'opérateur de croisement).Soit n le nombre d'individus de P, on doit en sélectionner n/2 (l'opérateur de croisement nous permet de repasser à n individus).
Les meilleurs individus sont sélectionnés pour se reproduire.Selon leur qualité, les individus se font attribuer des pourcentages de chances d'être choisis. Ces pourcentages correspondent à l'importance relative de la qualité de l'individu par rapport à la qualité totale de la population.

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population.
Il existe plusieurs méthodes de sélection comme la roulette, le tournoi ou l'élitisme.

- **Roulette (roue de loterie biaisée)**

Chacun des secteurs de la roue est associé à un individu de la population. Son angle étant proportionnel à la qualité de l'individu qu'il représente. On obtient un individu à chaque fois que la roue est tournée.
On effectueautant de tirages avec remises qu'il y a d'individus dans lapopulation. Cette méthode présente néanmoins quelques inconvénients tels que la perte de diversité par la domination d'un super individu.

- **Tournoi**

Plusieurs individus pris au hagard sont rassemblés pour un tournoi dont le vainqueur est l'individu de meilleure qualité. On peut alors sélectionner uniquement le vainqueur comme on peut sélectionner les 2 ou les 3 meilleurs.
Cet opérateur a pour principe, de tirer aléatoirement deux individus dans la population. Celui qui a laperformance la plus élevée sera reproduit dans la nouvelle population avec

uneprobabilité p comprise entre 0.5 et 1. Le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de ppermet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de sélection. Cetteméthode permet d'obtenir des résultats très satisfaisants.

- **Élitisme**

Ce sont les meilleurs individus qui sont sélectionnés. Ils sont sauvegardés pour s'assurer qu'ils fassent partie de la nouvelle génération.
Cette méthode consiste à sélectionner les n individus dont on a besoin pour la nouvelle génération P' en prenant les n meilleurs individus de la population P après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.

C'est une façon d'éviter que les meilleurs individus soient altérés. La stratégie élitiste, consiste en la reconduite explicite de l'élite dans une certaine proportion. Ainsi, bien souvent, les meilleurs individus correspondant à 5% de la population, par exemple, sont directement reproduits à l'identique, l'opérateur de reproduction ne jouant alors que sur les 95% restants.

Après le croisement, on compare le meilleur individu de la nouvelle génération avec le meilleur individu de la génération précédente. Le meilleur individu est conservé tandis que l'autre est détruit. Cette technique permet de s'assurer que la fonction objectif augmente (diminue) toujours si on maximise (minimise) une fonction.

IV.1.4.2.Croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes.Les individus sélectionnés, en fonction de leurs performances, formant les individus parents sont aléatoirement appariés et subissent un croisement (crossover) selon une probabilité Pc généralement de 50%.

Le croisement consiste à choisir un point (2ou3) de coupure du chromosome puis à échanger les portions de chromosomes résultantes de part et d'autre de ce point, donnant ainsi naissance à 2 nouveaux individus, comme illustré par la figure IV.1. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population.

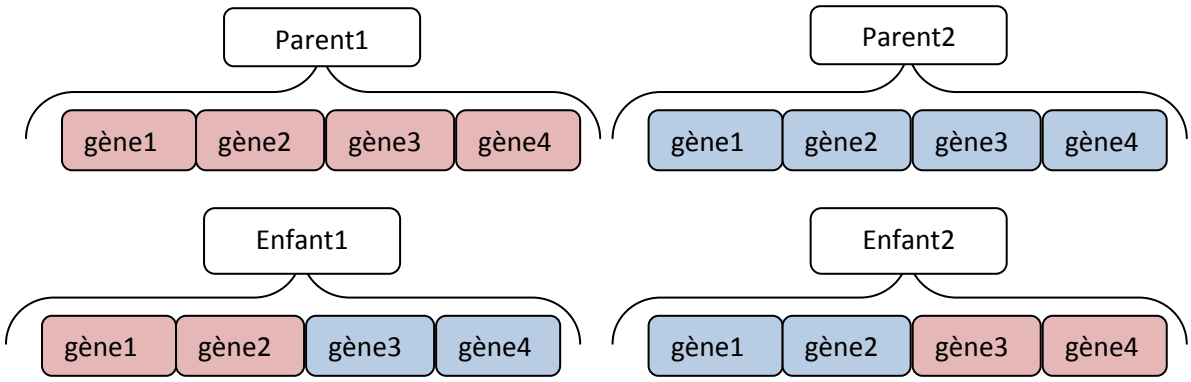


Figure IV.1.Croisement des individus.

La taille de la population étant constante tout au long de l'algorithme, on obtient à nouveau une population de *n* individus qui, en théorie, ont une meilleure performance en moyenne que les individus de la générationprécédente.

IV.1.4.3.Mutation

La nouvelle population résultant du croisement est formée des individus parents et enfants. Certains d'entre eux, choisis aléatoirement, vont subir par la suite une mutation. Il s'agit, comme le montre la figure IV.2, d'inverser deux gènes du chromosome qui forme l'individu.

Bien que la probabilité Pm de mutation demeure faible puisqu'elle n'excède pas 5%, mais cette étape est très importante puisqu'elle peut donner naissance à des individus qui ne sont pas forcément les meilleurs, mais qui peuvent apporter des possibilités supplémentaires qui pourraient bien être utiles pour la création de bonnes solutions. Généralement, seul un gène est modifié pour passer d'une solution à une autre solution.

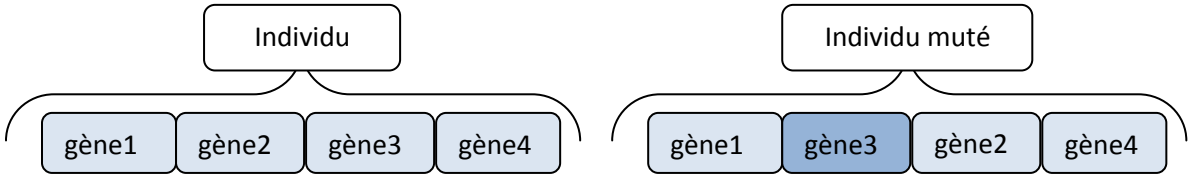


Figure IV.2.Mutation des individus.

Les mutations jouent le rôle de bruit et empêchent l'évolution de se figer. Elles permettent d'assurer une recherche aussi bien globale que locale, selon le poids et le nombre des gênes mutés. De plus, elles garantissent mathématiquement que l'optimum global peut être atteint.

L'ensemble des étapes d'un algorithme génétique est résumé sur l'organigramme de la figure IV.3.

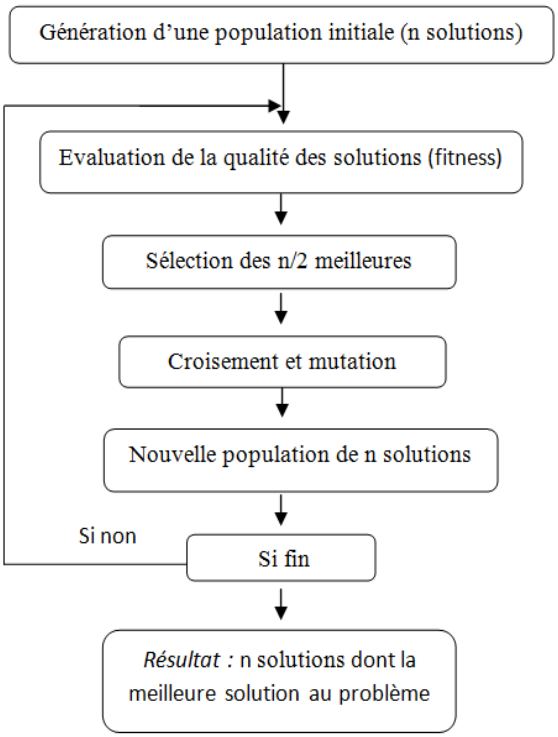


Figure IV.3. Etapes d'un algorithme génétique.

Cet algorithme sera utilisé pour optimiser la résistance à la compression des cylindres confinés hélicoïdalement avec des bandes continues en FRP.

IV.1.5. Application de l'algorithme génétique pour l'optimisation de la résistance à la compression du cylindre confiné

La résistance à la compression des cylindres confinés est donnée par une fonction de plusieurs variables. Ces variables représentent les paramètres de confinement qui sont la largeur de la bande du FRP, le pas de l'hélice que forme le FRP autour du cylindre, la résistance du béton non confiné et la résistance à la traction du FRP.

Ces paramètres sont introduits dans l'algorithme génétique sous forme de vecteurs de données. Les valeurs prises en considération pour chaque paramètre, sont données dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Valeurs des variables de l'optimisation

L (mm)	S (mm)	f_{frp}(MPa)	f_{co}(MPa)
20	60	400	30
30	75	800	35
40	100	1200	40

L'optimisation de la fonction qui décrit la résistance du cylindre confiné est conduite dans le but de trouver la meilleure combinaison de variables qui donnerait une valeur cible du gain en résistance. Les solutions à ce problème d'optimisation sont des chromosomes formés de quatre gènes lesquels représentent les quatre variables considérées.

Cette optimisation est réalisée sous contraintes, puisqu'on fixe la valeur de la résistance recherchée, donc les solutions satisfont toutes à cette condition posée. Les solutions de ce problème d'optimisation représentent les individus qui forment la meilleure génération obtenue après plusieurs itérations.

L'optimisation est conduite pour une population initiale de 80 individus. Les résultats, solutions données par le logiciel de calcul, obtenus pour un gain en résistance à la compression de 100%, sont donnésdansle tableau IV.2.

Tableau IV.2. Résultats de l'optimisation des paramètres de confinement hélicoïdal par FRP.

L(mm)	f_{frp}(Mpa)	S(mm)	fco(Mpa)
30.55018	765.9765	78.65961	35.81284
29.85388	946.2927	79.69161	35.96257
30.26522	874.1353	77.92452	36.20797
30.00627	941.2908	78.42524	36.56197
31.76974	853.1009	76.46172	35.61754
31.10376	851.6497	79.3138	34.04581
27.44855	861.2815	78.32511	35.21019
30.42517	856.8111	68.71516	35.17758
29.01303	750.6126	80.46234	35.34887
29.1044	803.7044	80.57065	35.98057
29.71088	822.0706	79.22035	34.28592
29.81479	796.8685	78.48647	36.58852
30.84672	785.1642	76.28355	36.51143
31.5863	819.1204	78.59073	35.71536
30.41104	825.2376	78.54316	36.23116
30.11914	860.6707	76.18764	36.37087
29.83497	904.4999	79.23292	35.93681
30.17291	842.917	79.13993	36.53583
30.37034	852.9779	78.8691	33.86286
32.14477	756.5466	80.04233	35.17117
29.06299	857.3482	78.88197	32.23313
31.24957	867.0504	79.31425	35.4933
29.86482	879.7453	70.62009	36.65168
29.99388	834.3615	79.15346	36.80617
29.80436	771.2715	78.98031	36.06091
31.004	854.974	79.12	35.89203
30.42706	849	76.42931	35.84917
29.88904	850.5003	79.40221	35.92513
30.53532	795.3443	80.37242	35.66087
29.90124	863.422	79.61545	35.97598
31.09473	1001.008	79.75042	34.27036
30.20809	837.5717	79.94585	35.92096
30.9002	891.5046	78.56145	41.77613
30.30396	769.0924	80.29063	35.63182
30.05935	828.3361	79.22371	36.22394
30.88377	858.1814	76.21262	35.59231
29.13484	862.7968	75.52038	29.75675
30.41841	755.597	79.19632	35.85259
32.59629	819.2952	80.59837	36.23533
27.83249	757.707	81.2948	34.15247
26.55651	774.4144	80.1921	34.72699
30.78167	871.9955	79.3785	35.88385
30.21038	617.7509	78.35041	35.55916
31.74699	859.3127	79.40376	34.44805
29.438	862.4273	78.35206	37.29913
31.47776	433.2409	78.3646	35.84021
31.04932	860.4975	92.65506	35.93711
29.35778	742.4855	78.46854	35.71167
30.32966	930.5797	79.43978	36.36557
26.05682	860.8958	79.0072	37.07754
31.39145	854.3237	78.20943	35.70081
30.20597	868.9259	79.38542	35.80631
32.48402	726.7719	80.25277	35.04856
29.93965	779.9063	79.18539	36.47456
29.11701	865.6963	77.48704	35.09439
30.20738	867.4305	77.86239	33.62132
28.68822	861.0957	79.03148	37.00926
30.90946	813.7013	80.99096	35.72277
29.55505	871.879	79.26841	33.22966
30.82034	820.4894	75.54203	37.10638
31.34751	873.1516	79.16998	37.27853
29.01854	772.2602	78.2581	35.83428
30.02335	863.8656	78.29302	32.29744
30.73409	850.2835	79.03967	36.4747
29.68984	788.7276	76.69225	35.85015
30.67809	787.4494	80.90918	35.69372
30.71193	862.3499	76.48887	35.30784
30.03335	860.2335	75.70692	36.70589
30.73287	925.8835	79.49438	34.83373
29.54595	828.7782	79.26806	36.41928
30.78337	876.033	66.90978	36.38184
31.89281	874.7133	79.40421	35.89553
29.99439	880.8082	78.65393	34.19543
30.05365	780.9451	79.1782	43.17325
30.02375	867.0268	78.11963	35.68934
27.95383	860.9004	79.07007	35.67642
30.05726	914.5361	78.58418	33.2417

Pour pouvoir désigner la meilleure solution parmi cet ensemble de solutions possibles, cette optimisation doit être complétée par une Analyse en Composantes Principales (ACP).

IV.2. Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales est une méthode issue de travaux de psychomètres américains (Spearman, C. (1904) et Pearson, K. (1901)).
Elle a été développée par Hotelling (1933).L'ACP, en faisant appel à l'algèbre linéaire,permet de représenter dans un espace de dimension réduite les individus d'une population ou d'un échantillon, de détecter les liaisons entre les variables ainsi que les variables séparant le mieux les individus. A partir d'un simple coup d'œil, elle permet souvent la localisation des grandes masses d'individus, détecte les individus atypiques et repère même d'éventuels groupes isolés.

La définition de l'ACP telle que donnée par Vogt (1993), est un ensemble de méthodes permettant de procéder à des transformations linéaires d'un grand nombre de variables intercorrélées de manière à obtenir un nombre relativement limité de composantes non corrélées. Cette approche facilite l'analyse en regroupant les données en des ensembles plus petits et en permettant d'éliminer les problèmes de multicolinéarité entre les variables.

IV.2.1.Principe de L'ACP

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine.
Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

La fonction première de cette technique est la réduction des données. Stevens (1992) met en relief l'intérêt qu'offre l'analyse en composantes principales comme technique de réduction des données.
C'est en effet un puissant outil de réduction de dimension, puisque elle permet de simplifier grandement le nombre de variables dans une étude avec une perte minimale d'information.

Mathématiquement l'ACP est une technique de projection orthogonale linéaire qui projetteles observations multidimensionnelles représentées dans un sous-espace de dimension p(pest le nombre de variables observées) dans un sous-espace de dimension inférieure q (q< p) en respectant le mieux les distances entre les individus formant un nuage de points multidimensionnel, ce qui revient à maximiser la variance des projections.

L'ACP peut être considérée de ce fait, comme une technique de minimisation de l'erreur quadratique d'estimation ou une technique de maximisation de la variance des projections.
Ainsi, les anciens axes sont remplacés par de nouveaux axes appelés axes factoriels qui forment à leur tour des plans factoriels servant de base à une représentation graphique plane des variables initiales ainsi que des individus.
L'interprétation de ces graphiques permet de mettre en évidence les liaisons inter-variables et les similitudes entre individus, et de désigner ceux qui présentent des valeurs particulières des différentes variables.

IV.2.2.Détermination des axes factoriels

Le premier axe factoriel, ou axe principal d'inertie correspondant à la première composante principale, est la direction selon laquelle le nuage de points présente un allongement maximal. L'axe factoriel F1 est donc l'axe selon lequel est préservé le maximum de la dispersion initiale des points du nuage après projection.

Le deuxième axe factoriel, correspondant à la deuxième composante principale, est la direction qui explique, après le premier axe, le maximum de l'inertie résiduelle. Les composantes principales devant être non corrélées, le deuxième axe est donc choisi orthogonal au premier, les vecteurs directeurs des deux premiers axes ont alors un produit scalaire nul , ce qui revient à dire que les deux premières composantes principales ont une covariance nulle.

La procédure est répétée, jusqu'à avoir formé q nouveaux axes à partir des p anciens axes. Les axes factoriels ainsi formés, portent des parts décroissantes de la dispersion initiale du nuage de points. Généralement, les 2, 3 ou 4 premiers axes factoriels suffisent pour reproduire un nuage de points à peine déformé par rapport à son état initial. Ces axes choisis permettent aussi une meilleure observation et donc une meilleure analyse des données.

IV.2.3.Formulation mathématique de l'ACP

On suppose que l'on dispose de p variables, de covariances non négligeables, formant un vecteur $x=(x_1, x_2, ..., x_3)$

On souhaite créer q nouvelles variables $(q < p)$ avec une perte minimale d'information. On cherche alors une fonction linéaire C_1 des éléments de x ayant une variance maximale où a_1 est un vecteur de constantes $(a_1, a_2, ..., a_3)$ et $C_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1p}x_p$.

on cherche par la suite la deuxième composante principale C_2, non corrélée avec C_1 et ayant une variance maximale. On procède alors de manière récursive jusqu'à la k ième fonction linéaire C_k. Ce qui donne au final les nouvelles variables $C_1, C_2, ..., C_k$ qui sont déterminées comme suit :

Soit W la matrice de variance covariance de x, telle que $W_{i,j} = \text{cov}(i, j)$ et $W_{i,i} = \text{var}(i)$

Pour $k = 1, 2, ..., p$, la k ième composante principale $C_k = a_k^t x$ où a_k est le vecteur propre correspondant à la k ième plus grande valeur propre λ_k. Par ailleurs si on choisit a_k de sorte que $a_k^t a_k = 1$, alors la variance de C_k est $\text{var}(C_k) = \lambda_k$.

Pour la première composante principale,

$$\begin{cases} \text{var}(C_1) = \max a_1^t W a_1 \\ a_1^t a_1 = 1 \end{cases} \qquad \text{(IV.1)}$$

Résoudre ce problème revient à maximiser $a_1^t W a_1 - \lambda(a_1^t a_1 - 1)$ où λ est un multiplicateur de Lagrange.

Après différenciation par rapport à a_1 :

$(W - \lambda I_p)a_1 = 0$ où I_p est la matrice identité d'ordre p x p.

Alors, λ_1 est la première valeur propre de W et a_1 est un vecteur propre de W.

On cherche à maximiser $a_1^t W a_1 = a_1^t \lambda a_1 = \lambda a_1^t a_1 = \lambda_1$, par conséquent, λ_1 est la plus grande valeur propre.

Alors, a_1 est le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre possible de W et $\text{var}(C_1) = a_1^t W a_1 = \lambda_1$ la plus grande valeur propre possible.

On obtient par un raisonnement analogue, les vecteurs propres $a_2, a_3, a_4, ..., a_p$ de W correspondant aux valeurs propres $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 ....., \lambda_p$ respectivement.

IV.2.4.Choix du nombre de composantes principales à extraire

Le pourcentage de variance expliqué par chaque composante décroîtsystématiquement à mesure que l'on progresse dans le processus d'extraction etpeut devenir tout à fait négligeable une fois que les composantes les plusimportantes auront été extraites. Plusieurs critères ont été élaborés afin de savoir à quel niveau il faudrait arrêter ce processus d'extraction.

- ***Critère de Kaiser***

La variance totale dans la matrice, correspond à la somme des variances de chaque variable.
l'algorithme utilisé en ACP fait en sorte de maximiser la variance expliquée par la première composante tandis que la deuxième composante extraite viendra expliquer une portion additionnelle de variance, indépendante de la première, et correspondant à une proportion plus faible que la précédente.
Selon le critère de Kaiser (1960), on devrait arrêter l'extraction des composantes principales, dès qu'une valeur propre devient inférieure à1.

- ***Utilisation du test d'accumulation de variance de Cattell***

Un graphique illustrant la taille des valeurs propres des différentes composantes en fonction de leur ordre d'extraction est tracé. Le critère proposé par Cattell (1966), nous conduit à l'arrêt de l'extraction des composantes à l'endroit où se manifeste le changement de pente dans le graphique.

- ***Utilisation de l'analyse parallèle de Horn***

Horn (1965), recommande de conserver pour extraction, uniquement les composantes dont les variances sont significativement supérieures à celles obtenues à partir de données aléatoires. La prise de décision est relativement facilitée si on utilise un graphique représentant les deux séries de valeurs propres.

IV.2.5. Application de l'ACP aux solutions de l'optimisation des paramètres de confinement hélicoïdal par FRP

IV.2.5.1. Variables considérées dans l'ACP

L'optimisation mathématique par les algorithmes génétiques de la fonction qui décrit la résistance à la compression du cylindre confiné, de façon à obtenir un gain de 100% en résistance à la compression, a révélé un ensemble de solutions possibles. Il s'agit de plusieurs variantes combinant les différentes valeurs données aux variables qui constituent cette fonction.

Les variables étudiées étant la résistance à la compression du béton non confiné, la résistance à la traction du FRP, la largeur de la bande de FRP, le pas de l'hélice que forme le FRP autour du cylindre ainsi que la résistance à la compression du béton confiné. Elles constituent les variables initiales de l'ACP.

IV.2.5.2.Résultats de l'ACP

L'ACP conduite à partir d'un espace à 5 dimensions, s'est ramenée à un nouvel espace à deux dimensions. Les résultats de cette ACP sont donnés sous forme de graphiques en dimension 2, résumant pertinemment la configuration réelle des données qui se trouvent en dimension 5.

Les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unité appelé cercle des corrélations. On peut ainsi interpréter les positions des anciennes variables les unes par rapport aux autres en termes de corrélations.On interprète alors les variables qui sont bien représentées c'est à dire celles qui sont proches du cercle de corrélation. Les variables projetées vers le bord du cercle, sont les mieux représentées.

On interprète les positions des variables par rapport aux axes afin de déterminer quelles sont les variables qui sont expliquées par ces axes et les positions des variables les unes par rapport aux autres.Par ailleurs, deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre formant un angle proche de 0, sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont

corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

Sous réserve d'une bonne représentation, la proximité de deux individus sur un plan factoriel est synonyme d'individus ayant un comportement similaire, c'est-à-dire ayant des réponses aux variables de l'analyse qui sont très proches. Si deux individus ont exactement les mêmes valeurs aux différentes variables, ils seront superposés sur les différents plans factoriels. De même, des individus ou des groupes d'individus s'opposant par rapport à un axe factoriel, s'opposeront par rapport aux variables qui « font » cet axe.

Ainsi, pour les variables considérées dans cette ACP, la résistance au pic à la compression du béton est bien représentée par l'axe 1, elle est corrélée positivement avec la largeur de la bande, la résistance à la traction du FRP et la résistance à la compression du béton non confiné. Par ailleurs, elle est corrélée négativement avec le pas de l'hélice comme indiqué sur la figure IV.4.

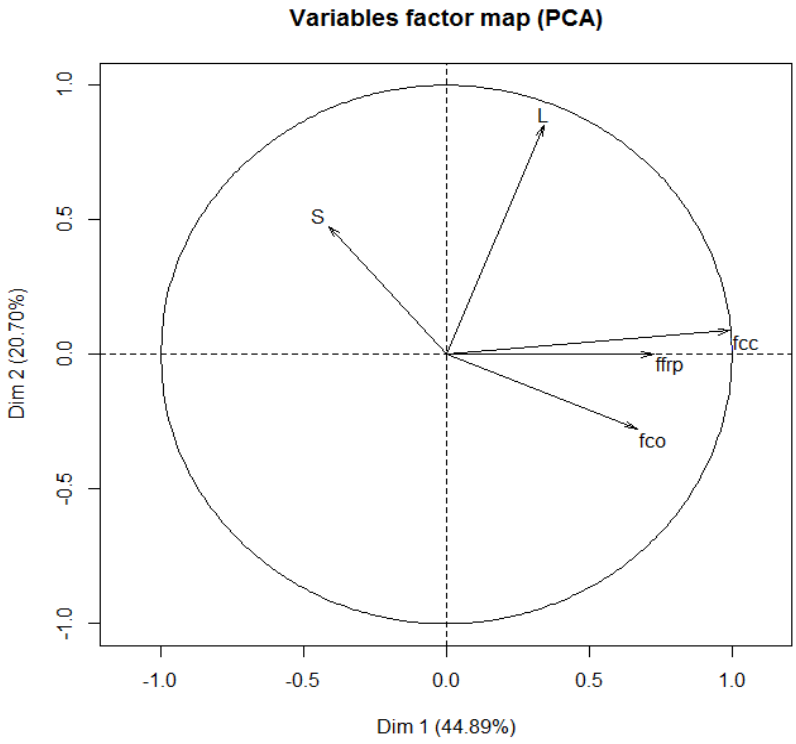


Figure IV.4. Graphe des variables donné par l'ACP.

Le second graphe donné par cette analyse est celui des individus. IL est lu simultanément avec celui des variables, et permet de déduire l'individu qui donne la meilleure (ou la plus faible) valeur de la variable considérée dans la lecture.

Il ressort du graphe des individus donné dans la figure IV.5, que la meilleure solution qui permettrait un gain de 100% en résistance, est l'individu n°11 qui correspond à un cylindre confiné avec des bandes de FRP de largeur $L = 3,1cm$,formant des hélices de pas $S = 8,7cm$, dont la résistance à la traction est $f_{prf} = 883,5MPa$ et ayant une résistance à la compression de 34 MPa.

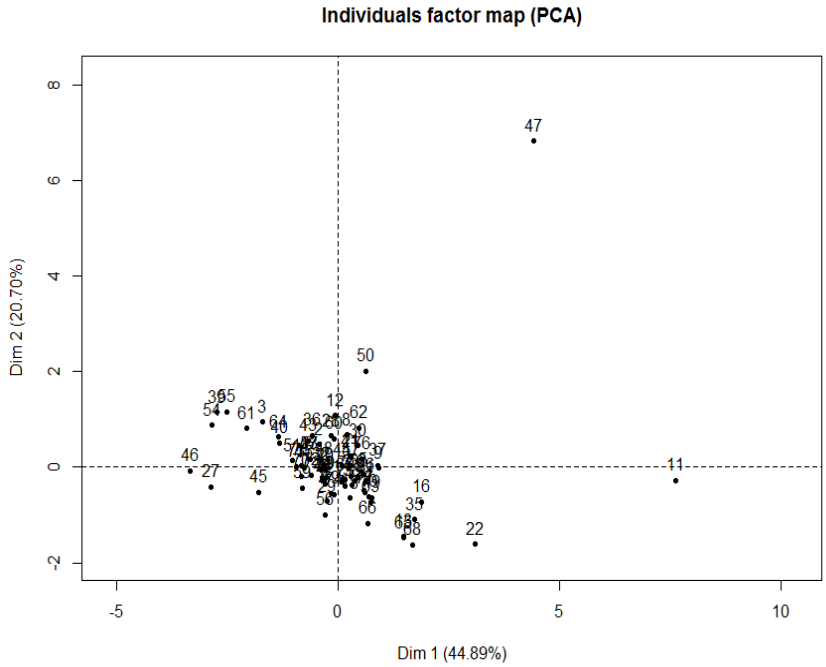


Figure IV.5. Graphe des individus donné par l'ACP.

La solution optimale du confinement hélicoïdal permettant un gain de 100% en résistance à la compression, pour un béton ayant une résistance caractéristique de 34 MPa, permet un gain en matériaux composites par rapport au cas du confinement avec une enveloppe entière.

En effet, en comparant la surface de l'enveloppe à celle des deux bandes de GFRP, on enregistre pour le cas de cette solution optimale, un gain de 36 % en matériaux composites.

Sachant que le prix unitaire du tissu de verre est d'environ 2,1 €/m^2 et celui de la résine est de 11,62€/Kg, le prix du FRP nécessaire au confinement total avec enveloppe est estimé à 1,97€. Alors que le prix du FRP nécessaire au confinement, selon la solution optimale, est de 1,4€, ce qui donne un gain de 40,71% en matière de prix.

Par ailleurs, une classification hiérarchique ascendante semble bien indiquée afin de faire une bonne lecture des résultats de l'ACP, en effectuant à la fois des groupements en classes des individus solutions de l'optimisation qui présentent des similitudes.

IV.2.6. Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)

Les résultats de l'ACP seront classés sous forme de groupes présentant des similarités entre les individus qui les forment. Cette démarche vise à classer les différentes solutions de l'optimisation selon leurs similitudes

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La classification ascendante hiérarchique (*CAH*) est l'une d'entre elles.

La classification a pour but, de faciliter l'étude d'une population d'effectif important, en regroupant les individus qui la forme en plusieurs classes de telle sorte que les individus d'une même classe soient le plus semblables possible(homogénéité intra-classe) et que les classes soient le plus distinctes possibles (hétérogénéité inter-classe).

IV.2.6.1. Principe de la Classification Hiérarchique Ascendante

La CHA commence par agréger les individus qui sont les plus semblables entre eux, puis les individus ou groupes d'individus un peu moins semblables et ainsi de suite jusqu'au regroupement trivial de l'ensemble de l'échantillon.
Ces agrégations se font deux à deux. C'est parceque cette technique part du particulier pour remonter au général qu'elle est dite « ascendante ».

L'agrégation se fait selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance existant entre chaque paire d'individus. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification; elle est dite « hiérarchique » car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein.

a. Calculer une matrice des distances

Pour regrouper les individus qui se ressemblent (et bien séparer ceux qui ne se ressemblent pas), il faut choisir un "critère de ressemblance*"*.

La notion de ressemblance entre observations est évaluée par une distance entre individus.

Il existe plusieurs types distances mathématiques pour les variables quantitatives (euclidiennes, Manhattan…).

La distance Euclidienne est le type de distance le plus couramment utilisé. Il s'agit d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel.

Elle s'écrit :d(x,y) = {∑ i (xi - yi) 2 } ½

b. Critère d'agrégation

Le critère d'agrégation permet de comparer les classes deux à deux pour sélectionner les classes les plus similaires suivant un certain critère. Les critères les plus classiques sont le plus proche voisin, le diamètre maximum, la distance moyenne, la distance entre les centres de gravités ainsi que le critère de Ward (Ward, 1963).
Le logiciel R, utilisé dans cette étude, utilise le critère de Ward qui considère que le regroupement choisi est celui qui maximise la variance inter-groupes ou qui fait le moins varier l'inertie intra-classes.
Variance totale = Variance intra-groupes + variance inter-groupes

A chaque étape, l'évolution de cette décomposition de variance donne des indications sur la qualité de la partition.
L'indice de dissimilarité entre deux classes (ou niveau d'agrégation de ces deux classes) est alors égal à la perte d'inertie inter-classe résultant de leur regroupement.

L'intertieinter-classe étant la moyenne des carrés des distances des centres de gravité des classes au centre de gravité total, la variation d'inertie inter-classe, lors du regroupement de A et B est égale à :

$$\delta(A,B) = \frac{P_A P_B}{P_A + P_B} d^2(g_A, g_B) \qquad \text{(IV.2)}$$

Où :g_A = centre de gravité de la classe A (poids p_A).
g_B = centre de gravité de la classe B (poids p_B).

Cette méthode est donc complémentaire de l'analyse en composantes principales et repose sur un critère d'optimisation assez naturel. Elle constitue à notre avis la meilleure méthode de classification hiérarchique sur données euclidiennes.

c. Choix de la partition finale

Afin de définir le nombre de classes sur lesquelles seront partitionnés les différents individus, le logiciel donne le graphique des pertes relatives d'inertie illustré par la figure IV.6.

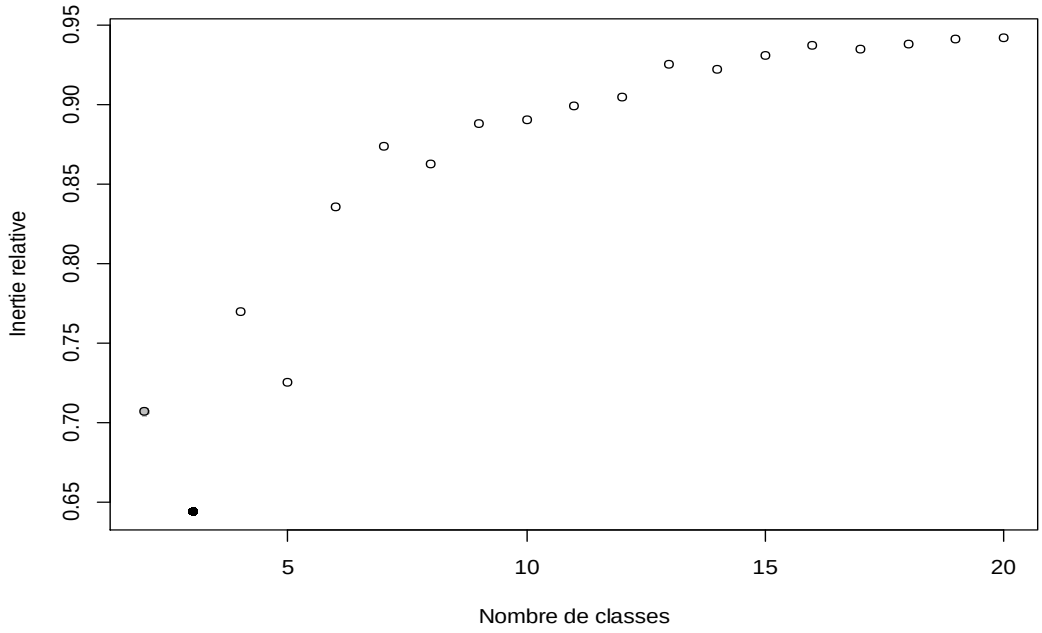


Figure IV.6. Détermination du nombre de classes.

La meilleure partition selon ce critère est représentée par un point noir et la seconde par un point gris.

Il ressort de l'observation de ce graphique, que le nombre de classes qui permet une classification fine des individus, issus de l'ACP, est égal à 3.

IV.2.6.2. Etapes de l'algorithme d'une classification hiérarchique ascendante

Pour classifier une population d'effectif n dont les individus sont numérotés, on considère cette population comme la réunion de n classes à un seul élément, on regroupe progressivement les classes deux à deux selon l'algorithme suivant :

Etape 1 : Calculer la matrice des distances :

D = (d (Mi, Mj)) $0 \leq i \leq n$, $0 \leq j \leq n$.

Etape 2 : Remplacer les deux individus de distance minimale par une classe (à 2 éléments) notée Γ1. La population compte alors n-1 classes (n-2 classes à un élément et une à 2 éléments).

On peut donc recommencer à l'étape 1, recalculer la matrice des distances entre ces n-1 classes, en remplaçant si nécessaire "distance entre individus" par "écarts entre classes", puis regrouper (étape 2) les deux classes de distance minimale en une seule. Après n-1 itérations, tous les individus seront regroupés en une classe unique.

IV.2.6.3.Calcul du dendrogramme

Une fois tous les individus classés, on obtient un arbre, appelé dendrogramme. Il est construit de la façon suivante : les points représentant les différents individus sont alignés sur l'axe horizontal et sont joints deux à deux, successivement, en suivant cet algorithme de classification hiérarchique ascendante (commençant par les plus proches, etc.). Cette démarche se poursuit ainsi jusqu'au regroupement de tous les individus en une classe unique.

Le dendrogramme calculé pour les résultats de l'ACP conduite précédemment est donné par la figure IV.7.

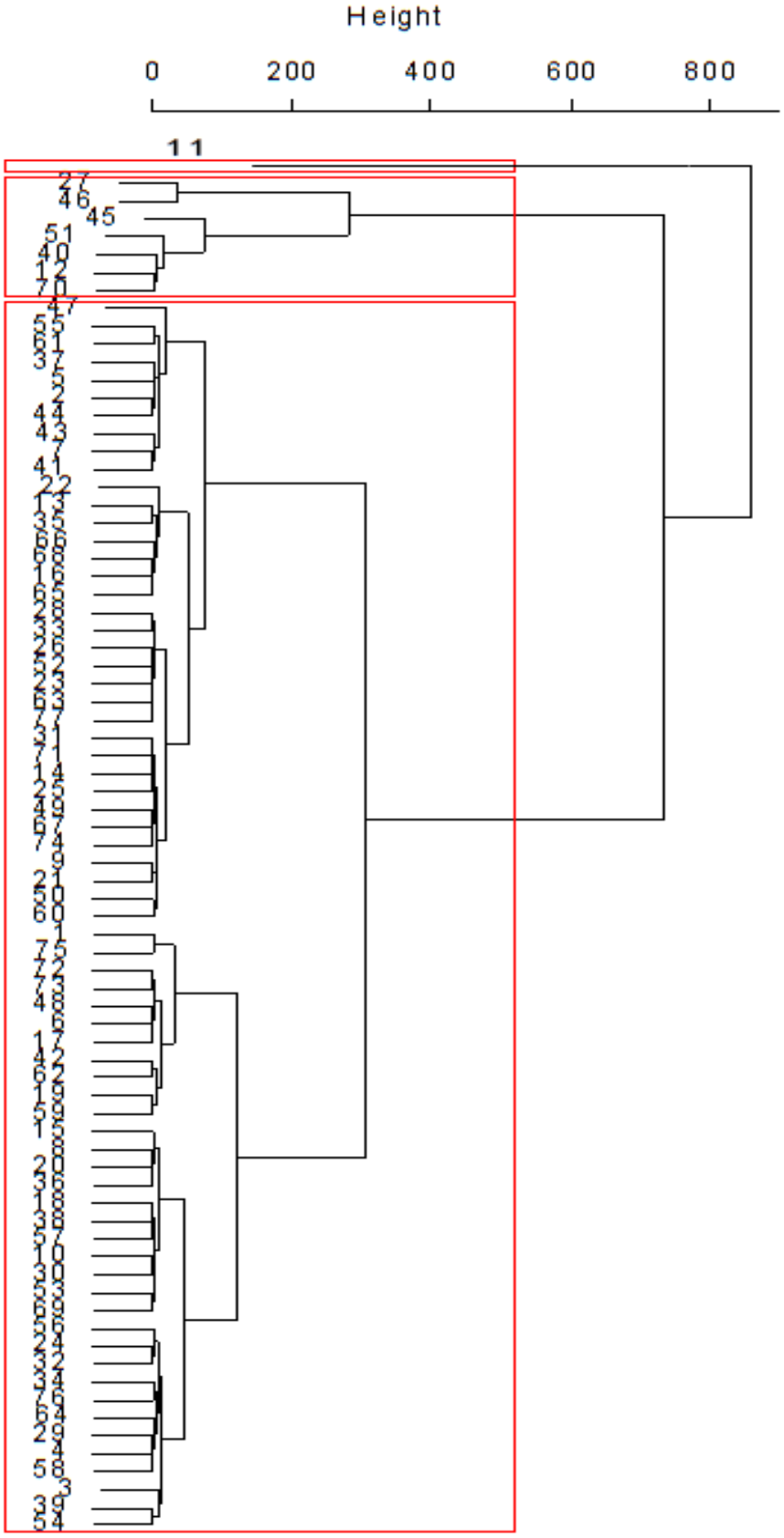


Figure IV.7. Dendrogramme calculé pour les résultats de l'ACP.

IV.2.6.4. Interprétation du dendrogramme

Le dendrogramme donne 3 classes différentes d'individus, solutions de l'optimisation de la résistance à la compression au pic de cylindres confinés avec des bandes hélicoïdales en GFRP.

La classe1 contient l'individu n°11. La classe 2 regroupe les individus similaires qui portent les numéros 12, 27, 40, 45, 46, 51 et 70. La classe 3, quand à elle, regroupe le reste des solutions de l'optimisation. Les caractéristiques des différents individus ayant été répartis selon ces trois classes ont été donnés précédemment dans le tableau IV.2.

En pratique, cette classification montre les différentes variantes de cette technique de confinement qui auraient la même efficacité en matière de résistance à la compression. C'est-à-dire qu'au sein d'une même classe, le confinement avec n'importe quelle variante correspondant aux individus de cette classe, produirait le même effet.

IV.3. Effet de la précontrainte exercée sur la bande en FRP : approche théorique

IV.3.1. Introduction

Les bandes de matériaux composites en FRP étant disposées sur la circonférence des cylindres, il serait intéressant de mettre en évidence l'effet de leur enroulement sur la résistance à la compression maximale du béton confiné, en supposant qu'elles soient soumises à une précontrainte. Ces bandes sont maintenues sous précontrainte à l'aide d'un système d'ancrage approprié.

Ce procédé peut s'avérer être une disposition constructive très intéressante qui permet d'assurer une certaine continuité du système de renforcemententre le FRP et le support béton.
Il permet également de tenir compte de l'effet de l'enroulement du FRP sur la qualité de ce renforcement, en matière de résistance au pic à la compression des cylindres confinés.

IV.3.2. Configuration de l'ancrage

La bande de FRP à coller sur le béton, est maintenue sous tension puisqu'on suppose qu'elle est soumise à un effort de traction à ses extrémités. La bande précontrainte est bloquée aux extrémités du cylindre à l'aide d'un dispositif d'ancrage.

Le but de cette procédure est d'optimiser le renforcement par matériaux composites en supposant que les bandes soient collées tout en appliquant des forces de traction à leurs extrémités.

Le comportement de la bande en FRP, soumise à la traction, est alors similaire à celui d'un ressort de traction.

IV.3.3. Bases de calcul des contraintes dans le corps d'un ressort de traction

IV.3.3.1. Efforts internes

Les efforts internes qui se développent dans la section droite du ressort soumis à la traction sont :

- Un effort normal $\vec{N}$, orthogonal à la section comme indiqué par la figure IV.8.
- Un effort tranchant $\vec{T}$, dans le plan de la section.
- Un moment de flexion $\vec{M}_f$, autour d'un axe contenu dans le plan de la section.
- Un moment de torsion $\vec{M}_t$ autour de l'axe orthogonale de la section.

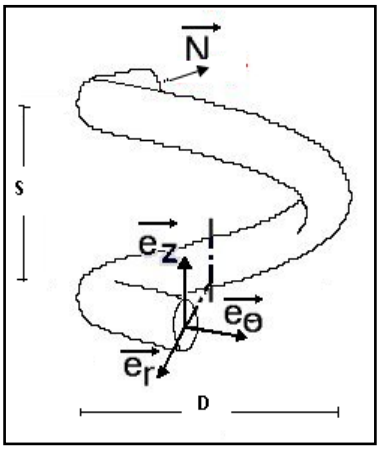


Figure IV.8. Représentation des efforts internes.

L'angle d'enroulement α est donné par la relation : $\tan\alpha = \frac{S}{\pi D}$ .Le repère lié à la section s perpendiculaire à l'axe du fil du ressort est défini par la relation matricielle :

$$\begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{e}_\theta \\ \vec{e}_z \end{pmatrix}$$

On a donc,

$\vec{N} = N\vec{i}$ $\quad$ $\vec{M}_t = M_t\vec{i}$ $\quad$ $\vec{R} = N\vec{i} + T\vec{j}$

$\vec{T} = T\vec{j}$ $\vec{M}_t = M_t\vec{i}$ $\quad$ $\vec{M} = M_t\vec{i} + M_f\vec{j}$

IV.3.3.2. Calcul des contraintes dans le ressort

Le torseur des efforts intérieurs au centre de la section est égal au torseur des efforts appliqués.

$$\vec{R} = -F\vec{e}_z$$
$$\vec{M} = -F\frac{D}{2}\vec{e}_\theta$$

Par projection sur $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{e}_\theta)$:

$$\left.\begin{aligned} \vec{R} &= F\sin\alpha\vec{i} - F\cos\alpha\vec{j} \\ \vec{M} &= -F\frac{D}{2}\cos\alpha\vec{i} - F\frac{D}{2}\sin\alpha\vec{j} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.3)}$$

On en déduit :

$$\left.\begin{aligned} \vec{N} &= F\sin\alpha\vec{i} \\ \vec{T} &= F\cos\alpha\vec{j} \\ \vec{M}_t &= -F\frac{D}{2}\cos\alpha\vec{i} \\ \vec{M}_f &= -F\frac{D}{2}\sin\alpha\vec{j} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.4)}$$

En considérant un point $M(x_1, x_2, x_3)$ dans le repère $(o, \vec{i}, \vec{j}, \vec{e}_r)$ et l'hypothèse de Saint Venant,la contrainte de flexion (ou de tension) σ_{11} et la contrainte de torsion (ou de cisaillement) τ , sont données par :

$$\left.\begin{array}{l} \sigma_{11} = -M_f x_3 / J - N / S \\ \tau = (0, \sigma_{12}, \sigma_{13}) \end{array}\right\} \qquad \text{(IV.5)}$$

La figure IV.9, montre la répartition des contraintes associées :

σ_{11} est orthogonale à la section et σ_{12}, σ_{13} sont dans le plan de la section droite.

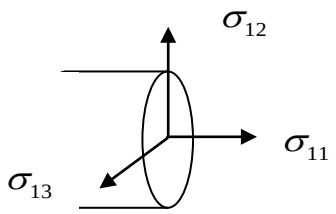


Figure IV.9. Section droite d'un ressort cylindrique.

On obtient, pour un ressort cylindrique, avec $I = \frac{\pi d^4}{32}$ et $J = \frac{\pi d^4}{64}$:

$$\sigma_{11\max} = (16FD\sin\alpha)(1+\frac{1}{4}\frac{d}{D}) / (\pi d^3) \qquad qui \;\; correspond \;\; à \;\; x_3 = -\frac{d}{2} \qquad \text{(IV.6)}$$

$$\tau_{\max} = (8F\cos\alpha)(1+\frac{2}{3}\frac{d}{D}) / (\pi d^3) \qquad qui \;\; correspond \;\; à \;\; x_2 = 0, \;\; à \;\; x_3 = -\frac{d}{2} \qquad \text{(IV.7)}$$

Lorsque l'angle d'enroulement est faible (α < 7.5°), la contrainte prépondérante est $\tau_{\max}$. Dans le cas du confinement hélicoïdal avec FRP, la bande est assimilée à un ressort de traction de section carrée comme le montre la figure IV.10. Pour calculer les contraintes qui se développent dans la section du renfort en FRP, on adapte les équations précédentes à une section carrée.

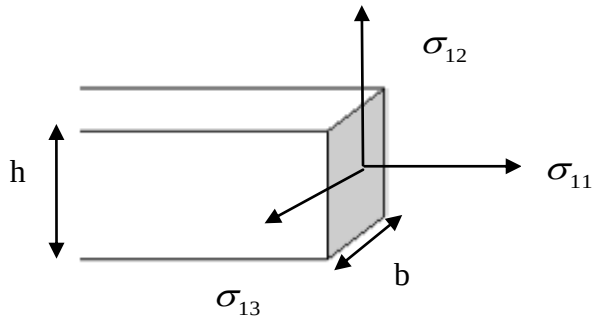


Figure IV.10. Section droite d'un ressort cubique.

La contrainte de cisaillement est alors donnée par :

$$\tau_{\max} = \frac{F\cos\alpha}{h}\left(\frac{3D}{b^2+h^2}+\frac{4}{3b}\right) \qquad \text{(IV.8)}$$

IV.3.4. Effet de la largeur de la bande et du pas de l'hélice sur la contrainte de cisaillement

La contrainte $\tau_{\max}$ est calculée pour plusieurs largeurs de la bande de FRP, pour une valeur fixe de l'effort de traction (100 N)appliqué aux extrémités de la bande.

La variation de $\tau_{\max}$ en fonction de la largeur de la bande pour une bande formant 5 spires est tracée sur la figure IV.11.

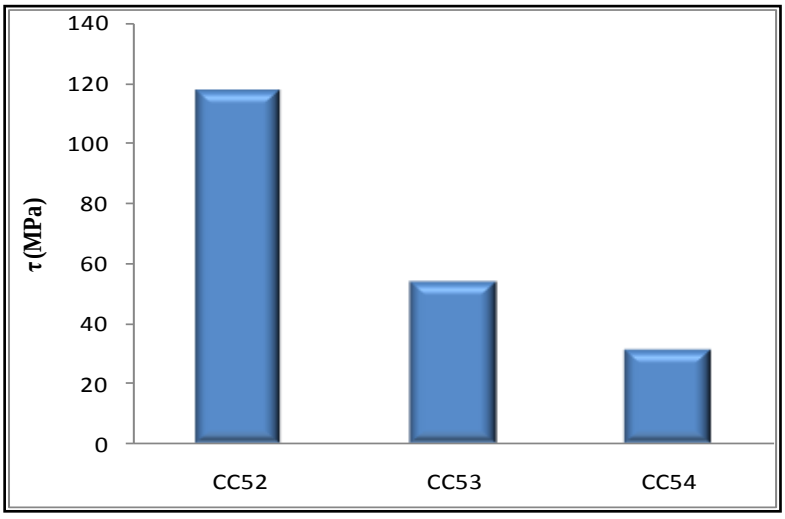


Figure IV.11. Contrainte de cisaillement dans le FRP pour différentes largeurs d'une bande formant des hélices à 5 spires.

Il ressort que la contrainte de cisaillement est inversement proportionnelle à la largeur de la bande. En effet, la contrainte est d'autant plus grande que la largeur est faible.Pour des hélices à 5 spires la contrainte décroit de 117,09 MPa à 31,13MPa pour des largeurs respectives de 2 et 4 cm.Par ailleurs, la contrainte semble être peu affectée par le pas de l'hélice, comme indiqué par la figure IV.12.

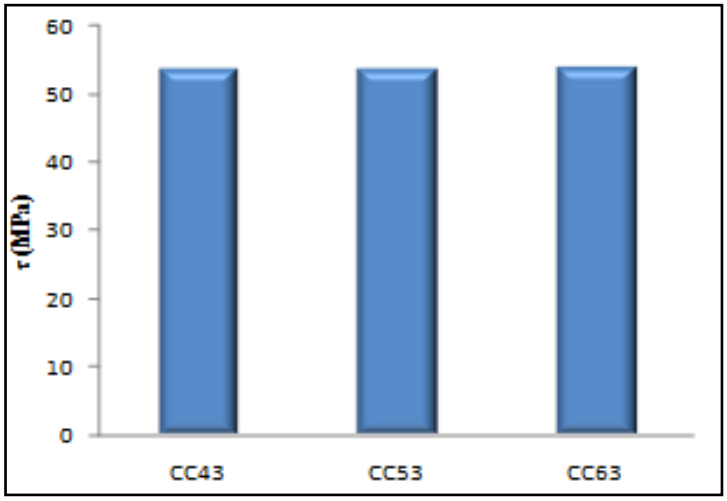


Figure IV.12. Contrainte de cisaillement dans le FRP pour différents pas d'hélice formée par une bande de 3 cm de largeur.

On obtient pour une bande de largeur 3cm, des valeurs très proches les unes des autres pour des hélices à 4 spires, 5 spires et 6 spires correspondant à des pas de 7,5 cm; 6 cm et 5cm respectivement.

IV.3.5. Estimation de la résistance à la compression au pic d'un cylindre confinéen tenant compte de l'effet de la précontrainte

La résistance à la compression au pic d'un cylindre confiné en tenant compte de l'effet de la précontrainte, peut être estimée à partir du modèle développé dans le chapitre II et donnée par la formule :

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1,35\frac{f_l}{f_{co}} + 0,79$$

La résistance maximale à la compression du béton confiné avec des bandes en FRP sous tension, est estimée en conjuguant l'effet de la pression de confinement latérale et de la

contrainte qui se développe dans la bande précontrainte. L'effet de cette contrainte est cumulé avec l'effet de la résistance à la traction de la bande (f_{frp}).
La résistance maximale à la compression du béton confiné, avec précontrainte, augmente par rapport à celle dubéton confiné sans précontrainte.

La figure IV.13, met en évidence la différence entre les résistances à la compression au pic de cylindres confinés sans et avec l'effet de la précontrainte.

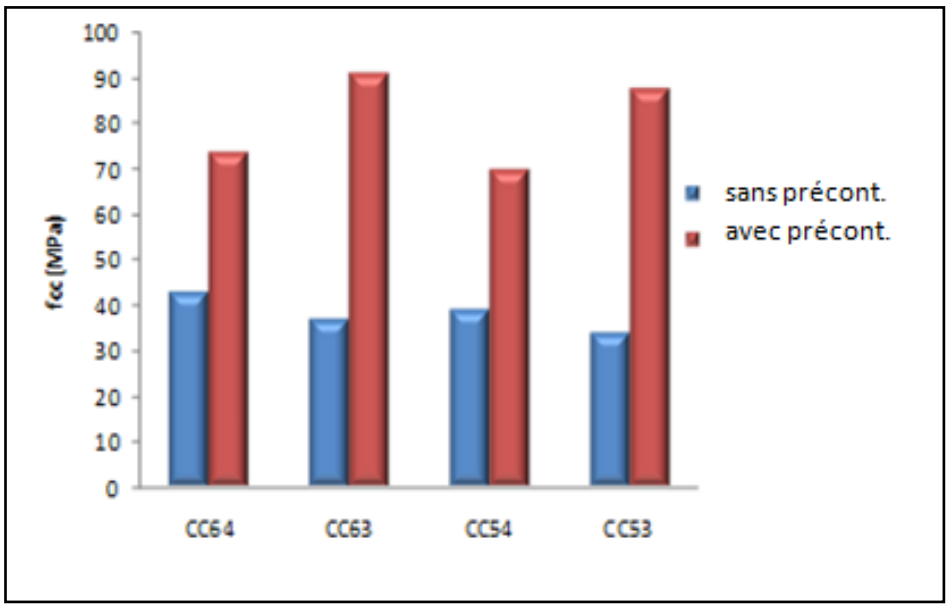


Figure IV.13. Résistance à la compression, au pic, de cylindres confinés sans et avec l'effet de la précontrainte.

Tableau IV.3. Gains en résistance pour différentes valeurs de la largeur de la bande et du pas de l'hélice.

Spécimen	f_{cc} **(MPa) sans précontrainte**	f_{cc} **(MPa) avec précontrainte**	**Gain (%)**
CC64	42,79	74	72,94
CC63	37,03	90,95	145,61
CC54	38,95	70,08	79,93
CC53	34,15	87,93	157,49

On constate que le gain en résistance atteint 157,49% pour des bandes de 3cm de largeur formant des hélices de 5spires. Les gains pour différentes configurations de confinement hélicoïdal sont représentés par la figure IV.14.

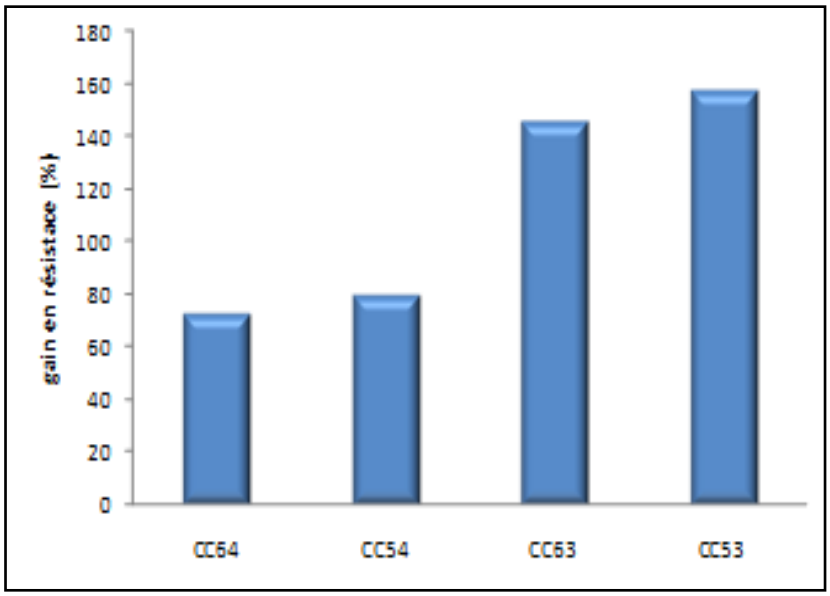


Figure IV.14.Gains en résistance pour différentes variantes de confinement.

Le gain en résistance à la compression des cylindres confinés, hélicoidalement par des bandes en GFRP, est inversement proportionnel à la largeur de la bande. Tandis que le pas de l'hélice semble ne pas affecter ce gain en résistance.

IV.4. Conclusion

L'optimisation mathématique, à l'aide des algorithmes génétiques, des paramètres de confinement hélicoïdal avec des bandes en FRP, a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres considérés dans cette étude dans l'évolution des résistances ultimes des cylindres en béton confinés.

L'optimisation de la fonction qui décrit la résistance du cylindre confiné est conduite dans le but de trouver la meilleure combinaison de variables qui donnerait une valeur cible du gain en résistance. Cette optimisation est réalisée sous contraintes, puisqu'on fixe la valeur du gain souhaité. La résistance à la compression des cylindres confinés est donnée par une fonction de plusieurs variables.

Ces variables représentent les paramètres de confinement qui sont la largeur de la bande du FRP, le pas de l'hélice que forme la bande composite en FRP autour du cylindre, la résistance du béton non confiné et la résistance à la traction du FRP. Ces paramètres sont introduits dans l'algorithme génétique sous forme de vecteurs de données.

Les solutions optimales données par l'algorithme génétique ont été analysées à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales dans le but de dégager la meilleure solution au problème d'optimisation de la fonction de la résistance à la compression du béton confiné avec des bandes en GFRP. Cette analyse a été complétée par une Classification Hiérarchique Ascendante afin de classer ces solutions selon leurs similitudes.

Par ailleurs, une approche théorique est proposée afin de mettre en évidence l'effet de la précontrainte, à laquelle la bande en FRP est supposée être soumise, sur la résistance à la compression maximale du béton confiné. Les bandes sont supposées être collées tout en étant maintenues sous tension grâce à un système d'ancrage approprié.

Ce procédé permet d'assurer une certaine continuité du système de renforcement entre le FRP et le support béton. Il permet également de tenir compte de l'effet de l'enroulement,sous précontrainte, de la bande composite en FRP sur la qualité de ce renforcement, en matière de résistance au pic à la compression des cylindres confinés. Le comportement de la bande en FRP est assimilé à celui d'un ressort de traction. Une formulation de la contrainte de cisaillement qui se développe dans la bande est alors proposée. Elle est inversement proportionnelle à la largeur de la bande et semble être peu affectée par le pas de l'hélice.
Lorsque les bandes de GFRP sont soumises à une précontrainte, leur résistance à la compression au pic, augmente par rapport à celle des cylindres confinés sans précontrainte. Ce procédé permet, par ailleurs, un gain en résistance de l'ordre de 157,49 % pour des cylindres confinés avec des bandes de 3cm de largeur formant des hélices de 5spires (un pas de 6cm) par rapport au béton non confiné.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche représente une contribution à l'étude de la réhabilitation, par confinement avec matériaux composites, des structures endommagées en béton.

La synthèse des différentes recherches antérieures à cette étude, a montré que la majorité des travaux expérimentaux ont été conduits sur des spécimens confinés avec des enveloppes entières en matériaux composites.

Tandis que peu de chercheurs se sont intéressés au confinement partiel avec des bandes de composites en FRP. C'est à partir de ce fait que l'intérêt s'est porté sur le confinement partiel du béton avec FRP, pour tenter de voir son effet sur la ductilité et la reprise d'effort ainsi que son aptitude à remplacer le confinement total, dans le cas où l'on connait le degré d'endommagement de la structure ou simplement dans le cas où l'on vise un certain gain en résistance.

Afin de mettre en évidence les effets du confinement hélicoïdal par des bandes composites à base de fibres de verre, sur le comportement du béton, une campagne expérimentale a été menée. Des spécimens cylindriques en béton ont été confinés par des bandes hélicoïdales continues et soumis à des tests de compression axiale.

Deux paramètres ont été considérés : la largeur de la bande composite et le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre. Ces essais ont permis de tracer la variation de la contrainte en fonction de la déformation axiale selon les différentes configurations considérées.

L'analyse des résultats obtenus montre clairement l'effet de la largeur de la bande de GFRP et le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre sur la résistance à la compression des cylindres confinés. Celle-ci croit avec l'accroissement de la largeur de la bande et le décroissement du pas de l'hélice.

On obtient ainsi, des gains en résistance de 36% ,28.32% et 14,32% pour des cylindres confinés avec des bandes de 3cm de largeur formant des hélices de 5 spires, 4spires et 3 spires respectivement.

Par ailleurs, on note des gains en résistance de 39,12% et de 28 ,32% pour des cylindres confinés avec des hélices de 4 spires de largeurs 4cm et 3cm respectivement.

Toutefois, l'allure que prennent les courbes contrainte-déformation semble identique pour tous les cas de confinement réalisés. Par ailleurs, le béton confiné gagne aussi en ductilité puisqu'on obtient un gain, en déformation axiale, de l'ordre de 71,43 % pour un cylindre confiné avec des bandes de GFRP de 4 cm formant des hélices de 4 spires

Ces résultats expérimentaux sont en parfaite concordance avec les résultats de la simulation numérique, puisqu'on obtient dans le cas du cylindre confiné avec des bandes de 3cm de large formant des hélices de 4 spires (pas de 7,5cm) un écart de l'ordre de 1,5%.

Basé sur la régression linéaire des résultats expérimentaux, un modèle de résistance au pic a été établi. Ce modèle calcule la résistance maximale en compression du béton confiné en fonction de la pression de confinement latérale.

Une simulation numérique du comportement des cylindres confinés est réalisée au moyen d'un code de calcul par éléments finis. La visualisation des cartographies d'évolution des contraintes et des déplacements montre clairement que lorsque le cylindre en béton est soumis à une compression uni-axiale, il connait des concentrations de champs de contraintes dans la région centrale engendrant par la suite l'ouverture des fissures , qui conduira à la rupture de l'élément, tandis que dans le cas du cylindre confiné, l'évolution des contraintes est lente et gênée, grâce à la mobilisation de la pression latérale de confinement exercée par la bande composite.

L'optimisation mathématique, à base d'algorithmes génétiques, de la fonction qui décrit la résistance du cylindre confiné est conduite dans le but de trouver la meilleure combinaison de variables qui donnerait une valeur cible du gain en résistance du cylindre confiné.

Les variables considérées représentent les paramètres de confinement qui sont la largeur de la bande du FRP, le pas de l'hélice que forme la bande composite en FRP autour du cylindre, la résistance à la traction du FRP et la résistance à la compression du béton non confiné.

A titre indicatif, pour un gain de 100% en résistance par exemple, il serait indiqué de confiner un cylindre ayant une résistance à la compression de 34 MPa avec des bandes de FRP de largeur de 31mm formant des hélices de 75mm de pas et ayant une résistance à la traction de 883,5 MPa.

Par ailleurs, l'enroulement de la bande de FRP autour du cylindre demeure un paramètre prépondérant quant à l'optimisation de cette technique de réhabilitation.

Pour mettre en évidence l'influence de la pression exercée par l'enroulement des bandes composites sur la résistance, au pic, à la compression des cylindres confinés, on a supposé que les bandes étaient précontraintes lors de leur pose autour du cylindre.

L'étude théorique a révélé une nette amélioration de la résistance à la compression du béton confiné et ce, en tenant compte de la contrainte de confinement additionnelle qui se développe dans la bande composite. Lorsque celle-ci est précontrainte au moment de sa pose sur le béton à confiner, le paramètre le plus prépondérant dans la contrainte développée est la largeur de la bande.

En effet, l'étude a montré que le gain en résistance est inversement proportionnel à ce paramètre (largeur de la bande) mais reste peu affecté par le pas de l'hélice. Nous avons enregistré, à titre indicatif, un gain en résistance à la compression de 157,49 % pour un cylindre confiné avec des bandes de GFRP de 3cm de largeur formant des hélices de 5 spires (pas de 6cm) par rapport au béton non confiné.

Enfin, malgré la bonne concordance entre les résultats expérimentaux et théoriques, des études complémentaires sont plus que nécessaires pour mettre en évidence tout l'intérêt de cette recherche.

Perspectives :

Afin de mieux comprendre le comportement du béton confiné avec des bandes hélicoïdales continues en FRP et soumis à la compression uni-axiale, il serait intéressant dans les recherches futures de :

- ✓ Conduire des essais sur des colonnes ainsi confinées à l'échelle réelle ;
- ✓ utiliser un autre FRP à base de fibre de carbone ;
- ✓ conforter les résultats de l'optimisation mathématique par des essais en confinant des cylindres présentant différents taux d'endommagement ;
- ✓ conduire des essais avec des nombres de plis différents de la bande de FRP ;
- ✓ tenir compte de la variation de la résistance du béton non confiné, en menant une campagne d'essais sur des spécimens confinés présentant différentes classes de résistance initiale ;
- ✓ tenir compte de l'orientation des fibres ;

- ✓ confirmer, par des essais, les résultats de l'approche théorique qui met en évidence l'effet de la précontrainte dans la bande.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ABAQUS, Theory Manual, version 6.10 et 6.12 , **K**arlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ;2010.

ACI COMMITTEE 440.2R-08, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2008).

Adam et Neville, M., « propriétés des bétons ». Editions Eyrolls, Paris, 2000.

Al-Rousan R., Haddad R. "*NLFEA sulfate-damage reinforced concrete beams strengthened with FRP composites";* Composite Structures 96 (2013) 433–445

Bardonnet, P. (1992) "Résines époxys", *Technique de l'ingénieur*, Traité Plastiques et Composites, A 3 465, A 3 466.

Berreur, L., De Maillard, B., et Nösperger, S. (2002) "L'industrie française des matériaux composites", Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP /SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.

Berthand, Y., Mesure de l'endommagement du béton par une méthode ultra sonore. Thèse de Génie civil : Université de Paris 6 , 175 p. (1988).

Berthet, J.F., Ferrier E. et Hamelin P. (2005) "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A: Experimental study", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 223-232.

Berthet JF, Ferrier E, Hamelin P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets: Part B: Modeling. Constr Build Mater 2006;20(5):338–47.

Berthelot,J.M., Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures. Livre, éditions :Lavoisier, p15. (2005).

Bradfort N M, Nanni. A., "*FRP-Jacketed concrete under uniaxial compression*, Const & Building Materials, V9, N°2, 115-124,(1995)

Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research, 1,* 245-276.

Carolin,A. (2003), "Carbone fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements". Doctorate Thesis, Lulea University of technology, 178p.

Chatain,M(2001),"Matériaux composites: présentation générale", AM 5000,Technique de l'Ingénieur, traité plastiques et composites, Vol.AM 6.

Chen, W.F. et **Han,**D .J. **(1988).** Plasticity for Structural Enpineen, Springer-Verlag. New-York, 606 p.

CRC. 2002. CRC Construction innovation. "Review of strengthening techniques using extenally bonded fiber reinforced polymer composites". s.l. : Decision support tools for concrete infrastructure rehabilitation, 2002. Report 2002-005-C-01.

Cromwell J.R., Harries K.A. and Shahrooz B.M., "Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures", Construction and Building Materials 25(5), pp. 2528-2539, (2011).

De Luca, A. and Nanni, A., Single-Parameter Methodology for the Prediction of the Stress-Strain Behavior of FRP-Confined RC Square Columns, Journal of Composites for Construction, 15(3), 2011, p. 392.

Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1981) "Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic", *ACI Material Journal Proceedings*, Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.

Fardis, M.N. et Khalili, H.H. (1982) "FRP-encased concrete as a structural material", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202.

Foo,S.,Naumoski,N.,Saatcioglu,M., (2001), "Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinion d'atténuationdes risques pour les immeubles canadiens, Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile, ministère des travaux publiques et services gouvernementaux, N° ducatalogue :D82-73/2002 F-IN.

Guenounou, O. (2009).thèse de doctorat:Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé. 142 pages (p8)

Hamelin P., "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", Techniques de l'ingénieur- traité plastiques et composites, (2002).

Holland, J. (1992). Adaptation in natural and artificial and systems. 2 nd edition. IT Press

Horn, J.L.(1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. Psychometrika, 30(2), 179-185.

Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components.Journal of Educational Psychology, vol. 24, pp. 417-441.

Houhou, N. (2012). Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique. Thèse de doctorat 'Structures et Matériaux' de l'Université Paris-Est.

Jankowiak I., Kąkol W., Madaj A.: *Identification of a continuous composite beam numericalmodel, based on experimental tests*, 7th Conference on Composite Structures, Zielona Góra, 2005, pp. 163–178.

Jiang T, Teng JG. Analysis-oriented stress–strain models for FRP-confined concrete. Eng Struct 2007;29(11):2968–86.

Jones T., Forrest S., "Fitness Distance Correlation as a Mesure of Problem Difficulty for Genetic Algorithms". Proceeding of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, p. 184-192, 1995.

Jong, K. D. (1980), 'Adaptive systeme design : A genetic approach', IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 10(3), 556–574.

Kachanov,L.,M., O vremeni razrušenija v usloviach polzućesti, Izv. Ak. Nauk CCCP, Otd. Techn. Nauk, nr 8,1958 ;26-31. 5

Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, *20*, 141-151.

Karabinis AI, Rousakis TC. Concrete confined by FRP material: a plasticity approach. Eng Struct 2002;24(7):923–32.

Karbhari VM, Gao Y. Composite jacketed concrete under uniaxial compression verification of simple design equations. J Mater Civ Eng 1997;9(4):185–93.

Kmiecik P., Kamiński M., "Modeling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. Archives of civil and mechanical engineering, vol.XI, n° 03, (2011), 14p.

Kupfer H., Hilsdorf H.,K., Rusch H., Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal, 65, 8(1979),656-666.

Lam, L. et Teng, J.G. (2002) "Strength models for FRP-confined concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 5, pp. 612-623

Lam, L. et Teng, J.G. (2003a) "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.

Lee, J and Fenves, G.L., ''Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures''. Journal of Engineering Mechanics, Vol 124, n° 8, pp. 892-900, (1998).

Lemaitre J., Chaboche J. L. . *« Mécanique des matériaux solides »* Paris, Ed: Dunod, 2001, 544p.

Lerman, I. & Ngouenet, F. (1995), Algorithmes génétiques séquentiels et parallèles pour une représentation affine des proximités, Rapport de Recherche de l'INRIA Rennes - Projet REPCO 2570, INRIA.

Lorrain,M. « Contribution à l'étude micromécanique des matériaux granulaires cohérents – application au béton ». Thèse de Doctorat Sciences, Toulouse, (1974).

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E. ''A Plastic-damage model for concrete''. International Journal of Solids and Structures, vol 25, pp. 299-329, (1989).

Mander, J. B., Priestley, M.J.N. et Park, R. (1988) "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.

Martinelli E. et al *« A 1D finite element model for the flexural behaviour of RC beams strengthened with MF-FRP strips »* Composite Structures 107 (2014) 190–204.

Matthys S, Toutanji H, Taerwe L. Stress–strain behavior of large-scale circular columns confined with FRP composites. J Struct Eng 2006;132(1):123–33.

Mazars,J., «Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire à la rupture du béton de structure ».Thèse d'Etat, Paris : Université Paris VI,(1984).

Mazzucco G., Salomoni V.A. , Majorana C.E., Pellegrino C., Ceccato C. Numerical investigation of concrete columns with external FRP jackets subjected to axial loads. Construction and Building Materials 111 (2016) 590–599.

Michalewicz, Z. (1992), Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag.

Mirmiran, A. et Shahawy,M., « dilatation characteristics of confined concrete », Journal of mechanics of cohesive frictional materials 2 (1997) p 237-249.

Mirmiran, A. et Shahawy, M. (1997) "Behavior of concrete columns confined by fiber composites", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No.5, pp. 583-590.

Mirmiran, A., Shahawy, M. Samaan, M. et El Echary, H. (1998) "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.

Monti, G. (2003) "Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP", *Technical report*, Teheran, 22 July 2003, 29 p.

Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T. et Kobayashi, A. (1999) "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet", *Transactions of the Japan Concrete Institute*,

Vol. 21, pp.143-150.

Nakatsuka T, Komure K, Tagaki K. Stress–strain characteristics of confined concrete with carbon fiber sheet. Concr Res Technol 1998;9(2):65–78. [in Japanese].

Nanni, A. et Norris, M.S. (1995) "«FRP» jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression", *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 5, pp.273-281.

Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. et Higashibata, Y. (1997) "Bond properties of CFRP plate joint", *Non-Metallic («FRP») Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium*, Sapporo, Japan, pp. 241-248.

Pantelides, C., Duffin, J., et Cercone, L. (2002) "Phase II: seismic rehabilitation of concrete bridges - verification using in-situ tests at south temple bridge on I-15", *Construction Report*,Utah Department of Transportation-Research Division, Civil & Environmental Engineering Department, University of Utah, Salt Lake City, Utah, Report N°. UT-02.14, December 2002.

Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh and Dublin Phylosophical Magazine and Journal of Science, vol. 6, pp. 559-572.

Pham, T. M. and Hadi, M. N. S., Predicting Stress and Strain of FRP Confined Rectangular/Square Columns Using Artificial Neural Networks, Journal of Composites for Construction 2014a, 18(6).

Pham, T. M. and Hadi, M. N. S., Stress Prediction Model for FRP Confined Rectangular Concrete Columns with Rounded Corners, Journal of Composites for Construction 2014b, 18(1).

Quiertant M., "Matériaux organiques spécifiques pour la construction", Yves Mouton (Ed.), Chapitre 23, pp. 503–525, ISTE, Londres (2011).

Rabotnov Y.N., Creep problems in structural members, North-Holland, Amsterdam 1969.

Rizkalla, S., Hassan, T. et Hassan, N. (2003) "Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures", *Concrete Construction, Proceedingsof Structural Engineering Materials*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 16-28.

Saadatmanesh H, Ehasni M.R, et Jin, L. (1996) "Seismic strengthening of circular bridge pier model with fiber composite", *ACI Structural Journal,* Vol. 93, No. 6, pp. 639-647.

Saadatmanesh H, Ehasni MR, et Li, MW. (1994) "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp.434-447

Saadatmanesh, H. et Ehsani, M.R., Editors, Tucson, Arizona, US-A., pp. 903-916.

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

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

Spearman, C. (1904). General intelligence objectively determined and measured. American Journal of Psychology, vol. 15, pp. 201-293.

Spoelstra. M and Monti. G "*FRP-Confined concrete model*", Journal of composite construction, ASCE, 3(3): 143-150,(1999)

Stevens, J. (1992). *Applied multivariate statistics for the social sciences*. Hillsdale : Lawrence Erlbraum Associates, Publishers.

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.

Teng, J. G., Jiang, T., Lam, L., and Luo, Y. Z., Refinement of a Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete, Journal of Composites for Construction, 13(4), 2009,p. 269.

Thong M. Pham, Le V. Doan, Muhammad N.S. Hadi. Strengthening square reinforced concrete columns by circularisation and FRP confinement. Construction and Building Materials. Volume 49, December 2013, Pages 490–499.

Thong M. Pham et al. Effect of Different FRP Wrapping Arrangements on the Confinement Mechanism. Procedia Engineering 142 (2016) 306 – 312.

Thurstone, L. L. (1947). Multiple factor analysis. Chicago : University of chicago Press.

Toutanji HA. Stress–strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. ACI Mater J 1999;96(3):397–404.

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.

Ward, J.H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function, Journal of the American Statistical Association, 58, 236–244

Wright A., *Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization*, pp. 205–218. Morgan Kaufmann : San Mateo, CA, 1991.

Wu. G, Lu¨. Z.T , Wu. Z.S.(2005).Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites. Construction and building Materials, Volume 20,p134-148

Wu, Y. F. and Zhou, Y. W., Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP, Journal of Composites for Construction, 14(2), 2010, p. 175–84.

Xiao, Y., Martin, G.R., Yin, Z., Ma, R., (1996) "Seismic retrofit existing reinforced concrete bridge columns using a prefabricated composite wrapping system", *Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure*, ICCI'96,

Xiao, Y. et Ma, R. (1997) "Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricate composite jacketing", *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, Vol. 123, No. 10, p. 1357-1364.

Xiao Y, Wu H. Concrete stub columns confined by various types of FRP jackets. In: Teng JG, editor. Proceedings of the international conference on FRP composites in Civil Engineering, Hong Kong, China; 2001. p. 293–300

Xiao, Y. et Wu, H. (2003) "Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 13, pp. 1187-1201.

Yazici V, Hadi MNS. Normalized confinement stiffness approach for modeling FRP-confined concrete. J Compos Constr 2012;16(5):520–8.

Young Q., Qin Q. , Zheng D.analytical and numerical investigation of interfacialstress of FRP-concrete hybrid structure. Composite structure, 57(2002) 221-226.

Zain Saeed H,Qaiseruz Zaman Khan ,Hammad Anis Khan ,Rashid Farooq. Experimental investigation of stress–strain behavior of CFRP confined Low Strength Concrete (LSC) cylinders. Construction and Building Materials**.** Volume 104, February 2016, Pages 208–215.

RESUME

Une nouvelle technique de confinement des cylindres en béton confinés avec des bandes composites hélicoïdales continues 'GFRP', est proposée dans cette étude. Les gains en résistance à la compression et en ductilité ont été quantifiés et analysés, expérimentalement et théoriquement, en fonction de la largeur de la bande en 'GFRP' et du pas de l'hélice qu'elle forme en circonférence du cylindre en béton.
Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration, à la fois, de la résistance à la compression et de la ductilité des éprouvettes testées. La résistance à la compression du béton est proportionnelle à la largeur de la bande et inversement proportionnelle au pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre.
L'estimation de la résistance pour une quelconque combinaison des paramètres de confinement est obtenue à partir d'un modèle analytique basé sur la régression linéaire des résultats expérimentaux.
Par ailleurs, une simulation numérique à base des éléments finis du comportement global des cylindres en béton confinés par 'GFRP' est également réalisée. Les résultats de cette analyse mettent en évidence l'influence de la variabilité des paramètres considérés sur la résistance au pic et sur les modes de rupture des cylindres considérés.
Une optimisation mathématique à base de l'algorithme génétique, réalisée sous contraintes est conduite dans le but de sélectionner la meilleure combinaison possible des variables de confinement considérées, à savoir : la largeur de la bande du 'GFRP', le pas de l'hélice que forme la bande composite en 'GFRP' autour du cylindre, la résistance du béton non confiné et la résistance à la traction du 'GFRP'. L'intérêt est de trouver la bonne combinaison de paramètres qui permettrait la réhabilitation de l'élément en connaissant son degré d'endommagement, ce qui présente un intérêt économique certain.
Enfin, une étude théorique sur l'effet d'une force de traction appliquée aux extrémités de la bande en 'GFRP' est également présentée. Elle vise à mettre en évidence l'effet de l'enroulement de la bande composite soumise à une tension lors du tirage autour du cylindre en béton, provoquant ainsi une contrainte de confinement additionnelle.
Mots clés : Cylindres en béton - confinement hélicoïdal - compression - bandes continues en 'GFRP'- réhabilitation – optimisation.

ABSTRACT

A new technique of confinement of concrete cylinders by continuous helical composite strips 'GFRP', is proposed in this study. The gains in compression strength and ductility were quantified and analyzed, experimentally and theoretically, in terms of width of the strip 'GFRP' and the pitch of the helix it forms in circumference of the concrete cylinder.
The experimental results showed an improvement, both of the compressive strength and ductility of tested specimens. The compressive strength of concrete is proportional to the width of the strip and inversely proportional to the pitch of the helix it forms around the cylinder..
The resistance estimation of to any one combination of confining parameters is obtained from an analytical model based on the linear regression of the experimental results.
Moreover, a numerical simulation, based on the finite elements, of the behavior of the confined concrete cylinders is also performed. The results analysis highlights the influence of the variability of the parameters on the ultimate strength and the modes of rupture of the considered cylinders.
A mathematical optimization based on genetic algorithm, performed under constraints is conducted in order to select the best combination of the considered variables of confinement, as the belt width of the 'GFRP', the pitch of the helix that form the composite band 'GFRP' around the cylinder, the strength of unconfined concrete and tensile strength of 'GFRP'. The interest is to find the right combination of settings that allow the rehabilitation of the element by knowing the amount of damage, which has some economic interest.
Finally, the effect of a tensile force applied to the ends of the band 'GFRP for improving the compressive strength of confined concrete cylinders is also presented. It aims to highlight the effect of winding the prestressed composite strip by pulling the composite strip around the concrete cylinder, causing an additional confining stress.
Keywords: Concrete cylinder – helical confinement – compression – continuous strips of 'GFRP' – rehabilitation – optimization.