

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de master académique

*En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en
Génie civil*

Option : structures

Présenté par :

M^{lle} OUSSAD Fetta

Thème :

Etude expérimentale de l'effet de confinement ; par des
matériaux composites sur des cylindres endommagés en
béton.

Devant le jury composé de :

M^{me}. KHELLOUI. F
M^{me} ALI AHMED. C
M^{me} AKMOUSSI. O

Maître de conférences A
Maître de conférences B
Maître de conférences B

U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou

Présidente
Encadreur
Examinatrice

Soutenu le 08/07/2017

Remerciements

Tout d'abord je remercie dieu tout puissant qui m'a donné le courage et la volonté durant tout mon cursus du primaire jusqu'à l'université et, pour en fin réaliser ce modeste travail.

La première personne que je veux remercier est ma promotrice M^{me} Ali AHMED Chafika pour son soutien continu et ses conseils qui m'ont permis d'avancer dans mes travaux, et pour sa disponibilité et le suivi de ce mémoire de Master durant toute l'année.

Je remercie également Monsieur SI SALEM Abdelmadjid pour son aide et ses encouragements le long de ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury : Mme KHELLOUI et Mme AKMOUSSI pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de lire et de juger ce mémoire.

Je voudrai aussi remercier Monsieur MAMOU, Monsieur BOUHRAOUA Rachid et Madame MADJBER, pour leur aide et leurs conseils durant toute la période des essais au laboratoire.

J'adresse mes vifs remerciements à ma collègue IGUENI Célia avec la quelle je me suis bien entendue, une excellente collègue qui m'a accompagnée durant toute la période des travaux au laboratoire.

La réalisation des essais du programme expérimental, a été simplifiée grâce à la participation et l'aide de mes amis, particulièrement HADDAD Abdelhak, DJAFOUR Tarik et BETROUNI Hakim que je remercie infiniment.

Mes sincères remerciements sont adressés envers mes parents ; c'est grâce à leurs sacrifices tout au long de mes études que j'ai pu arriver là. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à toute ma famille qui a toujours été présente à mes cotés, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Merci à tous



. Dédicace

Je dédie le présent travail à tous ceux qui me sont chers,

A mes respectueux parents qu'aucune dédicace ne saura exprimer mon amour, mon respect, et mes remerciements, je vous dédie cet humble travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous m'avez toujours su combler.

Puisse dieu vous garder et vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A tous les membres de ma famille, ma sœur Dahbia, et mes frères Ali et Djamel pour leurs encouragements et leur soutien le long de ma formation.

Sans oublier tous mes amis et mes camarades.

Fetta,



Résumé :

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur l'efficacité du confinement par bandes en PRFV des cylindres en béton endommagés à différents degrés de leur charge de rupture, le PRF est caractérisé par une légèreté du tissu, des propriétés mécaniques élevées et un faible coût par rapport à d'autres matériaux. Le tissu imprégné de résine époxy a été découpé et appliqué sur les éprouvettes sous formes de bandes hélicoïdales au tour des cylindres.

Les gains de résistance à la compression du béton confiné avec ces matériaux composite (PRF) ont été évalués et analysés en fonction de la résistance en compression du béton non confiné et du degré d'endommagement initial du béton. Pour cela les éprouvettes confinées par collage externe du tissu bidirectionnel en fibres de verre, ont été sollicitées en compression uniaxiale dans le but de confirmer la possibilité de la réparation et du renforcement du béton par ce type de confinement quel que soit son endommagement initial.

Les résultats de l'essai de compression obtenus après confinement ont montré l'effet bénéfique de ces enveloppes sur le comportement en compression uniaxiale du béton pour l'ensemble des spécimens testés. Un gain en résistance été enregistré même pour les cylindres totalement endommagés.

Le traitement statique des résultats sous le logiciel R a permis de confirmer l'effet du degré d'endommagement initial du béton sur la résistance en compression et ce par l'analyse de la variance (ANOVA). D'autre part, la régression linéaire faite par le même logiciel a permis d'établir une relation linéaire entre le degré d'endommagement et la résistance du béton confiné, qui va permettre d'estimer la résistance en compression uniaxiale pour un béton confiné par ces même enveloppe en PRFV en connaissant son degré d'endommagement initial.

Abstract:

The study presented in this paper focuses on the effectiveness of FRP envelope confinement of concrete cylinders damaged to different degrees, the PRF is characterized by lightweight fabric, high mechanical properties and low cost compared to other materials. The epoxy resin impregnated fabric was cut and applied to the test specimens in the form of helical strips around the cylinders.

The compressive strength gains of the concrete confined with these composite materials were evaluated and analyzed for the compressive strength of the unconfined concrete and the degree of initial damage of the concrete. In this case, the specimens confined by external bonding of the bidirectional glass fiber fabric have been stressed in uniaxial compression in order to confirm the possibility of the repair and reinforcement of the concrete by this type of confinement whatever its initial damage.

The results of the compression test obtained after confinement showed the beneficial effect of these envelopes on the uniaxial compression behavior of the concrete for all the specimens tested. , The percentage increase in resistance was considerable even for totally damaged cylinders.

The static processing of the results under the software R a confirms the effect of the initial degree of damage of the concrete on the compressive strength and this by the analysis of the variance (ANOVA), on the other hand the linear regression Made by the same software a allows to establish a linear relationship between the degree of damage and the strength of the confined concrete which will allow by the following to estimate the resistance in uniaxial compression for a concrete confined by these same envelope in PRFV in Knowing its degree of initial damage.

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Sommaire.....	v
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux.....	xi
Liste des symboles.....	xii

Introduction Générale.....	2
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le confinement du béton

I.1. Introduction.....	7
I.2. Différentes solutions techniques de réparations et de renforcement des ouvrages béton	8
I.2.1. Réparation des désordres superficiels.....	8
I.2.2. Traitement des fissures.....	9
I.2.2.1. Injection.....	10
I.2.2.2. Par Cachetage.....	10
I.2.2.3. Par Calfeutrement.....	11
I.2.2.4. Par Pontage.....	11
I.2.2.5. Protection généralisée.....	12
I.2.2.6. Par colmatage.....	12
I.2.3. Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles.....	12
I.2.4. Renforcement des structures par précontraintes additionnelles.....	13
I.2.5. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement.....	14
I.2.6. Béton projeté.....	14
I.2.7. Chemisage.....	15
I.2.7.1. Chemisage en béton armé.....	15
I.2.7.2. Chemisage en acier.....	16
I.2.8. Réparation et renforcement des éléments structuraux au moyen de matériaux composites.....	16
I.2.8.1. Renforcement des poteaux.....	17
I.2.8.2. Renforcement des poutres.....	18
I.2.8.3. Renforcement des murs.....	19
I.2.8.4. Renforcement des dalles.....	19
I.2.9. Les différentes méthodes de confinement par composites.....	20
I.2.9.1. La stratification directe.....	21

I.2.9.2. Enroulement filamenteux.....	21
I.2.9.3. Chemisage par coquille préfabriquées.....	22
I.3. Travaux portants sur le confinement du béton.....	22
I.4. Conclusion du chapitre.....	26

Chapitre II : Les matériaux composites

II .1. Introduction.....	29
II.2. Définition.....	29
II.2.1. Les avantages des matériaux composites.....	30
II.3. Polymère renforcé de fibres (PRF).....	31
II.3.1. Le polymère.....	32
II.3.2. La matrice.....	34
II.3.1.1. Les matrices organiques.....	35
II.3.1.1.1. Résines thermodurcissables.....	35
II.3.1.1.2. Résines thermostables.....	37
II.3.1.1.3. Résines thermoplastiques.....	37
II.3.1.2. Les matrices minérales.....	38
II.3.1.2.1. Matrices céramiques.....	38
II.3.1.2.2. Matrices métalliques.....	38
II.3.2. Les charges et additifs.....	38
II.3.2.1. Les charges.....	38
II.3.2.1.1 Les charges renforçantes.....	39
II.3.2.1.2. Les charges non renforçantes.....	39
II.3.2.2. Les additifs.....	39
II.3.3. Le renfort.....	40
II.3.3.1. Architecture des renforts.....	40
II.3.3.1.1. Forme linéiques.....	41
II.3.3.1.2. Formes surfaciques.....	41
II.3.3.2. Les fibres.....	42
II.3.3.2.1. Fibres de carbone.....	42
II.3.3.2.2. Fibres d'aramides.....	42
II.3.3.2.3. Fibres céramiques.....	43
II.3.3.2.4. Fibres végétales.....	43
II.3.3.2.5. Fibres de verre.....	43
II.4. Comportement en compression du béton.....	53
II.4.1. Béton non confiné.....	53
II.4.2. Béton confiné par PRF.....	54
II.5. Conclusion du chapitre.....	55

Chapitre III : Programme expérimental

III.1. Introduction.....	57
III.2. Programme expérimental.....	57
III.3. Matériaux utilisés.....	57
III.3.1. Le béton.....	58
III.3.1.1. Malaxage et mise en œuvre du béton.....	59
III.3.1.2. Fabrication des éprouvettes.....	60
III.3.1.2.1.. Préparation des moules.....	60
III.3.1.2.2. Remplissage des moules.....	61
III.3.1.2.3. Démoulage et conservation des éprouvettes.....	63
III.3.1.2.4. Surfaçage des éprouvettes avant écrasement.....	64
III.3.2. Polymère renforcé avec des fibres de verre (PRFV).....	65
III.3.2.1. Tissu en fibres de verre.....	65
III.3.2.2. Résine.....	66
III.4. Caractérisation des matériaux.....	67
III.4.1. Essai de compression uniaxiale sur le béton.....	67
III.4.2. Essai de traction sur le PRFV.....	68
III.4.3. Essai d'auscultation dynamique.....	69
III.5. Confinement externe avec le tissu en verre.....	71
III.5.1. Description des spécimens.....	71
III.5.2. Préparation des bandes de tissu de verre.....	73
III.5.3. Préparation de la résine.....	73
III.5.4. Collage du composite sur les surfaces latérales des cylindres.....	75
III.5.5. Ecrasement des cylindres après confinement.....	75
III.5. Conclusion du chapitre.....	77

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Résultats expérimentaux de l'essai à ultrason.....	79
IV.3. Variable d'endommagement D.....	82
IV.4. Résultats de l'essai de compression uniaxiale.....	82
IV.5. Gains en résistances après confinement.....	84
IV.6. Traitement statique des résultats expérimental.....	85
IV.6.1. Analyse de la variance (ANOVA).....	86
IV.6.2. Régression linéaire.....	86
IV.7. Mode de rupture des éprouvettes cylindriques.....	87
IV.8. Conclusion du chapitre.....	89

Conclusion générale et perspectives.....	91
---	-----------

Liste des figures

Désignation	Titre	Page
Figure. I.1.	Principales méthodes de réhabilitation de structures	7
Figure. I.2	Nettoyage d'une fissure avec une brosse métallique	9
Figure. I.3	Les différents traitements des fissures	10
Figure. I.4	Injection de fissures au pont de Châlons-en-Champagne	10
Figure. I.5	Fissures en cours de cachetage	11
Figure. I.6	Calfeutrement de fissures à l'aide d'un mortier à base de liants hydrauliques	11
Figure. I.7	Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature	12
Figure. I.8	Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure	13
Figure. I.9	Précontraintes additionnelles	13
Figure. I.10	Renforcement au moyen d'un béton projeté	15
Figure. I.11	Préparation des poteaux pour le chemisage en béton armé	15
Figure. I.12	Chemisage en acier	16
Figure. I.13	Poteaux en BA confiné par matériaux composites	17
Figure. I.14	Poutre en BA renforcées par matériaux composites	18
Figure. I.15	Réhabilitation du blanc d'El Harrach, Alger	18
Figure. I.16	Réhabilitation d'un mur en maçonnerie(Suisse)	19
Figure. I.17	Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en PRF	20
Figure. I.18	Renforcement d'une dalle de pont	20
Figure. I.19	Confinement des colonnes par stratification directe	21
Figure. I.20	Confinement par enrouement filamentaire	21
Figure. I.21	Chemisage par coquille préfabriquées	22
Figure. II.1	Composants d'un matériau composite	30
Figure. II.2	Courbes contrainte-déformation des fibres, de la résine et des PRF	31
Figure. II.3	Utilisation des PRF dans le génie civil	32

Figure. II.4	Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	33
Figure. II.5	Différentes matrices	35
Figure. II.6	Types de durcisseurs des résines Epoxydes	36
Figure. II.7	Les types de renforts	40
Figure. II.8	Mat en fibres de verre	41
Figure. II.9	Chaînes et trames d'un tissu	42
Figure. II.10	Fils coupés	47
Figure. II.11	Fibres broyées	47
Figure. II.12	Mat à fils coupés	48
Figure. II.13	Stratifil	48
Figure. II.14	Machine à tisser	49
Figure. II.15	Taffetas	50
Figure. II.16	Armure sergé	50
Figure. II.17	Exemple d'un tissu sergé 2/2 et d'un tissu sergé 3/1	51
Figure. II.18	Armure satin (Satin de 8)	51
Figure. II.19	Armure haute module	52
Figure. II.20	Armure unidirectionnel	52
Figure. II.21	Diagramme contrainte-déformation (σ - ϵ) du béton en compression	54
Figure. III.1	Différents constituants du béton	58
Figure. III.2	Malaxeur à axe vertical	59
Figure. III.3	Malaxage du béton	60
Figure. III.4	Moules métalliques de dimensions ($\varnothing 150$ mm x 300 mm)	61
Figure. III.5	Compactage et vibration des éprouvettes	62
Figure. III.6	Arasement des surfaces des éprouvettes	63
Figure. III.7	Démoulage des éprouvettes	64
Figure. III.8	Cure d'hydratation des éprouvettes en béton	65
Figure. III.9	Traitement de la surface latérale des cylindres en béton	66
Figure. III.10	Tissu en fibres de verre	67
Figure. III.11	Presse hydraulique	68
Figure. III.12	Eprouvette soumise à la compression	69

Figure.III.13	Eprouvette de PRFV	70
Figure.III.14	Résultats de l'essai de traction sur le PRFV	71
Figure.III.15	Appareil d'auscultation sonique	72
Figure.III.16	Auscultation dynamique sur une éprouvette cylindrique	72
Figure.III.17	Enregistrement des mesures de l'ultrason sur un ordinateur	73
Figure.III.18	Bandes en tissu de verre	76
Figure.III.19	Résine de couleur blanche et durcisseur de couleur marron	76
Figure.III.20	Application de la résine sur le composite	77
Figure.III.21	Collage de composite sur la face externe du cylindre	77
Figure.III.22	Cylindres confinés avec des bandes hélicoïdales de PRFV	78
Figure.III.23	Eprouvette confinée soumise à la compression uniaxiale	78
Figure. IV.1	Courbe des vitesses en fonction des pourcentages d'endommagement	83
Figure. IV.2	Endommagement uniaxiale selon Kachanov (Comby-Peyrot 2006)	84
Figure. IV.3	Histogramme montre l'évolution de la résistance en fonction du degré d'endommagement	87
Figure. IV.4	Histogramme illustre le gain de résistance par confinement	89
Figure. IV.5	Mode de rupture des éprouvettes confinées avec un PRFV	92

Liste des Tableaux

Désignation	Titre	Page
Tableau. II.1	Caractéristiques des résines thermodurcissables	27
Tableau. II.2	Caractéristiques des résines Epoxydes	29
Tableau. II.3	Caractéristiques des résines thermoplastiques	30
Tableau. II.4	Composition chimiques des différents types de verre	41
Tableau. II.5	Caractéristiques des verres	42
Tableau. III.1	Composition du béton selon la formulation de DREUX GORISSE	59
Tableau. III.2	Caractéristiques élastiques du tissu composite	67
Tableau. III.3	Duré de vie de la résine en fonction de la température	68
Tableau. III.4	Résultats du test de compression sur le béton	70
Tableau. III.5	Description des spécimens	75
Tableau. IV.1	Vitesse de propagation des ondes à travers les cylindres en béton non endommagé	82
Tableau. IV.2	Vitesse de propagation des ondes à travers les cylindres en béton pour différents degrés d'endommagements	82
Tableau. IV.3	Variable d'endommagement D des éprouvettes cylindriques	85
Tableau. IV.4	Résultats des essais de compression uniaxiale	86
Tableau. IV.5	Effet de confinement sur les cylindres endommagés	87
Tableau. IV.6	Table de l'ANOVA	90
Tableau. IV.7	Résultats de la régression linéaire	91

Liste des symboles

T : Température de fléchissement sous charge

P : Masse volumique

σ_t^R : Contrainte à la rupture en traction

ε_t^R : Allongement à la rupture en traction

G : Module d'Young

σ_c^R : Résistance à la compression

ε_{ult} : Déformation ultime

f_c : Contrainte dans le béton

ε_c : Déformation axiale dans le béton

V : Vitesse longitudinale

E_d : Module d'élasticité dynamique du béton

ν : Coefficient de poisson

L : Longueur de la bande du tissu en verre

R : Rayon du cylindre (15×30) cm

s : Pas de l'hélice du composite

n : Nombre de tour de l'hélice

P : Périmètre du cylindre (15×30) cm

D : Variable d'endommagement initial du béton

S_D : Surface endommagée

S : Surface d'un élément de volume endommagé

$\acute{S}$: Surface résistante effective

E'_c : Module du béton endommagé non confiné

E_c : Module du béton non endommagé non confiné

F : Force de compression

σ : Résistance à la compression

σ_{moy} : Résistance moyenne à la compression

***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***

Le développement des technologies modernes exige que l'on utilise des matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. L'objectif étant notamment de réduire la masse des structures. Les matériaux composites sont des matériaux qui répondent aux exigences précédentes. En raison de leur faible densité, de leur grande résistance, de leur rigidité importante et de leur excellente durabilité. [16]

La production de matériaux composites augmente de plus de 6% par an en quantité et se développe rapidement dans le monde [38] [4]. Les matériaux composites, au sens le plus courant du terme, sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, de façon à ce que la fonction mécanique soit dominante. [54]

Bien que leur coût soit plus élevé que celui des matériaux traditionnels; ils offrent une meilleure isolation thermique et/ou phonique et ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. [4]

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté. En effet, dès l'antiquité, ils ont été utilisés par l'homme [5]. Pour renforcer et améliorer ses premières créations (les habitations, les outils, les armes...etc.).L'homme a du combiner, par tâtonnement, les matériaux de bases primaires, créant ainsi de façon "artisanale" les premiers "matériaux composites" rudimentaires de l'histoire de l'humanité. [49]

Les premiers exemples sont : le bois et le torchis [57] (mélange de terre argileuse et de paille) qui sont des composites de la vie quotidienne. Le torchis était le matériau de construction des habitations ; les Celtes l'utilisaient principalement pour la construction des murs de leurs maisons en raison de son faible coût et de ses propriétés isolantes (inertie et accumulation thermique: chaleur en hiver et fraîcheur en été). Le torchis était composé d'une matrice plastique (la terre) et de renforts (les fibres végétales).

Le développement des matériaux composites dans les industries de pointe au cours de ces dernières décennies touche désormais des domaines de plus en plus nombreux : aéronautique, spatial, automobile, ferroviaire, construction civile, électronique, sport et loisirs, médical, etc.

En génie civil le rôle des matériaux composites dans le domaine du renforcement des structures est incontestable. De nombreux travaux de recherches et des réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments de renforcement extérieur. [47]

Le suivi et le contrôle des ouvrages peut mettre en évidence soit des erreurs de conceptions initiales, soit des erreurs de réalisation, soit des vieillissements et endommagements évolutifs qui donnent des structures incapables de répondre aux exigences voulues en terme de résistance, rigidité et ductilité [21]. L'apparition de ces problèmes ne laisse que deux solutions: la reconstruction ou la réparation.

Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation ou le renforcement, ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées. Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés en tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies, [22] comme le chemisage des poteaux, l'incorporation de profilés métalliques ou l'augmentation de la section du béton.

Dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques métalliques. Cette technique résout le problème de dégradation des structures par augmentation de la capacité portante des éléments structuraux mais elle présente de sérieux inconvénients dont la corrosion des armatures, la difficulté de maniabilité et l'impossibilité d'ancrer les plaques sur des surfaces irrégulières.

Récemment, des travaux de recherche ont été menés pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance ; le polymère renforcé de fibres (PRF). [35] L'introduction dans le domaine du génie civil de ces matériaux composites, présente en plus de leurs caractéristiques intéressantes, de nombreux avantages fonctionnels tels que:

- une légèreté du tissu.
- une mise en œuvre aisée.
- une liberté de forme.

Parmi ces composites on trouve ceux à base de tissu en fibres de carbone, de verre ou de fibres végétales (lin, chanvre, Diss, etc.....) [14]. Les composites en fibres de verre sont parmi les composites les plus utilisés, le verre obtenu à partir de sable (silice) présente des caractéristiques mécaniques très élevées ce qui explique son emploi dans plus de 95% des composites.

En Algérie les infrastructures présentent un immense réseau de route, de bâtiments, et de ponts. Plusieurs de ces infrastructures présentent des signes de détérioration importante à cause des conceptions inappropriés, vieillissement des matériaux, corrosion, et l'augmentation de la surcharge routière, notant aussi que l'Algérie est un pays sismique, ce qui met les ouvrages dans les zones de forte sismicité en risque de détérioration, d'où l'importance de la bonne construction et de la préparation de ces ouvrages contre tout risque possible, et prévoir des solutions et des techniques pour la réparations des dégâts.

Les FRPs peuvent à la fois servir au renforcement des structures saines ou endommagées et à la réparation de tous dégâts causés surtout par le séisme, ainsi le développement de ces matériaux et de leur utilisation en Algérie est plus qu'intéressant.

Se basant sur une étude de confinement du béton avec des bandes hélicoïdales de polymère renforcé de fibres de verre (Ali Ahmed, 2016), nous nous sommes posé la question de savoir si ce type de confinement était efficace sur des cylindres endommagés quel que soit leur degré d'endommagement.

Objectif du travail :

Ce mémoire présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'effet de confinement des cylindres en béton par des matériaux composites de type PRFV (polymère renforcé en fibres de verre).

L'objectif principal de ce travail est de démontrer que quelque soit le degré d'endommagement d'une colonne en béton, la réparation ou le renforcement de celle-ci peut se faire par collage externe d'un tissu (en verre) imprégné de résine époxy. L'évaluation du comportement en compression de ces cylindres confinés, permet d'étudier l'efficacité de ce confinement après l'endommagement.

Plan du travail :

Pour répondre à notre interrogation, nous avons scindé notre travail en quatre parties :
Après une introduction générale où l'on définit la problématique de notre recherche ainsi que les objectifs recherchés.

➤ Le premier chapitre expose l'étude bibliographique sur le confinement du béton avec les matériaux composites et les travaux antérieurs réalisés par des chercheurs, ainsi que les différentes techniques de renforcement et de réparation des structures et spécialement celle de l'utilisation des polymères renforcés de fibres «PRF».

➤ Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous apportons une connaissance des matériaux composites et leurs différents constituants, et particulièrement le polymère renforcé de fibres en verre. On y détaille les procédés de fabrication de verre, ses constituants, son origine, et les avantages de son utilisation. Un intérêt particulier est accordé au comportement du béton confiné par les FRPs.

➤ Le troisième chapitre sera consacré à la campagne expérimentale ; les matériaux utilisés et la confection des cylindres en béton et leur confinement, puis la procédure d'essai de compression uniaxiale y sont bien décrits.

➤ Dans le quatrième chapitre nous allons présenter les résultats obtenus à partir de l'essai, les analyser et les interpréter pour pouvoir évaluer l'effet du degré d'endommagement sur l'efficacité du confinement avec le tissu de verre.

Nous terminons enfin, par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE I :
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LE CONFINÉMENT DU BÉTON

I.1. Introduction :

Pour diminuer la vulnérabilité des structures en béton armé, notamment vis à vis des sollicitations sismiques, il est désormais courant de les renforcer à l'aide de chemisages classiques (béton ou acier) ou plus récemment de chemisages en matériaux composites. En plus d'un rapport performances mécaniques/poids très élevé les matériaux composites présentent, en effet, plusieurs caractéristiques avantageuses comme leur résistance aux environnements corrosifs, et une relative facilité de mise en œuvre. [5]

Le renforcement et la réparation d'ouvrages en béton par collage de matériaux composites consiste à associer à la structure existante, par collage structural, un matériau relativement léger ayant de plus hautes performances mécaniques que le béton [50]

Différentes méthodes de réhabilitation de structures par matériaux composites permettent de pallier les inconvénients des méthodes conventionnelles (figure. I.1), chemisage par béton armé, chemisage en acier, tôles collées, précontrainte additionnelle, etc., avec des performances mécaniques supérieures. [45]

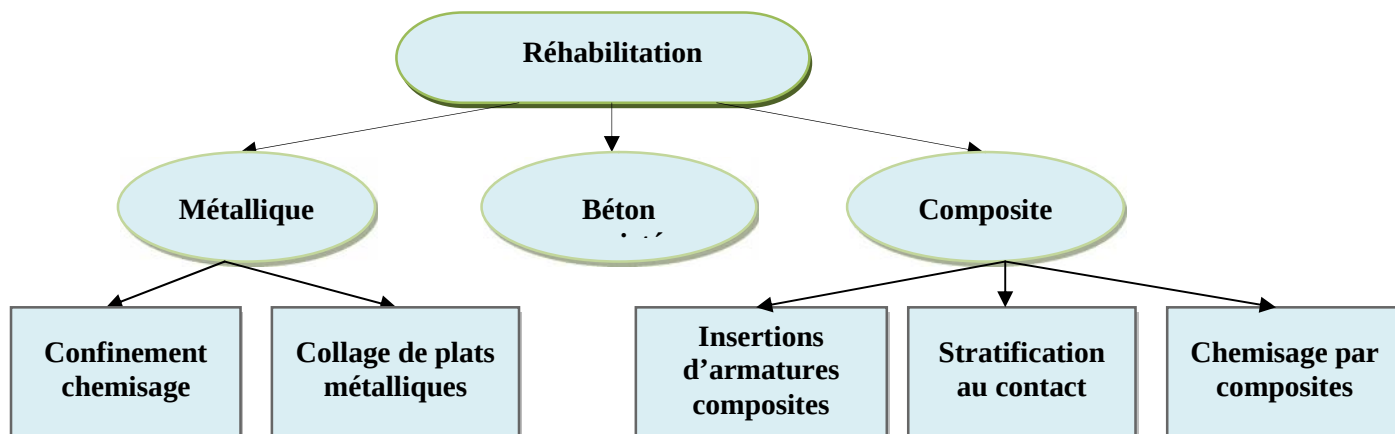


Figure I.1: Principales méthodes de réhabilitations de structure [44]

Plusieurs études ont été effectuées sur le confinement latéral des colonnes de béton avec des Polymères Renforcés de Fibres (PRF). Les fibres les plus utilisées étant celles de verre, de carbone et d'aramide. On constate que les colonnes confinées avec des PRF montrent une augmentation considérable de la résistance à la compression par rapport à celles confinées selon les méthodes de confinement conventionnelles. Lorsque le béton est soumis à une

compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton. [22] [40]

I.2. Différentes solutions techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton :

La durabilité d'un ouvrage de génie civil dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des conditions d'usage et d'exploitation. [35]. Le renforcement de ces ouvrages peut être dicté par différentes causes. A titre d'exemples, on cite, le cas d'un bâtiment qui change d'usage exigeant des charges plus élevée que celles prévues dans l'étude. Ou le cas d'un ouvrage réalisé avec des erreurs de conception dans la structure. De même pour, les structures dont la conception a été faite avec un ancien code, lequel a été actualisé avec des exigences en résistance plus sévères. Une détérioration de la structure après un séisme nécessite aussi un renforcement avant de remettre la structure en service. [34]

Plusieurs techniques de renforcement sont disponibles il convient juste de choisir la solution technique à adapter en fonction des désordres et de leurs causes après un diagnostic complet. Ces techniques permettent soit de réaliser un traitement esthétique (Réparation des désordres superficiels, protection des bétons par application de produits à la surface du parement), un renforcement structurel (Traitement des fissures, Renforcement des structures par précontrainte additionnelle) ou bien non structurel (béton projeté, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites). [35]

I.2.1. Réparation des désordres superficiels :

Dans le cas où les désordres sont superficiels et que les armatures ne sont pas corrodées, la réparation se fait par étapes. Il faut tout d'abord éliminer le béton dégradé et les traces de pollution ensuite protéger les armatures contre les risques de corrosion et reconstitué l'enrobage des armatures par un béton projeté ou u mortier. En fin un revêtement esthétique de toutes les surfaces traitées et posé.

Les produits de réparation doivent être compatibles avec le béton de la structure à réparer [35], ces produits sont soit à base de liants hydrauliques, de résines synthétiques ou bien mixtes.

I.2.2.Traitement des fissures :

Il existe plusieurs types de fissures réparties en fonction de leurs caractéristiques : ouverture (fissures fines, fissures moyennes, microfissures ...), profondeur (fissures ouvertes, fermées, mortes...), géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturée...), présence d'eau libre ou sous pression...

Avant tout traitement de fissures, il convient de les nettoyer des poussières, des mousses, et de toutes traces de laitances qui peuvent perturber la réparation (figure I.2). Cela se fait par brossage, aspiration ou lavage à l'eau, sous pression, de la surface fissurée. [35] [31]



Figure I.2 : nettoyage d'une fissure avec une brosse métallique

On distingue plusieurs techniques de réparation de ces fissures (figure I.3).

:

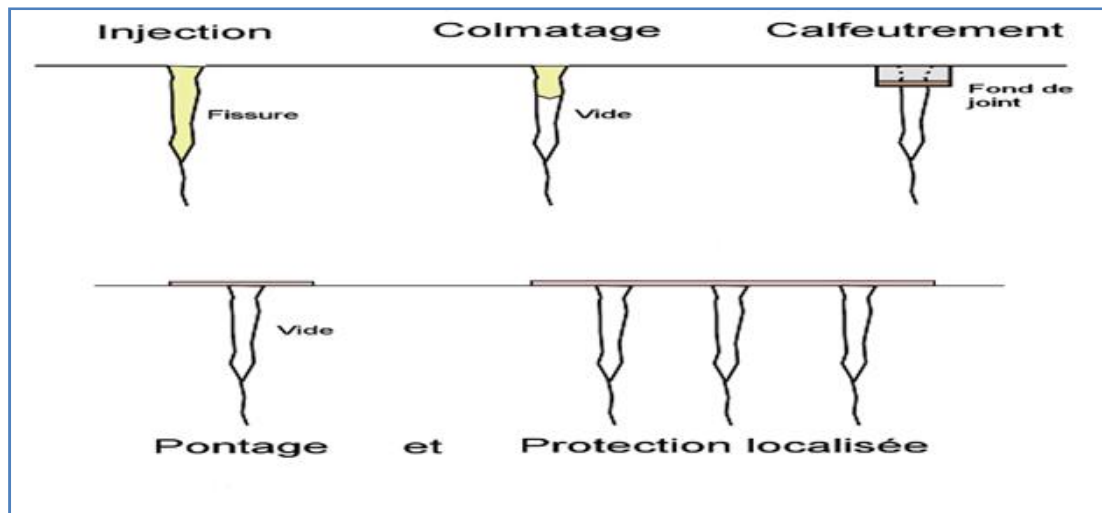


Figure I.3: les différents traitements des fissures

I.2.2.1. Injection :

Cette technique s'applique aux fissures d'ouvertures compris entre 0,1 et 0,2(mm) au moins, elle consiste à injecter dans la fissure un produit (souple ou rigide) qui va créer une continuité mécanique et une étanchéité entre les parties disjointes (figure I.4). [35]



Figure I.4: injection de fissures au pont de Châlons-en-Champagne [7]

I.2.2.2.Par Cachetage :

Le but est d'obturer provisoirement la fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté jusqu'à sa prise (figure I.5).



Figure I.5 : fissure en cours de cachetage

I.2.2.3. Par Calfeutrement :

Cette solution est destinée aux fissures très ouvertes, il faut tout d'abord élargir la fissure par meulage ou repiquage pour assurer la pénétration des produit de rebouchage (pats de ciment, résine ou mastics adéquats) puis nettoyer la fissure en abondance d'eau et injecter en suite le produit pour fermer la fissure (figure I.6) [31]



Figure I.6 : calfeutrement de fissures à l'aide d'un mortier à base de liants hydrauliques

I.2.2.4. Pontage :

Destiné à recouvrir une fissure par un revêtement, partiel ou global, imperméable ou étanche (figure I.7). Ces types de revêtement sont principalement des produits à base de résines plastiques appliquées en couches minces. [35] [31]

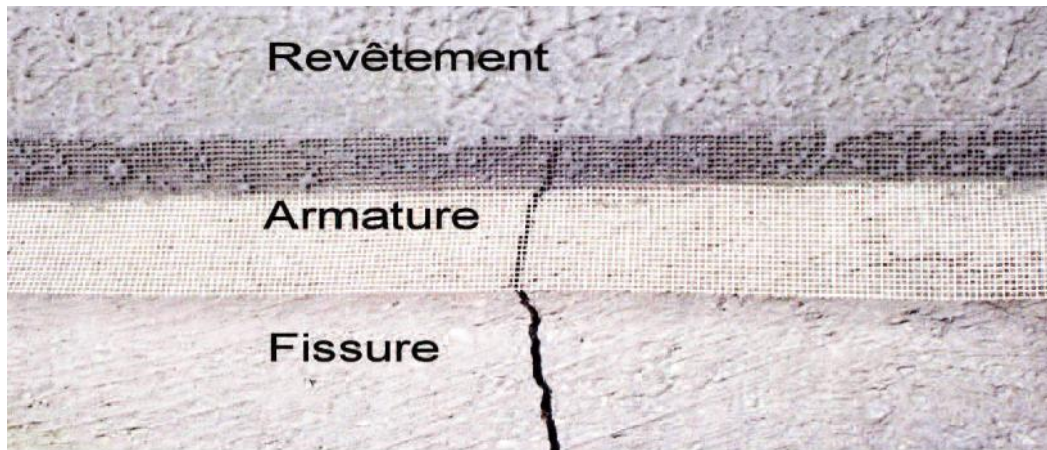


Figure I.7: Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature [7]

I.2.2.5. Par protection généralisée :

Il s'applique dans le cas où la fissure est anarchique, l'objectif est de fermer la fissure au moyen d'un revêtement appliqué pour toute la surface qui contient la fissure, [35] et qui peut remplir d'autres rôles, tels que :

- la protection contre les pénétrations (eau, gaz, agents agressifs...),
- la protection contre des actions physiques (abrasion, érosion, gel/dégel...) [7]

I.2.2.6 Par colmatage :

Il a pour but l'obturation d'une fissure, vide, interstice ou joint par un remplissage partiel au moyen d'une injection sur une certaine profondeur et sans élargissement.

I.2.3.Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles :

Le béton local est retiré dans la zone où les aciers sont corrodés. Ces derniers doivent être nécessairement soignés pour éviter la poursuite de leur dégradation. Les armatures de renfort doivent s'opposer à la fissuration (figure I.8), et la liaison s'effectue par soudure ou bien par scellement en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage requises. Un mortier est mis en place pour enrober les nouvelles armatures et reconstituer la géométrie de la structure. [35] [31]



Figure I.8: Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure. [31]

I.2.4. Renforcement des structures par précontrainte additionnelle :

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles ou torons fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Ces câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière et disposés généralement à l'extérieur du béton (figure I.9). La précontrainte additionnelle va introduire des sollicitations qui vont compenser les défauts de conception ou des nouveaux efforts imposés à la structure. Les torons ou câbles doivent comprimer les zones tendues sans ajouter de contraintes dans les zones déjà comprimer. [35] [13]



Figure I.9 : Précontraintes additionnelles

I.2.5. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement :

La protection des bétons vis-à-vis des agressions ou des attaques extérieures se fait par application de produits à la surface du parement. Ces produits sont de nature organique, ou minérale à base de ciment et de résine (inhibiteurs de corrosion, lasure, peinture, etc. ...), ils s'appliquent sur le béton durci en une ou plusieurs couches d'épaisseur inférieure à 3 mm.

Le support doit être propre, nettoyer de tous éléments qui peuvent nuire à l'adhérence (poussières, produits de cure, l'huile, etc....). La protection permet de ralentir le vieillissement du béton causé par : les réactions de gonflement interne, l'écaillage dû au gel, la pénétration d'eau, des chlorures ou du gaz carbonique, etc. [35]

I.2.6. Béton projeté :

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé. (Figure I.10).

La technique consiste à : malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage puis projeter le mélange sur le support à revêtir grâce à une lance. La plupart des adjuvants et additifs utilisés dans la fabrication des bétons de coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté il existe donc plusieurs types de bétons projetés en fonction de leurs constituants :

- Les bétons projetés léger (à base de granulats légers : argiles ou schiste expansé)
- Les bétons projetés de fibres (à base de fibres métalliques ou fibres de verre).
- Les bétons projetés avec incorporation de fumé de silice. [13]

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...).

Il existe deux techniques de projection: par voie sèche ou par voie mouillée. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage est introduite. Dans le

Procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale. [14]



Figure I.10: Renforcement au moyen d'un béton projeté

I.2.7.Chemisage :

I.2.7.1 Chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton, selon les besoins peut être destiné pour : améliorer la rigidité, la résistance(en flexion ou en cisaillement) et augmenter la portance ou la capacité de déformation. L'épaisseur de chemisage doit être suffisante pour disposer les armatures longitudinales et transversales avec un enrobage adéquat (figure I.11). [34]



Figure I.11 : Préparation des poteaux pour le chemisage en béton armé

I.2.7.2 Chemisage en acier :

Le chemisage en acier augmente généralement la résistance à l'effort tranchant des poteaux, la résistance des jonctions et aussi leur ductilité. Il est constitué de quatre cornières auxquelles sont soudées des plaques en aciers continues ou des bandes d'acier horizontales discontinues plus épaisses, (figure I.12). ces cornières sont collées au béton par un liant époxydique ou plaquées, sans aucun espace sur toute la hauteur.



Figure I.12 : Chemisage en acier

I.2.8.Réparation et renforcement des éléments structuraux au moyen de matériaux composites :

La technique de renforcement des structures au moyen d'un matériau composite consiste à coller des plaques composites (lamelles, fibres), textiles ou stratifiés (tissu) ; associé à des matrices polymères thermodurcissables. Cette technique présente divers avantages par rapport aux techniques de renforcement ou de réparation traditionnelles (collage des plats métalliques). Elle permet d'augmenter la résistance des structures dégradées, renforcer les structures en cas de défauts d'exécution ou modification des charges d'exploitations et aussi de confiner des poteaux, colonnes ou piles.

La mise en œuvre de la technique de renforcement par composites nécessite une connaissance des conditions et des recommandations pour assurer la qualité de la réparation et du renforcement.

Tout d'abord, il faut respecter les conditions climatiques : température (10°C à 25°C), humidité, et travailler à l'abri de la pluie et du soleil. Puis préparer le support : éliminer la laitance et la poussière, réparer tous les défauts (fissures, trous) et éliminer tout revêtement existant. Le composite (lamelles, tissu) est ensuite imprégné de résine (soit au moment du collage, soit pré imprégné en usine) et coller sur le support en marouflant pour éliminer toutes les bulles d'air formées entre le composite et le support. Cette technique peut être appliquée pour tous les éléments de la structure : poteaux, poutres, murs, dalles, ou colonnes. [35]

I.2.8.1 Renforcement des poteaux :

Le chemisage par matériaux composites des poteaux permet d'appliquer une pression de confinement qui croît avec la charge axiale en conservant un comportement élastique jusqu'à la rupture, [14] l'utilisation des enveloppes formées de feuilles en PRF autour du poteau permet d'améliorer la résistance à la compression sous l'effet du confinement produit par les fibres et donc l'augmentation de la capacité portante de la structure et de sa ductilité.

De nombreuses recherches ont été réalisées dans le but de déterminer l'efficacité du chemisage des poteaux avec des composites. La figure montre des poteaux rectangulaires et circulaires renforcés par des tissus composites. En général, les résultats de ces essais ont démontré une amélioration des paramètres d'isolation et de ductilité [41] [35] [14]



Figure I.13 : poteaux en BA confiné par matériaux composites.

I.2.8.2. Renforcement des poutres :

Les poutres peuvent être renforcées en flexion et aussi en cisaillement par collage externe des lamelles (PRF), après avoir préparé le support de la poutre en enlevant les couches faibles de la surface pour créer une surface uniforme qui assure une meilleure liaison entre le béton et les PRF. Le renforcement en flexion se fait en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement s'effectue par le collage des bandes sur les parois de la poutre (Voir Figure. I.14). [46] [35]



Figure I.14: poutres en BA renforcées par matériaux composites.

En Algérie, le premier cas d'utilisation de ces composites a été le renforcement des consoles en béton armé du stade de la ville de Tlemcen 1999 [SIK 03]. Il s'en est suivi le cas du renforcement du pont Blanc à El Harrach (Alger) qui est montré sur la figure I.14 et aussi le pont de Oued Larbaà et Hydra.



1. Renforcement en flexion

2. Renforcement en cisaillement

Figure I.15 : Réhabilitation du pont Blanc d'El Harrach, Alger

I.2.8.3. Renforcement des murs :

Un exemple de renforcement des murs par composites, est la réhabilitation de murs d'un bâtiment construit en 1930 à Zurich en Suisse (Steiner, 1996), ce bâtiment a été converti en bâtiment à bureaux, il a été alors modifié ; des murs en maçonnerie non renforcés conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et les murs restants doivent donc reprendre des charges beaucoup plus grandes. Le composite utilisé pour le renforcement de ces murs est sous forme de plaques en fibres de carbone collées sur les murs de chaque étages en forme de X (Figure I.16), et un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhérence entre les fibres et les murs. Les résultats obtenus ont montré une augmentation de la ductilité dans des délais courts et avec des coûts relativement faibles.



Figure I.16: Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse) [41] [14] [35]

I.2.8.4. Renforcement des dalles :

L'utilisation de composites en bandes pour le renforcement des dalles en béton armé simplement appuyées peut améliorer la résistance en flexion de ces dalles en assurant une facilité de mise en œuvre grâce à la légèreté et la flexibilité de ces composites, ces bandes sont collées sur la partie tendue de la dalle sous forme de lamelles croisées sur toute la face (Figure. I.17.a et figure I.17) ou bien juste dans la partie centrale ou la partie où les moments sont maximaux (Figure I.18.b) et ce pour les dalles travaillant dans les deux sens.

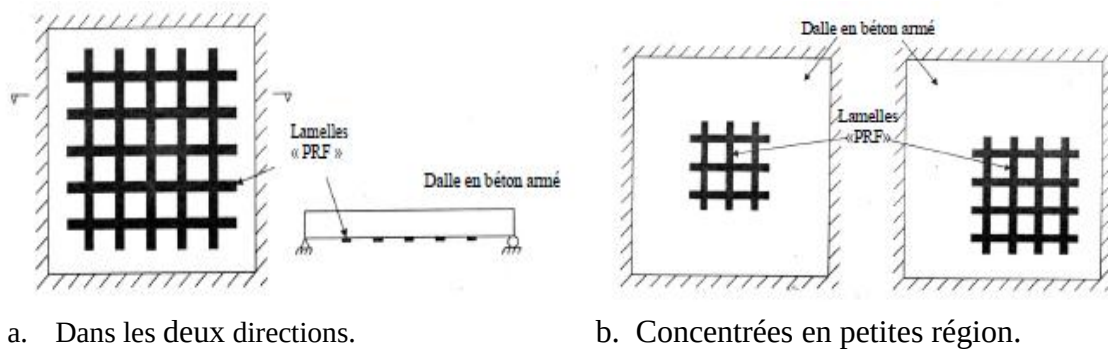


Figure I.17 : Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»



Figure I.18 : Renforcement d'une dalle de pont

En Algérie, il existe un seul cas de renforcement de dalle, fait en 2001 à l'usine LPA de Boudouaou près de Boumerdes. [46] [35]

I.2.9. Les différentes méthodes de confinement par composites :

Le confinement des colonnes en béton armé peut se faire par plusieurs méthodes classées en fonction de la technique de construction du composite utilisé, parmi ces méthodes, les plus utilisées sont : la stratification directe, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en PRF.

I.2.9.1. La stratification directe :

Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont découpées puis imprégnées de résine polymère ensuite déposées au tour des colonnes en orientant les fibres principales dans le sens de confinement avec un processus de moulage au contact, (Figure I.19) en fin l'application d'une couche de résine pour la protection nécessaire.



Figure I.19: Confinement des colonnes par stratification directe

I.2.9.2. Enroulement filamentaire :

Le principe de l'enroulement filamentaire ou bobinage, est d'envelopper les colonnes par des fibres continues au lieu des tissus (Figure I.20). L'enroulement se fait à l'aide d'une machine contrôlée par ordinateur, qui permet une précision de l'orientation des fibres, qui sont imprégnées de résine, et de l'épaisseur du PRF. [46]

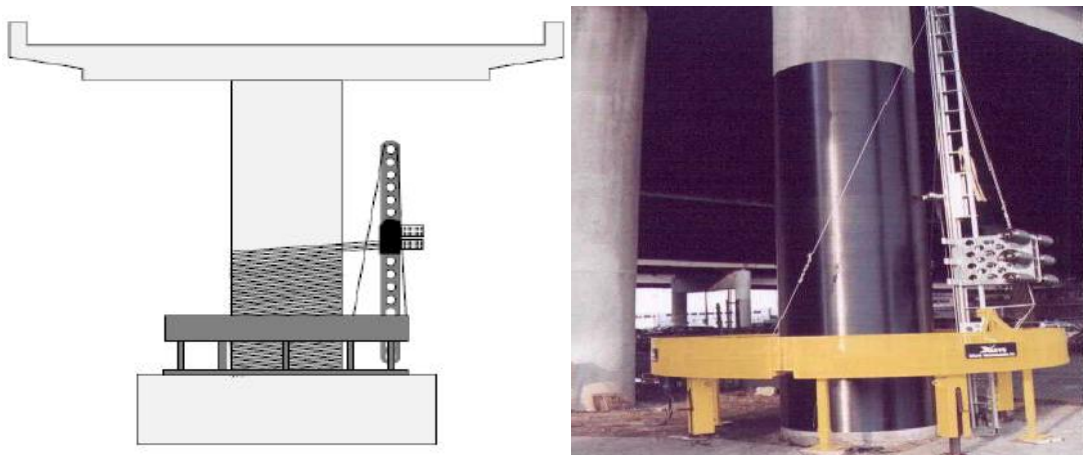


Figure I.20: Confinement par enroulement filamentaire [35][33]

I.2.9.3. Chemisage par coquille préfabriquées :

Les coquilles sont fabriquées sous forme de demi-cercle ou demi-rectangle en utilisant des fibres en bandes ou en voile. Les coquilles sont imprégnées de résine avant de les déposer (figure I.21). L'espace entre la colonne et la coquille est remplie avec un mortier de ciment pour assurer l'adhérence entre le béton et la coquille. [35]

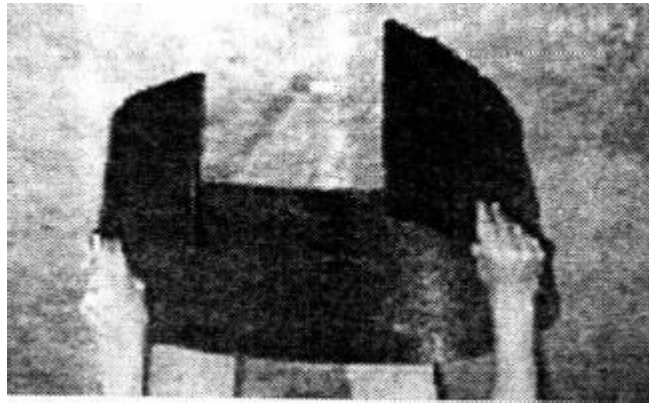


Figure I.21 : Chemisage par coquille préfabriquées

I.3. Travaux antérieurs portants sur le confinement du béton :

Plusieurs ouvrages rapportent les résultants d'expérimentation sur le béton confiné. La plupart de ces essais ont été réalisés sur des cylindres et sur des cubes de béton. [32]

Richart et al. (en1928) Ce sont les premiers à avoir étudié le confinement furent. Ils proposèrent un modèle qui tient compte de la contrainte maximale du béton non confiné et de la déformation axiale correspondante. Ce modèle permet donc de les évaluer pour le béton confiné. [52]

En **1981, Fardis et Khalili** ont effectué des essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions $\varnothing 76 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$ et $\varnothing 102 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$, enveloppés par différents tissus composites à base de fibres de carbone (CFRP). Les résultats de ce confinement ont montré une augmentation de la résistance en compression et une amélioration de la ductilité.

Dans un autre article en 1982, Fardis et Khaili proposent un modèle hyperbolique pour décrire la résistance en compression du béton confiné. [30]

Dans le but d'adapter le modèle de confinement proposé par **Ahmed et Shah en 1982**, au béton confiné à l'aide de spirales en FRP, en 1991 Ahmed et coll., entreprennent 33 essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions $\varnothing 102 \text{ mm} \times \varnothing 204 \text{ mm}$ confinés à l'aide de spirales en FRP, dans le but de calculer la contrainte maximale et la déformation correspondante du béton confiné..[30]

En 1992 Priestley et coll. ont conduit une investigation sur l'utilisation d'un système d'enveloppe (jacket) composé de matériaux FRP à base de fibres de verre (GFRP) collés en surface à l'aide d'époxy, pour améliorer la performance en flexion et en cisaillement des piles de pont en béton situées dans des régions sismiques. Ils présentent tout d'abord des modèles de design simples développés plus tôt (Priestley 1991, Priestley et Sieble 1991) pour le calcul de la ductilité et du cisaillement résultant de la réhabilitation ou du renforcement en question.

Sept piles de pont sont réhabilitées à l'aide du ce système et sont mises à l'essai pour valider les modèles. Trois piles sont renforcées au niveau de la zone de rotule plastique avant d'être testées en flexion, et les quatre autres piles sont renforcées sur toute leur longueur avant d'être soumises à des essais de flexion en courbure double. Les résultats expérimentaux ont montré que le système de matériaux GFRP collés peut empêcher la rupture prématurée par insuffisance de longueur de chevauchement dans la zone de rotule plastique. [30]

Ils ont également montré que le système apporte une augmentation appréciable de la résistance au cisaillement aux piles et aux colonnes qui présentent des insuffisances en matière de cisaillement. De plus, le comportement sismique de la colonne enveloppée de composite est amélioré et permet ainsi de satisfaire aux normes de dimensionnement.

En 1994, Demers a effectué des études dans le but de déterminer les paramètres qui influencent le comportement d'un élément en béton armé chargé axialement et confiné par une enveloppe en composite. La résistance du béton, le diamètre des barres longitudinales, l'espacement des étiérs, le degré de corrosion des armatures ainsi que l'endommagement du béton faisaient l'objet de cette étude. Pour cela, 16 poteaux de 300 mm de diamètre et de 200 mm de haut ont été testés avec différentes configurations de renforcement en acier et un même confinement en composite. [52]

Les résultats ont montré que le seul paramètre qui influence sur la résistance du béton confiné est la résistance du béton elle-même, les espacements d'acier choisis (150 et 300 mm) n'ont aucun effet sur le confinement. L'endommagement du béton n'influence que le début du chargement et n'affecte donc pas la capacité ultime ni la ductilité finale.

Saadatmanesh et coll en 1994 ont conduit une analyse paramétrique portant sur le comportement de colonnes circulaires et rectangulaires renforcées à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone, collées en surface. En se servant du modèle de Mander et coll (1988). Quatre paramètres sont considérés : la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en FRP, l'espacement des lamelles et les propriétés du matériau des lamelles. [30]

En 1995 Bavarian et al ont réalisé une étude sur des cylindres de dimensions $\varnothing 75 \times 150$ mm, $\varnothing 100 \times 200$ mm et $\varnothing 150 \times 300$ mm renforcés par confinement avec des fibres (S-glass) ou de kevlar (Kevlar-29). Le but était de déterminer l'influence du nombre de tours de composites ainsi que de la taille du spécimen. Les résultats ont signalé une augmentation significative de la résistance et de la ductilité du béton confiné. Une augmentation de 100% de la résistance axiale avec quatre tours de composite, un accroissement important de la ductilité et une diminution de la résistance axiale avec l'augmentation du diamètre du cylindre ont alors été observées. [52]

En 1995 Nanni et Bradford ont étudié le comportement de cylindres en béton de dimensions $\varnothing 150$ mm x 300 mm confinés avec trois types d'enveloppes en matériaux composites: des câbles précontraints en aramide, des plaques hybrides en verre-aramide, et un enroulement filamenteux en fibres de verre. Pour la première série, 16 échantillons sont testés, le paramètre étudié est : le diamètre et l'espacement des câbles. La deuxième série compte 4 échantillons et la troisième 15. Les cylindres de la troisième série sont enroulés à l'aide d'une machine d'enroulement filamenteuse, avec 1, 2, 4, ou 8 épaisseurs de fibres de verre du type E et de résine vinylester (ou polyester pour quelques-uns des spécimens).

Ils ont conclu qu'en général la réponse contrainte-déformation du béton enveloppé de matériau composite pourrait être modélisée par une simple courbe bilinéaire, le point de cassure de la courbe étant celui correspondant à la contrainte du béton non confiné, pour une

déformation de 3000pa. Ils n'ont cependant pas développé de modèles de confinement particuliers. [30]

Mastrapa en 1997, a étudié l'effet de l'adhérence, pour cela 32 cylindres de béton de dimensions $\varnothing 150 \times 300$ mm ont été confectionnés, 16 de ces cylindres sont enveloppés à l'aide de 1, 3,5 ou 7 épaisseurs de tissu FRP à base de fibres de verre du type S, alors que les 16 autres spécimens sont confectionnés à l'aide de tubes GFRP type S ayant les mêmes épaisseurs et remplis du même béton que les premiers cylindres.

Les résultats de ces travaux ont permis de conclure que la fabrication de l'enveloppe en FRP n'affecte pas de façon significative la résistance de colonnes confinées sous charges axiales.[30]

En 2000 Pantelides et al., ont comparé le comportement de 2 tronçons transversaux (de 3 piles et 2 travées) de deux ponts, le premier restant tel qu'il avait été construit en 1962 et le deuxième tronçon étant renforcé par matériaux composites. Les renforts en matériaux composites ont été dimensionnés de manière à doubler la ductilité de l'ensemble testé ; ils ont été disposés afin de renforcer la jonction pile/poutre, à confiner les piles et à renforcer au cisaillement les piles et chevêtres. Le chargement latéral était appliqué au niveau des chevêtres. La ductilité (rapport déplacement ultime obtenu/déplacement à la limite élastique) obtenue pour le tronçon non renforcé fut de 2,8, contre 6,3 pour le tronçon renforcé. [14] [1]

Benzaid et al. (2010), ont étudié 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 $\phi 160 \times 320$ 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 $\phi 8$ mm comme armatures transversales avec un espacement de 140 mm. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité en fonction de l'augmentation du nombre de plis de CFRP.

Quiertant et Clément en 2011, ont étudié le comportement de poteaux renforcés par matériaux composites et soumis à une charge axiale excentrée de 20 mm par rapport à l'axe du poteau. Quatre configurations sont examinées et chaque configuration est testée sur deux

corps d'épreuve (deux corps d'épreuve témoins sont également testés sans renforcement). Chaque configuration combine renforts longitudinaux à la flexion et confinement. Les essais ont montré que l'augmentation en termes de capacité portante n'est pas très importante, mais une augmentation très significative de la capacité de déformation a été observée.

Thong et al. (2013), ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de côté. Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales 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/m².

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.

Ali ahmed et al. 2015, ont testé l'effet du confinement par bandes hélicoidales de PRFV. Ainsi, des éprouvettes cylindriques de dimensions Ø150x300 mm ont été confinées en considérant deux paramètres qui sont la largeur de la bande composite ainsi que le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre. Il a été montré que les cylindres ont gagné en résistance à la compression ainsi qu'en déformabilité. [3]

Ces essais démontrent donc l'efficacité des renforts en matériaux composites. Ces renforts externes ont permis d'améliorer significativement la ductilité des tronçons d'ouvrages qui n'avaient pas été dimensionnés pour résister à de tels déplacements.

I.4. Conclusion du chapitre :

Les recherches menées par plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité des techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé par matériaux composites, ces techniques connaissent un développement beaucoup plus important en Amérique du Nord, au Japon et aussi en Europe, que ce soit pour les bâtiments ou pour les ouvrages d'arts.

Au niveau national, il ne faut pas négliger la nécessité de renforcement des ouvrages vis-à-vis du séisme, puisque l'Algérie est un pays sismique, l'application de ces techniques est relativement simple, très peu dérangeante pour les occupants des bâtiments et peu exigeantes en main-d'œuvre. Ainsi, elle représente l'une des solutions de rechange les plus souhaitables en matière d'accroissement de la résistance des bâtiments existants aux séismes. Les caractéristiques non corrosives des fibres de carbone de verre ou autres donnent à ce système de renforcement une durée de vie plus longue que celle des matériaux traditionnels tels que les aciers.

CHAPITRE II :
LES MATÉRIAUX COMPOSITES

II.1. Introduction :

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts. D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion. [25] [24]

D'une manière générale, les matériaux composites à matrice polymère et à renforts de fibres de carbone, de verre ou d'aramide présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton tels que poutre, poteau, dalle ou mur. Dans le cadre de la réhabilitation, le processus de l'introduction des polymères renforcé de fibres (PRF) a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. [28]

II.2. Définition :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de nature différente permettant d'obtenir un matériau dont la performance dépasse celles des composants pris individuellement. Une interface se crée entre les constituants et aura pour rôle de transmettre les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. [56]

Un matériau composite comme il est représenté dans la figure est constitué essentiellement de deux phases : une phase continue appelée « la matrice » et une phase discontinue appelée renfort ou matériau renforçant ; aux quelles on rajoute des charges et aditifs pour améliorer les caractéristiques du matériau. [2]

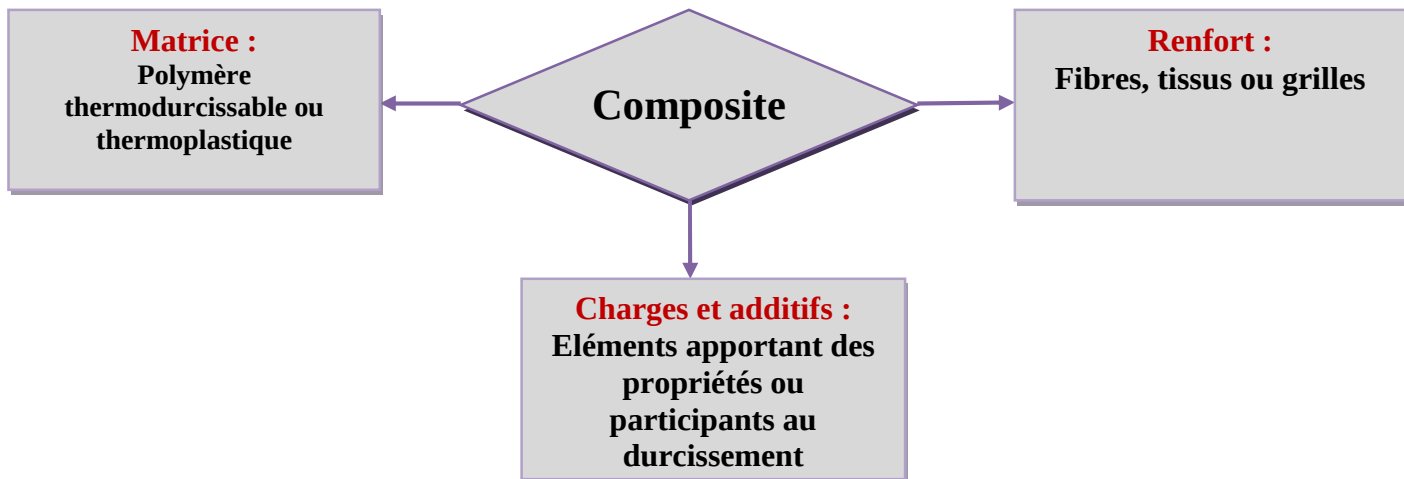


Figure. II.1 : composants d'un matériau composite. [4]

II.2.1. Les avantages des matériaux composites :

Les matériaux composites présentent divers avantages en résistance, poids, ou maniabilité comparativement aux aciers ; tels que :

- ▶ La résistance des fibres de composites est plus élevée que celle de l'acier ; pour une même section.
- ▶ La densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers. [36]
- ▶ Les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- ▶ Les PRF sont beaucoup plus concluants que les platines qui sont difficiles à assembler et à transporter.
- ▶ Facilité de préparation de surfaces.
- ▶ La bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.
- ▶ La conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente comparativement à celle des platines d'aciers.

II.3. Polymère renforcé de fibre (FRP):

Un polymère renforcé de fibres ou plastique renforcé de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice polymère appelée résine, renforcée par des fines fibres (souvent synthétiques) à haute module. [6]

La matrice garantit le transfert des efforts, l'orientation des fibres et la protection contre les agressions mécaniques et physico-chimiques de l'environnement (choc, corrosion, humidité...), elle est généralement un polyester thermodurcissable, un époxyde, un vinylester, ou thermoplastique (polyamide).

Les fibres jouent le rôle de renfort et supportent la majeure partie des efforts appliqués, les plus courantes sont les fibres de verre, de carbone, ou d'aramide.

Cette association fibres-matrice permet de rassembler les avantages respectifs de chacune des phases du composite, à savoir rigidité et résistance mécanique des fibres, faible masse volumique et bonne résistance à la corrosion de la matrice en un seul matériau, ce matériau est en général anisotrope, ses propriétés de résistance (mécanique, chimique) et sa densité sont très favorables comparé aux métaux. Le comportement en tension des PRF est élastique linéaire jusqu'à la rupture, la Figure. II.2 montre le comportement des fibres, de la résine et du PRF issu de leur association. [6]

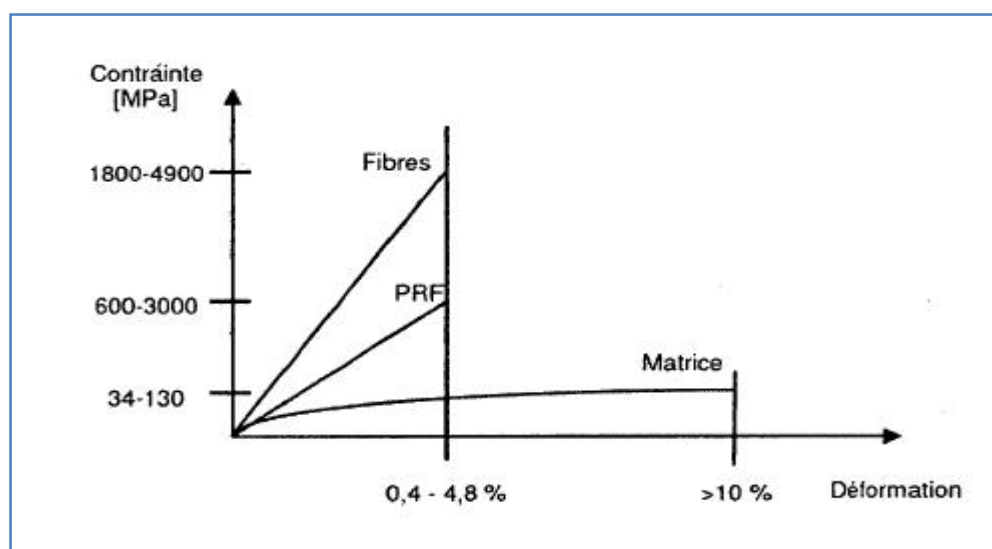


Figure. II.2 : Courbes contrainte-déformation des fibres, de la résine et des PRF [12]

En génie civil les PRF sont utilisées sous forme de lamelles, treillis, tubes, profilés ou barres d'armature, pour la réhabilitation des structures existantes, par des techniques d'application externe dont le but est d'améliorer les performances en compression, en flexion, ou en cisaillement, des éléments structuraux comme le collage de tissus, lamelles ou d'armatures. Ou aussi pour les nouvelles constructions comme éléments structuraux en PRF (profilés) ou comme barres d'armature internes dans les structures en béton (Voir figure. II.3).

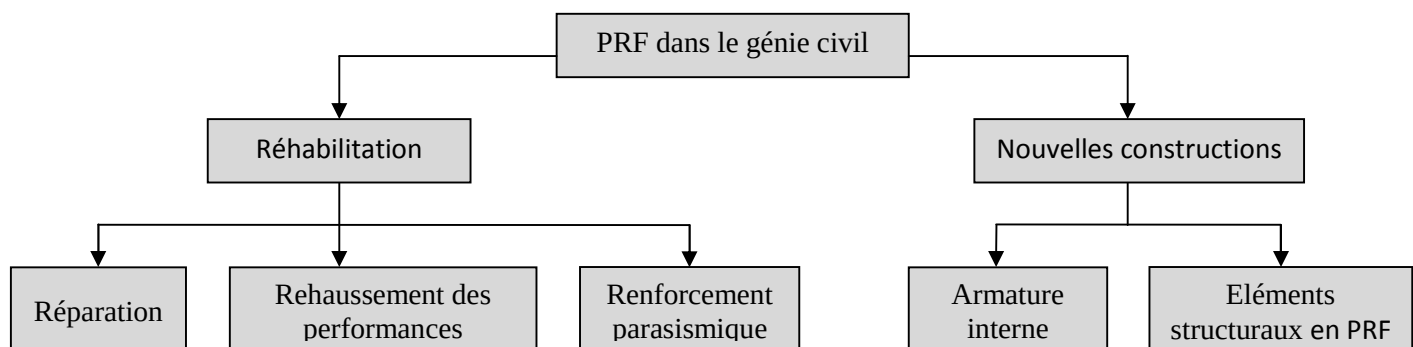


Figure. II.3 : Utilisation des PRF dans le génie civil [12]

Parmi les avantages de ces techniques de renforcement par PRF on peut citer :

- Une très grande résistance à la traction (Module d'Young E très élevé)
- Pas de nécessité d'étaieement,
- Pas d'interruption de l'exploitation de l'ouvrage,
- Pas de risque de corrosion,
- Résiste aux environnements agressifs,
- N'entraîne pas de masse supplémentaire (200 g/ml),

II.3.1. Le polymère :

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie »). On appelle polymère une grande molécule de masse moléculaire élevée (dépasse souvent 10 000 g/mol), formées par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères (ou motifs monomères) se

présente sous forme de chaînes qui lient entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes). Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. [42]

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire.

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation.

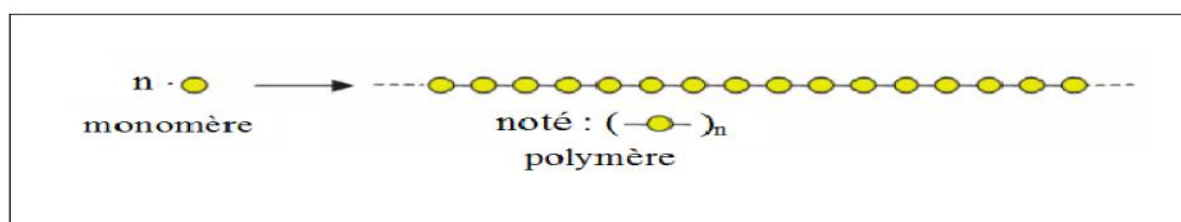


Figure. II.4 : modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

La lettre n est appelée « degré de polymérisation » ou « indice de polymérisation », pour des valeurs élevées de n ($n > 100$), on parle de macromolécules. La plupart des macromolécules synthétiques se présentent de façon semblable, sous forme de fils longs et souple. Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire.

Le degré de polymérisation est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule. Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère.

On trouve des polymères non-organiques comme l'amiante, et aussi des polymères synthétiques du type organique qui sont souvent associés avec le terme « plastique ». Afin de corriger l'intuition générale, le terme plastique ne signifie pas que le polymère ressemble physiquement à un plastique mais uniquement parce-que à une certaine étape de sa fabrication il est plastique, les polymères organiques sont des matériaux récents tirés du pétrole. [6]

Un polymère peut se présenter sous forme liquide (plus ou moins visqueux) ou solide à température ambiante. À l'état solide, il peut être utilisé comme matériau moyennant des propriétés mécaniques suffisantes [54]. Un polymère liquide à température ambiante peut être

transformé en matériau s'il est réticulable ; les élastomères sont des matériaux obtenus par réticulation de polymères linéaires liquides à température ambiante.

Les polymères ont un comportement viscoélastique. En effet, ils démontrent simultanément des propriétés élastiques et un caractère visqueux. Ils peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés. [42]

En termes général ces polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques en polymères: thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères. Les propriétés des polymères dépendent du type d'assemblage de ces monomères et du degré de polymérisation, les propriétés générales sont les suivantes :

- ☀ Ce sont des matériaux « légers », ils ont une masse volumique faible (en général inférieure à $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit une densité par rapport à l'eau inférieure à 1,5),

- ☀ Ils sont en général souples, les polymères thermoplastiques ont un module de Young inférieur à environ 3 GPa, comparé à environ 20 GPa pour les bétons, 70 GPa pour l'aluminium et 200 GPa pour l'acier,

- ☀ Ils ne sont stables qu'à des températures modérées. La plupart des polymères thermoplastiques se ramollissent ou fondent à des températures comprises entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; un polymère est dit « thermostable » s'il résiste à $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant quelques instants, la plupart des polymères se dégradent à des températures supérieures,

- ☀ Ce sont des isolants électriques et thermiques, sauf cas particuliers. [39]

II.3.2. La matrice :

On désigne sous le nom matrice ; un liant polymère ; généralement homogène et isotrope qui enrobe les fibres en assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et apporte une bonne protection chimique au matériau, on distingue : les matrices minérales et les matrices organiques (Figure. II.6). [37]

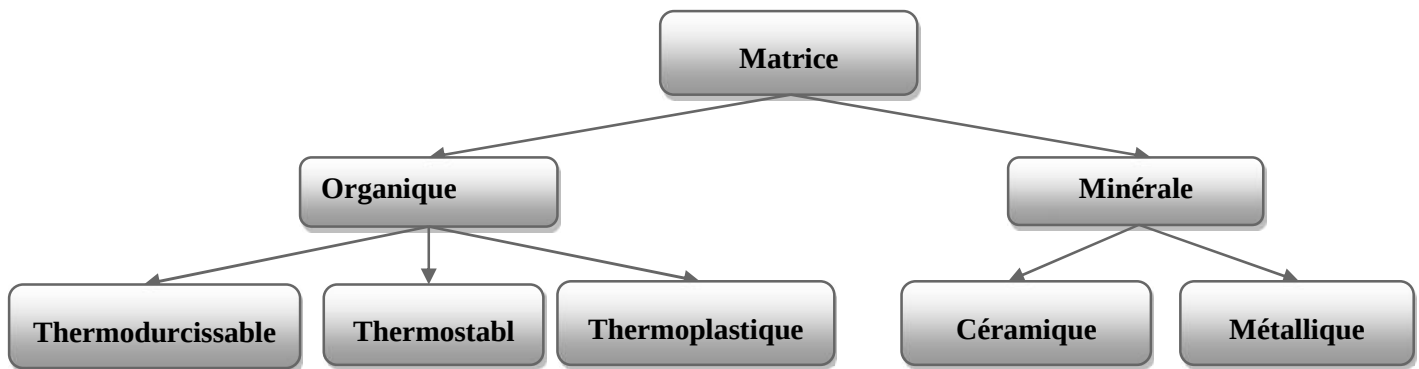


Figure. II.5 : Différentes matrices [25]

II.3.1.1. Les matrices organiques :

II.3.1.1.1 Résines Thermodurcissables:

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui se transforment en produits essentiellement infusibles et insolubles, après un traitement thermique. Elles peuvent être mises en forme qu'une seule fois [42]. Ces résines ont des propriétés mécaniques plus élevées par rapport aux résines thermoplastiques, du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées dans la mise en œuvre des matériaux composites, on trouve dans cette famille : Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxyes. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques élastiques et propriétés mécaniques des résines thermodurcissables. [54]

Tableau. II.1 : caractéristiques des résines thermodurcissables

Résines	T (°C)	ρ (Kg/m ³)	ϵ_r^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Parmi les résines thermodurcissables les plus utilisées on trouve les résines époxy :

❖ Les résines Epoxydes :

Le terme Epoxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques, sont les résines les plus utilisées après les résines polyester, généralement sans charges et additifs[11], leur durée de transformation et cuisson doivent être très longues (100°C), le durcisseur est un des éléments du produit fini, le temps de prise est déterminé par le type de durcisseur et non par son pourcentage.

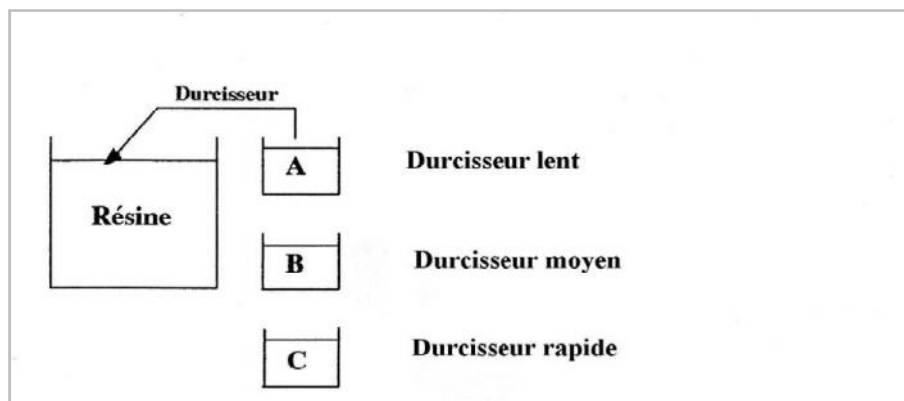


Figure. II.6 : types de durcisseurs des résines Epoxydes

Sont les matrices de composites à haute performance du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques mécaniques des résines Epoxydes : [16]

Tableau. II.2 : Caractéristiques des résines Epoxydes

Masse volumique (Kg/m ³)	1100 à 1500
Module d'élasticité en traction (GPa)	3 à 5
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	60 à 80
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	100 à 150
Allongement à la rupture (%)	2 à 5
Résistance au cisaillement (MPa)	30 à 50
Température de fléchissement sous charge (°C)	290

❖ **Les avantages des résines Epoxydes :**

- Faible retrait (environ 1% contre 6% pour le polyester)
- Bonnes propriétés mécaniques (traction, compression, flexion, choc, fluage, etc.)
- Très bonne adhérence sur une grande variété de matériaux
- Une adhérence parfaite sur les fibres
- Mise en œuvre facile
- Une bonne tenue thermique et chimique [14]
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques
- Une sensibilité à la fissuration

II.3.1.1.2 Résines Thermostables :

Présentent de bonnes propriétés mécaniques pour des températures supérieures à 200°C, elles sont utilisées pour la fabrication de circuits imprimés ou des pièces aéronautiques, les plus utilisées sont les polyimides et les bismaldéides [10]

II.3.1.1.3. Résines Thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles, elles sont solides et nécessite une transformation à haute températures, ce qui rend leurs développement limité. L'intérêt de ces résines réside dans leur faible coût, ce faible coût est lié aux matières premières disponibles et aux propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. [10]

Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques mécaniques de ces résines :

Tableau. II.3 : caractéristiques des résines thermoplastiques

Résines	T (°C)	ρ (Kg/m ³)	σ_t^R (MPa)	E (GPa)
Polymides	65 à 100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200	20 à 35	1,1 à 1,4

II.3.1.2. Les matrices minérales :

Les matrices métalliques et céramiques sont utilisées respectivement pour les applications hautes températures ($<500^{\circ}\text{C}$) et très hautes températures ($>1000^{\circ}\text{C}$). Ce type de matrice ne peut être associé qu'à des fibres Sic ou des fibres de carbone. Le coût de fabrication de ces matériaux est très élevé.

II.3.1.2.1. matrices céramiques:

Ces composites sont utilisés dans des environnements sévères, par exemple les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz. Des matrices céramiques telles que le verre et le carbure de silicium (SiC) associées aux renforts comme les métaux et le carbone. Dont le but est d'améliorer les propriétés mécaniques telles que la ténacité et la résistance au choc thermique des céramiques monolithiques.

II.3.1.2.2. matrices métalliques:

Dans ces composites, des matériaux métallique comme l'aluminium et le titane sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques. Les composites à matrice métallique ont des propriétés mécaniques meilleures, plus adaptables au chargement que leurs matrices monolithiques.

II.3.2. Les charges et additifs :

Les composites peuvent être renforcé par un autre matériau d'origine minéral ou végétale, pour modifier les propriétés mécaniques, électriques, ou thermiques, ou aussi faciliter la mise en œuvre du composite, améliorer l'aspect de surface [29] [58] et réduire le coût. Ces substances incorporées à la matrice doivent être compatibles avec la résine de base. [14]

II.3.2.1. Les charges:

Les charges se divisent en deux types : les charges renforçantes et les charges non renforçantes.

II.3.2.1.1. Les charges renforçantes :

Le but de ces charges est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, elles sont classées suivant leurs formes en charges sphériques et charges non sphériques.

Les charges non sphériques sont incorporées aux résines thermoplastiques ou thermodurcissables sous forme d'écailles de dimensions transversales allant de 100 à 500 μm , la charge non sphérique la plus utilisée est le mica.

Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères pleines ou creuses de diamètres allant de 100 jusqu'à 500 μm , ces charges diminuent la susceptibilité à la fissuration de la matrice à cause de leurs formes qui évitent la concentration de contraintes.

Parmi les charges sphériques, on trouve les microbilles de verre, les microbilles de carbone, et les microbilles organiques. [16]

II.3.2.1.2. Les charges non renforçantes :

Elles sont utilisées soit pour diminuer le coût des résines, soit pour améliorer certaines propriétés, on peut trouver donc : les charges à faible coût extraites des roches (silicates, silices et carbonates), les charges conductrices comme les paillettes métalliques (fer, cuivre, aluminium, etc...), et les microbilles de verre métallisées. [16]

II.3.2.2. Les additifs :

Les additifs se trouvent en faibles quantités, en fonction des propriétés qu'elles apportent à la résine on distingue : [15]

- Lubrifiants et agents de démoulage
- Pigments et colorants
- Agents anti-retrait et agents de fluage
- Agents anti-ultraviolets

II.3.3. Le renfort :

Le renfort est le squelette supportant les efforts dans le matériau composite, son rôle est d'accroître les propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer les propriétés physiques et électriques. En assurant une meilleure compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. [54] Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous. [11]

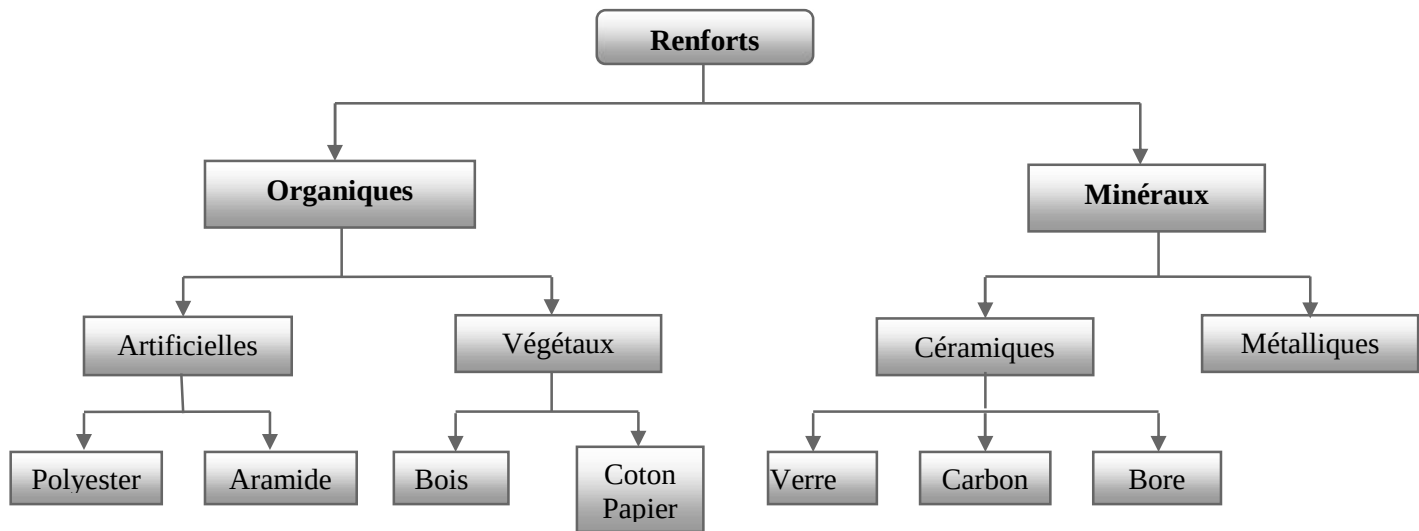


Figure. II.7 : Les types de renforts

II.3.3.1. Architecture des renforts :

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il faut jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Le renfort se présente généralement sous forme de fibres qui sont soit :

1. Sous forme linéique (fils ou mèches)
2. Sous forme surfacique (tissus simple ou mats)
3. Sous forme multidirectionnelle (tissus complexes ou tresses)

II.3.3.1.1. Forme linéiques :

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres et ensuite réunies en fils ou en mèches. Les fils continus ou discontinus sont utilisés ensuite pour réaliser divers formes surfaciques (mats, tissus ou rubans), essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

II.3.3.1.2. Formes surfaciques :**a. Les mats :**

Sont des nappes de fils continus ou discontinus dont l'orientation est aléatoire, ils possèdent donc des propriétés mécaniques isotropes, ils sont maintenus ensemble par un liant. On distingue les mats à fils coupés et les mats à fils continus.



Figure. II.8 : Mat en fibres de verre

b. Les tissus:

Ensemble de fils et mèches tissés à l'aide d'un métier à tisser, constitués de chaînes et de trames, les chaînes sont un ensemble de fils parallèles répartis suivant la longueur du tissu, les trames sont les fils qui s'entrecroisent avec les fils de chaînes (Voir Figure. II.11).

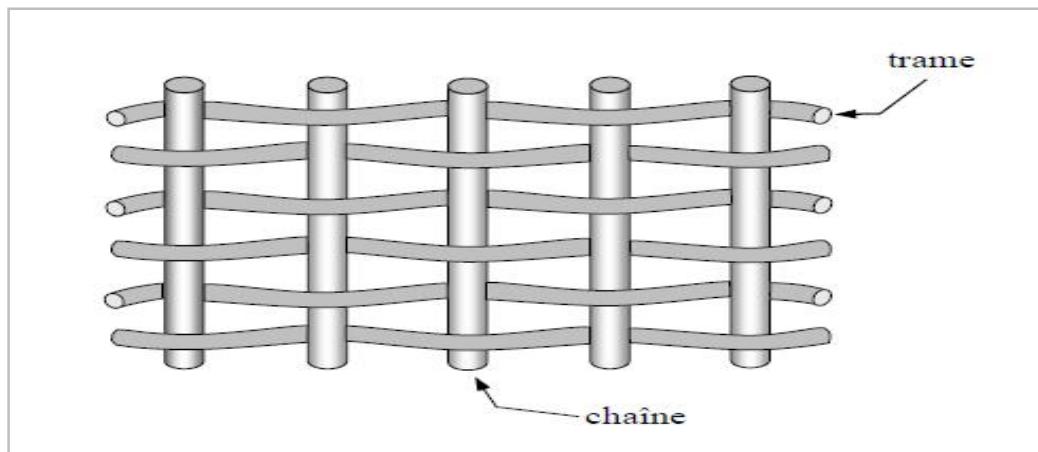


Figure. II.9 : chaînes et trames d'un tissu

Le type de fils utilisé pour le tissage et le mode d'entrecroisement (armure) des fils de chaîne et de trame permet de distinguer plusieurs types de tissus : satin, sergé, toile et taffetas, tissu haute module, et les tissu à armure unidirectionnelle.

II.3.3.2. Les fibres :

II.3.3.2.1. Fibres de carbone :

Sont les renforts les plus répandus pour les matériaux composites hautes performances, élaborées à partir d'un polymère appelé précurseur. [16] Le diamètre d'une fibre est de l'ordre de 5 μ m. [8]

Les fibres de carbone présentent des propriétés mécaniques très élevées (haut module, haute résistance, faible dilatation thermique), ces caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C, [16] c'est un matériau anisotrope par rapport à sa structure moléculaire avec un coût élevé (environ 20 €/ Kg). [47]

II.3.3.2.2. Fibres d'aramide :

Elles sont connues sous le nom Kevlar (nom commercial mis au point par Dupont de Nemours (USA)), possèdent de bonnes propriétés en traction, une ténacité, [8] et une bonne tolérance aux dommages [39] d'où leur usage pour la fabrication de gilet pare-balles, le diamètre d'une fibre est de l'ordre de grandeur d'une fibre de verre , l'élaboration de

ces fibres se fait à basses températures, elles sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.[35]

II.3.3.2.3. Fibres céramiques :

Les fibres céramiques sont les plus chères en raison de leur difficulté de fabrication, [54] exemple de ces fibres : le Carbure de silicium (SiC) et le Bore(B), elles possèdent une bonne stabilité des propriétés à hautes températures (de 500°C à 1600°C) et une absorption des vibrations (amortissement) 34, sont de gros filaments (100µm) et présentent un comportement anisotrope.

II.3.3.2.4. Fibres végétales :

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine,[55] comme le coton, la chanvre, le lin, et le jute, elles présentent des propriétés mécaniques faibles mais un coût de fabrication dérisoire par rapport aux autres fibres, le module de traction d'une fibre de chanvre est du même ordre de grandeur (70 GPa) que celui d'une fibre de verre,[8] ces fibres travaillent facilement avec les technologies du textile(tissage), elles sont utilisées pour les applications qui présentent un fort aspect écologique .

II.3.3.2.5. Fibres de verre :

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité et sensibilité aux microfissures, par contre élaboré sous forme de fibres, le verre devient plus performant et possède des propriétés mécaniques élevés. [16]

La connaissance des matériaux composites fibreux à matrice polymères est initialement basée sur des études des composites à fibres de verre.[39]Les fibres de verre sont des matériaux isotrope, appartenant au groupe des matériaux inorganiques et non métalliques, elles ont une structure cristalline qui lui donnent une grande rigidité, et un excellent rapport performance –prix (environ 3€ /Kg)[9]qui les placent parmi les renforts les plus utilisés dans la construction de structures composites,[19] (utilisées dans plus de 95% des

composites),[47] elles présentent un module de traction faible mais une résistance en traction intéressante,[4] elles présentent aussi une bonne résistance à l'humidité et à la corrosion[38] .

Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de sable (silice) au quel on rajoute des additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore), le pourcentage élevé de silice améliore les propriétés mécaniques des verres, des fibres de silice pure sont utilisées lorsqu'on cherche des hautes performances.

a. Compositions et caractéristiques des différents types de verre :

On faisant varier la composition chimique du mélange de base on peut obtenir différents types de verre (Voir tableau. II.4) : Le verre E, le verre D, le verre R, le verre E-CR, le verre AR, le verre C, le verre S, le verre A

Tableau. II.4 : Compositions chimiques des différents types de verre [18]

Principaux constituants	Composition massique (%)							
	Verre E	Verre D	Verre A	Verre C	Verre R	Verre S	Verre AR	Verre E-CR
Silice (SiO ₂)	53 à 56	73 à 74	70 à 72	60 à 65	58 à 60	64 à 65	60 à 63	52 à 56
Alumine (Al ₂)	12 à 16	/	0,5 à 2,5	2 à 5,5	23,5 à 25,5	24 à 25	0,3 à 0,7	10 à 16
Chaux (CaO)	21 à 24	0,5 à 0,6	5 à 10	12 à 14	14 à 17	/	0,6 à 5,2	18 à 25
Magnésie (MgO)	21 à 24	0,5 à 0,6	1 à 4	1 à 3	14 à 17	10 à 11	0,05	0 à 5
Oxyde de bore (B ₂ O ₃)	5 à 9	22 à 23	0 à 0,5	2 à 2,5	/	/	0,05	/
Fluor (F)	0 à 1	/	/	/	/	/	/	/
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	≈1	1,3	12 à 15	8 à 10	/	0 à 1	14,8 à 15,8	≈1
Oxyde de potassium	≈1	1,5	1 à 2,5	/	/	0 à 1	0,3 à 2,5	≈1

(K₂O)								
Oxyde de zirconium (ZrO₂)	/	/	/	/	/	/	15,8 à 9,5	/
Oxyde de fer (Fe₂O₃)	1	0,1 à 0,2	/	/	/	/	0,05	0 à 0,5
Oxyde de titane (TiO₂)	1	/	/	/	/	/	0,05 à 0,07	0 à 3

Le tableau. II.5 montre les caractéristiques principales des différents types de verre, l'année d'invention, et l'inventeur de chaque type.

Tableau. II.5 : Caractéristiques des verres [18]

Type	Indication générales	Année d'invention	Caractéristique principales	Résistance	Inventeur
E	A usage général : bonnes propriétés électriques	1939	Classe électrique	Moyenne	Owens Corning
A	Haute teneur en alcali	1938	Isolation	Faible	Owens Corning
C	Résistance chimique (séparateurs de batterie)	1943	Résistance à la corrosion	Faible	Owens Corning
S	Haute résistance mécanique	1965	Grande robustesse	Très élevée	Owens Corning
R	Haute résistance mécanique (aérospatiale, aéronautique ou armement)	1965	Grande robustesse	Elevée	Saint-Gobain
AR	Résistant en milieu basique	1974	Résistance aux alcalis	Faible	Owens Corning
E-CR	Pour usage en milieu acide	1980	Résistance à la corrosion	Moyenne	Owens Corning

b. Fabrication des fibres de verre :**❖ Elaboration des fibres de verre :**

Les fibres de verre sont élaborées par filage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices et calibrés d'environ 2 mm de diamètre,[30] la température à l'intérieur des filières est de 1250°C à cette température le verre s'écoule par gravitation à travers les orifices sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres, à la sortie de la filière le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse puis refroidi.[35] [16]

Il existe deux procédés d'étirage des fibres de : l'étirage mécanique et l'étirage pneumatique la différence entre les deux procédés est la vitesse d'étirage et la condition de refroidissement.

❖ Ensimage des fibres de verre:

L'opération consiste à déposer à la surface des filaments de verre, un produit d'ensimage de composition complexe ;[16] [35] c'est une émulsion aqueuse contenant 0,05 à 10% en poids de composés organiques comme les silanes, les agents lubrifiants, les agents collants, les agents mouillants et les émulsifiants.[18] Cette étape permet d'établir une cohésion certaine entre les filaments, donner une raideur assez grande aux fils, protéger les filaments contre l'abrasion, éviter l'apparition de charges électrostatiques, faciliter l'imprégnation des filaments par la résine, et favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du composite.[35]

c. Les produits industriels en verre :

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il faut jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. [18] [16]

❖ Les fils de base :

Sont les fils continus ou discontinus élaborés par assemblage parallèle des monofilaments sans torsion à la sortie de la filière. Ces fils sont la base pour fabriquer autres produits en verre.

❖ Les fils coupés :

Se sont les fils de base coupés en petites longueurs (3, 4, 5, 6, 12 et 25 mm), utilisés pour : le moulage au contact ou le renforcement des résines thermoplastiques par injection ou extension. [16]



Figure. II.10 : Fils coupés

❖ Les fibres broyées :

Les fibres sont obtenues par broyage des fils de base utilisés aussi pour le renforcement des résines thermoplastiques, la longueur de ces fibres est de quelques dixièmes de millimètres (0,1 à 0,5mm).



Figure. II.11 : Fibres broyées

❖ Mats :

Le mat se présente sous forme planaire comme un tissu, sans orientation préférentielle des fibres, qui sont soit coupées, soit continues, maintenues ensemble avec un liant.

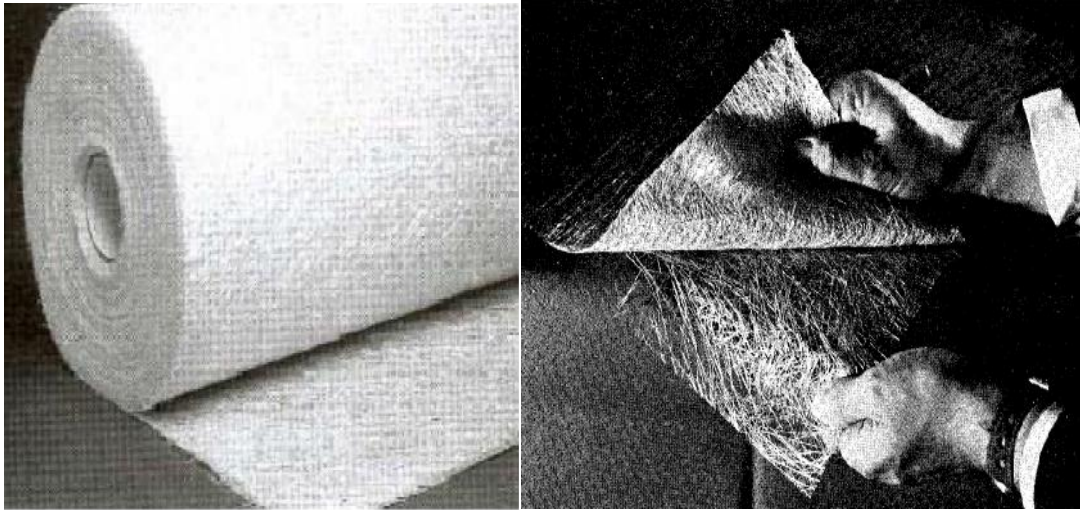


Figure. II.12 : Mat à fils coupés

❖ Stratifils :

Assemblage de fils de base silionne parallèles groupés sans torsion, présentés en pelotes ou bobines, ils s'appliquent généralement u l'enroulement filamentaire et la pultrusion, aussi utilisés pour le moulage par projection, coupe pour la fabrication de mats et tissage pour la fabrication de tissus. Il existe divers types de stratifils qui varient suivant le nombre de fils de base et la masse linéique globale.



Figure. II.13 : stratifil

❖ Tissus (Tissus 2D):

Les tissus bidimensionnels sont réalisés avec des métiers à tisser,[10] on désigne par armure le mode d'entrecroisement des fils de chaînes et des fils de trames, dans un tissu, ce qui permet d'obtenir différents types de tissus de verre (Satin, Sergé, et Taffetas) qui se présentent en rouleau de largeurs importantes(de 1 à 3 m), ou bien de largeur réduites (rubans).

■ Taffetas :

Pour ce tissu, chaque fil de chaîne passe alternativement au dessus et au dessous de chaque fil de trame et réciproquement, le tissu obtenu est très plat, stable mais peu déformable, dans ce cas les propriétés mécaniques sont identiques dans les deux directions.

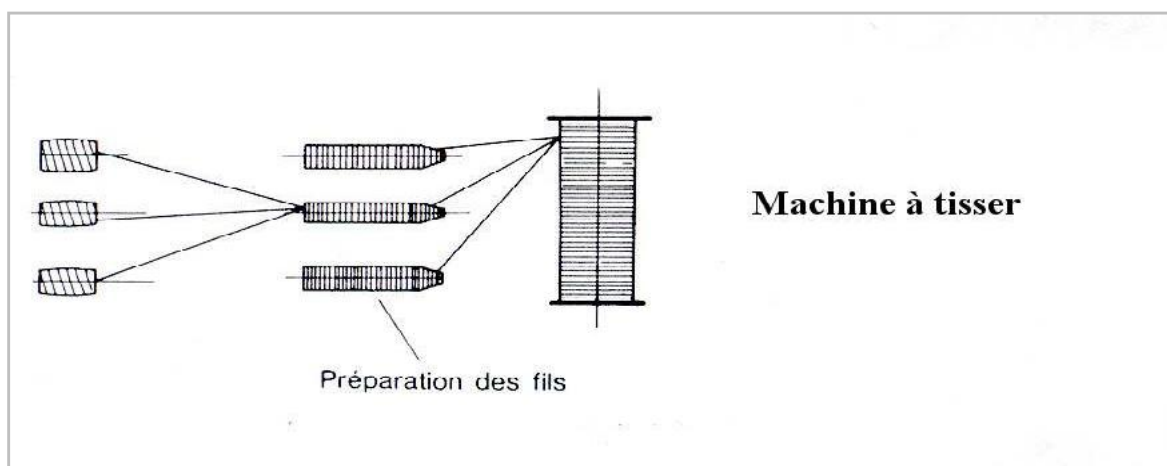


Figure. II.14: Machine à tisser [38]

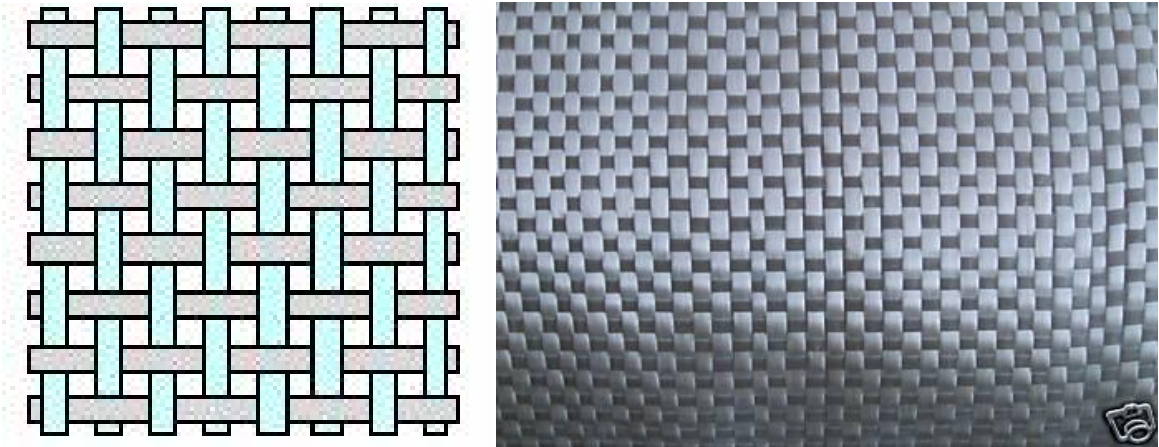


Figure. II.15 : Taffetas

■ Sergé :

C'est l'armure la plus dense ; chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs fils de trame, par exemple, dans un sergé 2×1 les fils trame passent sur un fil chaîne et sous deux fils chaîne.

Les tissus sergés sont très déformables et possèdent un comportement similaire dans sens des chaînes et dans le sens des trames, et permettent aussi un glissement entre les fils chaîne et les fils trame et s'adaptent à des moulages de formes complexes.

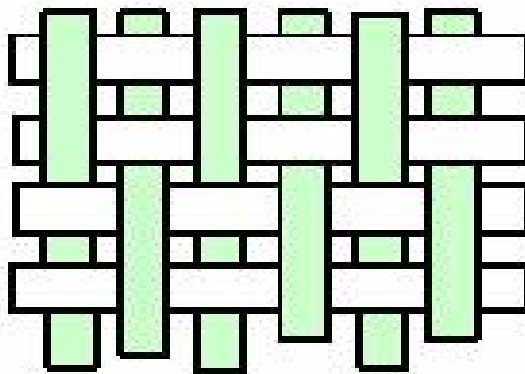


Figure. II.16 : Armure sergé

La Figure. II.23 montre un exemple d'un tissu sergé 3/1 : les fils trames passent par un seul fils chaîne et sous 3 fils chaîne, et un tissu sergé 2/ 2 : dans ce cas les fils trames passent sur deux fils chaîne et sous deux fils chaîne.

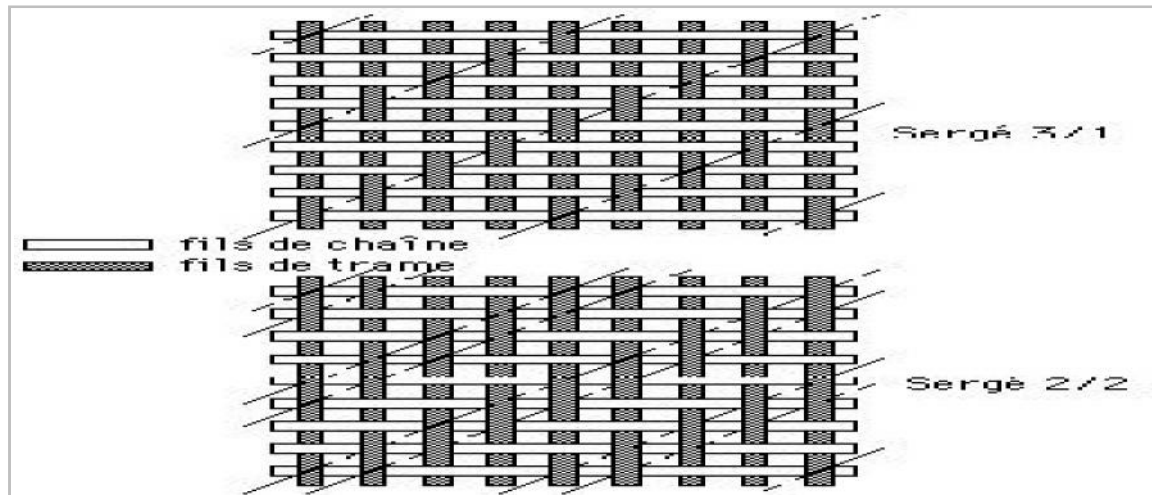


Figure. II.17 : Exemple d'un tissu sergé 2/2 et d'un tissu sergé 3/1

■ Satin:

Constitué de fils de chaîne flottant au-dessus des fils de trame, le nombre de ces fils est plus élevé par rapport au tissu sergé.

Chaque tissu satin est caractérisé par le nombre de fils chaîne qui passent par les fils trame ; par exemple le satin 8 qui est le plus utilisé, ce satin est très déformable, utilisé généralement pour les formes complexes.

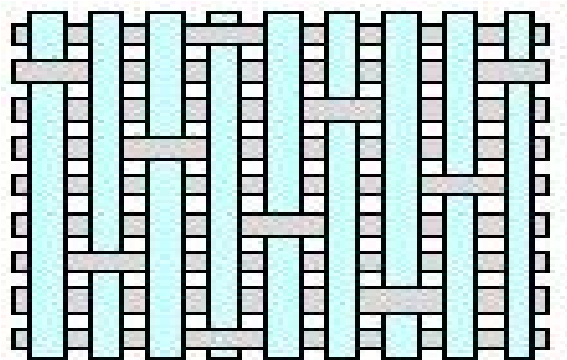


Figure. II.18 : Armure satin (Satin de 8)

■ Armure haute module :

Les fils de chaîne et trame sont maintenus par des fils fins et ne subissent aucun entrecroisement, l'absence d'entrecroisement supprime les effets de cisaillement et donne un tissu très performant mais coûteux.

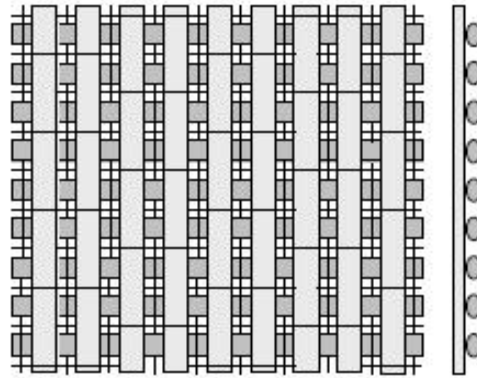


Figure. II.19 : armure haute module

■ Armure unidirectionnelle :

L'armure unidirectionnelle est constituée que de fils parallèles à la direction chaîne, maintenus dans la direction trame par un fil, ainsi le tissu est unidirectionnel avec des performances élevées dans la direction chaîne. [18] [16]

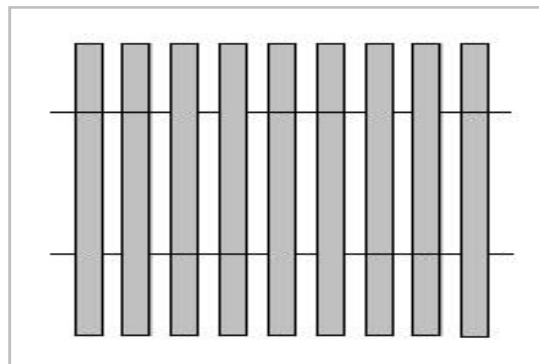


Figure. II.20 : armure unidirectionnel

d. Caractéristiques et avantages des fibres de verre :

- Résistance à la corrosion
- Haute solidité mécanique
- Résistance aux produits chimiques
- Résistance aux rayons UV et au temps
- Isolant électrique et thermiques
- Résistance au chaud et au froid

- Faible coefficient thermique d'extension
- Antimagnétique sans formation d'étincelles
- Transparence électromagnétique
- Possibilité de choisir la couleur
- Façonnage facile
- Maintenance minimale [48]

II.4. Comportement en compression du béton :

II.4.1. Béton non confiné :

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable, son comportement en compression, que l'on traduit par une relation contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité reliée à la microfissuration du matériau. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. [50] [26]

La rupture du béton survient lorsque la contrainte principale en compression atteint la résistance du béton. Au début du chargement le béton se comporte d'une manière quasi élastique, subit un raccourcissement dans la direction de chargement et une dilatation dans le plan perpendiculaire, les déformations à ce stade sont réversibles.

Lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 40% de sa résistance en compression, la microfissuration apparaît et se propager parallèlement au chargement au fur et mesure que celui-ci augmente. La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. [12]

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par une branche descendante avant l'atteinte de la contrainte ultime, dont l'allure est approximativement linéaire, parallèle au module élastique, jusqu'à la déformation ultime du matériau.

La figure illustre la relation contrainte-déformation (σ - ϵ) du béton en compression. [17]

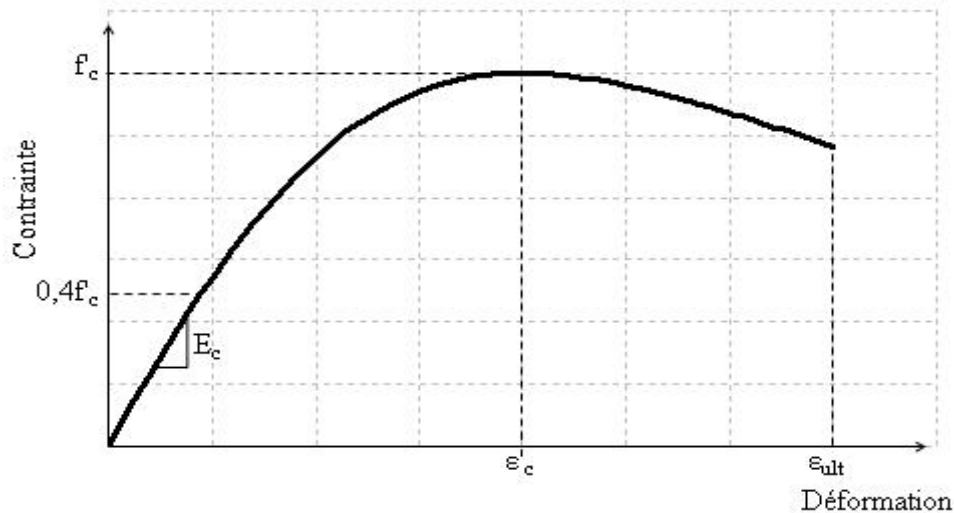


Figure. II.21 : Diagramme contrainte-déformation (σ - ϵ) du béton en compression [26]

II.4.2. béton confiné par FRP :

La compréhension du mécanisme d'endommagement et de la rupture du béton en compression uniaxiale a permis de déduire qu'il est possible d'augmenter la résistance à la compression en s'opposant à la dilatation radiale, donc de limiter la propagation des fissures et de permettre en conséquence une plus grande déformabilité axiale (ductilité) [51]. Ceci peut être atteint en appliquant une pression latérale dont la direction est opposée à celle de la dilatation.

Le béton se déforme latéralement sous une charge de compression uniaxiale, ce qui produit une fissuration qui conduit à la rupture en propageant avec l'accroissement de l'effort, mais si le béton est retenu latéralement, la déformation sera réduite et donc la résistance et la ductilité augmentent. [20] [43]

Beaucoup de travaux ont été effectués par des chercheurs afin de prévoir le comportement du béton confiné en compression. Ils ont constatés que le gain en résistance du béton confiné est une fonction linéaire déterminée par la contrainte principale minimale qui n'est autre que la pression latérale de confinement. Les colonnes confinées avec les FRP montrent une

augmentation considérable de la résistance, cette augmentation est proportionnelle à la force de confinement, et une augmentation de la ductilité en raccourcissant la dilatation latérale.

II.5. Conclusion du chapitre :

Comme il existe plusieurs types de fibres ; de résines, et plusieurs procédés de mise en œuvre, on obtient une large gamme de produits de renforts en PRF qui rend l'utilisation des composites en génie civil de plus en plus large. Le renfort en verre est parmi les renforts les plus utilisés, en raison de son faible coût, légèreté, et caractéristiques mécaniques élevées ; il peut être sous forme de fibres longues, courtes, divers tissus, ou en poudre.

La fabrication des renforts en verre passe par différentes étapes et selon le composant de base et le procédé de tissage on obtient plusieurs types de verre chaque type à ces caractéristiques et ces avantages et donc son domaine d'application spécifique. Tous ces types et différentes architectures ; associées à divers résines permet de créer une famille de composites en verre capables de remplacer les matériaux traditionnels.

CHAPITRE III:
PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

III.1. Introduction :

La technique de collage des composites sur un support en béton permet une diffusion répartie de l'effort et nécessite des moyens de mise en œuvre légers. Nous nous sommes ainsi intéressés au confinement de cylindres endommagés en béton par collage de bandes en tissu de verre selon une trajectoire hélicoïdale. Le comportement des cylindres confinés, sous compression uni axiale, est ainsi étudié.

Le but étant d'estimer la restitution de la résistance de ces cylindres, endommagés à différents degrés et confinés avec des bandes hélicoïdales en PFRV. Les différentes étapes de notre démarche expérimentale, les matériaux utilisés à savoir le béton et le PRFV ainsi que l'instrumentation et la procédure d'essais seront décrits dans cette partie.

III.2. Programme expérimental :

Le programme expérimental comporte une série de 16 éprouvettes cylindriques en béton de dimensions ($\varnothing 150$ mm x 300 mm). Une série de trois cylindres est gardée intacte, pendant que les spécimens restants ont été endommagés à différents pourcentages de la charge de rupture, à savoir 25%, 50%, 75% et 100%. Ces cylindres ont été par la suite confinés avec des bandes de polymère renforcé de fibres de verre (PRFV).

Il est à noter que les cylindres endommagés à 100% de la charge de rupture, ont servi pour la caractérisation du béton en compression. Les cylindres endommagés ont été réparés en surface à l'aide d'un mortier de même dosage en ciment que le béton les constituant. Tous les cylindres ont été confinés, par la suite, avec des bandes hélicoïdales en PRFV, ayant une largeur de 4 cm et formant des hélices, l'une dextre et l'autre senestre, autour du cylindre.

III.3. Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés sont le béton et le composite qui est formé par l'imprégnation du tissu de verre d'une résine époxy.

III. 3.1. Le béton :

Les cylindres ont été confectionnés à partir d'un béton ordinaire, obtenu par le mélange de sable naturel (0/3), de granulats (3/8 et 8/15), de ciment de type CPJ-CEM II/B 42,5 N produit par LAFARGE Algérie, et d'eau (Figure.III.1).



Figure. III.1 : Différents constituants du béton

La formulation de la composition du béton a été faite à partir de la méthode de « DREUX GORISSE » basée sur des abaques permettant une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés. Après calcul, la composition finale obtenue pour un mètre cube de béton (1m^3) est représentée dans le tableau.III.1.

Tableau. III.1 : composition du béton selon la formulation de DREUX GORISSE

Composants	Ciment	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau
Poids (kg/m^3)	350	824,4	240	784,4	200

III.3.1.1. Malaxage et mise en œuvre du béton :

La qualité d'homogénéité du béton est conditionnée par son malaxage qui est donc une phase importante dans sa fabrication. Le malaxeur est un appareil qui assure cette homogénéité grâce au déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange. Ce

déplacement est provoqué par des trains de palettes ou de planétaires dont l'axe est excentré par rapport à celui de la cuve, qui est elle-même est fixe ou tournante. Le béton subit un puissant effet de brassage dans le sens vertical et dans le sens horizontal.

Le malaxage de notre béton a été réalisé avec un malaxeur à axe vertical, constitué d'une cuve et de palettes centrales tournantes, d'une capacité de 65 litres (Figure III.2).



Figure .III.2 : Malaxeur à axe vertical

Certains paramètres ont été respectés au moment du malaxage pour que ce dernier soit efficace, comme l'ordre d'introduction des composants et le temps de malaxage qui doit être suffisant. Les constituants solides ont été, ainsi, introduits et bien malaxés en premier afin de constituer un squelette granulaire le plus compact possible. L'eau est par la suite introduite dans le mélange pour former le béton.

La capacité du malaxeur nous a contraint à confectionner l'ensemble des éprouvettes de cette expérience, à partir de trois gâchées selon la même formulation (Figure III.3).



Figure. III.3. Malaxage du béton.

III.3.1.2. Fabrication des éprouvettes :

III.3.1.2.1. Préparation des moules :

Des moules métalliques d'une hauteur de 30 cm et d'un diamètre de 15 cm ont été utilisés (figure.III.4). Ils possèdent deux faces latérales et une base qui sont assemblées à l'aide des vérins formant ainsi, des moules rigides et indéformables sous l'effet de la poussée du béton notamment lors de la vibration.

Les éléments de coffrage doivent tout d'abord être nettoyés pour éliminer tout ce qui peut constituer une source de salissures, ensuite rassemblés et posés soigneusement pour assurer leur étanchéité. L'absence d'étanchéité aux joints a pour effet de laisser passer l'eau ou la laitance du béton, ce qui provoque sur le parement des défauts d'aspect (hétérogénéité de texture et de teinte).



Figure III.4: Moules métalliques de dimensions ($\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$).

Les moules sont nettoyés afin d'éliminer toute trace de béton adhérent, l'application d'une huile sur les faces intérieures des coffrages est par la suite nécessaire. Ce produit de démoulage doit être appliqué de façon régulière sur toute la surface, sans défaut ni excès, ce qui permet d'éviter les arrachements du béton lors du décoffrage, d'absorber l'eau du béton au coulage, de faciliter l'entretien du coffrage, et de limiter l'oxydation et la corrosion des coffrages métalliques.

Cependant, ce produit de démoulage ne doit pas adhérer au béton après sa prise, ni le tacher ou l'altérer, afin de permettre l'application ultérieure de revêtements ou dans notre cas de collage des composites à la surface latérale sans nuire à leur adhérence.

III.3.1.2.2. Remplissage des moules :

Le béton est coulé dans les moules qui ont été remplis en compactant le béton à l'aide d'une tige métallique au fur et à mesure du remplissage. Ils ont subi, par la suite, une vibration sur une table vibrante pour une durée de 20 seconds environ avec une vitesse de $0,5 \mu\text{s}$. Le temps de vibration est un facteur important, puisque s'il est trop court, le béton serait insuffisamment serré et s'il est contrairement très long, il peut entraîner une ségrégation des constituants. Certains indices permettent d'apprécier le moment requis pour arrêter la vibration, tel que l'arrêt du dégagement d'air, la cessation de tassement du béton, et l'apparition de la laitance en surface.

Au début de la vibration les moules sont remplies jusqu'aux bords, la vibration contracte le béton et donc son volume diminue, cette diminution de volume est compensée en remplissant les éprouvettes au fur et à mesure de la vibration afin que le niveau de béton soit maintenu jusqu'aux bords supérieurs des éprouvettes, le béton qui se trouve au dessus de ces bords doit être retiré au moyen d'une truelle ou taloche, par un mouvement de sciage de l'extérieur vers l'intérieur (Figure III.5).



Figure. III.5. Compactage et vibration des éprouvettes.

Après vibration, l'arasement des surfaces des éprouvettes a été effectué à l'aide d'une truelle (Figure III.6) pour avoir une surface lisse et plane, cette étape est indispensable car la présence d'une surface convexe ou concave sur l'éprouvette provoque une répartition hétérogène des forces appliquées au cours de nos essais de compression et risque donc de minorer la résistance vraie du béton.



Figure. III.6. Arasement des surfaces des éprouvettes.

Les éprouvettes sont ensuite conservées dans un endroit humide pendant 24 heures avant leur démoulage.

III.3.1.2.3. Démoulage et conservation des éprouvettes :

Les cylindres ont été décoffrés 24 heures après leur coulage et ce avec soin pour ne pas épauférer les arêtes (Figure III.7).



Figure. III.7. Démoulage des éprouvettes.

Les éprouvettes en béton sont classiquement placées dans des conditions de conservation normalisées suivant la norme NF EN 12390-2. Ces conditions de référence sont :

- dans une chambre humide à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et d'humidité relative au moins égale à 95%
- ou dans l'eau à température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

En effet, une température de conservation supérieure aux conditions normalisées risque d'augmenter la résistance au jeune âge et, au contraire, de baisser la résistance à 28 jours. Une humidité insuffisante durant la conservation peut diminuer les résistances à l'écrasement.

Les éprouvettes qui doivent être surfacées peuvent être extraites de l'ambiance humide au plus 24 h avant l'essai, sous réserve d'être placées dans un milieu dont la température est comprise entre 15°C et 30°C .

Nos éprouvettes ont été donc déposées dans des bacs remplis d'eau (Figure. III.8) juste après le démoulage pour y subir une cure d'hydratation jusqu'au mûrissement du béton à 28 jours. Les éprouvettes devant être confinées avec le composites sont retirées de l'eau 24 heures avant, pour subir un traitement des surfaces.



Figure. III.8. Cure d'hydratation des éprouvettes en béton.

III.3.1.2.4. Surfaçage des éprouvettes avant écrasement :

Avant de procéder à l'essai de compression, puis au confinement, il est nécessaire de faire un surfaçage pour les deux faces de chaque cylindres afin d'assurer la répartition uniforme de la charge de compression au moment de l'écrasement, afin d'obtenir des surfaces planes et lisse.

Les surfaces latérales ont été nettoyées à l'aide d'une brosse métallique et autre papier verre, (figure III.9) 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 composites. Ce procédé permet l'obtention d'une très bonne adhérence entre celui-ci et le béton.



Figure. III.9 : traitement de la surface latérale du cylindre en béton.

III.3.2. Polymère renforcé avec des fibres de verre (PRFV) :

Le PRFV est obtenu en imprégnant les bandes de tissu de verre d'une résine époxy donnant ainsi un composite d'environ 2 mm d'épaisseur, qui sera appliqué en surfaces des cylindres en béton.

III.3.2.1. Tissu en fibres de verre :

Le tissu utilisé est à base de fibres de verre de couleur blanche, tissé de façon bidirectionnelle. Il se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. Il est formé par un ensemble de fils et de mèches, disposés en chaines (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaines) (Figure III.10).



Figure .III.10 : Tissu en fibres de verre

Il présente plusieurs avantages : une résistance élevée, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec la résine, une facilité de mise en œuvre, et un faible coût. Des bandes de 4cm de largeur sont découpées à partir de ce tissu pour qu'elles servent dans le confinement des cylindres en béton. Les caractéristiques élastiques du tissu de verre sont données dans le tableau III.3.

Tableau III.2 : Caractéristiques élastiques du tissu composite [75].

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

III.3.2.2. Résine :

La résine époxy destinée à imprégner le support à confiner est constituée de deux composants : une résine de couleur blanche et un durcisseur de couleur marron. La proportion en masse des composants est de 1/3 de la quantité pour le durcisseur et 2/3 pour la résine (durcisseur/ résine = 0,5) à mélanger au moment de l'utilisation.

Le malaxage est effectué en utilisant un agitateur mécanique à vitesse lente pendant 3 min pour éliminer toutes bulles d'air et obtenir, ainsi, un mélange homogène prêt à être appliqué sur le support en béton au moyen d'un pinceau.

La durée de vie de ce mélange dépend de la température du milieu de travail (Tableau .III.2).

Tableau .III.3. Duré de vie de la résine en fonction de la température

Température	+10°C	+20°C	+30°C
Durée d'utilisation	Environ 50 min	Environ 25min	Environ 15 min

Il est à noter que lors de l'utilisation de la résine, il est indispensable de se protéger en mettant des lunettes de protection et des gants nitriles.

III.4. Caractérisation des matériaux :

Afin de caractériser les matériaux utilisés, nous avons procédé à un essai de compression sur le béton qui nous a permis d'estimer la résistance caractéristique du béton ainsi qu'à un essai de traction sur le PRFV qui nous a permis quand à lui, d'estimer la résistance de celui-ci à la traction.

III.4.1. Essai de compression uniaxiale sur le béton :

Après traitement des surfaces les essais d'écrasement ont été effectués pour déterminer la résistance à la compression. Tous les spécimens cylindriques sont testés selon la norme ASTM C39/C39 M-03. L'essai est conduit sous un chargement quasi-statique avec une vitesse de 0,5 KN/m. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité 3000 KN de type ELE (Figure. III.11). Elle comporte deux plateaux, un plateau inférieur mobile et un plateau supérieur fixe.



Figure. III.11 : Presse hydraulique

L'essai illustré par la figure III.12 est conduit, jusqu'à la rupture, sur quatre éprouvettes afin de définir la résistance à la compression à 28 jours du béton utilisé. Tandis que les autres éprouvettes ont été testées à différents degrés d'endommagement relativement à cette résistance caractéristique. Ces mêmes éprouvettes étant destinées au confinement avec le PRFV.



Figure. III.12 : Epreuve soumise à la compression.

Les essais conduits sur le béton de référence ont donné les résultats consignés dans le tableau III.3.

Tableau III.4. Résultats du test de compression sur le béton.

Eprouvette	Contrainte à la compression (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)
N°1	22,11	21,18
N°2	20,22	
N°3	21,23	

III.4.2. Essai de traction sur le PRFV :

Afin de caractériser le PRFV, une série d'essai de traction est menée sur des éprouvettes rectangulaires selon les normes ISO 527-1, ISO 527-2 et ISO 527-5 recommandées par l'AFGC (2003), pour la caractérisation des matériaux composites stratifiés insitu utilisés pour la réparation des structures en béton.

La forme ainsi que les dimensions des éprouvettes sont illustrées par la figure III.13. Les talons sont constitués de stratifiés verre résine selon la norme EN ISO 527-1, pour éviter que la rupture ne se produise dans les mors de la machine d'essai.

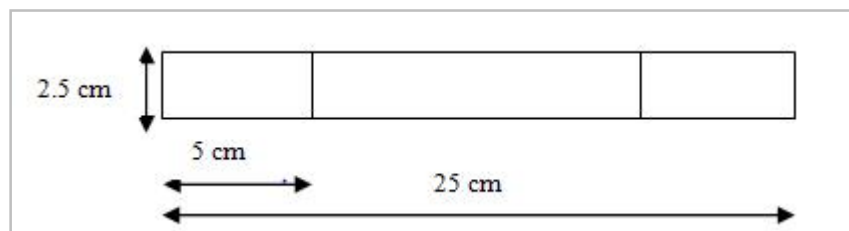


Figure III.13. Epreuve de PRFV.

La rupture des plaques composites, intervient lorsque la contrainte de traction atteint celle des fibres. La concentration des contraintes au voisinage de la rupture, produit un mode de rupture qui dépend principalement de la capacité portante des fibres et des propriétés de l'interface de contact. La figure III.14 reproduit les résultats du test de traction sur les éprouvettes en PRFV.

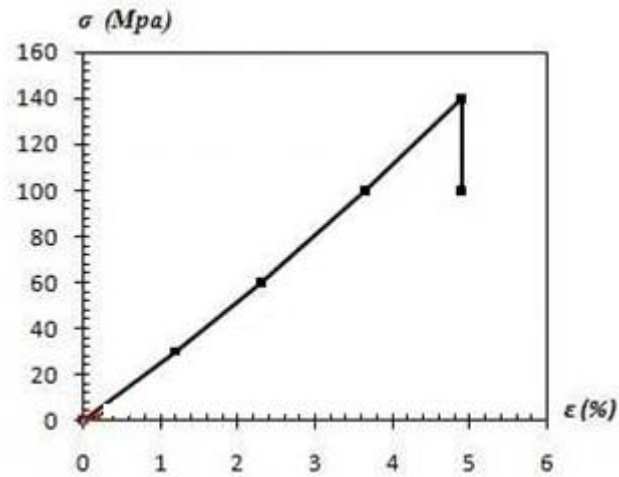


Figure III.14. Résultats de l'essai de traction sur le PRFV.

III.4.3. Essai d'auscultation dynamique :

Afin d'estimer les valeurs des module élastiques (E) des différents cylindres endommagés et non endommagés on a effectué des essais non destructifs (END) à l'aide d'un ultrason (Figure.III.14).

L'ultrason est un appareil d'auscultation sonore utilisé pour mesurer le temps de propagation et par conséquent la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers un matériau, il est constitué d'un testeur ultrasonique, une tête de transmission des ondes et une de réception (un transducteur émetteur et un transducteur récepteur), les câbles de connexion et un barreau de calibrage.

L'appareil génère des impulsions soniques transmises par un transducteur émetteur mis en contact avec la surface de l'élément à tester, le temps de propagation des ondes est visualisé sur un afficheur végétal.



Figure.III.15 : appareil d'auscultation sonore

L'essai est rapide et léger à mettre en œuvre, il permet d'effectuer des mesures sur le béton sans l'endommager, et aussi de refaire les essais au même endroit ce qui permet d'effectuer plusieurs répétitions pour une même éprouvette et donc s'assurer des résultats obtenus.

Les mesures sont effectuées par transmission directe, l'ultrason est lié à un ordinateur qui permet d'enregistrer plusieurs les données sur le béton testé tel que la vitesse de propagation des ondes, le temps mis par une onde, et la distance parcourue.



Figure. III.16 : auscultation dynamique sur une éprouvette cylindrique



Figure. III.17 : Enregistrement des mesures de l'ultrason sur un ordinateur

La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs, on a donc appliqué un gel aux endroits de l'auscultation avant de poser les transducteurs sur les faces des éprouvettes à tester.

La vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques à travers le béton est utilisée pour la détermination de module élastique du béton à l'aide des formules mathématiques.

$$V^2 = \frac{E_d (1-\nu)}{\rho (1-\nu)\nu}$$

Avec :

E_d : module d'élasticité dynamique du béton

ρ : est la masse volumique du béton

ν : est le coefficient de poisson

III.5. Confinement externe avec le tissu en verre :

III.5.1. Description des spécimens :

Le programme expérimental se compose d'un total de 15 éprouvettes de dimensions ($\varnothing 150$ mm x 300 mm), endommagées puis confinées à l'aide de bandes en fibres de verre ayant une largeur de 4 cm et une longueur totale de 191 cm.

Les spécimens ont été endommagés à différents pourcentages de la charge de rupture. Trois répétitions pour chaque degré d'endommagement ont été considérées.

Pour déterminer la charge à la rupture du béton, 3 cylindres ont été endommagés jusqu'à la rupture (100% endommagés), tandis que les autres cylindres ont été endommagés jusqu'à l'atteinte des degrés d'endommagement souhaités, soient 0%, 25%, 50% et 75 % de cette même charge de rupture.

Après l'endommagement, une réparation des surfaces des cylindres a été effectuée. Les fissures superficielles ont été colmatées à l'aide d'un mortier (ciment+eau) de même dosage que le ciment du béton de référence. Les spécimens ont été par la suite confinés avec une seule couche de tissu de verre sous forme de bandes hélicoïdales imprégnées d'une résine époxy. Les bandes composites forment des hélices de sens contraires (l'une dextre et l'autre sénestre). Deux bandes d'une largeur de 2cm ont été collées en tête et en bas de chaque cylindre afin 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.

Les cylindres confinés ont été soumis à des essais de compression uniaxiale réalisés à l'aide d'une presse hydraulique machine, la campagne d'essai a été menée 15 jours après le confinement, la durée nécessaire au durcissement de la résine.

Un système d'identification des éprouvettes a été mis en place. Les cylindres confinés sont désignés par : CCn, où C réfère à Cylindre, C à Confiné et n au pourcentage d'endommagement. A titre d'exemple, CC75 est la référence du cylindre confiné endommagé à 75% de la charge de rupture. Par ailleurs, le cylindre de béton non confiné est désigné par : CBO.

La description des différents spécimens est donnée dans le tableau III.5.

Tableau .III.5. Description des spécimens

Désignation	Degré d'endommagement(%)	Nombre de répétitions	Nombre de tours du composite	Largeur du composite
CC100	100	3	4	4
CC75	75	3	4	4
CC50	50	3	4	4
CC25	25	3	4	4
CC0	0	3	4	4

III.5.2. Préparation des bandes de tissu de verre :

Le tissu de verre est découpé en bandes de largeur 4 cm (figure. III.15), et dont la longueur a été calculée à partir de la formule (III.1).

$$L=n\sqrt{S^2 + 4\pi^2 R^2} \quad (III.1)$$

Avec :

L : Longueur de la bande

S : Pas de l'hélice

R : Rayon du cylindre

n : Nombre de tour de l'hélice

Le calcul étant fait pour un cylindre de dimension Ø150mm×300mm, confiné avec des bandes hélicoïdales à 4 spires, ayant une largeur de 4cm. Dans notre cas : S=7,5 cm, R=7,5 cm, n=4 ce qui implique que la longueur de la bandes est :

$$L=4\sqrt{7,5^2 + 4 \times (3,14)^2 \times 7,5^2}=191 \text{ cm}$$



Figure. III.18. Bandes en tissu de verre

III.5.3. Préparation de la résine :

L'adhésif qui assure l'assemblage bandes composites/support béton est formé en malaxant deux composants, à savoir, à savoir : la résine organique (A) à performances élevées, de type époxyde, et son durcisseur (B) (Figure. III.19) dans une proportion de 1/3, tous deux fabriqués par Granitex Algérie.

Le malaxage se fait par petites quantités et à faible vitesse pour empêcher l'inclusion de l'air dans le mélange, tout en tenant compte des recommandations du fabricant quand aux conditions de température et d'humidité.



Figure. III.19: Résine de couleur blanche et durcisseur de couleur marron

La résine est ensuite appliquée sur les bandes à l'aide d'un pinceau, elles sont posées en circonférences des cylindres en béton (Figure. III.20).



Figure. III.20 : application de la résine sur le composite.

III.5.4 Collage du composite sur les surfaces latérales des cylindres :

Le confinement des cylindres est partiel, il est effectué au moyen de deux bandes de PRFV pour chaque cylindre. Elles sont posées de façon à former deux hélices en circonférences du cylindre : l'une dextre et l'autre senestre. Le pas de l'hélice correspond au rapport de la hauteur du cylindre au nombre de tours que forme l'hélice autour du cylindre. La hauteur du cylindre étant de 30cm, et l'hélice formant 4 tours, le pas de l'hélice dans notre cas est donc 7,5cm (Figure. III.21).



Figure. III.21 : Collage de composite sur la face externe du cylindre.

Les deux hélices se croisent ainsi en plusieurs points le long du cylindre (Figure III.22).



Figure. III.22 : Cylindres confinés avec des bandes hélicoïdales de PRFV.

III.5.5. Ecrasement des cylindres après confinement :

Les cylindres confinés sont soumis à la compression uniaxiale comme le montre la figure III.23. L'écrasement a été effectué après une quinzaine de jours de la date de confinement, temps nécessaire pour le durcissement de la résine.

Tous les cylindres ont été endommagés jusqu'à la rupture afin de déterminer les nouvelles résistances et l'influence du confinement hélicoïdal sur le degré d'endommagement.



Figure. III.23 : Eprouvette confinée soumise à la compression uniaxiale.

III.5. Conclusion du chapitre :

Dans cette partie, nous avons exposé le matériel et la méthode utilisés pour le type de confinement adopté dans cette étude, à savoir le confinement des cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales de PRFV.

La campagne expérimentale a été exposée, en commençant par la description des matériaux utilisés, ainsi que leurs compositions. Le mode de confinement y est bien décrit, en mettant l'accent sur les différentes étapes du confinement, allant de la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention d'éprouvettes confinées avec des bandes hélicoïdales de PRFV prêtes à être soumises à un essai de compression dont la procédure est également détaillée dans ce chapitre, en vue d'étudier l'effet de ce type de confinement sur le degré d'endommagement des cylindres en béton. Les résultats des différents essais de compression font l'objet du chapitre suivant. Au collage du tissu et réalisation des essais d'écrasement nécessaires.

CHAPITRE IV:

RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction :

Après avoir réalisé tous les essais nécessaires pour la technique de confinement en question, dans cette partie on exposera tous les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations, ce qui nous permettra d'évaluer l'efficacité de ce modèle de confinement pour chaque pourcentage d'endommagement.

Autrement dit, on va évaluer l'efficacité de ce confinement sur la variable d'endommagement, nommée D qui est fonction du module d'élasticité du béton non endommagé et celui du béton endommagé non confiné.

IV.2. Résultats expérimentaux de l'essai à ultrason :

L'essai ultrasonique sur les éprouvettes endommagées en béton avant le confinement a permis d'enregistrer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (V) à travers les cylindres, vitesse qui traduit l'arrangement des grains et la présence des vides à l'intérieur du béton. Les résultats obtenus pour le béton non endommagé sont donnés dans le tableau IV.1, tandis que ceux obtenus pour les différents degrés d'endommagement sont donnés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.1 : Vitesse de propagation des ondes à travers les cylindres en béton non endommagé

Code de l'éprouvette	Vitesse (m/s)	Vitesse Moyenne (m/s)
CBO-1-1	2703	4221,44444
CB0-1-2	2817	
CBO-1-3	3942	
CBO-2-1	3521	
CBO-2-2	3576	
CBO-2-3	3359	
CBO-3-1	3783	
CBO-3-2	3764	
CBO-3-3	3812	

Tableau IV.2 : Vitesse de propagation des ondes à travers les cylindres en béton pour différents degrés d'endommagement.

Code de l'éprouvette	Vitesse (m/s)	Vitesse Moyenne (m/s)	Code de l'éprouvette	Vitesse (m/s)	Vitesse Moyenne (m/s)
C25-1-1	4032	4002 ,33333	C75-1-1	3961	3673,66667
C25-1-2	3942		C75-1-2	3841	
C25-1-3	4021		C75-1-3	3055	
C25-2-1	4115		C75-2-1	3927	
C25-2-2	4021		C75-2-2	3935	
C25-2-3	4016		C75-2-3	3963	
C25-3-1	3968		C75-3-1	3488	
C25-3-2	3927		C75-3-2	3534	
C25-3-3	3979		C75-3-3	3359	

C50-1-1	4060	3845,33333	C100-1-1	3968	3475,22222
C50-1-2	3968		C100-1-2	3953	
C50-1-3	4115		C100-1-3	3961	
C50-2-1	4027		C100-2-1	3942	
C50-2-2	3942		C100-2-2	3841	
C50-2-3	4021		C100-2-3	9316	
C50-3-1	3979		C100-3-1	2655	
C50-3-2	2655		C100-3-2	2530	
C50-3-3	3841		C100-3-3	3827	

La courbe de la figure III.1, montre que la vitesse de propagation des ondes est inversement proportionnelle au degré d'endommagement du béton, ce là est expliqué par le faite que le béton est déjà endommagé et plus l'endommagement est important plus la résistance du béton diminue donc la vitesse de propagation des ondes sera faible.

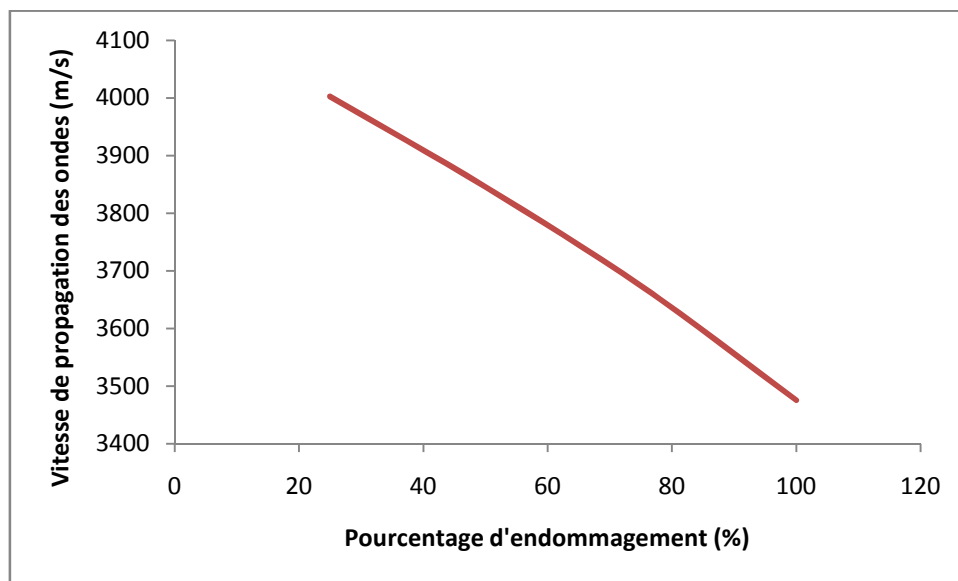


Figure. IV.1 : Courbe des vitesses en fonction du degré d'endommagement.

Cette vitesse nous permet de déterminer le module de Young de chaque éprouvette, ce qui conduit au calcul de la variable d'endommagement D, traduit le degré d'endommagement des spécimens.

VI. 3. Variable d'endommagement D :

La mécanique de l'endommagement est une théorie qui décrit la réduction progressive des propriétés mécaniques des matériaux en raison de la croissance des fissures microscopiques à l'intérieur de ces mêmes matériaux. L'estimation de l'endommagement est initialement introduite par Kachanov en 1958, par la notion de contraintes effectives :

Soit S la surface d'un élément de volume, n est la normal à cette surface, S_D la surface endommagée et $\tilde{S}$ désigne la surface résistante effective ($\tilde{S} < S$) on a donc :

$$\tilde{S} = S - S_D$$

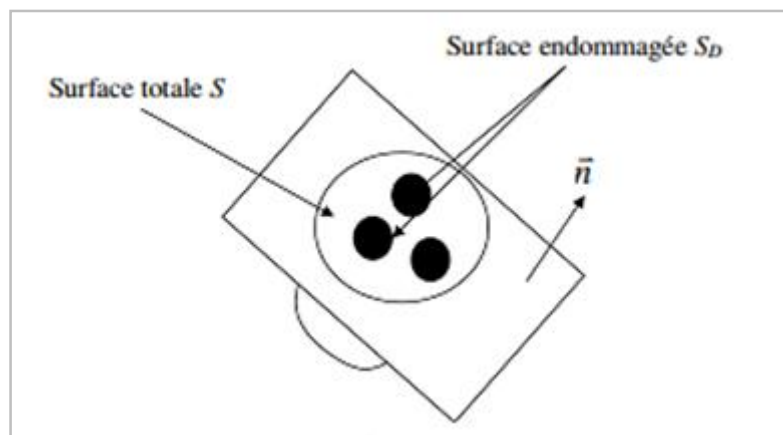


Figure. IV.2 : Endommagement uniaxial selon Kachanov (Comby Peyrot 2006).

La variable d'endommagement D est donc donnée par la formule suivante :

$$D_n = \frac{S_D}{S} = \frac{S - \tilde{S}}{S}$$

Avec $D_n = D$ dans le cas d'un endommagement isotrope.

Mazars a ensuite appliqué ce concept en définissant cette variable en fonction des modules élastiques du béton à l'état initial et après endommagement tel que :

$$\triangleright D = 1 - \frac{E' \epsilon}{E_c} \quad \text{Avec : } 0 \leq D \leq 1$$

Le module d'élasticité longitudinal est fonction de la vitesse de propagation de l'onde dans le béton, ainsi que de la masse volumique de celui-ci, tel que :

$$\rightarrow E = \frac{V_L^2 \rho (1-\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

$$\rightarrow \rho = 1.67 + 0.155V$$

Avec :

- ρ : Masse volumique.
- ν : Coefficient de poisson du béton.
- V : vitesse de propagation de l'onde.
- E'_c : Module du béton endommagé non confiné
- E_c : Module du béton non endommagé non confiné.

Les résultats obtenus pour les différentes éprouvettes testées sont représentés dans le tableau. IV.3.

Tableau.VI.3 : Variable d'endommagement D des éprouvettes cylindriques.

Pourcentage d'endommagement (%)	V (m/s)	ρ	E_c (Pa)	E'_c (Pa)	E'_c/E_c	D
0	4221,4	655,99	467608009	4676080094	1	0
25	4002,3	622,03	467608009	3985648514	0,852	0,14
50	3845,3	597,69	467608009	3535157841	0,756	0,24
75	3673,6	571,08	467608009	3082923697	0,659	0,34
100	3475,2	540,32	467608009	2610260108	0,558	0,44

Les différentes valeurs calculées pour D, sont des scalaires compris entre 0 et 1. La valeur 0 correspondant à un béton sain (non endommagé), dans ce cas $E'_c = E_c$, le module élastique du béton à l'état initial.

Pour le béton endommagé on remarque que cette variable traduit le degré d'endommagement du matériau béton ; c'est-à-dire que D augmente à chaque fois que l'endommagement dans le béton est important ce qui est vrai puisque le module du béton qui est fonction de la vitesse de propagation des ondes à travers le béton diminue au fur et à mesure que l'endommagement augmente.

VI. 4. Résultats de l'essai de compression uniaxiale :

La rupture du béton soumis à la compression uniaxiale résulte de l'ouverture des microfissures au fur et à mesure de l'augmentation du chargement ; ces fissures se propagent et provoquent ainsi la rupture du béton.

Pour limiter la propagation de ces fissures nous avons procédé au confinement du béton pour augmenter sa résistance à la compression. La pression de confinement exercée sur le béton limite les déformations radiales et donc, empêche la fissuration.

Les résultats obtenus pour l'essai de compression uniaxiale sur les cylindres initialement endommagés et sur les cylindres du béton de référence sont présentés dans le tableau. IV.4.

Tableau. VI.4 : Résultats des essais de compression uniaxiale.

Béton Témoin					
Numéro de l'éprouvette		F	σ	σ_{moy}	Ecart type
1		396,1	22,11	21,18	0,94574486
2		357,2	20,22		
3		387,3	21,23		
Béton confiné					
Valeur de D	Numéro de l'éprouvette	F (KN)	σ (MPa)	σ_{moy} (MPa)	Ecart type
0	1	542 ,4	29,73	29,36	0,37
	2	525,8	28,99		
	3	538,9	29,36		
0,14	1	490,7	28,05	28,29	0,24
	2	504,3	28,53		
	3	501,4	28,29		
0,24	1	479,2	27,61	26,73	0,88
	2	459,5	25,85		
	3	465, 3	26,73		
0,34	1	429,1	24,28	25,09	

	2	504	25,26		0,73979727
	3	406,4	25,73		
	1	431,6	24,03		
0,44	2	391,1	22,13	23,08	0,95001754
	3	410,2	23,09		

Les résultats sont ensuite représentés par un histogramme qui met en évidence l'effet du degré d'endommagement sur la résistance du béton (Figure.VI.3)

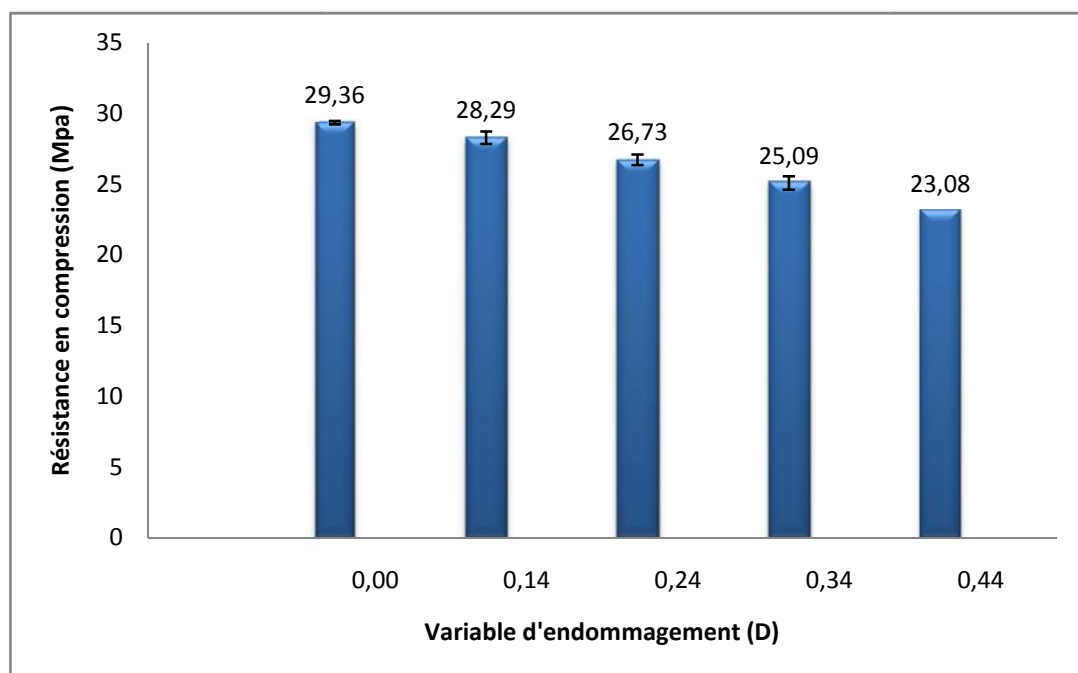


Figure. VI.3 : Résistance à la compression en fonction du degré d'endommagement.

La résistance en compression des cylindres après confinement est inversement proportionnelle au degré d'endommagement initial, la résistance minimale obtenue est celle du béton endommagé à 100%, elle est de 23,08MPa.

VI. 5. Gains en résistances après confinement :

Pour évaluer l'efficacité de ce confinement sur le degré d'endommagement, nous avons pensé à quantifier les gains en comparant les résistances obtenues pour le béton

confiné avec celles du béton de référence qui est un béton non confiné. Les gains évalués pour les différents cylindres sont mentionnés dans le tableau IV.5.

Tableau. VI.5 : Effet de confinement sur les cylindres endommagés.

D=0,44	
Différence	1,9(MPa)
Gain	8,97%
D=0,34	
Différence	3,91(MPa)
Gain	18,46%
D=24	
Différence	5,55(MPa)
Gain	26,20%
D=0,14	
Différence	7,11(MPa)
Gain	33,57%
D=0	
Différence	8,18(MPa)
Gain	38,62%

Ces résultats sont représentés par l'histogramme de la figure IV.4, qui illustre le gain en résistance pour chaque valeur de D.

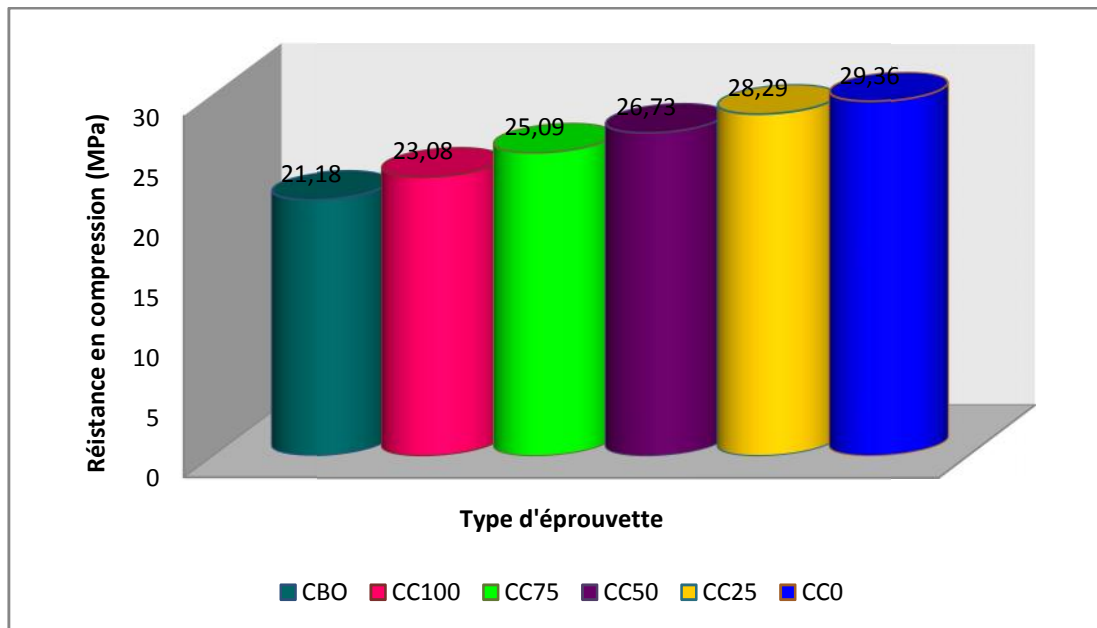


Figure. IV.4 : Histogramme illustre le gain de résistance par confinement.

Les résultats obtenus montrent que le confinement des cylindres par des bandes hélicoïdales PRFV, est efficace quelque soit l'endommagement initial du béton, les résistances après confinement sont entre 23MPa et 29 MPa, le béton de référence possède une résistance de 21MPa, l'augmentation considérable de la résistance est dû à la mobilisation de la pression de confinement exercée par le PRF qui a empêchée la propagation des fissure et donc la rupture du béton, ce qui a restitué au moins la résistance initiale du béton.

Pour le béton totalement endommagé le gain en résistance est de 8%, cette augmentation est de plus en plus importante que les cylindres sont moins endommagés. Elle atteint à titre indicatif, la valeur de 33.57 % pour un cylindre endommagé à 25% de la charge de rupture. Pour les cylindres non endommagés le confinement a donné un gain de résistance qui a atteint une valeur de 38%. Cela laisse penser que le modèle de confinement étudié est bénéfique en matière de résistance à la compression, une conclusion qui peut être vérifiée par une analyse statistique des résultats obtenus.

IV.6. Traitement statistique des résultats expérimentaux :

Cette partie comporte deux analyses statistiques, à savoir une analyse de la variance (ANOVA) et une régression linéaire. La première a été réalisée dans le but de confirmer

l'effet du confinement hélicoïdal sur le degré d'endommagement du béton. La deuxième a été réalisée afin d'établir une relation linéaire entre ces deux mêmes variables.

IV.6.1. Analyse de la Variance (ANOVA) :

Elle a pour principe de tester l'effet d'un facteur qualitatif sur une variable quantitative mesurée au sein de l'échantillon étudié. La variable quantitative mesurée étant la résistance à la compression, où nous avons considéré trois répétitions de la mesure, tant dis que le facteur contrôlé est le degré d'endommagement, qui présente 5 modalités.

Cette analyse a été conduite sous le logiciel R et les résultats obtenus sont donnés dans la table de l'ANOVA (Tableau IV.6) qui résume l'ensemble des calculs du programme de cette analyse.

Tableau IV.6. Table de l'ANOVA

Analysis of Variance Table						
Response: résistance						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
endommagement	4	75.293	18.8233	38.911	4.569e-06	***
Residuals	10	4.837	0.4837			

Signif. codes:	0	'***'	0.001	'**'	0.01	'*'
					0.05	'.'
					0.1	' '
						1

Les résultats révèlent une différence très hautement significative entre les différents degrés d'endommagement, puisque le logiciel donne une p-value égale à $4.569 \cdot 10^{-6}$ qui est largement inférieur au risque d'erreur fixé par les statisticiens à des valeurs qui n'excèdent pas 5%. Ceci permet de rejeter l'hypothèse testée qui stipule que le facteur degré d'endommagement n'a pas d'effet sur la résistance à la compression. Au final, nous pouvons affirmer que le degré d'endommagement a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

IV.6.2. Régression linéaire

Elle a pour but d'établir une relation linéaire qui se traduit par l'équation d'une droite qui relie le degré d'endommagement à la résistance en compression du béton confiné. Cette droite peut servir de modèle prédictif, puisqu'elle nous permet d'estimer la résistance pour n'importe quel degré d'endommagement.

L'analyse est conduite également sous le logiciel R, qui donne les résultats consignés dans le tableau III.7.

Tableau III.7. Résultats de la régression linéaire.

```
Call:
lm(formula = résistance ~ D)

Residuals:
    1      2      3      4      5 
-0.4931  0.4543  0.3353  0.1363 -0.4327 

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  29.8531     0.4107   72.696 5.74e-06 ***
D            -14.4100     1.4772   -9.755  0.00229 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5059 on 3 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9694,    Adjusted R-squared:  0.9592 
F-statistic: 95.16 on 1 and 3 DF,  p-value: 0.002289
```

La lecture de ce tableau permet de tirer plusieurs conclusions, à savoir l'équation de la droite qui est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = -14.41 D + 29.85$$

Ajouter à cela, un coefficient de détermination $R^2=0.95$ qui est très proche de 1 avec une p-value= 0.0022, ce qui veut dire que le résultat est significatif. Ceci renseigne sur la bonne qualité du lien linéaire établi.

VI. 7. Mode de rupture des éprouvettes cylindriques :

A cause du comportement fragile des matériaux composites l'enveloppe de PRFV cède et produit la rupture des spécimens, cette rupture est brutale précédée par des craquements du PRFV.

Toutes les éprouvettes confinées par le PRFV ont cédé par le même mode de rupture, une rupture par dilatation radiale du béton qui cause une rupture en traction des fibres. (Figure.VI.5).



Figure. VI.5 : Mode de rupture des éprouvettes confinées avec un PRFV

Nous remarquons qu'avec l'augmentation du chargement, se développe la fissuration dans le sens longitudinal du cylindre et parfois elle se propage suivant des lignes brisées sur la hauteur de l'éprouvette. Ce mode de rupture est dû à la nature bidirectionnelle du tissu en fibres de verre utilisé vu que fibres des chaînes sont supportées par les fibres des trames, ce qui les rendent solidaires les uns des autres. Ceci a pour effet de redistribuer les contraintes sur toute la hauteur du cylindre. Les fissures se propagent, le plus souvent, sur une longueur de 100 mm à 150 mm de la hauteur du cylindre et dans le cas d'un fort chargement, l'enveloppe se déchire sur presque la totalité de la hauteur. La rupture est traduite par le déchirement de l'enveloppe composite dans le sens du chargement. Nous avons remarqué également l'arrachement du béton qui reste collé aux bandes détachées dans les zones de rupture, ce qui renseigne sur la bonne adhérence PRFV-béton.

VI.8. Conclusion du chapitre :

Le confinement externe par bandes hélicoïdales de PRFV augmente la résistance en compression des cylindres confinés endommagés à différents degrés de la charge de rupture du béton. En effet des gains de résistance allant jusqu'à 38% ont été enregistrés. Un gain de résistance de 8% est par ailleurs enregistré pour les cylindres totalement endommagés.

Le traitement statistique des données a révélé un effet significatif du degré d'endommagement sur la résistance à la compression du béton confiné. La méthode de la régression linéaire utilisée a permis d'établir une relation qui relie la variable d'endommagement du béton (D) à la résistance après confinement par composites en donnant une fonction linéaire qui permet d'estimer la résistance d'un béton endommagé confiné pour n'importe quelle valeur de l'endommagement.

On peut aussi conclure que le confinement avec des bandes hélicoïdales de PRFV présente une bonne solution pour la réparation ou le renforcement des bétons endommagés en vue de l'amélioration de la capacité portante des éléments.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion général :

L'Algérie a hérité d'un patrimoine architectural et urbain qui date de la période coloniale 19^{ème} et 20^{ème} siècle, cette tranche de patrimoine riche et diversifier elle occupe une place importante dans le parc national du logement et se trouve actuellement dans un état de dégradation très avancé menace l'hygiène, le confort et la sécurité de ses occupants. Vue cet état vétuste dans lequel se trouve ces ouvrages, des interventions urgentes telles que des opérations de réhabilitation sont nécessaires afin d'améliorer en premier lieu les conditions de vie des occupants et enfin assurer sa pérennité dans le temps pour le transmettre aux générations futures.

La meilleure façon de résoudre ces problèmes de réhabilitation est d'améliorer les techniques de renforcement et de réparations. Les polymères renforcés de fibres présentent de nombreux avantages puisqu'ils affichent un rapport résistance-poids très élevé et ne corrodent pas, ainsi l'utilisation de ces matériaux est sûrement le meilleur choix pour des structures plus rigides, capables de reprendre plus de charges. Ces nouveaux matériaux qui présentent des caractéristiques mécaniques élevées, permettent d'opter pour des structures réparées et renforcées au lieu de les démolir et de reconstruire. La réparation par les techniques de collage de tissus composites légers et faciles à maitre en œuvre, est de plus en plus répandue.

La technique de renforcement étudiée dans le cadre de cette étude consiste à utiliser des lamelles de tissu de verre collées en surface latérale de cylindres en béton, selon une trajectoire hélicoïdale, sans appliquer une tension initiale au moment d l'installation.

Les gains de résistance en compression du béton sont évalués et analysés en fonction du rapport de renforcement qui est le rapport de la surface des fibres et le degré d'endommagement des colonnes en béton.

L'objectif de ces travaux était d'évaluer l'influence du degré d'endommagement du béton sur l'efficacité de la technique de confinement étudiée. Le programme expérimental a porté sur le confinement des cylindres en béton non armés après l'endommagement de ces derniers ; 15 éprouvettes cylindriques de dimensions (15×30) cm ont été confectionnées, 3 spécimens ont été endommagés jusqu'à la rupture, les autres spécimens ont été endommagés à

25%, 50% et 75% de la charge de rupture, tandis que les trois derniers, n'ont été ni endommagés, ni confinés mais gardés comme cylindres de référence. Le confinement par une seule couche de PRFV est ensuite appliqué pour tous les cylindres qui ont été soumis finalement à l'essai de compression uniaxiale pour déterminer les nouvelles résistances.

Le mode de rupture observé pour toutes les éprouvettes confinées était le même ; une fissuration au niveau du PRF due à la dilatation radiale du béton ainsi qu'au décollement de la plaque composite. Les résultats obtenus ont montré que le confinement avec les PRFV est très efficace pour tous les spécimens quelque soit leur degré d'endommagement initial.

Une amélioration considérable de la résistance a été remarquée pour tous les cylindres, la valeur moyenne de la résistance en compression du béton non confiné étant de 21,18MPa, par conséquent cette résistance a été améliorée après le confinement avec le PRFV d'environ 38%. Un gain en résistance allant jusqu'à 8% pour le béton endommagé à 100% de la charge de rupture. Nous avons, par ailleurs, enregistré une augmentation plus importante de la résistance pour les cylindres moins endommagés (environ 18% pour le béton endommagé à 25%, 26% pour celui endommagé à 50%, et 33% pour le béton endommagé à 75%).

L'analyse statistique, basée sur la méthode de la régression linéaire en utilisant le logiciel R a permis d'établir une fonction linéaire liant la résistance d'un béton endommagé confiné et la variable d'endommagement D, ce qui permet d'estimer la résistance d'un tel béton pour n'importe quel degré d'endommagement. L'ANOVA a également permis de mettre en évidence l'effet significatif sur la résistance en compression.

Enfin, le type de confinement des cylindres en utilisant des matériaux composites de type PRF étudié dans ce mémoire demeure un sujet d'un intérêt particulier, vu qu'il tient compte de l'endommagement initial du béton, et d'un point de vue amélioration de la résistance cette technique a montrée une efficacité considérable.

Perspectives :

En perspectives, nous considérons que cette technique de confinement partielle par lamelles hélicoïdales en PRFV sur un béton endommagé peut être améliorée pour obtenir des résultats plus importants et rendre le travail plus utile.

Il serait utile donc de prévoir un travail complémentaire qui traitera de la durabilité et la résistance aux agressions chimiques de ces enveloppes composites qui est un paramètre essentiel pour la validation de cette technique.

Notre étude a été réalisée en utilisant une seule couche de composite en PRFV en bandes de largeur 4cm et de longueur 192 cm, pour les prochaines recherches il serait intéressant d'effectuer les mêmes essais en utilisant plusieurs couches du composite pour améliorer encore plus les résistances et aussi varier la longueur et la largeur des lamelles du PRF.

On pourrait penser aussi à tester les éprouvettes renforcées par ce confinement en flexion et en cisaillement pour voir leurs comportements sous ces sollicitations. On pourrait tester d'autres tissus pour le même modèle de confinement et comparer les résultats, ainsi on peut remplacer le tissu de verre par d'autres tissus moins coûteux et présentant des caractéristiques mécaniques plus élevées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abdelhakim BEDDIAR, Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites.
- [2] Abderrezak Gharbi, Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage en utilisant des capteurs piézo –électriques, Constantine: 2005
- [3] Ali Ahmed C. « Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, de structures endommagées : techniques-expérimentation et modélisation ». thèse de doctorat, 2016.
- [4] Belkacem Hachemane, Boudjema Bezzazi, Comportement en fatigue de matériaux composites, Manuscrit auteur, publié dans "JNC 16, Toulouse : France (2009)
- [5] Berthelot J-M, Matériaux composites, comportement mécanique et analyses des structures, 2^{ème} Edition, Masson, Paris, 1996, ISBN: 2-225-85425 4.
- [6] C. FARAHMANDPOUR, S. DARTOIS, M. QUIERTANT, Y. BERTHAUD, H. DUMONTET, Modélisation numérique du comportement du béton confiné par polymères renforcés de fibres, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [7] Collège de la Comté 63270 Vic-le-Comte, Les plastiques en débats, 2^o3, 2012
- [8] FABEM GUIDES STRRES, Béton et maçonnerie, Traitements des fissures, FABEM 3 - Version 2, Novembre 2013.
- [9] F. Laurin. ONERA29 avenue de la division leclerc, 92322 Châtillon Cedex. Téléphone : 01 46 73 46 92, Télécopie : 01 46 73 41 42, Introduction générale sur les matériaux composites,laurin@onera.fr,
- [10] F.Medja, Chapitre I, généralités sur les polymères, université Biskra 2014

Références bibliographiques

- [11] G. Hivet, Modélisation mésoscopique pour le comportement bi-axial et la mise en forme des renforts de composites tissés, Thèse de doctorat LMSP, Orléans : Université d'Orléans, 2003, 146 p.
- [12] HADDADI Manel, Étude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère, 2010/2011.
- [13] Hany TOBBI, Comportement en compression de colonnes en béton renforcées d'armatures en prf.
- [14] Hicham BELHANNACHI, Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé, Juillet 2009
- [15] ISIS Canada, (2006) – ISIS Educational Module 4: An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures, www.isiscanada.com
- [16] Jamal Eddine ARBAOUI, Étude comparative et caractérisations mécanique des structures sandwichs multicouche, Octobre 2009
- [17] Jean-Marie Berthelot, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 4^{ème} édition, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, LONDRES-PARIS-NEW YORK.
- [18] J.M.BERTHELOT, Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4^{ème} édition, 2002.
- [19] Julien.caulier.free.fr/images/doc_tech/FdV_tech.pdf
- [20] Laurent Gornet, Généralités sur les Matériaux Composites, cel-00470296, version 2 - 19 Mai 2011.
- [21] Madi R., Guenfoud M., Étude de la vulnérabilité des constructions vis- à -vis du séisme. Revue Technologie et développement, ANDRU, Vol. 8, 2011.

Références bibliographiques

- [22] Madi R., Guenfoud M., Renforcement des poteaux en béton armé, Congrès Algérien de mécanique CAM2011, 14-17 Novembre 2011, Université 08 mai 45, Guelma, Algérie, 2011.
- [23] Madi Rafik, Guenfoud Mohamed, Renforcement des poteaux rectangulaires en béton armé par prf, 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26-30 août 2013, Laboratoire LGCH, Université 8 mai 45, B.P. 401, Guelma, Algérie.
- [24] Marc Blétry, Méthode de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007
- [25] Marc François, Module M227 Matériaux non métalliques, Crédit 1ECTS, Partie 3/3 Composites, <http://aupetitcolibri.free.fr>
- [26] Marc Marzano-Action Composite, Pascal Celle-GNFA, Dossier Pédagogique, Les matériaux composites, ANFA/Edition 2014.
- [27] MARIE-JOSÉE HOUDE, Modélisation de poutres en béton armé endommagées par chargements cycliques, Comportement en flexion et en cisaillement, Mars 2007.
- [28] Martin Lévesque ; mémoire de maîtrise, L'essai de traction de matériaux composites unidirectionnels à fibres continue, Décembre 2000
- [29] Merdas Abde-ELGHANI, Utilisation du tfc dans la réparation et le renforcement des poutres en BA, Février 2005.
- [30] Métier à tisser, http://hanen-jedda.franceserv.com/chapter4/ch4_p1.htm, s. d.
Laurent Gornet, Généralités sur les Matériaux Composites, cel-00470296, version 2 - 19 Mai 2011.
- [31] Michel Le Blanc, ing. Confinement de colonnes de béton circulaires à l'aide de fibre de carbone, Montréal, Septembre 2000.
- [32] Mohcene BOUKHEZAR, Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites, Juillet 2009.

Références bibliographiques

- [33] MOUSSAOUI Boualem, Apport du confinement du béton sur le comportement des éléments de structure au flambement, Juin 2011.
- [34] NCHRP. 2004. NCHRP REPORT 514. "Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites". WASHINGTON, D.C: Transportation research board of the national academies, 2004.
- [35] Ould El Hacen Zein El Abidine, Renforcement du béton par les matériaux composites, Mai 2016.
- [36] Patrick Guiraud, Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton, Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2011.
- [37] Patrice HAMELIN, Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites, Université Lyon.
- [38] P. C. Chou, R. Croman, Journal of Composites Materials, testing and design, ASTM STP 674, pp 431-454, 1979.
- [39] Pierre ROCHETTE, Mémoire de maîtrise, Confinement de colonnes courtes en béton de section carrée ou rectangulaire avec des matériaux composites, Sherbrooke (Québec), CANADA, Janvier 1996.
- [40] Pongtorn PROMBUT, Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels, Septembre 2007.
- [41] Prof. Dr. KASSOUL Amar, Recueil des communications du 1^{er} Workshop sur le comportement non linéaire des structures en béton armé, Le 30 Septembre 2014
- [42] Prof. KASSOUL Amar, Matière : Vulnérabilité et Réhabilitation des Structures, CHPTRE III : Réhabilitations des constructions en béton armé.

Références bibliographiques

- [43] P. WEISS, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Support de Cours, La chimie des polymères, 2009-2010.
- [44] Raphaël CONTAMINE, Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textiles-mortier applications à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton arme vis-à-vis de l'effort tranchant, Décembre 2011.
- [45] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems," Polymer Engineering and Science, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [46] Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh, Contribution a l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton, Juillet 2013.
- [47] Rui Pedro Carreira, DECATHLON, Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs, Congrès RFIS, Juin 2005.
- [48] SAIDANI Kamel, Analyse de composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine, Juin 2014.
- [49] Salim TEKKOUK, Le calcul de haute performance appliqué à l'étude du comportement électromagnétique des structures en matériaux composites d'un avion, Avril 2014.
- [50] S. CHATAIGNER, A. GAGNON, M. QUIERTANT, K. BENZARTI, C. AUBAGNAC, IFSTTAR – Centre de Nantes – Route de Bouaye CS4 - 44 344 BOUGUENAIS Cedex, DL Autun – CETE de Lyon – Bd de l'Industrie BP 141 - 71 405 AUTUN Cedex, Université Paris Est – IFSTTAR – 58 Bd Lefebvre - 75 732 PARIS Cedex 15.
- [51] S-Laldji, Cours-ETS, Caractéristiques fondamentales du béton, hiver 2015.

[52] S. Soukane, M. Dahli, La Réhabilitation du patrimoine colonial 19ème 20ème dans le contexte du développement durable, Université de Tizi-Ouzou, Département d'architecture, Algérie.

[53] Stéfane LAVERGNE, mémoire de maîtrise, Étude expérimentale de poteaux en béton armé confiné par une enveloppe en matériaux composites, Sherbrooke (Québec), CANADA, Mai 1998.

[54] Toufik ACHOUR, Étude des techniques de réparation des structures composites endommagées, Année 2010/2011.

[55] Viacheslav Koval, Bruno Massicotte, Efficacité d'utilisation des matériaux composites pour le renforcement de poutres de ponts en béton précontraint endommagées, école polytechnique de Montréal, C.P. 6079. Succursale Centre-ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, 15^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Mai 2008.

[56] www.theses.ulaval.ca (Jodin, 1994)

[57] Wikipédia. Matériau composite, [en ligne]. <http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=4598>

[58] YAHIAOUI Lamia, Caractérisation d'un composite à la rupture a base des fibres végétales (Diss).

[59] ZAIDI Ali, Étude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement), Février 2014.