

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



UNIVERSITE MOULOU D 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^{elle} HADJADJ Taous

Thème :

Influence des paramètres constitutifs d'un béton sous l'efficacité d'un confinement

Devant le jury composé de:

Mr DAHMANI Lahlou	Professeur	U.M.M.Tizi-Ouzou	Président
M r KHELIL Nacim	Maître de conférences B	U.M.M.Tizi-Ouzou	Promoteur
M ^m BOUZBOUDJA Fatma	Maître de conférences B	U.M.M.Tizi-Ouzou	Examinatrice

Promotion 2018

Remerciements

Ce travail a été mené au sein du laboratoire de structures du département de génie civil, de la faculté de génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou.

Tout d'abord je remercie dieu tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté, pour en fin réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements et l'expression de ma vive gratitude à Mr KHELIL NACIM, Docteur à l'UMMTO, pour avoir proposé, dirigé et suivi constamment l'évolution de ce mémoire de Master.

Je tiens également à remercier **Mr OULD OUALI. M**, pour sa contribution et son soutien.

Je remercie tout particulièrement **Mr BOUHERRAOUA. R** pour son savoir et l'aide qu'il m'a fourni au cours de ce travail au niveau de laboratoire, ainsi que pour ses conseils.

Je voudrais également adresser mes remerciements à tous les membres du laboratoire, qui par leur participation directe ou indirecte m'ont permis de travailler efficacement.

Nous présentons nos sciences remerciements à tous nos enseignements de génie civil de l'université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, et surtout **Mr HANNACHI. N**

J'adresse mes vifs remerciements à mes amies SAM Melissa, BOUZID Katia, OUBRAHAM Naima avec lesquelles je me suis bien entendue, des excellentes amies qui m'ont accompagné durant toute la période des travaux au laboratoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à ma sœur KAHINA et son mari, de m'avoir aidé et de m'avoir conforté tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury : **Mr DAHAMANI. L** professeur à l'UMMTO, **M^M BOUZEBODJA. F** maître de conférences B à l'UMMTO pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de lire et de juger ce mémoire.

Dédicaces

Avec l'aide du tout Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

A mon très cher père,

Je voudrais partager ce succès avec lui, Que dieu le protège et le garde.

A ma très chère maman,

Que dieu la protège pour moi, je ne pourrai jamais la remercier assez
Pour ce qu'elle fait pour moi.

A mes frangins,

Qui sont très présents pour me soutenir

A mes chers amis.

Taous

Résumé

La méthode utilisée dans ce travail est une technique de renforcement par collage externe d'un renfort tissé sur la surface latérale de l'éprouvette, à l'aide d'une résine à base époxyde. Dans ce contexte, ce travail décrit le comportement mécanique en compression uni axiale des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations, certaines ont été confinées soit avec une enveloppe complète de tissu en fibre de verre (PRFV), soit avec une enveloppe de tissu en fibre de jute (BCRFJ). Les résultats de l'essai de compression obtenus après confinement ont montré l'effet malfaisant de ces enveloppes sur le comportement en compression uni axiale du béton pour certaines des éprouvettes testées, dès que les résistances du béton sont élevées, cette efficacité diminue, les fibres (verre, jute) ayant une résistance mécanique inférieure à un béton de bonne résistance, sous l'effet des poussées latérales du béton, ils se déforment de manière importante, étant donné qu'ils sont collés très fortement au béton, leur dilatation amplifie celle du béton, et créent un état de fissuration important, réduisant la résistance mécanique. Et pour les autres éprouvettes ayant de faibles résistances, les fibres résistent plus que le béton, les éprouvettes rompent certainement à la résistance maximale des fibres (jute et verre).

Mots Clés : Béton Ordinaire, Formulation, Prismatiques en béton, Confinement, Compression, Enveloppe en 'PRFV', Enveloppe en 'BCRFJ', Réhabilitation, Renforcement.

SOMMAIRE

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Sommaire	iv
Liste des Figures	ix
Liste des Tableaux	xiii
Liste des abréviations	xiv
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur matériau béton et son comportement mécanique et les différentes méthodes de renforcement des structures.

I. Introduction	04
I.2. Définition	04
I.2.1. Composition du béton	05
I.2.1.1. Malaxage du béton	05
I.2.1.2. Mise en œuvre dans le coffrage	06
I.2.1.3. Vibration du béton	06
I.2.2. Composants d'un béton	07
I.2.2.1. Le ciment	07
I.2.2.1.1. Les différents Types de ciment	08
I.2.2.1.2. Caractéristiques mécaniques de ciments	09
I.2.2.2. Les granulats	10
I.2.2.2.1. Dimension maximale des granulats D_{max}	11
I.2.2.3. L'eau de gâchage	12

I.2.2.4. Adjuvants	12
I.2.2.5. Additions minérales	13
I.2.3. Rôle des différents éléments constituant le béton	13
I.2.4. Résistance mécanique	13
I.2.5. Nécessité de la réhabilitation d'une structure	14
II. Méthodes de renforcement	15
II.1. Introduction	15
II.2. Méthodes de renfort	15
II.2.1. Réparation par béton projeté	16
II.2.2. Réparation par précontrainte additionnelle	17
II.2.3. Renforcement par chemisage en acier ou en béton armé	17
II.2.4. Renforcement par matériaux composites	19
II.2.4.1. Introduction	19
II.2.4.2. Méthodes de confinement	20
II.2.4.2.1. Stratification au contact	20
II.2.4.2.2. Enroulement filamentaire	21
II.2.4.2.3. Chemisage par coquille préfabriquées	22
II.2.4.3. Renforcement des éléments structuraux	22
a) Les poutres	22
b) Les poteaux	23
c) Les dalles	23
II.3. Comportement en compression du béton	24
II.3.1. Béton non confiné	24
II.3.2. Béton confiné	25
II.4. Revue des travaux antérieurs	26

Chapitre II : Matériaux composite

I. Introduction	30
II.1. Définition d'un matériau composite	30
II.2. Classification des matériaux composites	31
II.2.1. Classement suivant la nature des constituants	31
II.2.2. Classement suivant la morphologie	31
II.3. Constituants des matériaux composites	32
II.3.1. La matrice	33
II.3.1.1. Description de la matrice utilisée dans cette étude	35
II.3.2. Les charges	36
II.3.3. Les additifs	36
II.3.4. L'interface	37
II.3.5. Le renfort	37
II.3.5.1. Fibres synthétiques	39
a) Fibres de verre	39
b) Fibres de carbone	41
c) Fibres d'aramide	42
II.3.5.2. Fibres naturelles	42
II.3.5.2.1. Structure de la fibre végétale	44
II.3.5.2.1.1. Les différents constituants de la paroi végétale	45
a) Fibre de Jute	46
II.3.5.2.2. Utilisation des fibres végétales	49
II.3.5.3. Les différentes formes de renforcement	50

II.4. Application des matériaux composites	50
II.5. Mécanisme de déformations des polymères	51
II.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites	51
II.6.1. Les avantages	51
II.6.2. Les inconvénients	51
 Chapitre III : Programme expérimental	
III. Introduction	53
III.1. Programme des essais	53
PARTIE I : Elaboration des corps d'épreuve	54
III. Matériaux utilisés	54
III.1. Le ciment	54
III.1.1. Composition chimique et minéralogique	54
III.2. Les granulats	55
III.2.1. Essai sur les granulats.....	56
III.3. L'eau de gâchage	57
III.4. Béton	57
III.4.1. Composition du béton	57
III.4.2. Confection des éprouvettes	58
a) Malaxage du béton	59
b) Remplissage et conservation des moules	59
III.5. Matériaux composites	62
a) Tissu en fibre de verre	62
b) Tissu en fibre de jute	63
c) La résine	64

III.5.1. Mise en œuvre de composites	65
a) Préparation des enveloppes de tissu en fibre de jute et de tissu en fibre de verre	66
b) Préparation de la résine	67
c) Collage du composite sur les surfaces latérales des éprouvettes prismatiques	67
III.6. Ecrasement des éprouvettes prismatiques	68
Conclusion	70
Partie II : Résultats et discussions	71
III.1. Les Comparaison entre les propriétés mécaniques des différentes formulations	74
III.1.1. Résistances mécaniques	74
III.1.2. Déformations	75
III.2. Etude de l'effet du confinement	76
III.2.1. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de jute (BCRFJ)	76
III.2.1.1. Résistances mécaniques	76
III.2.1.2. Déformations	77
III.2.2. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de verre (PRFV)	78
III.2.2.1 Résistances mécaniques	78
III.2.2.2. Déformations	79
III.3. Etude comparative des matériaux composites à renfort tissés à base de fibres de verre et fibres de jute	80
III.3.1. Résistances mécaniques	80
III.3.2. Déformations	81
III.4. Mode de rupture	81
III.4.1. Mode de rupture du béton non confiné	81
III.4.2. Mode de rupture du béton confiné	82
Conclusion générale et perspectives	83
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85
ANNEXES	92

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur matériau béton et son comportement mécanique et les différentes méthodes de renforcement des structures.

Fig.I.1 : Pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	04
Fig.I.2 : Principe de représentation du béton en 2 matériaux	05
Fig.I.3 : Malaxeur utilisé lors de la confection du béton	06
Fig.I.4 : Moules utilisés dans la confection du béton	06
Fig.I.5 : Table vibrante	07
Fig.I.6 : Ciment utilisé dans la confection de béton	09
Fig.I.7 : Les différents agrégats constituent un béton	10
Fig.I.8 : Les différents diamètres des granulats utilisés dans les confections de béton	11
Fig.I.9 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment	12
Fig.I.10 : Renforcement au moyen d'un béton projeté	17
Fig.I.11 : Gaine de précontrainte additionnelle avec déviateur	17
Fig.I.12 : Chemisage en acier	18
Fig.I.13: Chemisage acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire	18
Fig.I.14 : Illustration renforcement par stratification au contact avec FRP carbone (SikaWrap)	21
Fig.I.15: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A, (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF»; (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» en spirale continue ; et (c) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'anneaux discrets	21
Fig.I.16: Confinement par enroulement filamentaire	22

Fig.I.17 : Chemisage par coquille préfabriquées	22
Fig.I.18: Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF	23
Fig.I.19: Poteaux en BA confinés par matériaux composites	23
Fig.I.20 : Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées	24
Fig.I.21: Comportement du béton en compression simple	25
Fig.I.22 : Courbes contraintes-déformations béton confiné.....	25
Fig.I.23: Section de béton effectivement confiné pour différentes géométries de colonnes confinées par enveloppe externe en PRF	27
Fig.I.24: Modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les colonnes de section rectangulaire	28

Chapitre II : Matériaux composite

Fig.II.1 : Matériau composite	30
Fig.II.2 : Classification des matériaux composites	32
Fig.II.3 : Constituants d'un composite	33
Fig.II.4 : Différents types de matrices utilisées dans les composites	34
Fig.II.5 : matrice utilisée, produit EPOTEK FIX (durcisseur + résine)	36
Fig.II.6 : Présentation de l'interface, matrice et fibre	37
Fig.II.7 : Architecture des renforts	37
Fig.II.8 : Différentes formes de renforts tissés	38
Fig.II.9 : Fibres de verre	41
Fig.II.10 : Fibre de carbone	42
Fig.II.11 : Les différents types de fibres naturelles	42
Fig. II.12 : Schéma des parois d'une fibre de jute	45

Fig. II.13 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale	45
Fig.II.14 : Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres chanvre à l'échelle micrométrique	46
Fig. II.15 : Plante de jute Typique a, b et c botte de fibres extraite de la tige de jute	47
Fig.II.16 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c)	47
Fig.II.17 : Différentes formes de renforcement : (a) nappe unidirectionnelle, (b) mat, (c) tissu, (d) tissu tridimensionnel orthogonal	50

Chapitre III : Programme expérimental

Fig.III.1 : Ciment utilisé (Matine)	54
Fig.III.2 : Lavage et séchage des granulats utilisés dans les différentes formulations du béton	55
Fig.III.3 : Appareil de tamisage et les diamètres de granulats utilisés.....	56
Fig.III.4 : Constituants des différentes formulations du béton	58
Fig.III.5 : Malaxeur et moules huilés utilisés pendant les essais	60
Fig.III.6 : Éprouvettes compactées avec une table vibrante	60
Fig.III.7 : Éprouvettes coulées, rasées, protégées par un film transparent.	60
Fig.III.8 : Démoulage, Nomination des éprouvettes et Bassin de conservation	61
Fig.III.9 : L'apparence externe des différentes formulations	61
Fig.III.10 : Tissu de fibres de verre	62
Fig.III.11 : Toile de jute	63
Fig.III.12 : Résine époxydique d'imprégnation pour tissu de renforcement	64
Fig.III.13 : Séchage et nettoyage de la surface latérale des éprouvettes prismatiques en	

béton	65
Fig.III.14 : Mesure et Découpage du tissu en fibres de verre et en fibre de jute	66
Fig.III.15 : Préparation de la matrice	67
Fig.III.16 : Collage des composites sur la face externe du prismatique	68
Fig.III.17 : .Presse hydraulique utilisé pour l'écrasement des éprouvettes	69
Fig.III.18 : Courbe Force-Déplacement du béton	69
Fig.III.19 : Histogramme présente les Résistances à la compression des bétons témoins en fonction des différentes formulations.....	74
Fig.III.20 : Histogramme présente les déformations à la compression des bétons témoins en fonction des différentes formulations.....	75
Fig.III.21 : Histogramme présente les résistances à la compression des bétons confinés par une enveloppe tissé à base de fibre de jute en fonction des différentes formulations.....	76
Fig.III.22 : Histogramme présente les déformations à la compression des bétons confinés par une enveloppe tissé à base de fibre de jute en fonction des différentes formulations.....	77
Fig.III.23 : Histogramme présente les résistances à la compression des bétons confinés avec des enveloppes en PRFV en fonction des différentes formulations.....	88
Fig.III.24 : Histogramme présente les déformations à la compression des bétons confinés avec des enveloppes en PRFV en fonction des différentes formulations.....	79
Fig.III.25 : Histogramme présente les résistances à la compression des bétons confinés (PRFV, PRFJ) en fonction des différentes formulations.....	80
Fig.III.26 : Histogramme présente les déformations à la compression des bétons confinés (PRFV, BCRFJ) en fonction des différentes formulations	81
Fig.III.27 : Fig.III.27 : Mode de rupture du béton non confiné	82
Fig.III.28 : Fig.III.28 : Mode de rupture du béton confiné en PRFV et BCRFJ	82

LISTE DES TABLEAUX

Tab.I.1 : Classification des ciments selon leurs résistances	9
Tab.I.2 : Teneur minimale de ciment	10
Tab.I.3 : comparaison entre composites et acier	19
Tab.II.1 : Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques	34
Tab.II.2 : Différents types de fibre de verres textiles	39
Tab.II.3 : Composition de différentes fibres de verre	40
Tab.II.4 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	41
Tab.II.5 : Classification et exemples de fibres naturelles	43
Tab.II.6 : Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles comparées aux fibres de verre et aux fibres de carbone	44
Tab.II.7 : Principales caractéristiques physiques des fibres de jute	48
Tab.III.1 : Composition chimique et minéralogique de Matine	55
Tab.III.2 : Diamètres de granulats utilisés pour chaque formulation du béton	57
Tab.III.3 : Les constituants de béton	58
Tab.III.4 : caractéristiques élastique du tissu de composite	63
Tab.III.5 : Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état nature	63
Tab.III.6 : Composition chimiques de la fibre de jute a l'état naturel, pourcentage en poids	64
Tab.III.7 : Caractéristiques de la matrice.	64
Tab.III.8 : Résultats de l'essai de compression sur le béton témoin	71
Tab.III.9 : Résultats de l'essai de compression sur le béton confiné par une enveloppe tissée à base de fibre de jute (BRFJ)	72
Tab.III.10 : Résultats de l'essai de compression sur le béton confiné par une enveloppe tissée à base de fibre de verre (PRFV)	73

Liste des abréviations

BCRFJ : Bio Composite Renforcé de Fibre de Jute.

DBCRFJ : Déformation d'un Bio Composite Renforcé de Fibre de Jute

DPRFV : Déformation d'un Polymère Renforcé de Fibre de Verre

F1 : Formulation Une.

F2 : Formulation Deux.

F3 : Formulation Trois.

F4 : Formulation Quatre.

F5 : Formulation Cinq.

F6 : Formulation Six.

GRBCRFJ : Gain de Résistance d'un Polymère Renforcé de Fibre de Jute

GRPRFV : Gain de Résistance d'un Polymère Renforcé de Fibre de Verre

PRFV : Polymère Renforcé de Fibre de Verre.

**INTRODUCTION
GÉNÉRALE**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers. [61] La réparation et la maintenance des ouvrages en béton représentent actuellement un réel enjeu technico-économique. [8]

Initialement des plaques d'acier collées sous les éléments en béton étaient utilisées comme éléments de renforcement, mais elles ont été remplacées progressivement par les matériaux composites. L'utilisation de plus en plus fréquente des matériaux composites s'explique d'un part par leurs meilleures propriétés mécaniques et d'autre part, par l'amélioration des procédés de fabrication et de mise en œuvre durant ces dernières décennies.[58]

Actuellement, les moyens de renforcement et de réparation utilisés en Algérie sont traditionnels (le béton additif et le rajout d'armatures extérieurement). Ceci nécessite un contrôle périodique ainsi qu'une protection. Ces méthodes sont caractérisées par la lourdeur et la difficulté d'exécution. D'où la nécessité d'opter pour la technique de renforcement à base de PRF. Cette dernière est facile à mettre en œuvre et rapide. [49]

Les matériaux composites sont constitués de l'agencement de plusieurs matériaux non miscibles dont les qualités de chaque constituant se complètent pour former des matériaux aux propriétés accrues. [5]

L'utilisation des matériaux composites à matrice organique a connu un essor considérable. Comparativement aux métaux, les composites présentent de nombreux avantages: légèreté, résistance à la corrosion, résistance aux chocs.... [48]

Le comportement des structures confinées à l'aide de matériaux composites est complètement différent de celui des structures qui subissent un confinement conventionnel. En effet, à la rupture, le matériau composite présente un comportement fragile en opposition avec le comportement ductile de l'acier. Il devient alors nécessaire de bien comprendre le comportement du béton ainsi confiné. [3]

De nombreux travaux de recherches et de réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisés comme renforcement externe. [31]

Ces activités de recherche propres à ces matériaux sont également très présentes dans les laboratoires du monde entier pour permettre de mieux comprendre le comportement des structures composites à travers de nombreux thèmes d'études, dans le but d'optimiser leur utilisation et leur adéquation avec l'application industrielle [6]

Le remplacement des fibres synthétiques par des fibres naturelles de cellulose engendre un intérêt certain dont les motivations principales sont la réduction des coûts et l'obtention de matériaux biodégradables plus légers tout en évitant l'abrasion de l'équipement. Malgré cela, les matériaux composites à base de fibres naturelles sont encore au stade de développement. [5]

L'utilisation des fibres végétales prend de plus en plus d'ampleur. Les propriétés spécifiques intéressantes, la faible densité et la biodégradabilité de ces fibres ouvrent des perspectives prometteuses. De nombreux travaux ont mis en valeur les avantages et les limitations intrinsèques de ces matériaux. Malgré le développement des composites à fibres naturelles, de nombreuses difficultés doivent être surmontés:[48]

- L'incompatibilité des fibres cellulosiques avec certains polymères. Cette incompatibilité provient de la nature hydrophile des fibres végétales et au caractère plus hydrophobe de la matrice. Cela constitue une difficulté majeure sachant que l'interface est le lieu privilégié du transfert des charges entre le renfort et la matrice.
- La seconde difficulté provient de la très grande diversité et la variabilité des fibres naturelles. Leurs caractéristiques physico mécaniques sont très délicats à maîtriser. De plus, les propriétés mécaniques des fibres d'origine végétale varient considérablement dans la même espèce et d'une espèce à l'autre. [48]

Dans le cadre de cette étude, parmi les méthodes de renforcement, l'utilisation de composites collés en surface des ouvrages à l'aide de résines époxy durcissant à température ambiante est une technique largement employée pour son efficacité et sa facilité et rapidité de mise œuvre.

Objectif du travail :

L'objectif de l'étude présentée dans ce mémoire est d'évaluer le comportement mécanique des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations ,non confinées et confinées à l'aide d'enveloppes en matériaux composites collés en surface (PRFV, BCRFJ) ainsi que la dépendance du confinement de la formulation du béton.

Problématique :

La technique de renforcement étudiée dans le cadre de ce travail consiste à utiliser des enveloppes de tissu en fibre de verre et en fibre de jute collées en surface latérale des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations. Dans ce contexte, nous nous sommes posé la question suivante : l'optimisation de la formulation du béton est-elle efficace sous l'effet du confinement ?

Plan du travail :

Pour répondre à notre interrogation, nous avons scindé le mémoire en trois parties :

- le premier chapitre est une présentation générale du matériau béton, ses constituants et les différentes méthodes de renforcement des structures ;
- Dans le second chapitre, une introduction à la conception des matériaux composites et leurs différents constituants et ce, suite à une présentation générale des matériaux composites. les différents types de matrices seront détaillés ainsi que les différents types de renforts existants.
- Enfin, nous présentons le programme expérimental qui est divisé en deux parties, la première décrit les matériaux utilisés, les différentes étapes de confection des éprouvettes et leurs confinements, puis les essais de compression uniaxiale effectués. Dans la deuxième partie, nous avons présenté les résultats et leurs interprétations pour pouvoir répondre aux objectifs fixés de cette étude.

Et nous achevons notre travail avec une conclusion générale et proposons des perspectives de recherche.

Chapitre I : Généralités sur matériau béton et son comportement mécanique et les différentes méthodes de renforcement des structures

Ce chapitre est divisé en deux parties principales, la première partie est consacrée à une recherche qui comporte une synthèse bibliographique sur le béton et ces constituants et leurs mises en œuvre, nous remarquons qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les caractéristiques recherchées. Ainsi que sur la nécessité de la réhabilitation des structures.

La deuxième partie de ce chapitre donne les différentes méthodes de renforcement des structures via étude bibliographique sur les différentes techniques de renforcement et de réparation des structures, ainsi que sur le confinement du béton avec les matériaux composites, et le comportement mécanique du béton confiné et non confiné.

Sommaire du chapitre :

I. Introduction	04
I.2. Définition	04
I.2.1. Composition du béton	05
I.2.1.1. Malaxage du béton	05
I.2.1.2. Mise en œuvre dans le coffrage	06
I.2.1.3. Vibration du béton	06
I.2.2. Composants d'un béton	07
I.2.2.1. Le ciment	07
I.2.2.1.1. Les différents Types de ciment	08
I.2.2.1.2. Caractéristiques mécaniques de ciments	09
I.2.2.2. Les granulats	10
I.2.2.2.1. Dimension maximale des granulats D_{max}	11
I.2.2.3. L'eau de gâchage	12
I.2.2.4. Adjuvants	12

I.2.2.5. Additions minérales	13
I.2.3. Rôle des différents éléments constituant le béton	13
I.2.4. Résistance mécanique	13
I.2.5. Nécessité de la réhabilitation d'une structure	14
II. Méthodes de renforcement	15
II.1. Introduction	15
II.2. Méthodes de renfort	15
II.2.1. Réparation par béton projeté	16
II.2.2. Réparation par précontrainte additionnelle	17
II.2.3. Renforcement par chemisage en acier ou en béton armé	17
II.2.4. Renforcement par matériaux composites	19
II.2.4.1. Introduction	19
II.2.4.2. Méthodes de confinement	20
II.2.4.2.1. Stratification au contact	20
II.2.4.2.2. Enroulement filamentaire	21
II.2.4.2.3. Chemisage par coquille préfabriquées	22
II.2.4.3. Renforcement des éléments structuraux	22
a) Les poutres	22
b) Les poteaux	23
c) Les dalles	23
II.3. Comportement en compression du béton	24
II.3.1. Béton non confiné	24
II.3.2. Béton confiné	25
II.4. Revue des travaux antérieurs	26

I. Introduction :

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, et sa formulation, jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la Science des matériaux.[1]

I.2. Définition :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton **(Voir Fig.I.1)**

Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumique (retrait) et source de résistance pour les granulats. [2]

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pâte pure (ciment + eau),
- D'un mélange granulaire,
- De produits additionnels (adjuvants, additions minérales). **(voir la Fig.I.1)**

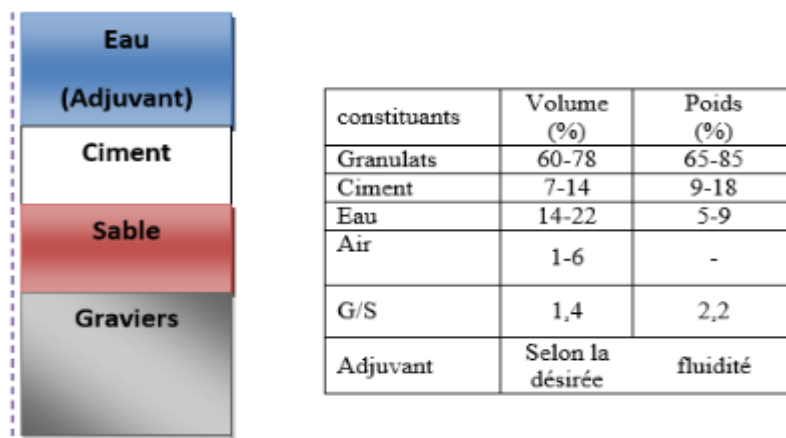


Fig.I.1 : Pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [3]

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier : le mélange (liant + sable + eau)
- De squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats (**voir la Fig.I.2**)

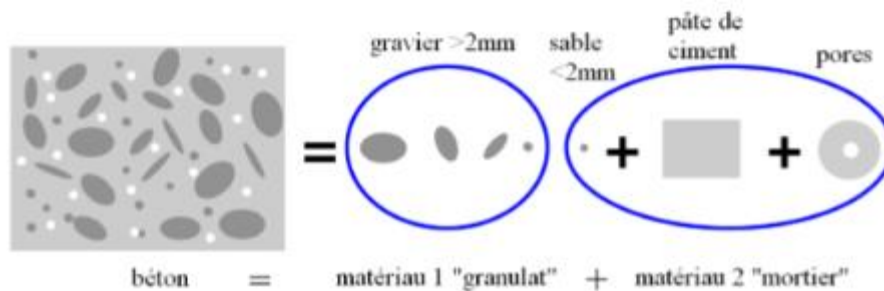


Fig.I.2 : Principe de représentation du béton en deux matériaux [3]

I.2.1. Composition du béton :

L'étude d'une composition de béton consiste, toujours, à rechercher conjointement deux qualités essentielles qui sont la résistance et l'ouvrabilité. Or ces deux qualités sont étroitement liées. En effet elles varient en sens inverse. [4]

I.2.1.1. Malaxage du béton :

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Ceci se fait soit avec un malaxeur à béton à train valseur qui consiste en un brossage forcé des divers constituants du béton, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par gravité en soulevant un volume de matériau et en laissant par la suite tomber le matériau.[19]

La confection des bétons nécessite un mode de malaxage bien défini. Dans le cas de cette étude, la norme NF P 18-404_Décembre 1981 (**Voir l'annexe 2**) intitulée « Bétons – Essais d'étude, de convenue et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes et mode de vibration » ont été prises en compte.



Fig.I.3 : Malaxeur utilisé lors de la confection du béton.

I.2.1.2. Mise en œuvre dans le coffrage :

Une fois malaxé, le béton encore à l'état frais est mis en place dans un moule appelé 'coffrage' de façon à lui donner à l'état durci la géométrie recherchée. Le coffrage est généralement construit en bois ou en métal.

Dans cette étude les moules utilisés, sont des moules métalliques de forme prismatiques de dimension 7 x 7 x 28 cm divisé en deux par des plaques en bois de dimension 7x7 cm (**Voir la Fig.I.4**)

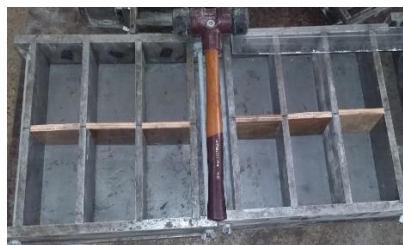


Fig.I.4 : Moules utilisés dans la confection du béton.

I.2.1.3. Vibration du béton :

Lors du malaxage du béton, des bulles d'air se trouvent piégées dans le mélange. L'idée consiste alors à vibrer le mélange de telle sorte qu'il perde sa viscosité et sa cohésion et ainsi pouvoir extraire autant que possible une grande quantité de ces bulles d'air. La vibration a pour objectif d'avoir un béton d'une résistance et d'une durabilité accrues par l'augmentation de la compacté. La vibration peut être mise en œuvre de deux manières :

- la vibration interne ou pervibration qui consiste à plonger une aiguille vibrante cylindrique dans le béton.

- la vibration externe ou le vibreur est fixé à l'extérieur du coffrage et dans ce cas le coffrage et le béton sont vibrés en même temps. Ce type de vibration est utilisé notamment en préfabrication et lorsque la forme ou l'épaisseur de l'ouvrage ne permet pas l'utilisation d'une aiguille vibrante. [19]

Une attention particulière doit être apportée à la vibration, de façon à éviter un dé homogénéisation et une ségrégation du mélange. Cela concerne à la fois la fréquence de vibration, la durée de la vibration et la manière de vibrer (distance entre les points de vibration, épaisseur des couches de béton à vibrer, etc.)

Dans cette étude nous avons utilisé la deuxième méthode, cette vibration est réalisé par une table vibrante (**Voir Fig.I.5**)



Fig.I.5 : Table vibrante

I.2.2. Composants d'un béton :

I.2.2.1. Le ciment :

Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker, associé à des constituants secondaires tels que le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer et du coke métallurgique, de cendres volantes ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches). Après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. [5]

I.2.2.1.1 Les différents Types de ciment :

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants :

- **Les ciments portlands : CEM I**

Ces ciments contiennent au moins 95 % de clinker.

- **Les ciments portlands composés : CEM II**

On distingue deux catégories de CEM II :

- les CEM II/A qui contiennent plus de 80 % de clinker et moins de 20 % de constituants secondaires ;
- les CEM II/B dont les valeurs sont respectivement plus de 65 % de clinker et moins de 35 % de constituants secondaires.

- **Les ciments de hauts fourneaux : CEM III**

Ces ciments sont subdivisés en trois catégories selon leur teneur en laitier : les CEM III/A (de 36 à 65 % de laitier), les CEM III/B (de 66 à 80 % de laitier) et les CEM III/C (de 81 à 95 % de laitier).

Le reste des constituants est du clinker avec éventuellement un filler dans la limite de 5 % de l'ensemble des constituants.

- **Les ciments pouzzolaniques : CEM IV**

On distingue également deux catégories :

- les CEM IV/A qui contiennent plus de 65 à 90 % de clinker ;
- les CEM IV/B dont la valeur est de 45 à 64 % de clinker.

Le reste des constituants sont des ajouts pouzzolaniques avec éventuellement un filler dans la limite de 5 %. Les ajouts pouzzolaniques peuvent être des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des cendres volantes siliceuses.

- **les ciments au laitier et aux cendres : CEM V**

Ils sont subdivisés en deux catégories selon leur teneur en laitier de haut fourneau et de pouzzolanes naturelles ou de cendres volantes siliceuses : les CEM V/A (de 18 à 30 %) et les CEM V/B (de 31 à 50 %). [6][7]



Fig.I.6: Ciment utilisé dans la confection de béton

I.2.2.1.2. Caractéristiques mécaniques de ciments :

Les ciments se caractérisent par leurs classes de résistances à la compression mesurées à 28 jours d'âge, exprimées en [MPa]. Les nouveaux ciments comportent quant à eux trois classes de résistance indiquées dans le tableau ci-dessous:

Tab.I.1 : Classification des ciments selon leurs résistances [7]

Résistance à la compression (en MPa)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	-		
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	-		
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30	-		

- D'après la norme AFNOR la teneur minimale en ciment est déterminée de la manière suivante:

Tab.I.2 : Teneur minimale de ciment.

MATERIAU DE CONSTRUCTION	TENEUR MINIMALE EN CIMENT (KG/M3)
Béton non armé (coulé gros masse)	150 à 250
Béton de route	300 à 325
Béton armé ordinaire	300 à 350
Béton spéciale (préfabriqué, précontraint...)	350 à 450

I.2.2.2. Les granulats :

Les granulats (sables, gravillons et graviers) sont principalement obtenus par criblage et concassage de silex, de calcaire dur, de silico-calcaire, de granite, de quartzite... Ils occupent généralement 60 à 80% du volume total et constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. [8]

N'importe quel granulats ne convient pas pour faire un béton. La quantité de ciment nécessaire pour lier l'ensemble des constituants est proportionnelle à la surface de ceux-ci. On a donc intérêt à choisir les granulats les plus gros, Ensuite, il faut remplir les trous entre les gros granulats, par d'autres granulats de plus petit diamètre (**voir Fig.I.7**) : on comprend dès lors pourquoi il faut sélectionner sérieusement la quantité de granulats de chaque dimension pour optimiser le remplissage et minimiser la quantité de ciment. C'est le principe de l'optimisation granulométrique. [17]

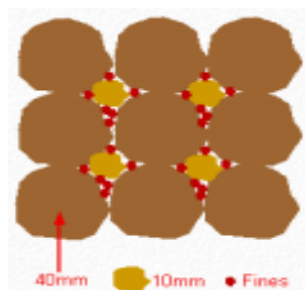


Fig.I.7 : Les différents agrégats constituent un béton. [17]

La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulats/pâte de ciment, conditionne les résistances du béton, Il faut faire le bon choix des granulats :

- nature (minéralogique et pétrographique).
- techniques de fabrication.

Les performances attendues pour un béton seront sur le plan de la « durabilité » et de la « compacité ». [4]



Figure I.8 : Les différents diamètres des granulats utilisés dans les confections de béton.

I.2.2.2.1. Dimension maximale des granulats D_{max} :

L'utilisation des granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de D_{max} reste conditionné par le [BAEL 91] :

- L'ouvrabilité demandée
- Les dimensions de l'ouvrage et l'épaisseur des pièces
- L'espacement des armatures
- L'enrobage des armatures. [10]

La Fig.I.9 montre l'augmentation de la résistance jusqu'à une certaine valeur de la dimension maximale du granulat, au-delà de cette dimension la résistance baisse.

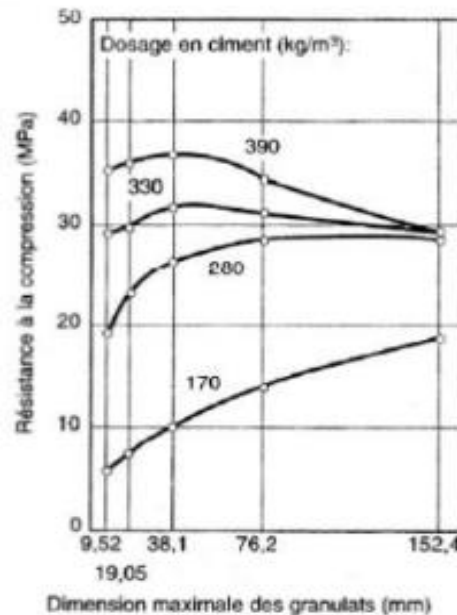


Fig.I.9: Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment [10].

I.2.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton. En effet, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc de la résistance mécanique. L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient du chlorure de sodium car les sels dissous dans l'eau peuvent intervenir dans la rhéologie du béton, la prise de la pâte de ciment et la durabilité du matériau durci (attaque des aciers d'armatures par les chlorures).

I.2.2.4. Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés aux bétons à des petites doses permettent d'améliorer certaines de ses propriétés [11]. Ils permettent de réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis. Il existe plusieurs types

d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants et les plastifiants.

1.2.2.5. Additions minérales :

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [12]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [13]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [14].

1.2.3. Rôle des différents éléments constituant le béton :

- **Ciment:** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats:** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- **Les plastifiants:** ils augmentent l'« ouvrabilité » du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton). [17]

1.2.4. Résistance mécanique :

La résistance mécanique est une propriété intrinsèque du béton. Elle détermine dans la plus part des cas les qualités d'un béton. La résistance d'un béton dépend de l'activité du ciment, du rapport E/C, de la granularité, de degré d'impureté des granulats, de degré de porosité, du mode de cure,etc.

Le béton en service est soumis aux différentes sollicitations il doit présenter une résistance.

- résistance à la compression.
- résistance à la traction
- résistance au cisaillement. [4]

La résistance mécanique des bétons dépend de plusieurs paramètres : [20]

- le type et la classe du ciment.
- la qualité des granulats utilisés pendant le bétonnage.
- le dosage de matériaux utilisés.
- La cadence et les conditions de réalisation.

I.2.5. Nécessité de la réhabilitation d'une structure :

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquentes sont :

❖ Accroissement des charges qui sollicitent la structure :

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

❖ Défauts dans le projet ou dans l'exécution :

- armature insuffisante ou mal placée,
- mauvais matériaux,
- dimensions insuffisantes des éléments structurels.

❖ Rénovation des structures anciennes :

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

❖ **Changement de la forme de la structure :**

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

❖ **Dégâts dans la structure :**

- corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
- impacts contre la structure,
- incendies.

❖ **Nécessité d'améliorer les conditions en service :**

- diminuer les déformations et flèches,
- réduire l'intensité des contraintes sur les armatures,
- diminuer l'ouverture des fissures. [21]

II. Méthodes de renforcement :

II.1. Introduction :

Les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions. [24]

II.2. Méthodes de renfort :

Dans le domaine de la construction, il existe de nombreuses procédures de renforcement ou de réparation des structures, les plus courantes sont :

- Réparation de désordres superficiels.
- Traitement des fissures. « plus de détail sur la référence [76] », [22]
- Incorporation de profils en acier : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.

- Collage d'éléments préfabriqués : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.
- Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.
- Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier. Le béton peut être coulé ou projeté.
- Adjonction de platines en acier. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.
- Adjonction de lamelles, bandes ou tissus de matériaux composites. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de matériaux composites (habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone, verre ou d'aramide).
- Amélioration des structures par précontrainte extérieure.
- Amélioration de la structure des bâtiments à l'aide de dispositifs amortisseur. [27]

Actuellement, les moyens de renforcement et de réparation utilisés en Algérie sont traditionnels (le béton additif et le rajout d'armatures extérieurement). Ceci nécessite un contrôle périodique ainsi qu'une protection. Ces méthodes sont caractérisées par la lourdeur et la difficulté d'exécution. D'où la nécessité d'opter pour la technique de renforcement à base de PRF. Cette dernière est facile à mettre en œuvre et rapide. [23]

II.2.1. Réparation par béton projeté :

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défaillantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide. Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact. [28]



Fig.I.10 : Renforcement au moyen d'un béton projeté [26]

II.2.2. Réparation par précontrainte additionnelle :

Cette technique est particulièrement adaptée pour réparer des poutres dont la résistance à la flexion ou à l'effort tranchant est insuffisante par l'emploi d'étriers actifs. Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre d'après. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées.



Fig.I.11 : Gaine de précontrainte additionnelle avec déviateur. [26]

II.2.3. Renforcement par chemisage en acier ou en béton armé :

Comme évoqué auparavant, pour certains ouvrages en béton armé, le confinement du béton par les cadres d'armature internes peut avoir été sous-dimensionné. Cette déficience peut être compensée par l'ajout d'un confinement extérieur, réalisé par exemple avec un chemisage en acier. La technique du chemisage en acier consiste, pour les poteaux de section circulaire, à positionner deux demi-coques en acier (d'un rayon supérieur de 12 à 25 mm au rayon de la section initiale de la colonne) autour du poteau, puis de les souder sur place de manière à former

un tube continu. Le faible espace annulaire formé entre le tube d'acier et le poteau est alors comblé avec un coulis de ciment. Pour les poteaux de section rectangulaire, la technique de mise en place est identique mais il est recommandé d'utiliser des chemisages elliptiques, comme illustré sur la **Fig.I.13b**. Ceux-ci présentent l'inconvénient d'être assez encombrants et peuvent par exemple gêner le trafic en réduisant la largeur des voies de circulation; des chemisages rectangulaires ont donc également été développés. Cependant, même si les chemisages rectangulaires s'avèrent efficaces pour un renforcement au cisaillement, les performances en termes de confinement et d'amélioration de la ductilité en flexion sont beaucoup moins bonnes que celles obtenues par des chemisages elliptiques.[31]



Fig.I.12 : Chemisage en acier[25]

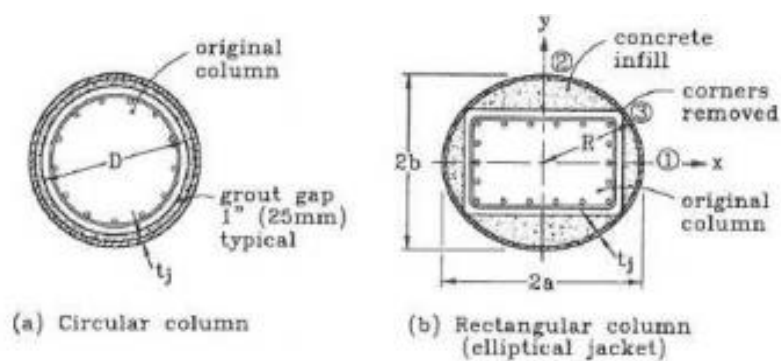


Fig.I.13: Chemisage acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire [31].

II.2.4. Renforcement par matériaux composites :

II.2.4.1. Introduction :

Les travaux de renforcement des structures en béton armé par addition de polymères renforcés par fibres de carbone, de verre ou végétales sont une excellente alternative aux systèmes utilisés traditionnellement pour le renfort ou la protection de structures. [28]

L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. À titre comparatif, le tableau donne les avantages des composites sur l'acier. [24]

Tab.I.3 : comparaison entre composites et acier

<i>Critères</i>	<i>Avec les composites</i>	<i>Avec l'acier</i>
Poids propre	Bas	Elevé
Résistance en traction	Très élevée	Elevée
Epaisseur	Très basse	Basse
Corrosion	Non	Oui
Longueur des plaques	Illimitée	Limitée
Manutention	Facile, flexible	Difficile, rigide
Capacité de chargement	Direction longitudinale	Toute direction
Coût du matériau	Elevé	Bas
Coût des installations	Bas	Elevé
Application	Pas d'équipement	Appareil de levage et d'attache

Étant donné ces nombreux avantages, les matériaux composites représentent un très bon investissement en ce qui a trait au renforcement et à la réhabilitation des structures en béton armé. Les seuls inconvénients sont le coût du matériau et le manque de connaissances autant sur son comportement à long terme dans les structures que sur les techniques de conception.

Les matériaux composites devraient très bien concurrencer les méthodes traditionnelles de réparation. [24]

Bien que l'installation du système de renforcement avec des matériaux composites varie d'un fabricant ou d'un installateur à l'autre, le processus passe généralement par les étapes suivantes : [27]

- Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.
- Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.
- Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
- Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.
- Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
- Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
- Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
- Répéter les deux étapes dernières, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées. [27]

II.2.4.2. Méthodes de confinement :

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites «PRF». Les méthodes de renforcement peuvent être classés dans trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite «PRF» à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «PRF».

II.2.4.2.1. Stratification au contact :

Des tissus secs de fibres de renfort souples sont imprégnés directement sur le site lors de l'application sur la structure au moyen d'une colle liquide durcissant à température ambiante. La zone à renforcer est au préalable enduite d'une couche de résine primaire liquide. Après marouflage, une dernière couche de résine de fermeture peut être appliquée comme protection supplémentaire avec le milieu extérieur et améliorer la durabilité du composite. Dans cette

technique une même résine est souvent à la fois matrice du composite et l'adhésif assurant la liaison entre le composite et le support béton. [28]



Fig.I.14 : Illustration renforcement par stratification au contact avec FRP carbone (SikaWrap)

Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches (Fig.I.15.a). Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF» sous forme d'une spirale continue (Fig.I.15.b) ou des anneaux discrets (Fig.I.15.c).[27]

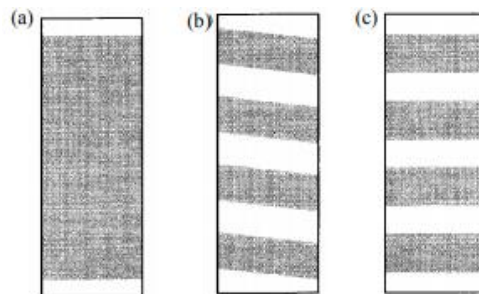


Fig.I.15: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A, (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF»; (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» en spirale continue ; et (c) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'anneaux discrets.

II.2.4.2.2. Enroulement filamentaire :

Le principe de l'enroulement filamentaire ou bobinage, est d'envelopper les colonnes par des fibres continues au lieu des tissus (Fig.I.16). 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. [30] [27]

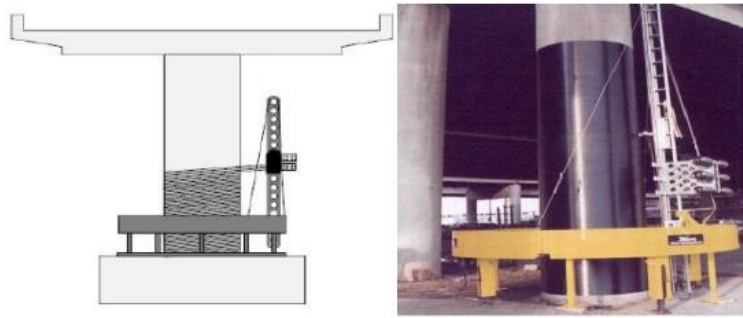


Fig.I.16: Confinement par enroulement filamentaire

II.2.4.2.3. 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 (**Fig.I.17**). 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. [30]

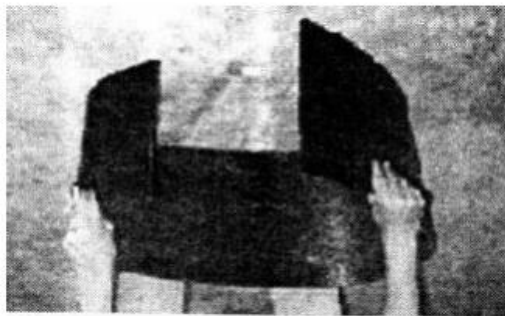


Fig.I.17 : Chemisage par coquille préfabriquées

II.2.4.3. Renforcement des éléments structuraux :

a) Les poutres :

Le renforcement vis à vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée (**Fig.I.18**). Avant l'application de la lamelle «PRF», le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton et d'exposer la totalité du béton pour améliorer la liaison avec le «PRF», et de fournir une surface uniforme. [27]

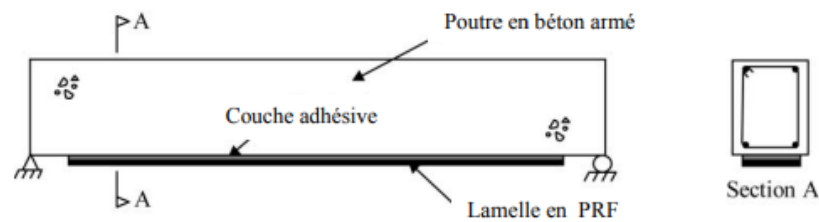


Fig.I.18: Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF (Smith et Teng 2002

b) Les poteaux :

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite. [24]



Fig.I.19: Poteaux en BA confinés par matériaux composites.

c) Les dalles :

La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» est de coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées (Fig.I.20 a), ou bien des «PRF» avec des fibres dans les deux directions. D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux selon les besoins de renforcement mais dans ce cas les bandes/lamelles de «PRF» sont terminées loin des bords de la dalle (Fig.I.20 b). [27]

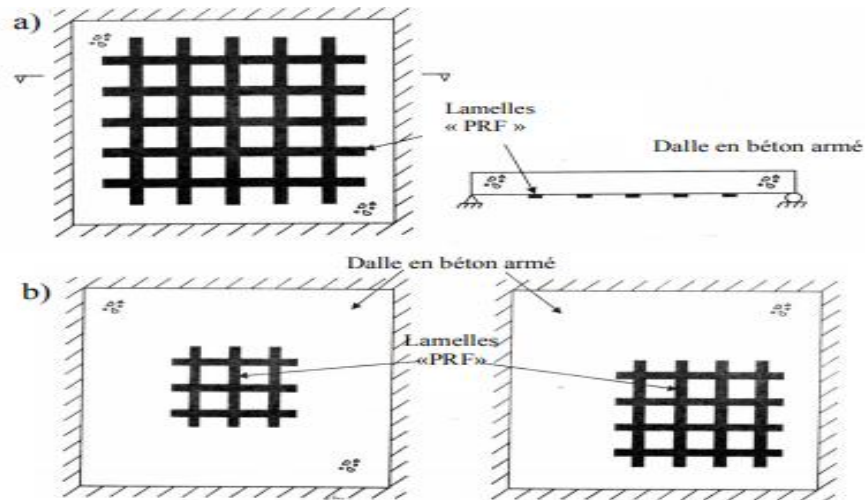


Fig.I.20 : Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées

II.3. Comportement en compression du béton :

II.3.1. Béton non confiné :

Le comportement du béton en compression uni axiale décrit trois phases distinctes. Dans la première phase, le béton se comporte d'une manière quasi élastique, subit un raccourcissement dans la direction de chargement et une dilatation (expansion) dans le plan perpendiculaire conformément à la loi de Poisson. Cette deuxième phase est caractérisée par le début de la non-linéarité du comportement et l'apparition de déformations rémanentes au déchargement. La troisième phase commence avec le dépassement du seuil de discontinuité à environ 70 % de la résistance du béton; les microfissures s'ouvrent davantage et s'interconnectent au long d'axes parallèles à celui du chargement ce qui altère la continuité du béton, la propagation des fissures devient instable et augmente rapidement le taux de dilatation radiale et donc le coefficient de Poisson « apparent ». On peut donc dire que la rupture en compression du béton est due aux efforts de tension transversale, comme l'ont déjà mentionné Richart et al (1928) [77] dans une étude sur le comportement en compression du béton sous chargement multiaxial. [45]

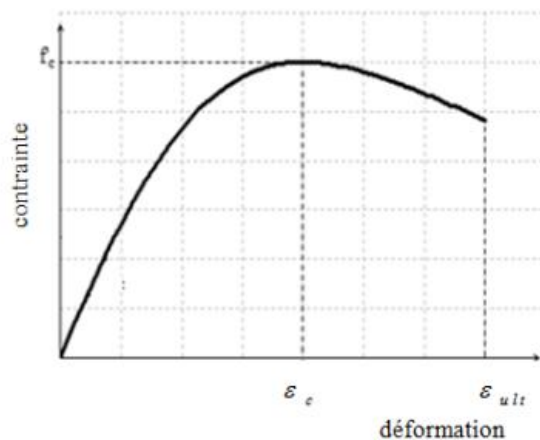


Fig.I.21: Comportement du béton en compression simple [78].

II.3.2. Béton confiné :

La compréhension du mécanisme d'endommagement et de la rupture du béton en compression uni axiale nous amène à la déduction 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). Ceci peut être atteint en appliquant une pression latérale dont la direction est opposée à celle de la dilatation. [45]

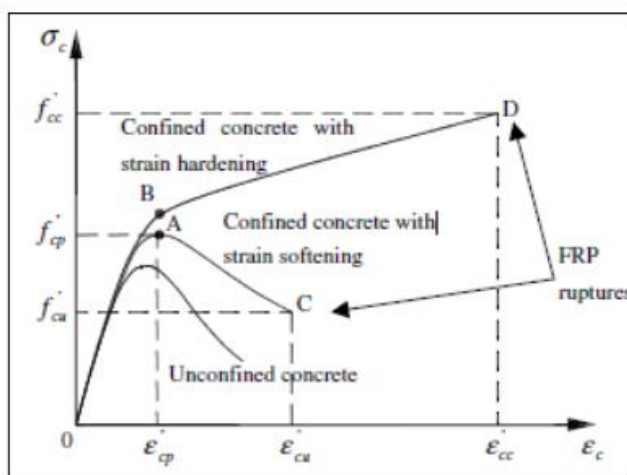


Fig.I.22 : Courbes contraintes-déformations béton confiné (21)

II.4. Revue des travaux antérieurs :

Les matériaux composites à base de fibres «PRF» ne sont utilisés pour le confinement du béton que depuis le début des années 1980, bien que l'utilisation de tubes en plastique (PVC) remplis de béton, ait débuté dès la fin des années 1970. [79]

Katsumata et al. (1988) présentent des résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement sismique des colonnes renforcées au moyen de matériaux composites «PRFC». Deux séries de dix modèles réduits de colonnes aux coins arrondis, de section carrée 200 mm x 200 mm, sont mises à l'essai pour évaluer l'efficacité de l'interface entre le béton et le «PRFC». Dans la première série, un isolant a été appliqué entre le béton et le matériau composite, alors que dans la deuxième série le matériau composite a été collé directement en surface à l'aide d'une résine époxy. [27]

Saadatmanesh et al. (1994) [81] conduisent 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. Ils modélisent le confinement procuré par les lamelles à l'aide du modèle de Mander et al. (1988) [80]. Quatre paramètres sont considérés en particulier : la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en «PRF», l'espacement des lamelles et les propriétés des lamelles. [27]

Youssef et al. (2007) [82] développent un modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF». Le modèle est basé sur les résultats d'un large programme expérimental incluant des colonnes courtes circulaires (\emptyset 406 x 813 mm et \emptyset 152 x 305 mm), carrées (381 mm x 381 mm x 762 mm) et rectangulaires (254 mm x 381 mm x 762 mm) confinées en utilisant deux types de matériaux composites (PRFC et PRFV) avec une vaste gamme de rapport de confinement. Un total de 117 spécimens a été testé sous chargement axial. L'analyse des résultats d'essai montre que:

- La contrainte ultime, la déformation de rupture, les paramètres de l'enveloppe composite et la géométrie de la section sont les facteurs significatifs affectant le comportement contrainte déformation du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» [27]

Al-Saloum (2007) [83] présente des résultats expérimentaux concernant l'influence du rayon des coins des sections carrées sur la résistance en compression axiale du béton confiné avec des «PRFC». L'auteur a testé 8 prismatiques carrés de dimension 150 mm x 150 mm x 500 mm et deux cylindriques ($\text{Ø}150 \times 300$ mm) pour la comparaison. En conclusion l'auteur a montré que : la meilleure performance en matière de résistance à la compression était celle des éprouvettes cylindriques suivi respectivement par les colonnes carrées avec des coins arrondis d'un rayon égale à 38, 25 puis 5 mm. Cette différence d'efficacité de confinement peut être expliquée, selon l'auteur, par le fait que l'enveloppe composite offre une pression de confinement uniforme dans le cas des sections circulaires, ce qui n'est pas le cas pour les sections carrées. [27]

La quantité des travaux faits sur les colonnes de section rectangulaire est beaucoup plus modeste [Cole and Belarbi 2001,[84] Campione and Miraglia 2003 [85], Chaallal et al. 2003,[86] Maalej et al. 2003,[87] Harries and Carey 2003,[88] Hassan and Chaallal 2007 [89]].

Cette disparité vient surtout du fait que le confinement des sections rectangulaires est moins efficace que celui des sections circulaires, l'aire de béton effectivement confiné y est réduite, mais aussi à cause des concentrations de contraintes aux angles qui causent des ruptures prématurées du PRF. L'arrondissement des angles droits conduit à une amélioration du comportement en compression des colonnes et cela en agrandissant l'aire du béton effectivement confiné d'une part (Fig.I.23) et en diminuant la concentration de contraintes d'autre part. [45]

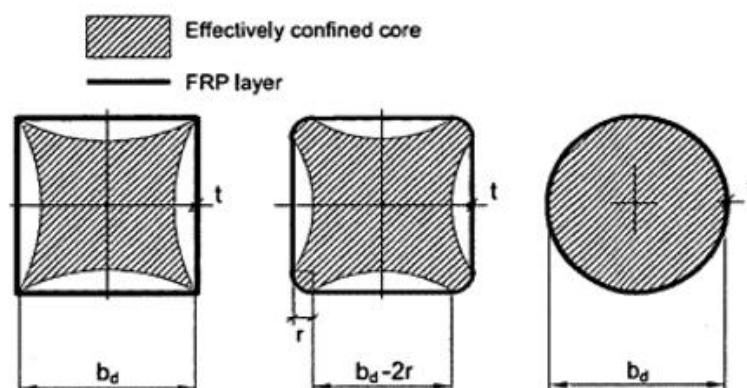


Fig.I.23: Section de béton effectivement confiné pour différentes géométries de colonnes confinées par enveloppe externe en PRF [85]

Lam et Teng (2003) [90] ont testé 10 éprouvettes de section carrée et deux de section rectangulaire, plusieurs épaisseurs du renfort composite et valeurs du rayon des coins ont été prises en compte pour avoir des différents niveaux de confinement. Deux éprouvettes circulaires ont aussi été testées et qui avait un coefficient d'efficacité de confinement $k_1 = 2,98$. Pour améliorer les prédictions de la résistance en compression du béton confiné avec des matériaux composites «PRF», Lam et Teng proposent un modèle modifié de la section effectivement confinée. Dans ce modèle, la section effectivement confinée est comprise entre quatre paraboles comme illustrées sur la **Fig I.24**, avec une pente initiale des paraboles égale à celle des diagonales adjacentes. [45]

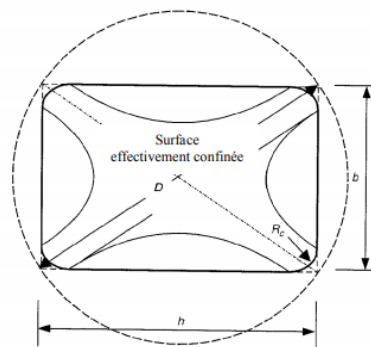


Fig.I.24: Modèle de coefficient de forme de Lam et Teng pour les colonnes de section rectangulaire. [90]

L-M Wang et Wu (2008) [91] testent 108 colonnes courtes de section carrée (150 mm x 150 mm x 300 mm) en béton confinées avec du «PRFC». Le but principal de l'étude était d'examiner l'effet des rayons de courbure des coins sur le confinement effective fournis par l'enveloppe composite, particulièrement pour des colonnes carrées avec des coins à 90°. Les variables d'essai ont inclus les rayons de courbure des coins, l'épaisseur de l'enveloppe composite et la classe de résistance du béton (résistance en compression de 30 et 50 MPa). Les résultats d'essai ont montré que le niveau de confinement est très influencé par le rayon de courbure des coins. En conclusion les auteurs ont montré que : [27]

- Au début de chargement, le confinement efficace de colonnes carrées avec des coins à 90° est insuffisant pour augmenter la résistance des ces dernières. Cependant, ce confinement augment après le pic de la charge maximale du béton non confiné et devient assez significatif pour améliorer la ductilité des colonnes.

- Pour un béton de résistance en compression de l'ordre de 50 MPa : le confinement a augmenté efficacement la ductilité de toutes les colonnes. Cependant, un niveau de confinement élevé ne peut pas fournir une ductilité élevée pour des colonnes avec un rayon de courbure des coins de l'ordre de 45 ou 60 mm.
- Pour un béton de résistance en compression égale à 30 MPa, et à l'exception des spécimens carrés à 90° et ceux avec un faible rayons de courbure des coins ($r = 15$ ou 30 mm), le confinement avec des «PRF» n'a pas une influence sur la ductilité.

Chapitre II : Matériaux composite

Ce deuxième chapitre est une introduction à la conception des matériaux composites, et leurs différents constituants. Suite à une présentation générale des matériaux composites, les différents types de matrices seront détaillés ainsi que les différents types de renforts existant. L'avantage des matériaux composites à renforts fibreux sera présenté.

On s'intéressera particulièrement à la fibre synthétique fibre de verre (le polymère renforcé en fibres de verre) et à la fibre naturelle fibre de jute (composite renforcé en fibre de jute) qui ont été utilisés dans cette étude. On y détaille notamment les procédés de fabrication de jute, ses constituants, son origine, et les avantages de son utilisation.

Sommaire du chapitre :

I. Introduction	30
II.1. Définition d'un matériau composite	30
II.2. Classification des matériaux composites	31
II.2.1. Classement suivant la nature des constituants	31
II.2.2. Classement suivant la morphologie	31
II.3. Constituants des matériaux composites	32
II.3.1. La matrice	33
II.3.1.1. Description de la matrice utilisée dans cette étude	35
II.3.2. Les charges	36
II.3.3. Les additifs	36
II.3.4. L'interface	37
II.3.5. Le renfort	37
II.3.5.1. Fibres synthétiques	39
a) Fibres de verre	39
b) Fibres de carbone	41

c) Fibres d'aramide	42
II.3.5.2. Fibres naturelles	42
II.3.5.2.1. Structure de la fibre végétale	44
II.3.5.2.1.1. Les différents constituants de la paroi végétale	45
a) Fibre de Jute	46
II.3.5.2.2. Utilisation des fibres végétales	49
II.3.5.3. Les différentes formes de renforcement	50
II.4. Application des matériaux composites	50
II.5. Mécanisme de déformations des polymères	51
II.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites	51
II.6.1. Les avantages	51
II.6.2. Les inconvénients	51

II. Introduction :

Au cours de ces dernières décennies, l'utilisation des matériaux composites à matrice organique a connu un essor considérable. Comparativement aux métaux, les composites présentent de nombreux avantages: légèreté, résistance à la corrosion, résistance aux chocs. [32]. Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux ". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. [33] L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

II.1. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. [34] Le composite est considéré comme constitué d'une matrice (phase continue) et d'un renfort (phase discontinue).

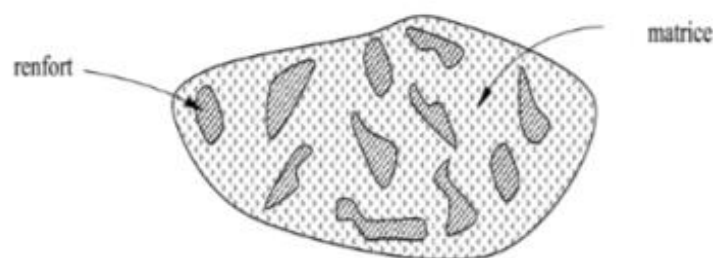


Fig.II.1 : Matériau composite [34]

Les propriétés des matériaux composites résultent:

- des propriétés des matériaux constitutants;
- de leur distribution géométrique;
- de leur interaction.

II.2. Classification des matériaux composites :

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures.

II.2.1. Classement suivant la nature des constituants :

- Composites à matrice organique : (résine, charges) avec :
 - Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
 - Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
 - Fibres métalliques : bore, aluminium, etc. ;
- Composites à matrice métallique : (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
 - Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
 - Des fibres métalliques : bore ;
 - Des fibres métal-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BSiC).
- Composites à matrice minérale : (céramique), avec :
 - Des fibres métalliques : bore ;
 - Des particules métalliques : cermets ;
 - Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires. [46]

II.2.2. Classement suivant la morphologie :

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (**Fig.II.2**) :

- **Composites à renforts de particules** : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

- **Composites à renforts de paillettes** : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan. [34]
- **Composites à renforts de fibres** : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- **Composites stratifiés** : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.[46][34]

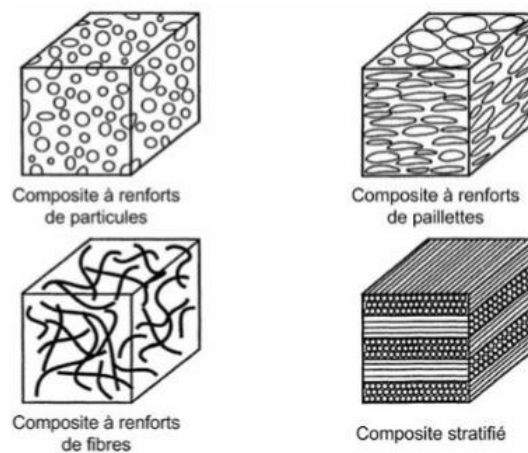


Fig.II.2. Classification des matériaux composites [46].

II.3. Constituants des matériaux composites :

Les performances mécaniques des composites sont directement liées aux caractéristiques des constituants élémentaires fibres et matrice mais aussi de la qualité de l'interface fibre-matrice.[39] La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux

constituants des matériaux composites.[35] La rigidité du matériau est assurée principalement par le renfort qui possède des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que la matrice.

La combinaison fibre-résine aboutit tout naturellement à un matériau ayant une bonne résistance mécanique, une grande rigidité et une bonne résistance chimique. En outre, ce composite est doté d'un module spécifique (module par unité de poids) et d'une résistance spécifique qui les rendent très compétitifs, vis-à-vis des métaux, dans les applications où le poids est un facteur déterminant [43].

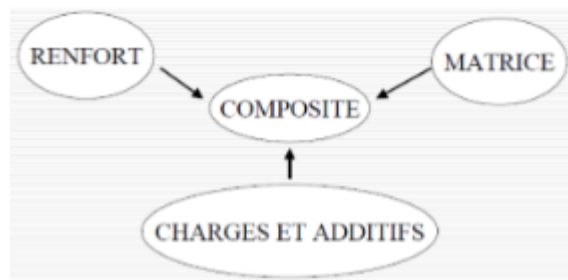


Fig.II.3: Constituants d'un composite [35]

II.3.1. La matrice :

Les matrices ont pour rôle de transférer les sollicitations aux fibres et de les maintenir en position, elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres, leur concentration massique doit être relativement faible de manière à conférer aux composites leurs caractéristiques mécaniques élevées.[31]

L'une des classifications des composites est la nature de la matrice utilisée. Dans le domaine de la mécanique, on distingue (**Fig.II.4**):

- Les composites à matrice organique qui constituent aujourd'hui la très grande majorité des composites industriels.
- Les composites à matrice céramique qui sont utilisés dans des applications de haute technicité pour des conditions extrêmes (haute température).
- Les composites à matrice métallique. [32]

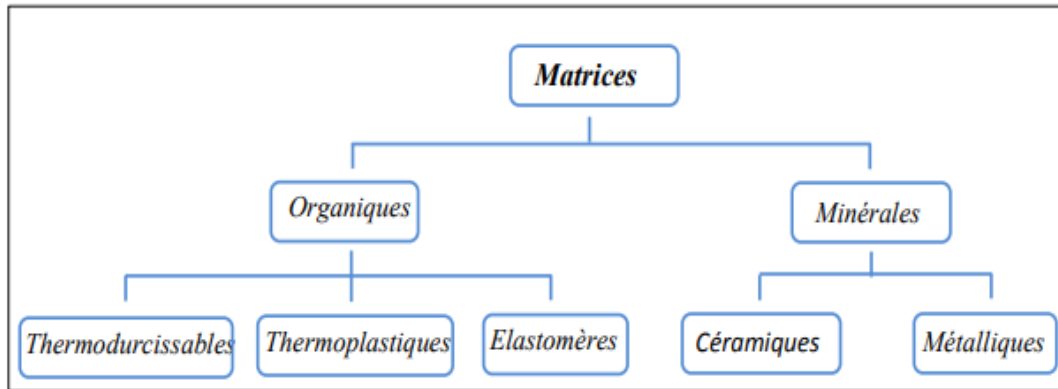


Fig.II.4 : Différents types de matrices utilisées dans les composites.

Les matrices peuvent être décomposées en quatre catégories en fonction du besoin industriel :

- les matrices thermodurcissables,
- les matrices thermoplastiques,
- les matrices thermostables,
- les matrices métalliques et céramiques. [35][37]

Les différences principales entre les thermoplastiques et thermodurcissables sont données dans le **Tab.II.1** :

Tab.II.1 : Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques [36]

Matrices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Bonne	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- Les polyesters insaturés : ce sont les résines les plus utilisées dans les applications grandes diffusion GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide et polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker ;
- Les vinylesters : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles ;
- Les résines époxy (ou époxydes) : constituent la résine type des composites hautes performances HP ;
- Les résines phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre ;
- Les polyuréthanes : ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule ; [38]

Les matrices thermodurcissables sont les plus utilisées, dans ce présent travail nous avons utilisé la matrice thermodurcissable résine époxyde « **EPOTEK FIX** ». Ces types de résines ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.

II.3.1.1. Description de la matrice utilisée dans cette étude :

EPOTEK FIX est un produit à deux composants à base de résine époxy formulée avec des charges spéciales et des agents thixotropes, à utiliser comme adhésif et mastic. Ce produit est sans solvant, présente une adhérence élevée sur tous les matériaux de construction et permet une liaison structurelle. Le durcissement de l'EPOTEK FIX se produit sans retrait, même dans des conditions environnementales difficiles telles que la présence d'humidité ou d'eau. (**Voir l'annexe 1**)



Fig.II.5 : matrice utilisée, produit EPOTEK FIX (durcisseur + résine)

Dans le cas des renforts jute, les matrices les plus utilisées sont les thermoplastiques tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) le polychlorure de vinyle (PVC) et le polyester. [32]

II.3.2. Les charges : [48]

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

Les principales charges utilisées sont :

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- des particules de carbone (noir de carbone)

II.3.3. Les additifs : [48]

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés. Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

II.3.4. L'interface :

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'intervient pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [48]

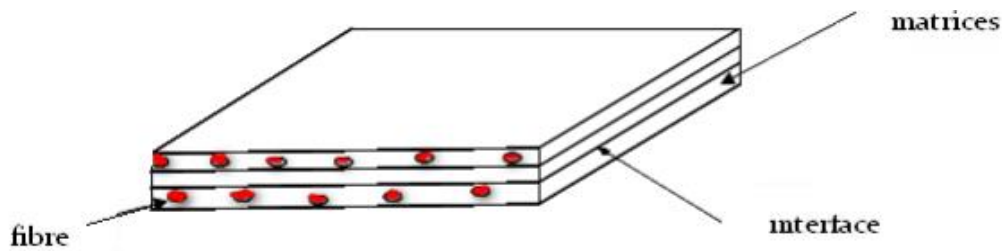


Fig.II.6 : Présentation de l'interface, matrice et fibre [50]

II.3.5. Le renfort :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la **Fig.II.7 [40]**:

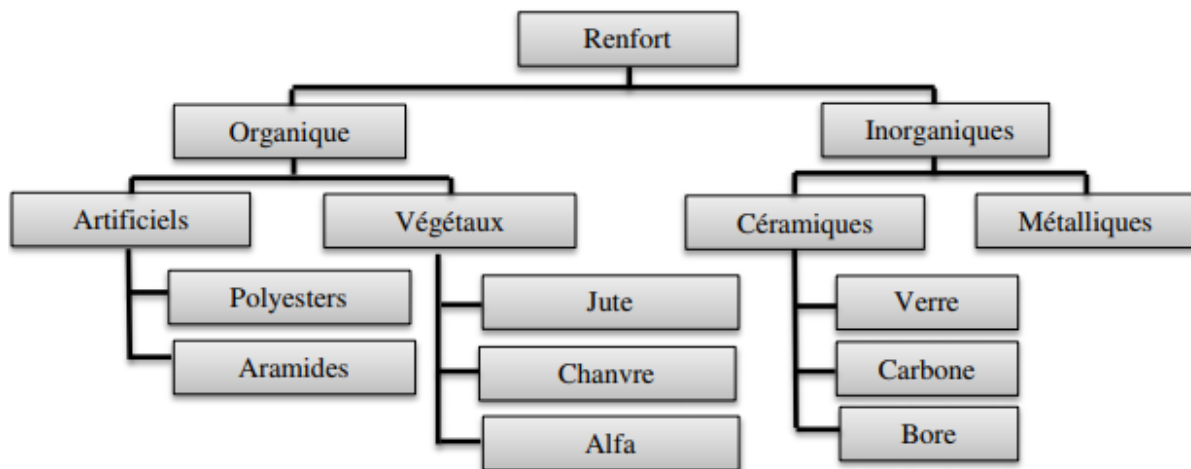


Fig.II.7. Architecture des renforts [40]

Dans cette étude nous avons utilisés deux types de renforts tissés, un renfort naturel tissé en fibre de jute et un renfort synthétique tissé en fibre de verre.

➤ **Cas des Renforts tissés :**

Les tissus sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures ; on distingue: la toile ou le taffetas, le sergé nm et le satin (**Fig.II.8**) [34]:

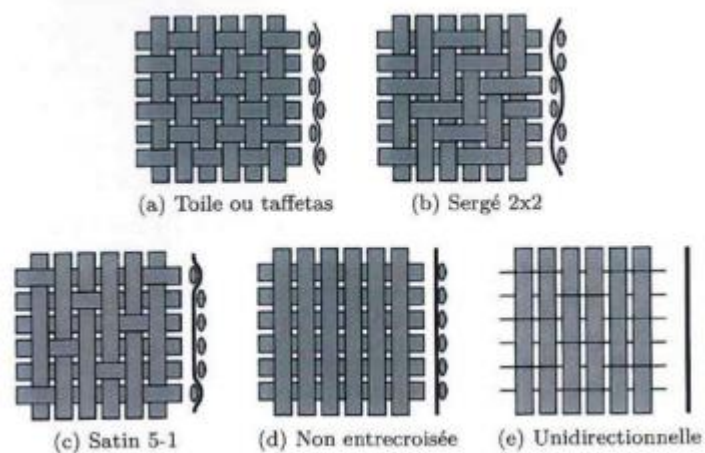


Fig.II.8. Différentes formes de renforts tissés [34].

Remarques :

- entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.
- Des additifs, en particulier des produits chimiques, rentrent dans la composition du composite pour former des interphases etc...
- Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope. [33]

La nature du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles parmi ces composites :

- Les renforts à fibres courtes qui permettent d'améliorer le comportement de la matrice seule. Celle-ci reste l'élément de base et l'on obtient alors un « polymère renforcé » ;

- Les renforts à fibres continues qui jouent un rôle majeur dans le comportement mécanique du composite. [33]

II.3.5.1. Fibres synthétiques :

Il existe plusieurs types de fibres synthétiques : fibre de verre, fibre de carbone, fibre aramide, fibre céramique, etc. Les plus répandues sont les fibres de carbone et les fibres de verre.

a) Fibres de verre :

Il existe plusieurs types de fibres de verre qui ont des compositions chimiques différentes, des propriétés différentes et qui sont fabriqués de façons différentes. On peut les classer dans le **Tab II.2** suivant.

Tab.II.2 : Différents types de fibre de verres textiles (1) [41]

Type	Indications générales
E	Bonne propriétés électriques à usages générales
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali (2)
C	Bonne résistance chimique
R	Haute résistance mécanique
S	Haute résistance mécanique
AR	Résistant en milieu basique
E-CR	Pour usage en milieu acide
(1) D'après la norme NF ISO 2078	
(2) Hydroxyde d'un métal alcalin	

Les fibres de verre E sont initialement développées pour leurs bonnes propriétés électriques d'isolation. Cependant, elles deviennent actuellement les fibres les plus utilisées sur le marché des fibres de renforcement en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et leur coût modéré (de 2 à 5 fois moins chères que les autres types) [41].

Les fibres de verre D sont composées essentiellement de silice et de bore, sont dotées de très bonnes propriétés d'isolation électrique. Elles sont développées pour les applications électriques à très hautes performances telles que les radômes pour les avions militaires. Les

fibres de verre C contiennent une forte teneur de la silice (jusqu'à 65%) qui leur confère une meilleure tenue que les fibres de verre E dans les milieux chimiques et particulièrement dans les milieux acides. Elles sont utilisées comme couches de protection anticorrosion des pièces dans le génie chimique ou dans la fabrication des bacs d'accumulateur. [42]

Les fibres de verre R ou S contiennent à hautes teneurs de la silice et de l'alumine mais pas d'oxyde de bore ou de métaux alcalins. L'absence de ces composants (dits fondants car ils diminuent la température de fusion des mélanges vitrifiables) entraîne des conditions d'élaboration plus difficiles et des coûts plus élevés.

En comparaison avec la fibre de verre E, leur résistance en traction et leur module d'élasticité sont respectivement 30% et 20% plus élevés. Leur masse volumique est légèrement inférieure (-4%).

Ils possèdent également une meilleure tenue en température que les fibres de verre E, ainsi qu'une meilleure résistance en milieux acides. Elles sont utilisées dans les industries aérospatiales, dans l'armement, dans des applications industrielles performantes (bouteilles de gaz comprimés, porteurs pour les câbles optiques, etc.) ou en remplacement de l'amiante dans les organes antifriction. Pour les fibres de verre AR (Alcalis résistants), leur particularité est une forte teneur en oxyde de zirconium (16-20%).

Dans l'industrie, ces fibres sont intéressantes comme renfort de ciment en milieu basique. [42]

Tab.II.3 : Composition de différentes fibres de verre [45]

Constituants en % en point	Verres polyvalents	Verres résistants aux acides	Verres à hautes résistances mécaniques		Verres diélectriques
	Type E	Type C	Type R	Type S	Type D
Silice SiO ₂	53 à 54	60 à 65	60	62 à 65	73 à 74
Alumine Al ₂ O ₃	14 à 15,5	2 à 6	25	20 à 25	< 0,5
Chaux CaO	20 à 24	14	6	-	0,5 à 0,6
Magnésie MgO		1 à 3	9	10 à 15	
Oxyde bore B ₂ O ₃	6,5	2 à 7	-	0 à 1,2	22 à 23
Fluor F	0 à 0,7	-	-	-	-
Oxyde de sodium Na ₂ O	≤ 1	8 à 10		0 à 1,1	1,3
Oxyde de zirconium ZrO ₂		0,5			-
Oxyde de potassium K ₂ O					1,5
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃					
Oxyde de titane TiO ₂					

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci/dessus sont résumées dans le Tab.II.4.

Tab.II.4 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

<i>Caractéristiques</i>	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

La Fig.II.7 représente les différentes formes des fibres de verre.

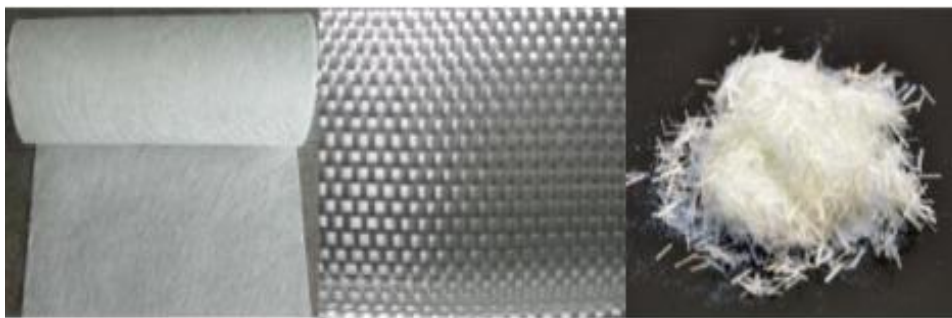


Fig.II.9: Fibres de verre

b) Fibres de carbone :

Présentent un coût 10 à 20 fois plus élevé que les fibres de verre, et sont donc utilisées dans des applications nécessitant des propriétés comparables à celles de l'acier. Elles présentent de très bonnes propriétés mécaniques, pour une masse volumique généralement inférieure à 2000 kg/m³. Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère précurseur, se présentant sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement les fibres utilisées sont principalement des fibres acryliques fabriquées à partir de poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent ensuite une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation de la structure. La qualité des fibres de carbone finales dépend des qualités du précurseur. [29]

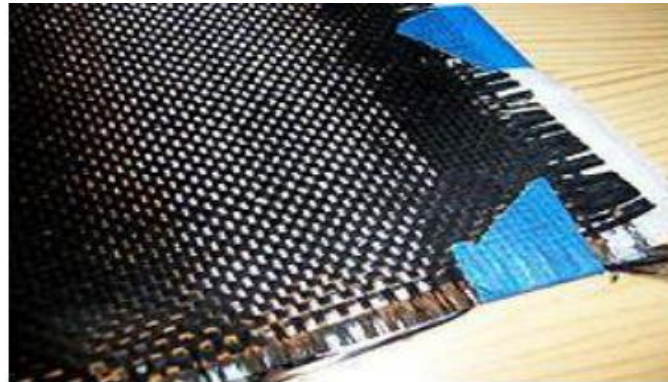


Fig.II.10 : Fibre de carbone [50]

c) **Fibres d'aramide**

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevés sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours.

II.3.5.2. Fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : animale, végétale et minérale. Elles peuvent être subdivisées en trois groupes (**Fig.II.11**) :

- Fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- Fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie),
- Fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco). [32]

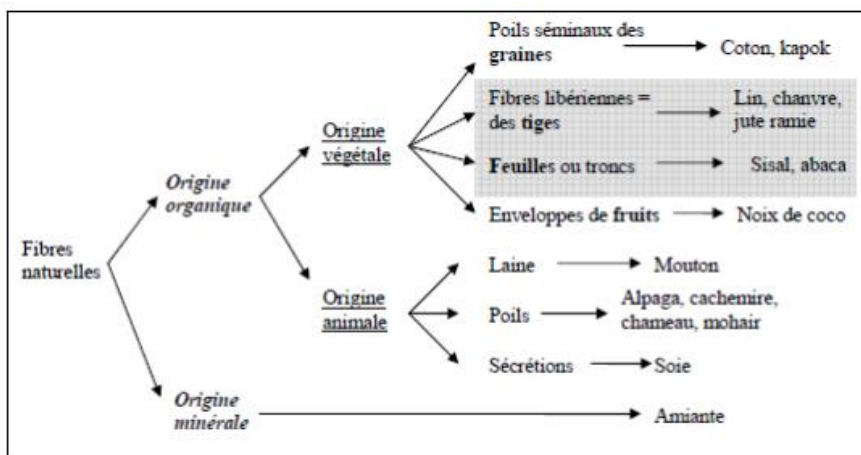


Fig.II.11 : Les différents types de fibres naturelles

Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile. Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne (**Tab.II.5**). [44]

Tab.II.5 : Classification et exemples de fibres naturelles

Origine	Provenance	Exemples
Végétale	Graines	Cotton, kapok, Asclépiade
	Fruits	Noix de coco
	Ecorces	Lin, chanvre, jute, ramie, kénaf.
	Feuilles	Sisal, henequen, abaca, Ananas
	Bois	
	Tiges	Blé, maïs, orge, seigle, avoine, riz
	Cannes et roseaux	Bambou, bagasse, alfa, roseau
Animale	Laine/poll	Laine, polls, Cachemire
	Vers à soie	Soie de tussah, soie de mûrier
Minérale		Amiante, Wollastonite

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont déterminées par leur :

- Composition chimique : pourcentage de cellulose (micro-fibrille = renfort).
- Structure physique : angle micro-fibrillaire.
- La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.

[66]

De nombreuses variétés de fibres provenant du liber (tige) sont utilisées aussi bien pour la confection d'étoffes raffinées que pour la fabrication de cordages. Outre le lin, extrait de la tige de chanvre, le jute et la ramie sont utilisés pour la fabrication de tissus plus grossiers, de cordes et de ficelles. Ces fibres sont les plus utilisées dans les composites polymères grâce à leur résistance mécanique élevée et des propriétés spécifiques. [32]

L'utilisation de fibres végétales correspond à l'exploitation de ressources locales. En Europe et dans les pays à climat tempéré, les fibres de lin [51] [52], de chanvre [53] [54] et d'ortie [53] présentent un grand intérêt en raison de leur abondance. A contrario, dans les zones tropicales, de nombreuses études portent sur le jute [55] [56] [57] [58], le kénaf [59], le sisal [60], le palmier [61], le bananier [56], etc. Ainsi, en raison de l'émergence de considérations

liées au développement durable, de nombreuses études portant sur les composites issus de ces différentes ressources ont été menées au cours de ces dernières années [72] [73] [74] [75] [76] [77].

Comparées aux fibres classiquement utilisées dans le renforcement des composites, telles que les fibres de verre, les fibres naturelles possèdent des propriétés mécaniques plus faibles (Tab.II.6). Cependant, ces fibres ont des densités moins élevées, et donc des rapports spécifiques propriétés/densité comparables aux fibres de verre. [44]

Tab.II.6 : Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles comparées aux fibres de verre et aux fibres de carbone

Fibre	Densité (g.cm-3)	Diamètre (µm)	Limite de traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Lin	1.5	40-600	345-1500	27.6	2.7-3.2
Chanvre	1.47	10-100	650-900	30-70	1.6
Jute	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1,16-1,5
Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
Glass fibre	2.55	17	3400	73	2.5
Carbone	1.78	5-7	3400a-4800b	240b-425a	1.4-1.8

II.3.5.2.1. Structure de la fibre végétale :

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine [67].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (Fig II.9) [68][66].

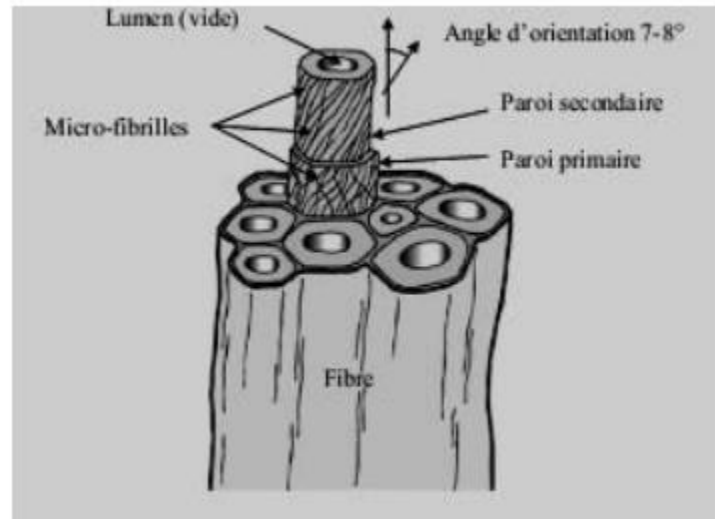


Fig. II.12. Schéma des parois d'une fibre de jute [69].

Les micro-fibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro-fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente. [66]

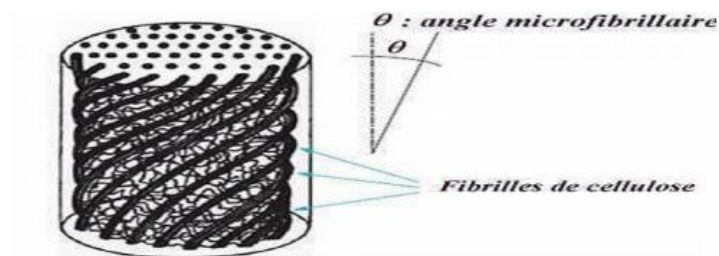


Fig. II.13. Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [28].

II.3.5.2.1.1. Les différents constituants de la paroi végétale :

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment les composées les plus majoritaires sont la cellulose, l'hémicellulose les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe (**Fig. II.14**).

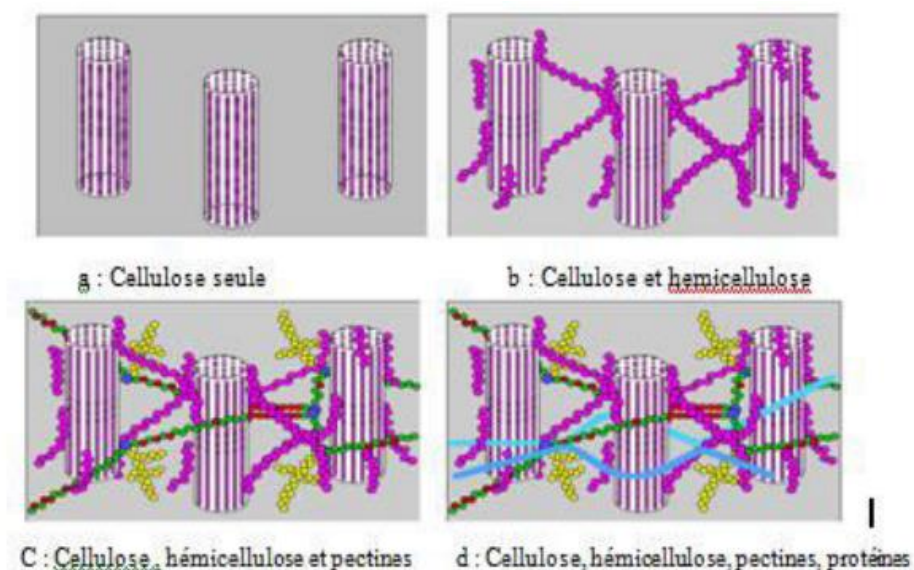


Fig.II.14 :Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres chanvre à l'échelle micrométrique [70]

Une des difficultés des fibres naturelles est la grande variabilité de leurs propriétés mécaniques comparée aux propriétés très contrôlées des fibres synthétiques. Les propriétés mécaniques des fibres naturelles végétales dépendent en effet de la structure, la composition chimique, les angles micro-fibrillaires, la tailles des cellules et les défauts des fibres considérées. Plus la fibre contient de la cellulose et plus la fibre unitaire sera rigide et résistante, ce qui découle logiquement du fait que la cellulose est le composé le plus rigide et résistant de la fibre. [29]

a) Fibre de Jute :

Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvacées, Il vient en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisation. Le jute est très polyvalent. La plante mesure 3 à 4 mètres de haut (**Voir la Fig.II.15**). C'est une fibre libérienne, extraite des tiges de deux espèces végétales de la famille des Tilliacées. [71]



Fig. II.15 : Plante de jute Typique a, b et c botte de fibres extraite de la tige de jute. [71]

La fibre de jute est constituée de 80 à 87 % de cellulose, le reste est de lignine. La longueur est de 1 à 5 mm et le diamètre est de 20 à 25 μm . Elle résulte de l'assemblage d'une dizaine ou plus de fibres élémentaires à section polygonale avec une ouverture centrale. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins (**Fig.II.16**). [32]

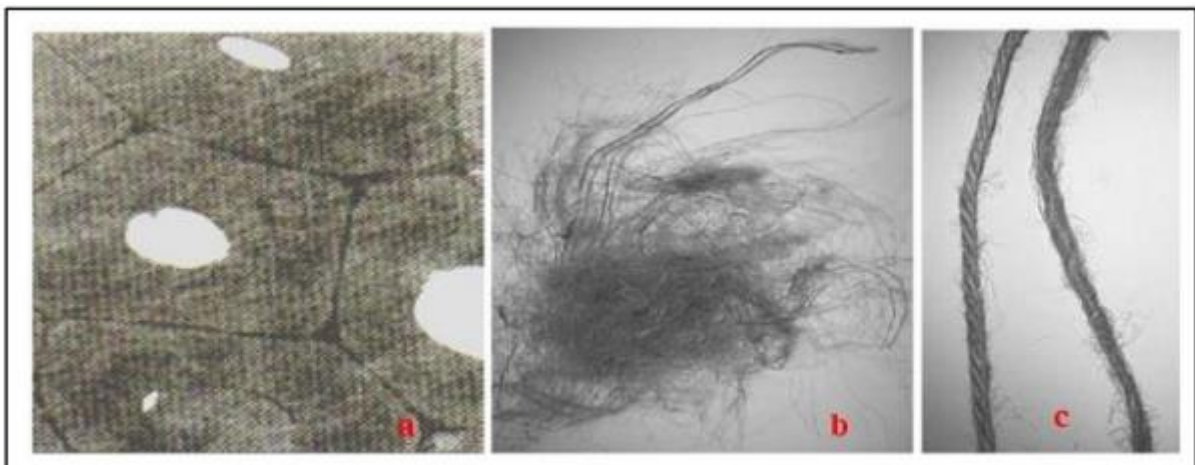


Fig.II.16 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c)

Les principales caractéristiques physiques des fibres de jute sont présentées dans le Tab. II.7

Tab.II.7 : Principales caractéristiques physiques des fibres de jute [32]

CARACTERISTIQUES	
Longueur de la fibre [mm]	2.5
Masse volumique g/cm ³	1.48 – 1.50
Reprise en humidité (20°C – 65% HR) [%]	16 – 18
Taux de sorption d'eau [%]	25.4
Ténacité à sec [N.Tex ⁻¹]	0,3 – 0,6
Perte de Ténacité au mouillé (%)	Gain de 15 - 25
Résistance aux UV	moyen
Résistance aux micro-organismes	moyen

La transformation des fibres jute en fil passe par différentes opérations:

- Ouverture du jute
- Ensimage : projection d'une émulsion d'huile dans l'eau sur le jute servant à humidifier les fibres et de permettre un meilleur glissement des fibres les unes sur les autres
- Obtention des fibres de longueur régulière par cardage.
- Parfaire le parallélisme des fibres par étirage.
- Filage et mise en forme en Rolls. [28]

Le comportement mécanique de la fibre de jute est gouverné par : l'orientation de l'axe de sollicitation des fibrilles et le glissement de celles-ci les unes par rapport aux autres. L'angle microfibrillaire du jute est influencé par le pourcentage de cellulose (61% à 71%). Il est de l'ordre de 8°. Ce dernier influe sur le comportement mécanique du jute, plus l'angle microfibrillaire est faible, plus la rigidité et la résistance de la fibre sont élevées. L'allongement à rupture est d'autant plus important que si l'angle microfibrillaire est important. [32]

Plusieurs traitements de surface peuvent être effectués pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques du jute. Ces traitements modifient la morphologie et l'interphase. Les traitements aux UV augmentent la résistance à la flexion de 58%. Le mode de rupture du renfort dans les stratifiés diffère grâce aux traitements des fibres. La rupture des fibres non traitées est nette, par contre, celle des traitées au silane est moins nette grâce à la cohésion des fibrilles.

Le traitement à la soude (NaOH 1%, 4 heures) améliore la résistance de la fibre. Dans ce cas, l'hémicellulose et la lignine sont dissouts et la zone inter fibrillaire est moins dense et moins rigide. Ceci permet aux fibrilles de se réorganiser dans le sens de la traction. Lorsque les fibres sont étirées, de tels arrangements entre les fibrilles se traduiraient par un meilleur partage de la charge. [32]

II.3.5.2.2. Utilisation des fibres végétales :

Avantages et inconvénients Outre l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement au stade de la fabrication, un composite renforcé par des fibres naturelles contribue également au respect de l'environnement.

Les fibres naturelles sont étudiées en vue de leur utilisation comme renforts des plastiques et de tirer profit des atouts particuliers qu'offrent chacune d'elles. Par comparaison avec les fibres de verre, elles offrent néanmoins des avantages certains tels que :

- faible densité,
- des propriétés spécifiques élevées,
- facilement recyclables,
- moins fragiles que les fibres synthétiques (mise en œuvre faciles dans les courbures)
- biodégradables,
- large gamme de variétés disponibles et renouvelables à travers le monde,
- faible consommation d'énergie,
- coût de revient limité, [32]

Cependant, pour différentes applications, ces matériaux doivent être spécialement traités par rapport :

- à l'homogénéité des propriétés des fibres
- au degré de miniaturisation et le dégomme
- au degré de polymérisation et de cristallinité
- à la bonne adhésion fibre/matrice
- à la résistance à la pénétration de l'humidité
- au comportement au feu. [32]

II.3.5.3. Les différentes formes de renforcement :

La forme et la disposition des renforts sont importantes. Pour simplifier la manipulation des fibres, des semi-produits dans lesquels plusieurs milliers de fibres sont placées côte à côte avec des directions connues ont été mis au point. [65] Les différentes formes de renforcement peuvent être réalisées à l'aide de différentes configurations d'orientation de fibre : (voir Fig.II.17)

- Les unidirectionnels (tissu UD)
- Les bidirectionnels (tissé, tressé, . . .)
- Les multi-axiaux (NCF : Non Crimped Fabrics, NC2 : Non Crimped New Concept, ..)

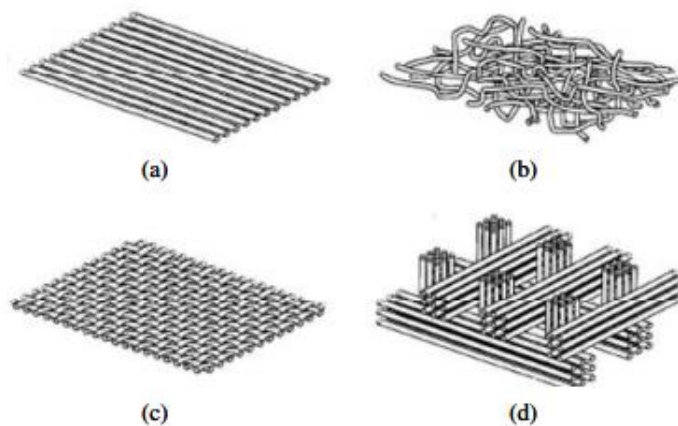


Fig.II.17 : Différentes formes de renforcement : (a) nappe unidirectionnelle, (b) mat, (c) tissu, (d) tissu tridimensionnel orthogonal. [65]

II.4. Application des matériaux composites :

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite : le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué.

- **Le système avec une cure in-situ :**

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

- le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture,

- le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton. [47]

▪ **Le système préfabriqué :**

Ce processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif.

II.5. Mécanismes de déformation des polymères :

Les polymères sont caractérisés par un comportement ductile, montrée par une augmentation de la température ou une diminution de la vitesse de chargement. La grande ductilité est associée à une réorientation des chaînes des polymères amorphes ou semi cristallins. Cependant, pour différents types de polymères, l'essai de traction permet d'observer la déformation macroscopique et les mécanismes de déformation induits.

Les paramètres qui permettent de quantifiés la réponse d'un polymère : sa rigidité (E), sa résistance à la rupture (σ_f) et sa ductilité (ϵ_{ultime}). [66]

II.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

II.5.1. Les avantages :

- Gain de masse.
- Mise ne forme de pièces complexe (principe de moulage) et réduction du nombre d'interface (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de corrosion.
- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquides, hydrauliques, peintures, solvant, pétrole. [72]

II.5.2. Les inconvénients :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.

- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumée parfois toxiques dans le cas de certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries. [72]

Chapitre III : Programme expérimental

Ce chapitre est divisé en deux parties principales, la première partie est consacrée à une caractérisation, mécanique, physique et chimique, permettant d'identifier les constituants de base des deux matériaux utilisés, à savoir les bétons et les composites constitués de tissu de fibre de verre et le tissu de fibre de jute et d'une résine époxy, et aussi exposer les différentes étapes de formulation, de confection et d'élaboration des corps d'épreuve, et particulièrement le procédé de mise en œuvre du renforts composites proposés. La deuxième partie du programme expérimental comporte la partie la plus importante de cette étude, nous avons présenté les résultats et leurs interprétations pour pouvoir répondre aux objectifs fixés par cette étude, qui est d'évaluer le comportement des propriétés mécaniques des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations non confinées et confinées, à l'aide d'enveloppes en matériaux composites collées en surface, ainsi que la dépendance du confinement de la formulation du béton.

Sommaire du chapitre :

III. Introduction.....	53
III.1. Programme des essais	53
PARTIE I : Elaboration des corps d'épreuve	54
III. Matériaux utilisés	54
III.1. Le ciment	54
III.1.1. Composition chimique et minéralogique	54
III.2. Les granulats	55
III.2.1. Essai sur les granulats.....	56
III.3. L'eau de gâchage	57
III.4. Béton	57
III.4.1. Composition du béton	57
III.4.2. Confection des éprouvettes	58
a) Malaxage du béton	59
b) Remplissage et conservation des moules	59

III.5. Matériaux composites	62
a) Tissu en fibre de verre	62
b) Tissu en fibre de jute	63
c) La résine	64
III.5.1. Mise en œuvre de composites	65
a) Préparation des enveloppes de tissu en fibre de jute et de tissu en fibre de verre	66
b) Préparation de la résine	67
c) Collage du composite sur les surfaces latérales des éprouvettes prismatiques	67
III.6. Ecrasement des éprouvettes prismatiques	68
Conclusion	70
Partie II : Résultats et discussions	71
III.1. Les Comparaison entre les propriétés mécaniques des différentes formulations	74
III.1.1. Résistances mécaniques	74
III.1.2. Déformations	75
III.2. Etude de l'effet du confinement	76
III.2.1. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de jute (BCRFJ)	76
III.2.1.1. Résistances mécaniques	76
III.2.1.2. Déformations	77
III.2.2. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de verre (PRFV)	78
III.2.2.1 Résistances mécaniques	78
III.2.2.2. Déformations	79
III.3. Etude comparative des matériaux composites à renfort tissés à base de fibres de verre et fibres de jute	80
III.3.1. Résistances mécaniques	80
III.3.2. Déformations	81
III.4. Mode de rupture	81
III.4.1. Mode de rupture du béton non confiné	81

III.4.2. Mode de rupture du béton confiné	82
Conclusion générale et perspectives	83

III. Introduction :

Ce chapitre présente le programme expérimental conduit sur des échantillons de différentes formulations en béton non armé, dont les uns sont renforcés par une enveloppe composite complète tissée à base de fibre de verre et les autres tissés à base de fibre de jute à l'aide d'une résine à base époxyde. Les différentes méthodes d'investigation suivies ainsi que le programme des essais seront illustrés. La confection des échantillons : le béton et les composites seront exposés. La fabrication des éprouvettes, l'instrumentation, le mode de chargement utilisé lors de l'essai est également expliqué, ainsi que des précisions sur les détails du montage expérimental.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations ; confinées et non confinées ; à l'aide d'enveloppes en matériaux composites collés en surface. Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance, Déformation), sur les différentes formulations du béton ;
- Évaluer l'influence de la variation de l'un des paramètres constitutifs du béton (diamètre global des granulats) sur le comportement et la performance des éprouvettes confinées avec des matériaux composites «PRFV, BCRFJ»;
- Faire une étude comparative du comportement mécanique à la compression sur les deux composites PRFV, BCRFJ.

III.1. Programme des essais :

Le programme expérimental, se compose d'une série de 36 éprouvettes prismatiques, de dimensions (70x70x140) mm³. La série contient six formulations différentes, la différence d'une formulation à l'autre est le diamètre des granulats utilisés dans le mélange du béton, trois éprouvettes ont été gardées comme bétons témoins pour chaque formulation, et pour les autres, certaines ont été par la suite soit confinées par une enveloppe complète de tissu en fibre de verre (PRFV), soit avec une enveloppe de tissu en fibre de jute (BCRFJ) et collées par de la résine époxyde. Les éprouvettes sont ensuite testées en compression uni-axiale.

PARTIE I : Elaboration des corps d'épreuve

III. Matériaux utilisés :

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, ciment, sable, gravier, eau et les composites sont des renforts de tissus en fibre de verre et en fibre de jute combinées avec une résine thermodurcissable de type époxyde.

III.1. Le ciment :

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est désigné sous le nom de MATINE. Ce dernier est un ciment composé, de classe 42.5 et de sous classe B provenant de la cimenterie **LAFRAGE** d'Alger. Il contient donc environ un tiers d'additions minérales autres que le clinker. (Fig.III.1)



Fig.III.1 : Ciment utilisé (Matine)

III.1.1. Composition chimique et minéralogique :

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans le **Tab.III.1**.

Tab.III.1 : Composition chimique et minéralogique de Matine
(Fiche technique de MATINE) [7]

Analyse chimique						
Désignation	Perte au feu %	Résidus insolubles %	Teneur en sulfates SO ₃ %	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	Teneur en chlorures %	Teneur équivalent en alcalis %
%	7.50 – 12	0.7 – 2	2 – 2.7	1 – 2.2	0.01 – 0.05	0.3 – 0.75
Désignation	Composition hypothétique du clinker					
%	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %		
	58 – 64	12 – 18	6 – 8	10 – 12		

III.2. Les granulats:

Les granulats (sable, gravier), utilisés dans cette étude sont des granulats concassés, proviennent d’une sablière, stockés à l’université, ils sont lavés et séchés, à l’étuve à une température de 105°C pendant plus de 24h. Le lavage a pour but d’éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton, parce que ces impuretés perturbent l’hydratation du ciment et entraînent des défauts d’adhérence granulats/pâtes ainsi qu’une absorption d’eau (Voir Fig.III.2)



Fig.III.2 : Lavage et séchage des granulats utilisés dans les différentes formulations du béton

Les granulats ont une influence directe sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton frais et durci. Pour avoir donc un béton maniable, résistant et durable, il faut caractériser et optimiser au maximum les granulats entrant dans sa composition.

III.2.1. Essai sur les granulats :

➤ sélection granulométrique :

Après la phase de séchage des granulats à l'étuve, une sélection de la granulométrie par tamisage était réalisée, avec une tamiseuse à fréquence réglable de 50 Htz qui permet de déterminer les différents diamètres de grains qui constituent les échantillons (diamètres sélectionnés selon nos besoins). De ce fait, l'analyse consiste à séparer et à classer les grains selon leur diamètre à l'aide de la série de tamis suivante sélectionnée en (mm): fond, 0.16, 0.315, 0.63 ,1.25, 2.5, 4, 5, 10. On définit :

- Refus: la quantité de matériau retenue par le tamis
- Tamisât: la quantité de matériau passée à travers le tamis.

Le principe de l'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis pendant 15 min. (Voir Fig. III.3) (Tab.III.2). Après la sélection des différents diamètres de grains qui constituent les différentes formulations, ce dernier conservé dans des sacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec normalisés et propres).



Fig.III.3 : Appareil de tamisage et les diamètres de granulats utilisés.

Tab.III.2 : Diamètres de granulats utilisés pour chaque formulation du béton

Formulations	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Diamètres de granulats utilisés (mm)	ds ₁ = 0.16 ds ₂ = 0.315 ds ₃ = 0.63 D _G = (4-5)	ds ₁ = 0.315 ds ₂ = 0.63 ds ₃ = 1.25 D _G = (4-5)	ds ₁ = 0.63 ds ₂ = 1.25 ds ₃ = 2.5 D _G =(4-5)	ds ₁ = 0.16 ds ₂ = 0.315 ds ₃ = 0.63 D _G = (5-10)	ds ₁ = 0.315 ds ₂ = 0.63 ds ₃ = 1.25 D _G = (5-10)	d ₁ = 0.63 ds ₂ = 1.25 ds ₃ = 2.5 D _G = (5-10)

III.3. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du robinet, qui est une eau potable du réseau de la ville de Tizi Ouzou. Aucune analyse chimique n'a été réalisée la dessus puisqu'elle est propre à la consommation.

III.4. Béton :

Formuler un béton consiste à déterminer un mélange optimal des granulats dont on dispose ainsi que le dosage en fines et en eau afin d'obtenir les qualités recherchées. Un point commun à toutes les études de composition, consiste à rechercher conjointement deux qualités essentielles : l'ouvrabilité et la résistance. [4]

III.4.1. Composition du béton :

Dans notre étude, les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées à partir des bétons ordinaires, six types de formulations de béton étaient utilisés. Pour la fabrication des différents échantillons à étudier, la quantité de granulat, ciment et d'eau restent constant quel que soit la formulation, ne changeant que les diamètres des granulats utilisés, afin de voir son effet sur les résistances mécaniques en compression ainsi que la dépendance du confinement de la formulation du béton.

Six éprouvettes sont utilisées pour chaque formulation du béton. Les constituants du béton sont présentés dans le (Tab.III.3) (Voir Fig.III.4).

Tab.III.3 : Les constituants de béton

Pour 1 m ³	Masse volumique (Kg/m ³)	2300
	(Sable + Gravier) (Kg)	1700
	E/C	0.48
	Dosage en ciment (Kg/m ³)	400
	Quantité d'eau (Kg)	192
La quantité totale de chaque constituant pour toutes les formulations	60% Gravier (Kg)	31
	40% Sable (Kg)	21
	Ciment (Kg)	11.84
	Eau (kg)	5.68



Fig.III.4 : Constituants des différentes formulations du béton

III.4.2. Confection des éprouvettes :

La confection des éprouvettes est faite conformément à la norme [NF P 18-404_Décembre 1981] (**Voir l'annexe 2**), pour les six formulations du béton, le confinement et les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques (70x70x140) mm³. Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

a) Malaxage du béton :

Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical, constitué de cuve et de palettes centrales tournantes, sa capacité est de 65 litres, il donne un béton très homogène.

Le malaxage de béton a été réalisé comme suit : **(Voir l'annexe 2)**

- Pré mouillage du malaxeur, pour limiter une absorption de l'eau de gâchage.
- Introduction des constituants secs dans la cuve du malaxeur;
- Malaxage à sec pendant 1 min ; un mélange à sec est nécessaire pour homogénéiser le mélange ;
- Ajout d'eau d'une façon uniforme pendant les 30 secondes qui suivent, en poursuivant le malaxage durant 2 minutes, jusqu' à ce que le mélange devienne homogène. **(Voir la Fig.III.5).**

b) Remplissage et conservation des moules :

Le remplissage et conservation des moules s'est fait comme suit : **(Voir l'annexe 2)**

- Après gâchage, on procède au remplissage à raison de deux couches, dans des moules métalliques qui ont été enduits d'huile à l'avance.
- On procède au vibrage à la table vibrante pour les deux couches ; la durée totale de vibration 10 s (5 s pour la première couche et 5 s pour la dernière) ;
- Enfin araser et lisser la surface du béton avec une truelle.
- La conservation des moules contenant les éprouvettes, se fait dans le laboratoire, et afin d'éviter toute dessiccation initiale, on protège les moules par du film plastique.
- Après 24 h les éprouvettes sont démoulées, renommées et immergées dans un bassin d'eau à une température $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et ce jusqu'à l'âge de 28 jours.

(Voir les Fig.III.5, Fig.III.6, Fig.III.7, Fig.III.8)



**Fig.III.5 : Malaxeur et Moules huilés utilisés pendant les essais
(Laboratoire de GC de l'Université de Mouloud Mammeri)**



**Fig.III.6: Éprouvettes compactées avec une table vibrante
(Laboratoire de GC de l'Université de Mouloud Mammeri)**



**Fig.III.7 : Éprouvettes coulées, rasées, protégées par un film transparent.
(Laboratoire de GC de l'Université de Mouloud Mammeri)**



**Fig.III.8 : Démoulage, Nomination des éprouvettes et Bassin de conservation
(Laboratoire de GC de l'Université de Mouloud Mammeri)**

Nous avons laissé les éprouvettes dans un bassin de conservation rempli d'eau, juste après le démoulage pour y subir une cure d'hydratation jusqu'au mûrissement du béton à 28 jours, dans le but d'avoir un béton n'ayant pas subi de dessiccation. Toutes les éprouvettes ont été testées après 28 jours de mûrissement afin de déterminer les propriétés mécaniques en compression du béton aussi bien témoin que confiné (PRFV, BCRFJ).

❖ **Remarque :**



Fig.III.9 : L'apparence externe des différentes formulations

Sur la **Fig.III.9**, nous avons constaté d'après l'observation visuelle que la troisième formulation (F3), est la formulation la plus faible en résistance mécanique, et ce, dû à la difficulté de vibration de la gâchée impactant la bonne adhérence entre les granulats et le liant hydraulique.

Pour les autres formulations F1, F2, F5, F6 nous constatons que ce sont des bétons très homogènes, qui présenteront à priori de meilleures résistances mécaniques, chose, que nous verrons dans la deuxième partie après l'écrasement des éprouvettes.

III.5. Matériaux composites :

Les matériaux composites, utilisés dans notre étude sont composé d'une résine à base époxyde (**Voir l'annexe 1**), et des tissus en fibre de verre et en fibre de jute.

- PRFV: Polymère renforcé de fibre de verre.
- BCRFJ : Bio composite renforcé de fibre de jute

a) Tissu en fibre de verre :

Le tissu utilisé est un tissu de fibres de verre bi directionnel avec une couleur blanche. Il se comporte d'un point de vue mécanique comme un matériau orthotrope. (**Voir Fig.III.10**).



Fig.III.10 : Tissu de 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.

Tab.III.4 : caractéristiques élastique du tissu de composite [30]

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

b) Tissu en fibre de jute :

Nous avons utilisé un tissu naturel de renforcement de structures, à base de fibre de jute tissé de façon bidirectionnel, de couleur marron. Le jute a des propriétés spécifiques élevées, une faible densité, un comportement moins abrasif pour l'équipement de transformation, une bonne stabilité dimensionnelle et l'innocuité. Le jute est un textile à faible coût. (Voir la Fig.III.11)



Fig.III.11 : Toile de jute

Tab.III.5 : Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état naturel [4]

Masse volumique (g/cm ³)	Longueur (mm)	Diamètre (μ m)	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Module spécifique (N.m/kg)	Elongation (%)	Angle micro- fibrilaire (degrés)
1.3 - 1.49	1.5 - 120	20 - 200	320 - 800	8 - 78	30	1 - 1.5	8

Tab.III.6 : Composition chimiques de la fibre de jute a l'état naturel [4], pourcentage en poids.

Cellulose	Hemicellulose	Lignine	Pectine	Cires	Eau
59 - 71.5	13.6 - 20.4	11.8 - 13	0.2 - 0.4	0.5	12.5- 13.7

c) La résine :

La colle utilisée dans le cadre de ce travail est désignée sous le nom « EPOTEK FIX » (Voir Fig.III.12), est un produit thixotrope à base de résine époxydique. Elle est constituée de deux composants : une résine de couleur grise et un durcisseur de couleur noir. La proportion en masse des composants est de même quantité pour le durcisseur et pour la résine (durcisseur/ résine = 1) à mélanger au moment de l'utilisation. Ses caractéristiques sont illustrées dans le tableau suivant : (Voir l'annexe 1)

Tab.III.7 : Caractéristiques de la matrice.

	Couleur	Densité	Temps d'ouvrabilité	Résistance à la compression	Allongement à la rupture
Pâte époxydique	Grise	1.6 (Kg/L)	30 min à 20 c ⁰	> 60 (Mpa)	2%



Fig.III.12 : Résine époxydique d'imprégnation pour tissu de renforcement

A 26 jours, nous avons sorti les éprouvettes du bassin de conservation, une fois nettoyée à l'eau pour enlever les résidus surfaciques, nous les avons mises à l'étuve pendant 24 h à une température de 45°C.

Les 18 éprouvettes témoins ont été mises de côté, et pour celles destinées au confinement, il était nécessaire de faire un nettoyage approfondi des quatre faces de chaque éprouvettes, avec un balai et une éponge, dans le but d'obtenir une surface propre de toute impureté ; pouvant provenir de produits de coffrage ou de laitance du béton ; La surface ainsi nettoyée, était prête à recevoir les enveloppes composites. Ce procédé de préparation nous permet l'obtention d'une très bonne adhérence entre celui-ci et le béton. (Voir la Fig.III.13)



Fig.III.13 : Séchage et nettoyage de la surface latérale des éprouvettes prismatiques en béton

III.5.1 : Mise en œuvre de composites :

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec, se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine, qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. La direction principale des fibres a été orientée dans le sens longitudinal des éprouvettes prismatiques.

Les deux renforts utilisés dans cette étude, sont des renforts tissés de nature différente, le premier c'est un renfort naturel provenant usuellement de la cellulose (tissu en fibre de jute), et le deuxième c'est un renfort synthétique (tissu en fibre de verre).

La méthode utilisée dans ce travail est une technique de renforcement par collage externe d'un renfort tissé sur la surface latérale de l'éprouvette, à l'aide d'une résine à base époxyde. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

Les enveloppes composites sont réalisées selon les étapes suivantes :

a) Préparation des enveloppes de tissu en fibre de jute et de tissu en fibre de verre:

Les enveloppes de tissu de renforcement (fibres de verre et fibres de jute), ont été mesurées en surface de $140 \times 320 \text{ mm}^2$ et ensuite coupées à l'aide d'un ciseau et d'une règle. Nous avons découpé les tissus en surface de $140 \times 320 \text{ mm}^2$ au lieu de $140 \times 280 \text{ mm}^2$, afin que l'on s'assure que l'ensemble de la surface latérale des éprouvettes demi-prismatiques soit correctement confinée. (Voir la Fig.III.14)



Fig.III.14 : Mesure et Découpage du tissu en fibres de verre et en fibre de jute

b) Préparation de la résine :

La résine à base d'époxy à deux composantes, résine (A) et durcisseur (B), doit être mélangée peu de temps avant l'application. Dans un gobelet, nous avons pesé 40g de durcisseur

et la même quantité de résine, nous avons mélangé les deux composantes manuellement avec un bout de bois pendant 4 min, jusqu'à obtention d'un mélange homogène, prêt à être appliqué sur le support en béton au moyen d'une raclette (le produit a une durée de vie limitée 30 min à 20°C. Après cette période de temps, la résine est inutilisable). (Voir la Fig. III.15)



Fig.III.15 : Préparation de la matrice

c) Collage du composite sur les surfaces latérales des éprouvettes prismatiques :

Une fois le mélange homogène, nous avons mis une petite quantité sur une raclette, nous l'avons étalée de bas en haut pour chaque face de l'éprouvette (1 mm d'épaisseur environ), ensuite nous avons collé le tissu autour de manière à ce que la jonction du tissu soit sur la face non lisse de l'éprouvette, maintenu le temps de durcir avec des élastiques. Après séchage de quelques heures (4 heures), à température ambiante, nous avons ajouté une deuxième couche de résine sur le tissu, pour que tout ce dernier soit recouvert de résine. Enfin, toutes confinées, les unes par le tissu en fibre de verre et les autres par le tissu en fibre de jute, les éprouvettes étaient mises à l'étuve à 45°C pendant 24 h pour subir un test d'écrasement en compression uni axiale. (Voir Fig.III.16)



Fig.III.16 : Collage des composites sur la face externe du prisme

III.6. Ecrasement des éprouvettes prismatiques:

Les essais de compression uni axiale des éprouvettes prismatiques (confinées et non confinées) de dimensions 70x70x140 mm ont été réalisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton (résistance à la compression, la déformation ϵ).

Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité 3000 KN, Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et l'autre supérieur fixe, viennent se placer à la surface supérieure et inférieure des éprouvettes à tester sur une surface de contact de 70x70 mm². La rotule est une rotule de type Autotest. L'essai est conduit sous un chargement quasi-statique avec une vitesse de 0,5 KN/s. La presse utilisé et le mode chargement est illustré par la (**Fig.III.17**)



Fig.III.17 : Presse hydraulique utilisé pour l'écrasement des éprouvettes

La mise en charge, doit se faire d'une manière continue, jusqu'au pic de la rupture de l'éprouvette, afin de mesurer le raccourcissement axial latéral des échantillons, ces lectures visuelles sont mesurées par un montage d'un comparateur de déplacements installé dans le sens vertical. La courbe Force – déplacement est illustrée par la **Fig.III.18**:

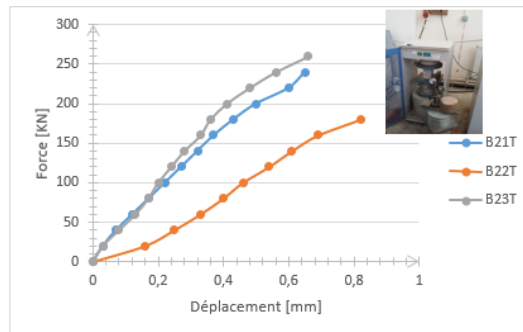


Fig.III.18 : Courbe Force-Déplacement du béton

Les résistances en compression sont obtenues par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S} \dots\dots\dots \text{Equation I}$$

D'où :

σ : Contrainte maximale (MPa).

F: Charge maximale (KN).

S : Surface de chargement (mm²).

ε : Déformations, elles sont calculées comme suit :

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \dots\dots\dots \text{Equation II}$$

Conclusion :

La technique de renforcement utilisée est une application directe par marouflage, du tissu imprégné d'une matrice à base époxyde, et de tissu de renforcement sur les surfaces externe des éprouvettes prismatiques.

Après la réalisation des corps d'éprouve, les éprouvettes prismatiques confinées et non confinées sont destinés à l'essai de compression uni-axiale jusqu'au pic de la rupture. Les résultats seront développés dans la partie II.

Partie II : Résultats et discussions :

Les différents résultats obtenus lors de l'essai de compression, en particulier la variation des déformations longitudinale en fonction des efforts appliqués, les résistances mécaniques moyennes sont donnés dans les tableaux suivants :

Tab.III.8 : Résultats de l'essai de compression sur le béton témoin

Formulation	Dimensions (mm ²)	Age (jours)	Déformations moyennes	La résistance à la compression		
				Force de rupture (KN)	Section (mm ²)	Contrainte moyenne de rupture (MPa)
F ₁	70X70	>28	0.0064	151.5	4900	31.06
F ₂			0.0051	210.5		45.28
F ₃			0.0059	95.7		19.52
F ₄			0.004	180.26		36.78
F ₅			0.0086	174.75		35.52
F ₆			0.016	185.12		38.49

Tab.III.9 : Résultats de l'essai de compression sur le béton confiné par une enveloppe tissée à base de fibre de jute (BCRFJ)

Formulation	Dimensions (mm ²)	Age (jours)	Déformations moyennes	La résistance à la compression		
				Force de rupture (KN)	Section (mm ²)	Contrainte moyenne de rupture (MPa)
F ₁	70X70	>28	0.0132	160.05	4900	32.66
F ₂			0.0157	155.3		31.69
F ₃			0.0181	102.15		20.84
F ₄			0.0118	96.45		19.67
F ₅			0.015	143.2		29.22
F ₆			0.047	162.11		33.08

Tab.III.10 : Résultats de l'essai de compression sur le béton confiné par une enveloppe tissée à base de fibre de verre (PRFV)

Formulation	Dimensions (mm ²)	Age (jours)	Déformations moyennes	La résistance à la compression		
				Force de rupture (KN)	Section (mm ²)	Contrainte moyenne de rupture (MPa)
F ₁	70X70	>28	0.0129	152.8	4900	31.18
F ₂			0.0146	168.9		34.47
F ₃			0.0107	112.2		22.90
F ₄			0.0074	122		24.90
F ₅			0.00929	175		35.71
F ₆			0.0261	181.19		36.98

Ces propriétés physiques élastiques et mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante : La contrainte axiale dans l'éprouvette est obtenue en divisant la force par l'aire de la section de l'éprouvette, la déformation en compression est calculée en divisant le raccourcissement retiré par la lecture visuelle sur le comparateur divisé par la longueur initiale de l'échantillon.

III.1. Les Comparaison entre les propriétés mécaniques des différentes formulations :

III.1.1. Résistances mécaniques :

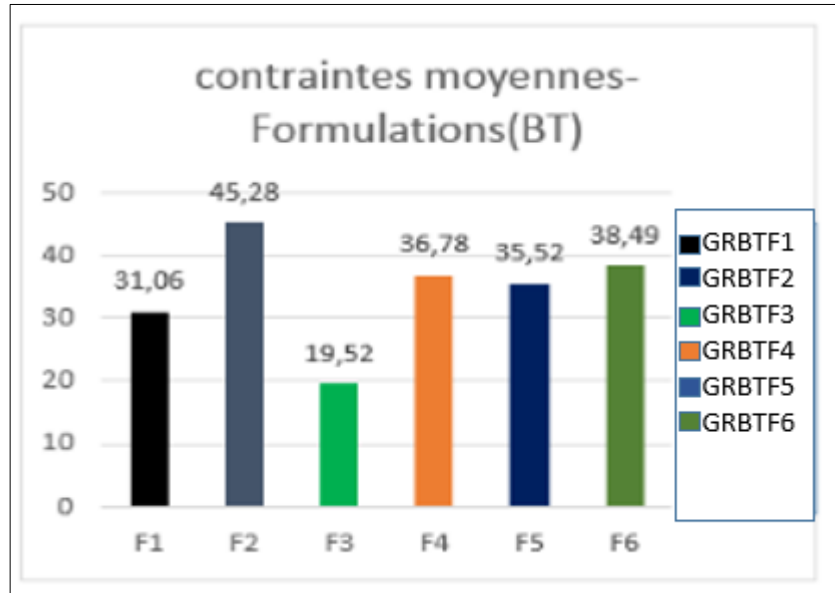


Fig.III.19 : Histogramme représentant les Résistances à la compression des bétons témoins en fonction des différentes formulations [MPa].

La **Fig.III.19** montre la résistance à la compression après 28 jours des bétons témoins en fonction des différentes formulations, dont les diamètres des granulats ont été variés au cours des expérimentations, chaque formulation a été constituée de trois diamètres différents de sable et un seul diamètre de gravier (**Voir le Tab.III.2**) Comme nous le voyons, dans toutes les formulations; la meilleure résistance mécanique de compression est obtenue dans la formulation F2 atteignant 45.28 MPa, tandis que dans les formulations F1, F4, F5 et F6, les résistances sont moindres, atteignant respectivement 31.06 MPa, 36.78 MPa, 35.52 MPa et 38.49 MPa, une très faible résistance mécanique est remarquée sur la F3 atteignant 19.52 MPa, cette faible résistance serait causée par l'inefficacité de la vibration ou plutôt la nécessité d'un temps de vibration plus long pour cette formulation, donnant un mélange moins homogène causant une mauvaise adhérence entre ses constituants (granulats et ciment), les grains n'adoptent pas la disposition la plus compacte ; (**voir la Fig.III.9**)

Concernant les formulations dont le $D_{max}=5$, nous observons un comportement optimal dans la formulation F2. L'observation d'un optimum, cela montre que la disposition du squelette granulaire est le plus élevé, à quantité de ciment égale.

Dans les formulations dont le $D_{max}=10\text{mm}$, nous observons qu'il n'y a pas de variation notable entre les résistances mécaniques, en effet, elles varient selon les compositions entre 35,52 et 38,49 MPa. A partir du comparatif des histogrammes, nous observons que dans l'ensemble l'adoption d'un D_{max} élevé, donne globalement une meilleure résistance mécanique par rapport à un D_{max} faible, cela dit, l'optimisation de la formulation (cas F2 atteignant 45,28), permet d'obtenir des résistances mécaniques élevées via notamment le choix de diamètres de sables optimaux.

III.1.2. Déformations :

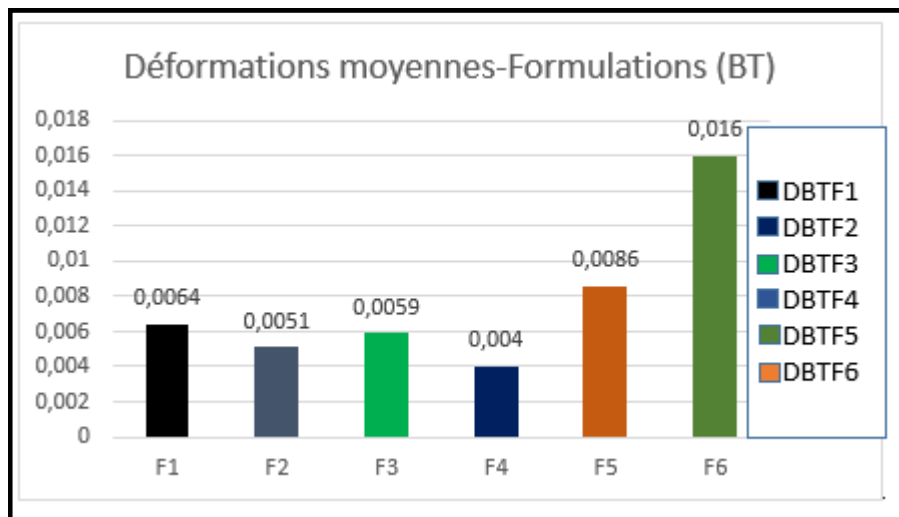


Fig.III.20 : Histogramme représentant les déformations à la compression des bétons témoins en fonction des différentes formulations.

La **Fig.III.20** montre deux comportements distincts selon le D_{max} considéré, effectivement lorsque $D_{max}=5\text{mm}$, nous observons une déformation quasi similaire située entre 0,0051% et 0,0064%, avec la valeur la plus faible observée pour l'éprouvette F2, ayant donné sur ses formulations la plus grande résistance mécanique. Lorsqu'on s'intéresse aux formulations à $D_{max}=10\text{mm}$, nous observons une augmentation graduelle des déformations allant de 0,004% à 0,016%, lorsque nous nous intéressons au détail des formulations F4, F5, F6, nous remarquons que le diamètre global des sables augmentent, que les vides inter-

granulaires sont globalement plus élevées, lors de l'application des charges, ces granulation ont la possibilité de se déplacer plus facilement et sur plus d'espace avant de rencontrer un autre granulant entravant son parcours, cela se traduit par conséquent par des déformation élevées.

Nous constatons sur les différentes formulations de cette étude que la variation de diamètre global des granulats joue un rôle très important sur les propriétés mécanique (Résistances, Déformations) du béton.

III.2. Etude de l'effet du confinement :

III.2.1. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de jute (BCRFJ) :

III.2.1.1. Résistances mécaniques :

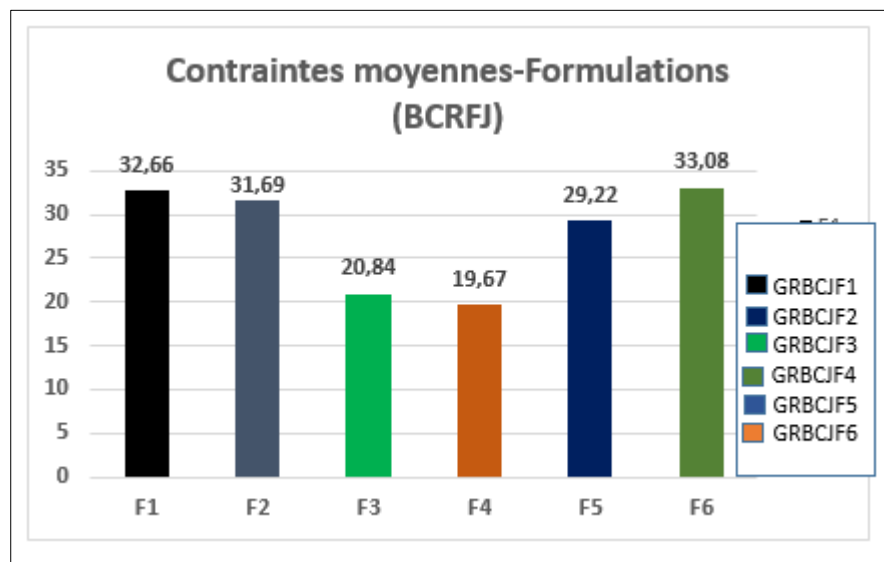


Fig.III.21 : Histogramme représentant les résistances à la compression des bétons confinés par une enveloppe tissé à base de fibre de jute en fonction des différentes formulations [MPa].

La Fig.III.21 montre que le confinement de F1, F3 avec des enveloppes tissées à base de fibre de jute, en comparaison avec les éprouvettes non confinées, conduit respectivement à une augmentation de la résistance à la compression de 4.90 %, 6.33 %. Ceci montre une amélioration de la contrainte ultime du béton en compression.

Le confinement de F2, F4, F5, F6 avec des enveloppes tissées à base de fibre de jute, en comparaison avec les éprouvettes non confinées, conduit respectivement à une chute de la résistance à la compression de 30 %, 46.5 %, 17.74 % et 14% comparativement aux témoins. Les observations montrent que le confinement n'est efficace a priori que pour les éprouvettes de béton de faibles résistances, cas de F1 et F3 notamment, dès que les résistances du béton sont élevées, (cas de F2, F4, F5, F6), cette efficacité diminue, voire devient négative, étant donné que l'on remarque une baisse des résistances mécaniques. Une hypothèse serait que, la fibre de jute ayant une résistance mécanique inférieure à un béton de bonne résistance, (cas de F2, F4, F5, F6), sous l'effet des poussées latérales du béton, il se déforme de manière importante, étant donné qu'il est collé très fortement au béton, sa dilatation amplifie celle du béton, et crée un état de fissuration important (notamment dans les parties réputées non confinées extérieures), réduisant la résistance mécanique. Dans le cas des bétons de faibles résistances, (F1, F3), le jute résistant plus que le béton, l'éprouvette rompt certainement à la résistance maximale du jute.

III.2.1.2. Déformations :

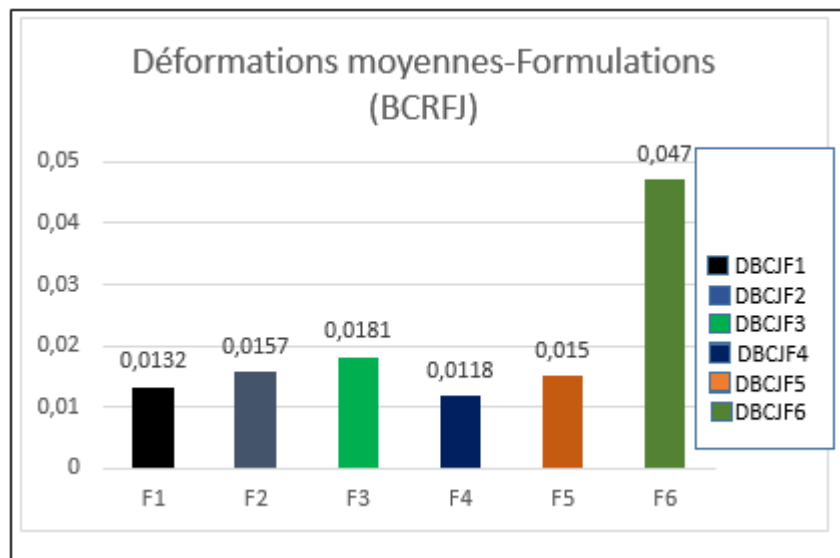


Fig.III.22 : Histogramme représentant les déformations à la compression des bétons confinés par une enveloppe tissée à base de fibre de jute en fonction des différentes formulations.

La **Fig.III.22** montre que le confinement des formulations (F1, F2, F3, F4, F5, F6) avec des enveloppes tissées à base de fibre de jute, en comparaison avec les éprouvettes non confinées, conduit respectivement à une augmentation de déformation à la rupture de 51.52 %, 67.52 %, 67.40 %, 66.10, %, 42.67 %, 65.95%.

Comme nous l'observons, le jute a eu pour effet d'augmenter la limite ultime de déformation des éprouvettes, cela est dû au fait que le jute étant très fermement collé aux parois du béton, il empêche ce dernier de s'effriter et le maintien en place, il peut donc se déformer de manière plus importante sans l'arrêt de la machine, une autre raison pour ces valeurs importantes, est comme cité précédemment, le fait que la déformation globale du béton est amplifiée par un effet d'arrachement latéral dû au tissu de jute, ce qui augmenterait la déformation dans le sens longitudinal de l'éprouvette de béton.

III.2.2. confinement avec une enveloppe tissé à base de fibre de verre (PRFV) :

III.2.2.1 Résistances mécaniques :

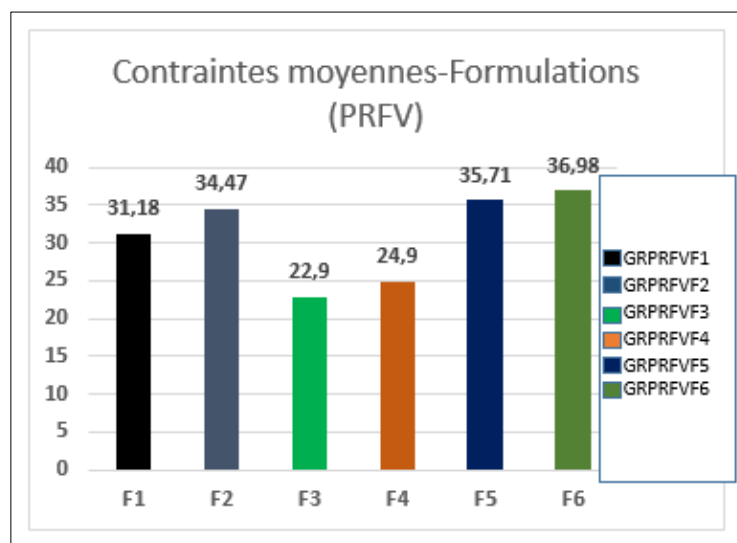


Fig.III.23 : Histogramme représentant les résistances à la compression des bétons confinés avec des enveloppes en PRFV en fonction des différentes formulations [MPa].

La **Fig.III.23** montre que le confinement de F1, F3, F5 avec des enveloppes en PRFV en comparaison avec les éprouvettes non confinées, conduit respectivement à une augmentation de la résistance à la compression de 0.38 %, 14.76 %, 0.53 %. Cette augmentation de résistance pour les deux formulations F1 et F5 est insignifiante, cependant ce confinement a nettement

augmenté la capacité de l'échantillon F3. Pour les formulations F2, F4, F6, avec des enveloppes en PRFV en comparaison avec les éprouvettes non confinées conduit respectivement à une chute de la résistance à la compression de 23.78 %, 32.30 %, 3.92 %. Les observations, comme dans le cas du jute, montrent que le confinement n'est efficace a priori que pour les éprouvettes de béton de faibles résistances, cas de F3 notamment dont la résistance à la compression est la plus faible, dès que les résistances du béton sont élevées, (cas de F2, F4, F6 qui sont par ailleurs les 3 résistances les plus élevées de l'ensemble des échantillons), cette efficacité baisse, voire devient négative, étant donné que l'on remarque une baisse des résistances mécaniques. La même hypothèse est proposée comme dans le cas du jute, la fibre de verre ayant une résistance mécanique inférieure à un béton de bonne résistance, (cas de F2, F4, F6), sous l'effet des poussées latérales du béton, il se déforme de manière importante, étant donné que le tissu est collé très fermement au béton, sa dilatation amplifie celle du béton, et crée un état de fissuration important (notamment dans les parties réputées non confinées extérieures cf. bibliographie), réduisant la résistance mécanique. Dans le cas des bétons de faibles résistances par ex. F3, le verre résistant plus que le béton, l'éprouvette rompt vraisemblablement du fait de l'atteinte de la résistance max du tissu de verre.

III.2.2.2. Déformations :

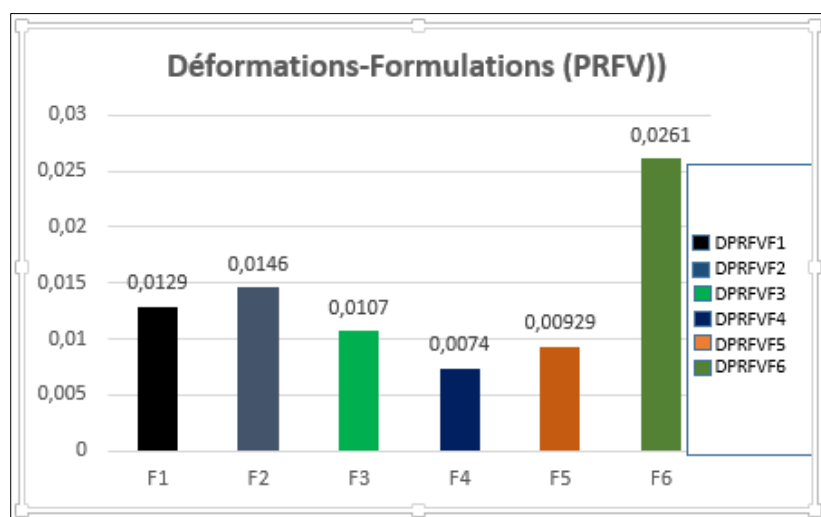


Fig.III.24 : Histogramme représentant les déformations à la compression des bétons confinés avec des enveloppes en PRFV en fonction des différentes formulations.

La Fig.III.24 montre que le confinement de F1, F2, F3, F4, F5, F6 avec des enveloppes en PRFV en comparaison avec les éprouvettes non confinées, conduit respectivement à une augmentation des déformations à la rupture respectivement de 50.38 %, 65.06 %, 44.86%, 45.94%, 7.42%, 46.75%. Comme nous l'observons, le tissu de verre a eu pour effet d'augmenter la limite ultime de déformation des éprouvettes de béton seul, cela est dû au fait que le tissu de verre bien collé aux parois du béton empêche celui-ci de s'effriter en morceau et contribue à le maintenir en place, il peut donc se déformer de manière plus importante sans l'arrêt de la machine, une autre raison pour ces valeurs importantes, est comme cité précédemment notamment le cas du jute, le fait que la déformation globale du béton est amplifiée par un effet d'arrachement latéral dû au tissu de jute, ce qui augmenterait la déformation dans le sens longitudinal des éprouvettes.

III.3. Etude comparative des matériaux composites à renfort tissés à base de fibres de verre et fibres de jute:

III.3.1. Résistances mécaniques :

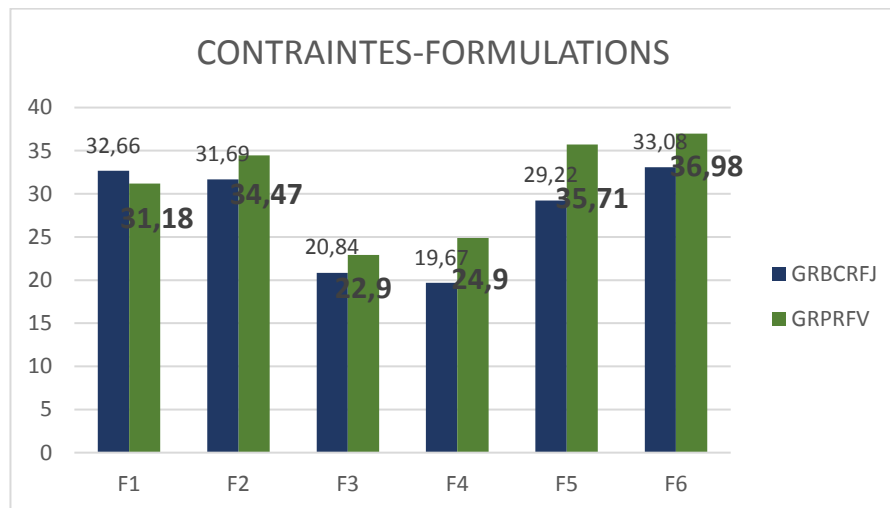


Fig.III.25 : Histogramme représentant les résistances à la compression des bétons confinés (PRFV, PRFJ) en fonction des différentes formulations [MPa]

La Fig.III.25 présente la comparaison des résistances mécaniques à la compression pour les deux composites PRFV et BCRFJ, nous observons que les composites de PRFV ont une résistance mécanique supérieure à celle des composites naturels (BCRFJ) dans tous les cas de

figures. La meilleure résistance a été observée sur la F5 atteignant 45.47 MPa pour le PRFV et 43.88 MPa sur la formulation F2 pour le PRFJ.

III.3.2. Déformations :

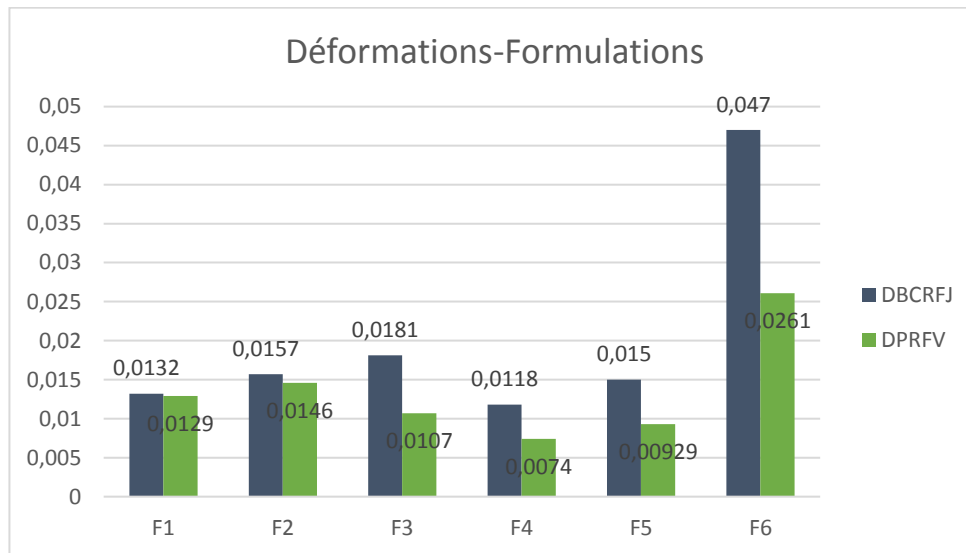


Fig.III.26 : Histogramme représentant les déformations à la compression des bétons confinés (PRFV, BCRFJ) en fonction des différentes formulations.

La **Fig.III.26** montre que les déformations sont plus importantes sur le composite naturel (BCRFJ) que sur le composite synthétique (PRFV), ce qui est cohérent avec les observations de la bibliographie, ou souvent les matériaux naturels issus notamment de végétaux ont la caractéristique d'être très déformables comparativement à leur équivalent synthétique.

III.4. Mode de rupture :

III.4.1. Mode de rupture du béton non confiné :

La rupture des éprouvettes prismatique (70x70x140 mm) non confinés en béton, lors des essais de compression, nous avons observé que la rupture au pic survient au niveau des coins en raison de la concentration des contraintes dans ces régions, au-delà de cette rupture les éprouvettes s'effritent avec destruction totale de l'éprouvette (**Fig.III.27**)



Fig.III.27 : Mode de rupture du béton non confiné

III.4.2. Mode de rupture du béton confiné :

Les éprouvettes prismatiques (70x70x140 mm) confinées avec des «PRFV» et «BCRFJ» ont été marquées par une rupture dans l'enveloppe composite au niveau des coins en raison de la concentration des contraintes dans ces régions (**Fig.III.28**). Dans toutes les éprouvettes testées, la rupture a été d'une manière "brutale" due à l'énergie de déformation emmagasinée dans l'enveloppe composite au cours du chargement. Après la rupture, le béton fissuré suite à l'application de la contrainte de compression reste confiné à l'intérieur de l'enveloppe composite.



Fig.III.28 : Mode de rupture du béton confiné en PRFV et BCRFJ

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale :

Dans ce mémoire de fin de cycle, nous avons présenté une étude expérimentale portant sur les propriétés mécaniques des éprouvettes prismatiques en béton avec diverses formulations confinées et non confinées. L'objectif était la caractérisation des propriétés mécaniques (Résistances, Déformations) des matériaux composites PRFV, BCRFJ sur les différentes formulations du béton ou nous avons varié le diamètre global des granulats dans chaque formulations, le comportement mécanique des composites a été testé en compression uniaxiale, ainsi une étude comparative entre les deux composites a été faite.

D'après les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation de diamètre D_{max} , par ex. $D_{max}=10$ mm des granulats dans le béton à un impact positif sur la résistance à la compression, pour des $D_{max}=5$ mm, une optimisation de la granulométrie permet d'avoir des résistances convenables ;
- Nous avons montré l'existence d'une dispersion dans les résultats des résistances à la compression des éprouvettes prismatique $70 \times 70 \times 140$ mm³, toutefois, nous avons obtenu plusieurs formulations de béton ayant des résistances moyennes supérieures à 25 MPa (F1, F2, F4, F5, F6), ce qui constitue, une des réponses aux attentes des professionnels du bâtiment.
- Le mode de rupture du béton confiné, PRFV, BCRFJ, ont été marquée au niveau des coins en raison l'inefficacité du confinement dans ces régions (dû à la géométrie), cette rupture est 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 et BCRFJ sont efficaces que sur les éprouvettes de faibles résistances.
- Le composite à renfort de fibre de verre a montré des bonnes résistances à la compression comparativement au composite en tissu de fibre de jute.

Perspectives :

- Tester des éprouvettes cylindriques de type 11x22 cm ou 16x32 cm afin de vérifier l'amélioration de l'efficacité du renforcement composite sur l'amélioration des résistances mécaniques.

- Tester d'autres types de tissus de renforcements naturels comme le lin facilement disponible localement.
- Tester les fibres de jutes en leur faisant subir un traitement de surface, afin d'en améliorer l'adhérence au béton
- Tester l'efficacité des composites sous environnement différents (températures, état hydriques).

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références Bibliographiques:

- [1]- A .HALEM, « Analyse paramétrique du confinement du béton : approche expérimentale », thèse de master académique ; université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [2]- Adam et Neville, M., « propriétés des bétons ». Editions Eyrols, Paris, 2000.
- [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]- Al-Salloum (2007) “Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates” Composites: Part B, Vol. 38, pp. 640-650.
- [5]- Amaury Lepetit. Elaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyéthylène. Chimie organique. Université de Limoges, 2017. Français.
- [6]- Amrou Ibtiham. « Etude expérimentale et numérique de effet d’orientation des fibres sur le comportement mécanique d’un bio-composite ».mémoire de magistère. 2016 /2017.
- [7]- Anh Vu Nguyen. Matériaux composites à renfort végétal pour l’amélioration des performances de systèmes robotiques. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français.
- [8]- Anne Hallonet. Développement et caractérisation d’un matériau composite à base de fibres de lin : application au renforcement de structures en béton par collage externe. Matériaux. Université de Lyon, 2016. Français.
- [9]- AYAD MOHAMED ; BARKA YASSINE, « modélisation des bétons ordinaires par des plans d’expériences », 24 juin 2013.
- [10]- BA-CORTEX, présentation du comportement du béton. Disponible sur : <http://www.bacortex.com/pages/cours/a1-materiaux/a1.3-comportement-du-beton.php>. Consulté en mars 2013.
- [11]- Baley C, Contribution à l’étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin. Rapport HDR. Université de Bretagne SudLorient, 2003.
- [12]- BEN AMMAR BENKHADDA, thème « traitement naturel des mortiers et bétons destinés aux structures en béton préfabriqué », 2006.

- [13]- Bergfjord C, Holst B. A procedure for identifying textile bast fibres using microscopy: Flax, nettle/ramie, hemp and jute. *Ultramicroscopy*. Vol. 110, pp. 1192-1197, 2010
- [14]- Campione, M. and Miraglia, N. (2003). Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. Elsevier Science Ltd. *Cement and Concrete Composites* 25, pp 31-41.
- [15]- CARMA 'centre d'animation regional en matriaux avaces ' , 'glossare matriaux composites ' ' 2006.
- [16]- Chaallal, O., Hassan, M. and Shahawy, M. (2003). Confinement Model for Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Wrapping. *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 2, March-April, pp 215-221.
- [17]- Cole, C. and Belarbi, A. (2001). Confinement Characteristics of Rectangular FRP-Jacketed RC Column. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*, Cambridge, UK, July 16-18, pp. 823-832.
- [18]- Construction moderne/Annuel ouvrage d'art 2011 ; « les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton.
- [19]- D. BROOKS, A.T. COREY. Hydraulic properties of porous media, colo.state univ, fort collins, 1964.
- [20]- DJEBLOUN Youcef. Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites.
- [21]- Dr. Ir. P. Boeraeve, Cours de Béton armé. Dernière impression le 17/01/2010 21:03:00.
- [22]- Dr.A. MERDES « cours de matériaux de construction II », U.F.A de stif.
- [23]- DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C. (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.
- [24]- El BARRAK M. (2005), « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III –Paul Sabatier, Juillet. 229 p.
- [25]- Farnfield CA, Alvey PJ, editors. *Textile terms and definitions*. 7th ed. Manchester: The Textile Institute; 1975. ISBN: 0-900739-17-7.
- [26]- Fiches techniques, tome 1 les constituants des bétons et des mortiers.
- [27]- Frédéric Laurin, « généralités sur les matériaux composites, méthodes et principes généraux de renforcement ».

- [28]- Frédéric Laurin. « Introduction générale sur les matériaux composites ». ONERA Châtillon cedex 2011.
- [29]- Glossaire des matériaux composites CARMA, Actualisation octobre 2006.
- [30]- Gunning.J.G, « concret technology : level 4 » Longman technician séries ; Const & civil, england, p 293, 1983.
- [31]- H. BOUCHELAGHEMa,b , A. BEZAZIb , M. BOUMAAZAc , N. ZANACHE c , F. SCARPA d . « Effet de l'orientation des fibres et leur type (CFRP/GFRP) sur le comportement des colonnes en béton ».Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [32]- Hany TOBBI. Thèse de doctorat « Comportement en compression de colonnes en béton renforcées d'armatures en prf ». Novembre 2012.
- [33]- Harries, K. A. and Kharel, G. (2003). Experimental investigation o f the behavior o f variably confined concrete. Elsevier Science Ltd. Cement and Concrete Research 33., pp 873-880.
- [34]- Hassan, M., and Chaallal, O. (2007). Fiber-Reinforced Polymer Confined Rectangular Columns: Assessment of Models and Design Guidelines. ACI Structural Journal, V. 104, No. 6, November-December, pp 693-702.
- [35]- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_\(plante\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_(plante)).
- [36]- Jean Lamanche. Renforts en fibres de verre, Techniques de l'Ingénieur, A3237, 1988.
- [37]- Jean-Marie Berthelot, « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » 5^e édition.
- [38]- K. Bledzki, J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibers", Prog. Polym. Sci. 1999.
- [39]- Khaldoune abd raouf. « Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composites »mémoire mastère, 2016.
- [40]- Kurt, C.E. (1978) "Concrete filled structural plastic columns", Proceedings of the American Society of civil engineering, Vol. 104, No. ST1, pp. 55-63.
- [41]- Lam, L. and Teng, J.G. (2003). Design oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Elsevier Science Ltd. Construction and Building Materials 17, pp471—489.
- [42]- LAPOINTE R. (1997) ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, mai.
- [43]- Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008.

- [44]- Lewington A. Plants for people. Eden project books. London: Transworld Publisher; 2003. ISBN: 1-903-91908-8.
- [45]- Maalej, M., Tanwongsva, S., and Paramasivam, P. (2003). Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP. Elsevier Science Ltd. Cement and Concrete Composites 25, pp 263-276.
- [46]- Malier Y, Les Bétons à hautes performances: caractérisation, durabilité, applications : compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [47]- Mander, J. B., Priestley, M.J.N. et Park, R. (1988) “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No.8, pp. 1804-1826.
- [48]- Mohamed El Hadi Bourahli. « Caractérisation d’un composite verre / époxy ». Thèse de doctorat, 2014.
- [49]- Mohcene BOUKHEZAR. « Comportement et analyse d’éléments structuraux en béton armé renforcés par des matériaux composites PRF en flexion simple ». Thèse de doctorat, 2014.
- [50]- NF EN 197-1 «La normalisation des ciments».
- [51]- NGUYEN T.L.H., (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de doctorat de l’école nationale des ponts et chaussées, 139 p.
- [52]- Oksman K, Mathew AP, Langstrom R, Nystrom R, Joseph K. The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene. Composites Science and Technology. Vol. 69, pp. 1847-1853, 2009.
- [53]- Ould El Hacen Zein El Abidine. «Renforcement du béton par les matériaux composites ». Mémoire de Master Académique, 2016.
- [54]- OURIDA Mohammed, « Formulation et caractérisation d’un béton polymère renforcé par des fibres végétales et filler de brique » thèse de master académique,2017.
- [55]- OUSSAD Fetta. « Etude expérimentale de l’effet de confinement ; par des matériaux composites sur des cylindres endommagés en béton ». mémoire de magistère académique,2017.
- [56]- Park JM, Quang ST, Hwang BS, DeVries KL. Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 2686–2699, 2006.

- [57]- Peng Wang. Étude numérique et expérimentale de procédé d'élaboration des matériaux composites par infusion de résine. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010. Français.
- [58]- Pierre-Alexandre BRIEMEL. Projet de fin d'études spécialité génie civil « Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone », 2013.
- [59]- Ragoubi M, Bienaimé D, Molina S, George B, Merlin A. Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof. *Industrial Crops and Products*. Vol. 31, pp. 344–349, 2010.
- [60]- Raphaëlle Sadone. Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites et soumis à des sollicitations de type sismique et analyse d'éléments de dimensionnement. Autre. Université Paris-Est, 2011. Français.
- [61]- Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh. Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton. Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp.264, 2010, 978-613-1- 55146-8.
- [62]- Richart, F. E., Brandtzaeg, A. and Brown, R. L. (1928). A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses. University of Illinois, Urbana. Engineering experimental station. Bulletin No. 185, 104 pp.
- [63]- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. et Li, M. W. (1994) "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", *ACI Structural journal*, Vol. 91, No.4, pp. 434- 447.
- [64]- Sedan, D., Thèse de doctorat, 2007, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Université de Limoges.
- [65]- Shaoxiong LIANG. « Etude de comportement en fatigue des composites renforcés par fibres végétales. Prise en compte de la variabilité des propriétés ». Thèse de doctorat, 2012.
- [66]- Shekhar Sharma HS, Van Sumere CF. The biology and processing of flax. Belfast: M Publications; 1992. ISBN: 0-9519963-0-4.

- [67]- Shinoj S, Visvanathan R, Panigrahi S. Towards industrial utilization of oil palm fibre: Physical and dielectric characterization of linear low density polyethylene composites and comparison with other fibre sources. *Biosystems engineering*. Vol. 106, pp. 378-388, 2010.
- [68]- Silva FA, Chawla N, Filho RDT. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*. Vol. 68, pp. 3438–3443, 2008.
- [69]- Sofien Bouzouita. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel. Autre. Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2011. Français.
- [70]- Tania Croston. « Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 point réparé par matériaux composites, juin 2006.
- [71]- TEC & DOC «Guide de la technique -2-: Métaux, Liants, Plastiques, Composites, Matières vivantes», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1991, PP: 143-148
- [72]- thesis.univ-biskra.dz/2282/3/ChapI.PDF.
- [73]- Thuault A. Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse Normandie, 2011.
- [74]- Toufik ACHOUR. Etude des techniques de réparation des structures composites endommagées. Année 2010/2011.
- [75]- Turner JA. Linseed law: a handbook for growers and advisers. Hadleigh, Suffolk: BASF (UK) Limited; June 1987. ISBN: 0-9502752-2-0.
- [76]- Van de Weyenberg I, Chi Truong T, Vangrimde B, Verpoest I. Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment. *Composites: Part A*. Vol. 37, pp. 1368–1376, 2006.
- [77]- Vilaseca F, Lo Pez A, Llauro X, Pelach MA, Mutje P. Hemp strands as reinforcement of polydyrene composite. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 82, pp. 1425–1431, 2004
- [78]- VIMAN PHOUMMVONG, M. Cours en béton armé-Essais de laboratoire, page. 1 à 146.
- [79]- W. Juimoa,b, R. Ngonob , D. Fokwab et T. Cherradia. Fissuration dans les ouvrages en béton armé soumis à la corrosion : simulation de la fissuration par éléments finis via le code Cast3M, Lyon, 24 au 28 Août 2015.

- [80]- Wang, L-M. et Wu, Y-F. (2008) “Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test”, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 493-505.
- [81]- www.freyssinet.com.
- [82]- www.lamy-expertise.fr
- [83]- Yahiaoui Lamia “ Caractérisation d’un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)” thèse de MAGISTRE 2011.
- [84]- Yahiaoui Souâd. Thème « Etude expérimentale de la durabilité des éléments fissure en béton armé rigidifié par les matériaux composites » .mémoire de magistère, 2006.
- [85]- Youssef , M.N., Feng M.Q., et Mosallam A.S. (2007) “ stress-strain model for concrete confined by FRP composites” Composites: Part B, Vol. 38, pp. 614-628.
- [86]- ZAIDI Ali, thème « Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement ». mémoire de magister, 2014.
- [87]-Ze Yi Wu. Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue. Sciences de l’ingénieur [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. Français.
- [88]- « nouveau guide du béton : composants et propriétés ».

ANNEXES

ANNEXE 1

FICHE TECHNIQUE

01-14



EPOTEK FIX

PÂTE ÉPOXYDIQUE THIXOTROPE POUR COLLAGE STRUCTURAL ET RÉPARATION

DESCRIPTION

EPOTEK FIX est une pâte époxydique bi-composant de type structurale, sans solvant, avec une adhésion élevée sur tous matériaux de construction.

EPOTEK FIX est un produit thixotrope à base de résine époxydique, spécialement formulé pour être utilisé en horizontal et en vertical.

EPOTEK FIX se présente en kit de 2 composants :

- Composant **A** : **résine**.
- Composant **B** : **durcisseur**.

DOMAINES D'APPLICATION

EPOTEK FIX est utilisé comme adhésif structural, en génie civil pour :

- Les ancrages horizontaux et verticaux.
- Le collage de structures en béton préfabriqué, même porteuses, pour consolider son unicité.
- L'ancrage de machineries, boulons, plaques, monte-charges, etc.
- La réparation et le renforcement structural entre matériaux de différents types (acier et béton), « renforcement par collage de plaque ou fibre d'acier ».
- Nivelage et surfacage.
- Réparation des lèvres de joints de dilatation.

PROPRIETES ET EFFETS

- Pouvoir d'adhésion élevé sur tous types de support.
- Possibilité d'obtenir des liens structuraux entre béton et béton, béton et acier, béton et bois.
- Résistances mécaniques élevées.
- Sans retrait.
- Très bonne résistance à l'eau, aux huiles minérales, à l'essence, aux solutions agressives acides et alcalines et aux solutions salines.

CARACTERISTIQUES

Couleur :Gris
Densité :1,6 Kg/L
Extrait sec :100 %
Temps d'ouvrabilité :30 min à 20 °C
Durcissement total (à 20 °C) :7 jours
Temps. Minimum d'application :10 °C
Résistance à la compression (UNI 4299) :> 60 Mpa
Résistance à la flexion (UNI 7219) :> 20 Mpa
Allongement à la rupture :2 %
Adhérence sur béton :> 3 Mpa

MODE D'EMPLOI

Préparation du support :

Le support doit être parfaitement propre, dépoussiéré, et exempt de toutes graisses ou parties non adhérentes.

Préparation du produit :

- Procéder au mélange, en versant le **composant B** dans le **composant A** en respectant le rapport du mélange.
- Le mélange doit être fait avec spatule ou avec un agitateur électrique à bas rpm durant 4 à 5 minutes jusqu'à obtention d'une parfaite homogénéité des composants (jusqu'à obtenir une couleur homogène).
- En pratique, nous conseillons l'utilisation de toute la quantité des **composants A et B**, vu que les poids sont pré-dosés pour éviter d'éventuelles erreurs de pesées fractionnées.
- En cas d'utilisation fractionnée veiller à conserver la juste proportion en poids des 2 composants.

APPLICATION

- L'**EPOTEK FIX** s'applique à la spatule ou tout autre matériel adéquat.

Page 1/2



Siège & Usines :

R.P. 2011 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
Tél : + 213 (0) 48 70 34 63
Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNA-CHEM.COM

Antenne d'Alger :

Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smer Alger
Tél/Fax : + 213 (0) 21 93 05 62

Antenne de Sétif :

Zone d'Activité Artisanale s^{ème} Etape - Sétif
Tél : + 213 (0) 36 99 80 10 - Fax : + 213 (0) 36 99 80 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique sont
qui représentent le stade le plus avancé de la connaissance, ne
dispensent l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans
ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance
technique de la société. Par conséquent le **TEKNA CHEM**
SA décline toute responsabilité pour l'emploi inapproprié du
produit.





EPOTEK FIX

PÂTE ÉPOXYDIQUE THIXOTROPE POUR COLLAGÉ STRUCTURAL ET RÉPARATION



- **EPOTEK FIX** doit être appliqué sur les 2 surfaces concernées et exercer une pression à l'aide de pinces.

CONSOMMATION

Environ 1,6 Kg/m²/mm d'épaisseur.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Kits de (composant A + composant B) :

- Kit de 02 Kilogrammes.....(1 Kg + 1 Kg)
- Kit de 10 Kilogrammes.....(5 Kg + 5 Kg)
- Kit de 20 Kilogrammes.....(10 Kg + 10 Kg)
- Kit de 40 Kilogrammes.....(20 Kg + 20 Kg)

Dans son emballage d'origine fermé et stocké à des températures entre 10 et 35 °C, le produit se conserve une année.

REMARQUE

Si le produit est conservé à des températures inférieures à 10 °C, sa densité peut être modifiée. Dans ce cas, mettre les deux boîtes de l'EPOTEK FIX dans un bain marie afin de leur rendre leurs propriétés initiales.

PRECAUTIONS D'EMPLOI

Utiliser des gants, se protéger les yeux et la peau.
Se référer à la fiche de données de sécurité.

DOCUMENT DE REFERENCES

PV d'essais établi par le CNERIB.



Siège social :

03 201 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
Tél : + 213 (0) 48 70 04 63
Fax : + 213 (0) 48 70 04 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNA-CHEM.COM

Bureau d'Alger :

Boulevard de Soummam lot N° 04 Z.I. Oued Smir Alger
Tél./Fax : + 213 (0) 21 92 03 62

Bureau de Sétif :

Zone d'Activité Artisanale e¹⁹⁹⁹ Souche - Sétif
Tél : + 213 (0) 34 99 90 10 - Fax : + 213 (0) 34 99 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispensent pas l'utilisateur de procéder à des tests performant dans ces propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent, **TEKNA CHEM** décline toute responsabilité pour l'emploi inapproprié du produit.



ANNEXE 2

NORME FRANCAISE HOMOLOGUEE	BETON ESSAIS D'ETUDE, DE CONVENANCE ET DE CONTOLE CONFECTION ET CONSERVATION DES ÉPROUVETTES	NF P 18-404 Décembre 1981
-------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

1. Généralités

1.1 OBJET

La présente norme a pour objet de définir comment les éprouvettes destinées aux essais d'étude, de convenance et de contrôle sont obtenues et conservées.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme s'applique aux essais d'étude, de convenance et de contrôle exécutés sur éprouvettes en vue de déterminer les caractéristiques des bétons de granulats courants (voir norme NF P 18-301) ou légers (voir norme NF P 18-309).

Elle ne s'applique pas aux essais d'étude, de convenance et de contrôle exécutés sur certains bétons spéciaux tels que les bétons caverneux, les bétons réfractaires, les bétons cellulaires.

1.3 DÉFINITIONS

Essai d'étude: essai exécuté entièrement en laboratoire avec les constituants susceptibles d'être utilisés sur le chantier, dans le but de vérifier l'aptitude de la composition à satisfaire les exigences.

Essai de convenance : essai ayant pour but de vérifier qu'avec les moyens du chantier, on peut réaliser le béton proposé. Il a également pour but de vérifier que les quantités de constituants prévues par mètre cube de béton donnent bien 1 m³ de béton en œuvre.

Essai de contrôle: essai ayant pour but de vérifier le respect des spécifications.

2 CONFECTION DES ÉPROUVETTES

2.1 CONDITIONS D'EXÉCUTION

Les essais d'étude sont exécutés sur le béton préparé dans un laboratoire ; les essais de convenance et de contrôle sont exécutés sur le béton gâché dans la bétonnière ou le malaxeur utilisés pour le chantier.

Ces essais ne sont valables que si les conditions suivantes sont remplies :

- les opérations d'échantillonnage du béton, de confection et de conservation des éprouvettes doivent être exécutées avec soin par du personnel qualifié et autant que possible toujours le même ;
- le matériel employé, et en particulier les moules, doivent être maintenus dans un état de propreté convenable ;
- l'échantillon servant à déterminer les caractéristiques du béton de la gâchée ou de la charge (1) doit être représentatif de celle-ci.

1) La gâchée est la quantité de béton fabriqué en une seule fois soit dans le malaxeur du laboratoire soit dans la bétonnière ou le malaxeur du chantier. La charge, conformément à la définition 1.4.7 de la norme NF P 18-305 sur les bétons prêts à l'emploi, est «la quantité de béton délivrée en une seule fois dans un seul récipient».

Homologuée par arrêté Du 1981-11-27 (J.O.1981-12-04) Effet le 1981-12-27	La présente norme remplace de même indice homologuée par arrêté du 21 janvier 1969	Afnor 1981 Droits de reproduction et de traduction réservés pour tous pays
-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------