

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 Fin D'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

THEME

*Renforcement, en flexion, d'éléments poutres
en béton.*

Présenté par : HAMLIL Dyhia

Devant le jury composé de :

SADAQUI A.	Professeur	UMMTO	Président
ALI AHMED C.	MCA	UMMTO	Encadrant
AIT TALEB S.	MCB	UMMTO	Examineur

Promotion : 2021/ 2022

Remerciement

Je remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.

Mes remerciements vont à ma promotrice Mme ALI AHMED, qui a su m'aider à réaliser mon souhait d'un travail de recherche à but environnemental, m'orienter et faire en sorte qu'il soit bien élaboré. Je la remercie pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'elle n'a cessé de me prodiguer durant toute la période de préparation de ce mémoire

Mes sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, Mr SADAOUI A. et Mme AIT TALEB S. pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Mes remerciements à tous les enseignants qui m'ont enrichi de connaissances et de savoir, et tout le personnel du Laboratoire de Génie Civil de l'Université

Mouloud MAMMERRI de Tizi Ouzou. Je remercie particulièrement Mme MEDJBAR, F et Mr BOUHERRAOUA.R, auprès desquels j'ai trouvé un accueil chaleureux, une aide et une assistance dont j'avais besoin durant les investigations expérimentales.

Merci 

Dédicace

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à
Tous ceux qui sont chers ;*

*A la mémoire de mon cher PAPA, que dieu te préserve dans son vaste Paradis. J'aurais
souhaité ta présence en ce moment, j'espère te rendre fier là où tu es.*

A ma très chère MAMAN

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel à ma considération
pour le sacrifice que tu as consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection
me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de
force pour affronter les différents obstacles*

A ma très chère grand-mère AZIZOU que dieu te protège pour nous

A mon cher frère SAÏD

*Mon deuxième PAPA, l'éducation qu'il m'a prodiguée avec tous les moyens et au prix de
tous les sacrifices qu'il a consentis à mon, égard, pour le sens du devoir qu'il m'a enseigné
depuis mon enfance MILLE MERCI.*

A ma très chère sœur FAFACHE

*Tu es mon amie depuis toujours, avec toi je partage les pleurs et la joie. Je te demanderai la
lune, le soleil ou Saturne, tu laisserais tout tomber pour pouvoir m'épauler.*

A ma belle-sœur NIHEË

*Une sœur en or, merci énormément pour ton soutien très précieux, merci pour ton grand cœur
et toutes tes qualités*

*Je remercie également mes amis FOUZIA, MALEK, KATIA, MOMO et SARA pour tout
leur encouragement et toute l'aide qu'ils m'ont apporté.*

*Je ne remercierai jamais assez mon cousin ABDELLEAH et mes cousine SONIA, KARIMA
et ROMAÏSSA pour leur soutien.*

*Merci aux membres de ma famille (oncles, tantes, cousins et cousines) qui ont été là tout au
long de mon parcours, et ont su être patients malgré qu'il soit, parfois, difficile de l'être*

A tous ceux que j'aime et qui m'aime

*Je dédie ce modeste travail et particulièrement à mon cher neveu MOHAMED
YANIS*

A qui je souhaite beaucoup de bonheur et un bel avenir.

RESUME

Ces dernières années, le renforcement des structures en béton avec des matériaux composites a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs, cela à cause de l'augmentation des besoins de renforcement, de réparation et de réhabilitation. Ces matériaux représentent une alternative captivante aux méthodes traditionnelles de renforcement et de réparation.

Les matériaux composites connaissent des applications diverses. Ils sont utilisés comme renforcement interne ou externe de l'élément de structure. En règle générale, le renforcement externe est principalement utilisé lors de la réhabilitation des structures existantes afin d'augmenter leur résistance. Dans ce cas, des matériaux composites 'FRP' sont utilisés principalement sous forme de tissus par moulage au contact ou de plaques préfabriquées. Le renforcement interne est quant à lui utilisé lors de nouvelles constructions.

Une campagne expérimentale est réalisée sur des éprouvettes prismatiques en béton renforcé par tissu de jute en variant les paramètres de renforcement (longueur, maillage et nombres de plis en PRFJ), chargées en flexion jusqu'à la rupture, pour mettre en exergue les performances mécaniques de tels spécimens comparativement à celles en béton renforcé par tissu de verre.

Les résultats de cette étude ont conduit à la possibilité de remplacer les fibres de verre par des fibres de jute à condition d'améliorer les propriétés géométriques du PRF à base de fibres naturelles. Cela augmente la résistance mécanique et l'améliore le déplacement de la poutre. De plus, sa légèreté, ses avantages économiques et environnementaux en font une excellente alternative aux matériaux coûteux et polluants.

Mots clés : poutre renforcée, béton, PRF, fibre de verre, fibre de jute.

ABSTRACT

In recent years, the reinforcement of concrete structures with composite materials has aroused the interest of several researchers, this because of the increase in the needs for reinforcement, repair and rehabilitation. These materials represent an exciting alternative to traditional reinforcement and repair methods.

Composite materials have various applications. They are used as internal or external reinforcement of the structural element. As a rule, external reinforcement is mainly used during the rehabilitation of existing structures in order to increase their strength. In this case, 'FRP' composite materials are used mainly in the form of fabrics by contact molding or prefabricated plates. Internal reinforcement is used in new constructions.

An experimental campaign is carried out on prismatic concrete specimens reinforced with jute fabric by varying the reinforcement parameters (length, mesh and number of plies in PRFJ), loaded in bending until rupture, to highlight the mechanical performance of such specimens compared to those in concrete reinforced with glass fabric.

The results of this study led to the possibility of replacing glass fibers with jute fibers on the condition of improving the geometric properties of FRP based on natural fibers. This increases the mechanical resistance and improves the displacement of the beam. In addition, its lightness, economic and environmental advantages make it an excellent alternative to expensive and polluting materials.

Keywords: reinforced beam, concrete, FRP, fiberglass, jute fiber.

Sommaire

Remercîments	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract.....	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des notations	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1. Introduction	4
I.1.1. Les causes du renforcement	5
I.1.2. Renforcement des poutres.....	5
I.1.3. Méthodes de renforcement	7
I.1.3.1. Renforcement par chemisage en béton	8
I.1.3.2. Renforcement par projection du béton.....	9
I.1.3.3. Renforcement à l'aide de tôles collées	9
I.1.3.4. Renforcement des structures par précontrainte externe	10
I.1.3.5. Renforcement des éléments structuraux par matériaux composite	11
I.4. Matériaux composites	11

I.4.1. Définition du matériau composite	11
I.4.2. Les composants des matériaux composites	12
I.4.2.1. La matrice	12
I.4.2.1.1. Résines	13
I.4.2.1.2. Charges et additifs	18
I.4.2.2 Les renforts	20
I.5. Fibres synthétiques.....	25
1.5.1. Fibres de verre	25
I.5.2. Fibres de carbone	26
I.5.3. Fibre d'aramide (Kevlar)	28
I.6. Fibres naturelles	29
I.6.1. Fibre végétale	30
I.6.1.1. Composition chimique de la fibre végétale	30
I.6.1.2. Classification des fibres végétales	31
I.6.1.3. Structure de la fibre végétale	31
I.6.1.4. Avantages et inconvénients des fibres végétales	32
I.6.1.4.1. La fibre de chanvre	33
I.6.1.4.2. La fibre de sisal	33
I.6.1.4.3. Le jute	34
I.7. Polymères renforcés de fibres.....	36
II.8. Conclusion	38

CHAPITRE II : Compagne expérimentale

II.1. Introduction.....	39
II .2. Protocole expérimental	39
II.3. Caractérisation des matériaux utilisés	40
II.3.1. Le béton	40
II.3.1.1. Granulats.....	40
II.3.1.2. Ciment.....	41
II.3.1.3. L'eau d'hydrations.....	41
II.3.2. Le renfort	42
II.3.2.1. Tissu en fibres de jute.....	42
II.3.2.2. Fibre de verre	43
II.3.3. Résine	44
II.4. Confection du béton et préparation des éprouvettes	45
II.4.1. Préparation des moules	45
II.4.2. Préparation des tissus de renfort.....	46
II.4.3. Coulage du béton	47
II.5. Nomenclature des éprouvettes.....	50
II.6. Procédure d'essai de flexion.....	51
II.7. Conclusion	52

CHAPITRE III : Résultats et discussions

III.1. Introduction	53
III.2. Résultats de l'essai de flexion	53

III.2.1. Renforcement avec le tissu de verre.....	53
III.2.2. Effet de l'utilisation du jute en remplacement du verre.....	56
III.2.2.1. Influence de la longueur du tissu de jute.....	56
III.2.2.2. Influence de la taille de la maille	59
III.2.2.3. Influence du nombre de plis du PRFJ	62
III.2.3. Confortation des résultats de toutes les variantes testées.....	65
III.3. Analyse statistique.....	65
III.4. Conclusion.....	67
Conclusion Générale et perspectives	68
Références bibliographique	71

Liste des figures

Figure I.1: Renforcement en cisaillement	6
Figure I.2 : Renforcement en flexion	7
Figure I.3 : Chemisage en béton armé d'un poteau	8
Figure I.4 : plaques d'acier collées	9
Figure I.5 : Renforcement d'un poteau circulaire par précontrainte additionnelle.....	11
Figure I.6 : Schéma illustratif d'un matériau composite.....	12
Figure 1.7 : Les différent type de matrice	18
Figure I.8 : Rôle des fibres dans la fissuration.....	21
Figure 1.9 : Les différent types de renfort.....	21
Figure I.10 : Fibres courtes et fibres longues.....	22
Figure I.11 : Forme linéique d'un renfort.	23
Figure I.12 : Chaîne et trame d'un tissu	23
Figure I.13: Types d'armure de tissage d'un tissu	24
Figure I.14 : Tissage cylindro-conique	24
Figure I.15 : Structures multidirectionnelles	25
Figure I.16 : Fibre de verre	26
Figure I.17 : La fibre de carbone.....	27
Figure I.18 : Fibre d'aramide	28
Figure I.19 : Différents types de fibres naturelles.....	30
Figure I.20 : Plante et fibre de chanvre.....	33
Figure I.21 : Plante et fibre de sisal	34

Figure I.22 : Plante et fibre de jute	34
Figure I.23 : Etapes d'extraction de la fibre de jute.....	36
Figure I.24 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c).	37
Figure I.25 : Composants d'un matériau composite de PRF	40
Figure II.1 : Constituants du béton	42
Figure II.2 : Tissu en fibre de jute.	43
Figure II.3 : Fibre de verre	44
Figure II.5 : Moules prismatiques	46
Figure II.6 : Préparation des tissus de fibre de jute et de verre.....	46
Figure II.7 : Plaque de PRFJ	47
Figure II.8 : Préparation des mailles	47
Figure II.9 : Fabrication du béton dans un malaxeur a axe vertical.....	48
Figure II.10 : Mise en place des renfort.....	49
Figure II.11 : Vibration du béton	49
Figure II.12 : a) Eprouvtes référencées b) Cure d'hydratation du béton	49
Figure II.13 : Mise en chargement des éprouvettes	51
Figure III.1 : Confrontation des courbes force-déplacement pour BT et BFV	54
Figure III.2 : Résistance et déplacement de la poutre renforcée avec le tissu de verre et de la poutre témoin.....	55
Figure. III.3 : Modes de rupture de la poutre renforcée avec le tissu de verre et la poutre non renforcée.....	55
Figure III.4 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute selon différentes longueurs et du renforcement avec le verre	57

Figure III.5 : Résistance et déplacement vertical des poutres selon la longueur du tissu de jute et celle renforcée avec le tissu de verre	58
Figure. III.6 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin.....	58
Figure III.7 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute pour les différentes mailles et du renforcement avec le verre.....	60
Figure III.8 : Résistance et déplacement vertical des poutres renforcées avec le jute pour les différentes mailles et du renforcement avec le verre.....	61
Figure. III.9 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin.....	61
Figure III.10 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute pour le nombre de plis et du renforcement avec le verre	63
Figure III.11 : Résistance et déplacement vertical des poutres renforcées avec le nombre de plis et du renforcement avec le verre.....	63
Figure III.12 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin.....	64
Figure III.13 : Confrontation des courbes	65

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé.....	8
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des tôles collées	10
Tableau I.3 Les caractéristiques mécaniques des résines polyesters	14
Tableau I.4 Avantages et inconvénients de la résine polyester	14
Tableau I.5 Les caractéristiques mécaniques des résines phénoliques	15
Tableau I.6 avantages et inconvénients de la résine de phénolique	16
Tableau I.7 Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes	16
Tableau I.8 Avantages et inconvénients de la résine époxyde.....	17
Tableau I.9 : caractéristiques mécaniques de fibre de verre	26
Tableau I.10 : Caractéristiques mécaniques de fibre de carbone.....	28
Tableau I.11 : Caractéristiques mécaniques de fibre de Kevlar	29
Tableau I-12 : Les avantages et les inconvénients des fibres végétales	32
Tableau I.13 : Avantages et inconvénients des PRF	38
Tableau II.1 : le dosage des constituants pour 1m ³ de béton.....	41
Tableau II.2 : caractéristiques de la fibre de jute.....	43
Tableau II.3 : caractéristiques de la fibre de verre	44
Tableau II.4 : Caractéristiques de la résine	45
Tableau II.5 . Nomenclatures des éprouvettes	50
Tableau III.1 : Résultats du renforcement avec le tissu de verre.	53
Tableau III.2 : Résultats du renforcement avec le jute selon différentes longueurs et du renforcement avec le tissu de verre.	56

Tableau III.3 : Résultats du renforcement avec le jute selon différentes tailles de mailles et du renforcement avec le tissu de verre.	59
Tableau III.4 : Résultats du renforcement avec le jute selon le nombre de plis et du renforcement avec le tissu de verre	62
Tableau III.5 : Les résultats de l'anova conduite pour chaque variable sont résumés dans le tableau suivant.....	66
Tableau III.6 Les résultats de ce test sont résumés dans le tableau suivant	66

Introduction

Générale

Introduction générale

L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la construction est la dégradation des structures. La plupart d'entre elles présentent des signes de faiblesse et ne répondent ou ne répondront plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs, etc.

L'apparition de ces problèmes ne laisse que deux solutions : la reconstruction ou la réparation.

Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation ou le renforcement, ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées.

Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes, soit pour des raisons de pertes de propriétés initiales, pour des raisons de remise à niveau liées à de nouveaux règlements ou de nouveaux usages, soit pour des raisons esthétiques.

De nombreuses techniques ont été développées pour le renforcement des structures en béton armé comme le chemisage des poteaux, l'incorporation de profilés métallique, l'augmentation de la section du béton avec ou sans augmentation des armatures.

Dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques métalliques dans les parties les plus sollicitées. Cette technique résout le problème de dégradation des structures par augmentation de la capacité portante des éléments structuraux, Récemment, des travaux de recherche ont été menés pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance ; les polymères renforcés de fibres (PRF : Polymères Renforcés de Fibres) qui offrent une alternative intéressante.

L'utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés. Comparativement aux autres techniques de renforcement, les PRF présentent les avantages suivants : légèreté, haute résistance, facilité de mise en œuvre, absence de corrosion, possibilité et facilité d'élaboration de formes complexes avec un minimum d'opération.

D'après les études antérieures, le mode de rupture le plus répandu est le décollement du renfort au niveau de l'interface béton-composite [7], ce qui nous mène à chercher d'autres alternatives, comme le renforcement interne avec des matériaux composites afin de diminuer ces problèmes.

Ce travail de mémoire a pour objectif d'une part à tester le renforcement interne, en flexion, des poutres en béton par PRF, et d'autre part, étudier la possibilité du remplacement de la fibre de verre, qui produit un impact négatif sur la santé humaine (allergie de la peau, cancer pulmonaire, etc.) et un impact écologique non négligeable, par une fibre naturelle qui est le jute.

La fibre de jute est d'origine végétale présentant plusieurs avantages, notamment la disponibilité, la facilité de fabrication et de mise en œuvre. Elle présente également les avantages d'être légère, flexible, solide, économique et biodégradable.

Cette fibre végétale est très intéressante, mais elle n'est pas aussi performante que les fibres synthétiques. Cette étude est basée sur une question de départ qui est celle de la possibilité du remplacement des fibres de verre par celles de jute dans le renforcement, en flexion, de poutres en béton.

Nous avons, à cet effet, tenté de trouver la configuration de renforcement avec les fibres de jute qui peut donner des résultats au moins équivalents à ceux obtenus pour le renforcement avec les fibres de verre, nous avons ainsi, fait varier la longueur, le nombre de plis ainsi que le maillage du tissu de jute pour essayer de trouver la variante qui pourrait remplacer la fibre de verre dans le renforcement interne des poutres en béton.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons entrepris une démarche de recherche scindée en trois chapitres.

- **Le premier chapitre** est une synthèse bibliographique rassemblant quelques informations sur les textiles, les matériaux composites et les techniques de renforcement du béton.
- **Le second chapitre**, porte sur une investigation expérimentale très riche, où nous avons développé toutes les étapes suivies pour l'élaboration des corps d'épreuves, avec une description détaillée des matériaux utilisés ainsi que de la démarche expérimentale et la procédure de l'essai de flexion.

- **Le troisième et dernier chapitre** quant à lui, est consacré à la présentation des résultats et leur interprétation. Une fois les recherches terminées et les résultats discutés, une conclusion générale s'impose. Elle comporte un rappel de notre démarche, les apports de cette recherche, ainsi que des perspectives à de futures recherches.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Durant leur durée de vie, les ouvrages en béton armé peuvent subir, pour plusieurs raisons, des opérations de renforcement ou de réparation afin de maintenir leur sécurité ou leur fonction.

L'étude du comportement pathologique des structures en béton armé met en évidence des endommagements de matériaux et de structure dus essentiellement à des erreurs de conception, des modifications des conditions d'exploitation et vieillissement des matériaux. Suivant les différentes causes des désordres survenus dans les structures, les opérations de leur maintenance consistent :

- Les protéger en limitant la corrosion et en assurant de meilleures conditions d'étanchéité,
- Les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance,
- Les renforcer en améliorant la performance et la durabilité de l'ouvrage.

Parmi les solutions de réhabilitation relativement récentes, l'application des matériaux composites des éléments en béton armé standards. Ces matériaux présentent l'avantage d'allier des caractéristiques mécaniques élevées et de faibles poids propres.

Notre recherche se dirige principalement vers le renforcement interne, en flexion, de poutres en béton armé au moyen de polymère renforcé de fibres (PRF) à base de fibres végétales de jute, comme alternative à l'utilisation des fibres de verres. Ce procédé peut s'avérer intéressant pour éviter la réparation par collage externe de plaques composites qui présente un inconvénient majeur lié au problème d'interface composite-substrat. En plus de son intérêt économique certain, l'utilisation du jute présente également un intérêt écologique puisque sa production, contrairement. Aux fibres synthétiques, ne nécessite pas une grande quantité d'énergie, et par conséquent moins de CO₂ est dégagé dans l'atmosphère. Ajouter à cela la caractéristique de biodégradabilité que présentent les fibres végétales et leur utilisation s'inscrit dans la démarche du développement durable.

I.1.1. Les causes du renforcement

Une structure peut nécessiter un renforcement pour de nombreuses raisons. Les plus fréquentes d'entre elles, peuvent se résumer comme suit [2] :

- Un accroissement des charges qui sollicitent la structure, induit par :
 - ✓ Un changement d'usage de la structure,
 - ✓ Une augmentation du niveau d'activité dans la structure (c'est le cas, par exemple, d'anciens ponts soumis au trafic actuel)
 - ✓ Une installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels
- Des défauts dans le projet ou dans l'exécution, qui résultent :
 - ✓ D'une mauvaise qualité des matériaux,
 - ✓ Des dimensions insuffisantes des éléments structurels
 - ✓ De la mise en place d'armatures insuffisantes ou mal placées.
- Une rénovation des structures anciennes, suite à :
 - ✓ Un vieillissement des matériaux induisant une perte des caractéristiques initiales,
 - ✓ Une connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception,
 - ✓ Des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou une période,
 - ✓ Une prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres).
- Un changement de la forme de la structure, survenu après :
 - ✓ Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs,
 - ✓ Elargissement de portées de calcul ou autre ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs

1.2. Renforcement des poutres

Plusieurs structures en béton armé présentent une résistance inadéquate aux charges prescrites par les normes les plus récentes. En raison de la nécessité d'augmenter ou de récupérer la capacité de certaines structures en béton armé, il devient nécessaire de les renforcer.

De nombreuses études ont démontré le potentiel des composites comme élément de renforcement en flexion et en cisaillement de poutres en béton armé. [3]

✚ Renforcement en cisaillement

Une poutre en béton armé doit être dimensionnée pour développer sa pleine capacité en flexion et ainsi assurer une rupture ductile sous une charge extrême. En effet, si une poutre déficiente en cisaillement est surchargée, une rupture soudaine en cisaillement pourrait survenir, ce qui s'avérerait très dangereux. Plusieurs techniques de renforcement externe en cisaillement ont été utilisées sur des poutres en béton armé. Deux techniques principales pour renforcer une poutre en cisaillement font appel aux matériaux composites, à savoir l'installation de bandes sur ses parois verticales, ou de bandes en forme de U autour de la section (figure I.1). Les renforts peuvent être continus ou discontinus. [3]

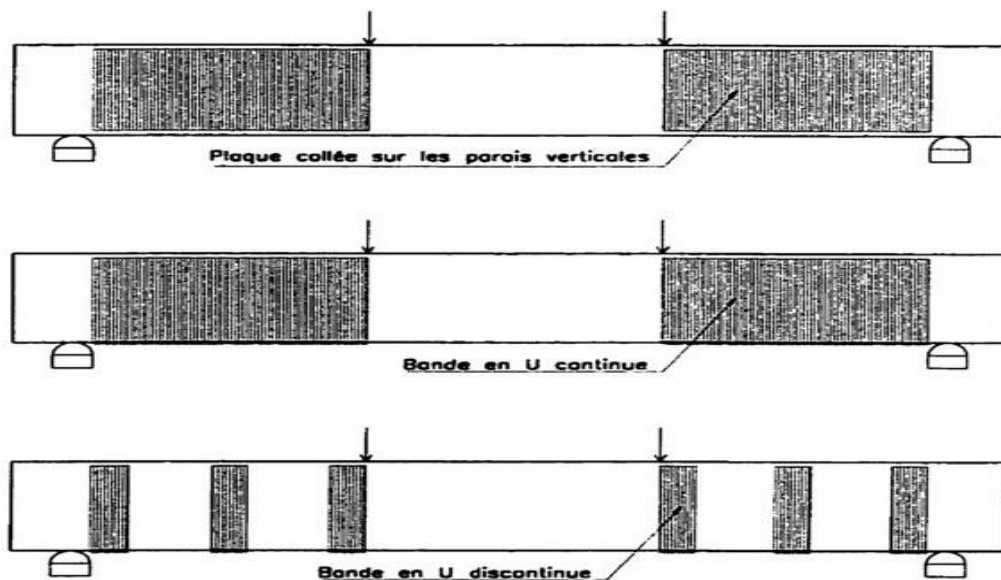


Figure I.1: Renforcement en cisaillement

✚ Renforcement en flexion :

Plusieurs recherches et études ont été effectuées sur le renforcement en flexion avec des composites, dans le but d'augmenter la charge de service, la charge ultime et la rigidité de poutres en béton armé. De façon générale, le renfort de composite en flexion est appliqué sur la face inférieure tendue d'une poutre. Ceci permet d'augmenter la résistance en tension dans la partie inférieure de la poutre qui sera contrebalancée par le béton en compression dans la partie supérieure. Par conséquent le moment résistant sera amélioré.

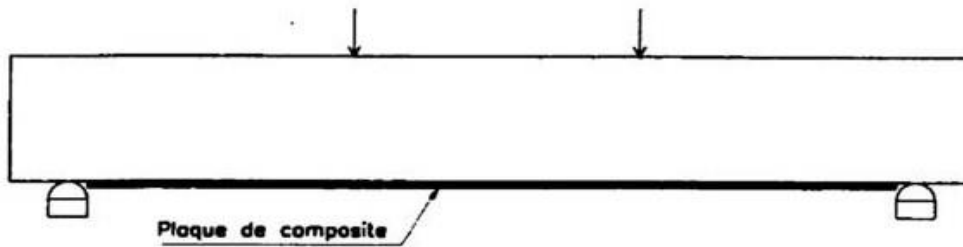


Figure I.2 : Renforcement en flexion

Après plusieurs expériences, diverses conclusions peuvent être tirées concernant le comportement général d'une poutre en béton armé renforcée en flexion avec des composites. En effet, l'ajout d'une plaque en composite sur la face tendue d'une poutre permet d'améliorer sa résistance en flexion de façon significative. En résumé, les travaux de recherche ont démontré ce qui suit :

Une augmentation de résistance en flexion peut être atteinte par collage d'une plaque de matériaux composites sur la face tendue d'une poutre en béton armé.

Le composite contribue à augmenter la rigidité de la poutre et à diminuer les flèches.

Une attention particulière doit être apportée à l'ancrage des plaques de composite, afin d'éviter un mode de rupture soudain et de garantir une ductilité suffisante à l'élément structural renforcé.

I.1.3. Méthodes de renforcement

Le renforcement d'un ouvrage en béton armé vise l'amélioration des caractéristiques mécaniques de ses éléments de manière qu'elles soient plus aptes à tenir face aux sollicitations et aux contraintes des états de service et des états ultimes. En effet, le renforcement s'effectue moyennant plusieurs techniques, il s'agit principalement des techniques qui interviennent sur les sections des éléments de la structure (chemisage, projection, etc. d'une part, ou d'autres techniques avec l'incorporation des profils et les tôles métalliques d'autre part. En revanche, plus récemment, les techniques de renforcement sont basées sur l'usage des matériaux composites.

I.1.3.1. Renforcement par chemisage en béton

Le renforcement par chemisage peut être considéré comme un confinement de la section primaire par une nouvelle couche secondaire en béton armé. Ce dernier s'accroche à l'ancienne pour augmenter sa résistance par l'accroissement de la section du béton et l'ajout d'une section d'armature additionnelle (figure I.3)

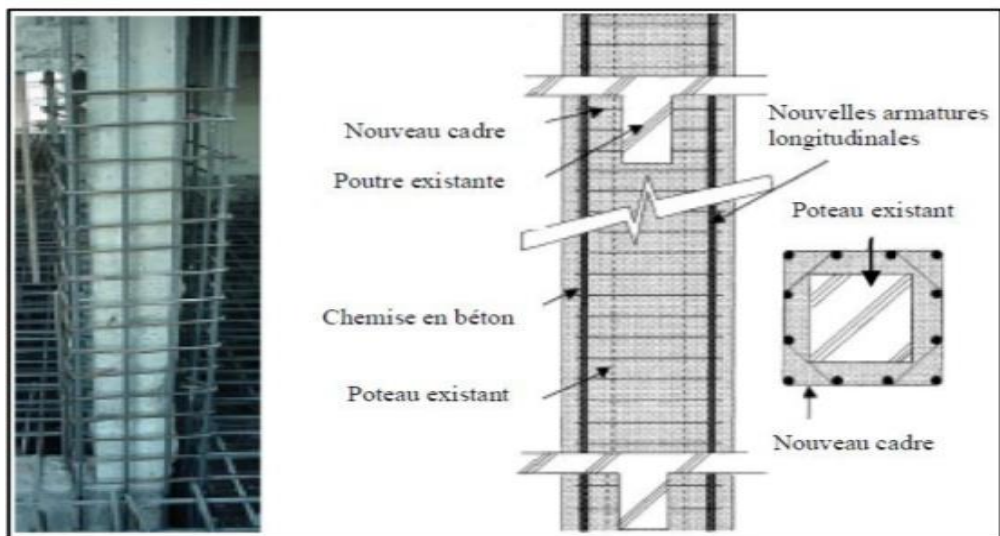


Figure I.3 : Chemisage en béton armé d'un poteau [4]

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé [5]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Technique peu coûteuse pour usage des matériaux traditionnels. • Cette technique n'exige pas une main d'œuvre qualifiée. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'agrandissement des sections augmente le poids de la structure et influe négativement sur l'esthétique. • Durée des travaux importante avec nécessité de vider les lieux. • Coffrage indispensable. • Difficulté d'exécution.

I.1.3.2. Renforcement par projection du béton :

Le béton projeté est un mélange de granulats de ciment, d'eau et souvent d'ajouts ou d'adjuvants. Cette technique préconise de projeter le béton sur le support à renforcer à l'aide de l'air comprimé. Selon le cas de dégradation, on peut distinguer deux types de réparation par béton projeté [6]

- Les réparations superficielles (la réfection d'une paroi en béton présentant de légères ségrégations)
- Les réparations profondes (le renforcement des structures par la disposition de nouvelle armature)

I.1.3.3. Renforcement à l'aide de tôles collées

Cette technique n'a pu voir le jour qu'une fois la colle adhésive à base d'époxy fut développée. La particularité de l'époxy est d'avoir un niveau élevé d'adhésion permettant de transmettre des efforts de façon acceptable. La première utilisation de cette technique a eu lieu à Durban à l'Afrique du Sud. Le rôle du renforcement était de compenser le manque d'acier oublié lors de l'exécution de l'ouvrage (Merdas et al, 2012). Ensuite, cette technique a été étudiée scientifiquement comme une technique de renforcement des poutres fléchies. Plusieurs chercheurs ont constaté son efficacité. Chose qui a motivé les Japonais à utiliser cette technique pour la réparation de 240 ponts à faible portance (David, 1999). En 1977 Freyssinet Internationaux ont décroché un brevet pour la technique des tôles perforées qui augmente l'adhérence des tôles avec la résine. La Figure I-5 présente un exemple de la technique de renforcement par tôles collées.



Figure I.4 : plaques d'acier collées [7]

Les avantages et les inconvénients de ce type de renforcement sont résumés dans le tableau I.2

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des tôles collées [7]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Ça ne nécessite pas des démolitions ou des modifications sur les structures. • La flexibilité de la tôle offre une certaine souplesse. • Comme le renfort se colle à la surface il n'occupe aucun volume. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige un entretien pour éviter la corrosion • La surface à renforcer doit être bien préparé et assez plat pour assurer une couche uniforme d'adhésif • Un collage sous pression pour éviter de laisser des bulles d'air est nécessaire

I.1.3.4. Renforcement des structures par précontrainte externe

Cette méthode de renforcement par précontrainte transversale additionnelle des poteaux des structures est encourageante. Elle est qualifiée complémentaire car elle est utilisée à des ouvrages existants pour l'amélioration de la capacité portante et en plus pour le prolongement de la durée de d'exploitation.

Cette technique de renforcement est efficace et moins couteuse que l'application du chemisage en acier.

En plus, le renforcement des éléments de structure par la précontrainte additionnelle, garantit une armature supplémentaire avec une pression latérale active. La technique de mise en place consiste à entourer le poteau par des bandes d'acier (figure I.5)

Les bandes d'aciers se composent de torons en acier à sept fils avec un élément d'ancrage élaboré spécialement pour le chemisage en acier.

L'utilisation des éléments d'ancrage conduit à un ancrage adapté aux extrémités du toron. La pression latérale active provoque une amélioration pour le confinement du béton, tout en augmentant la résistance à la flexion et au cisaillement.

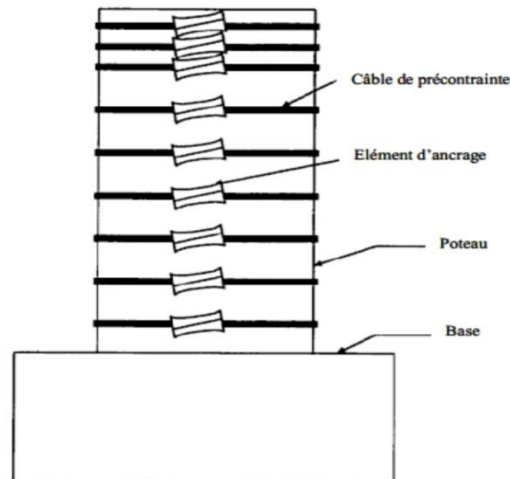


Figure I.5 : Renforcement d'un poteau circulaire par précontrainte additionnelle [8]

I.1.3.5. Renforcement des éléments structuraux par matériaux composite

La technique de renforcement par des matériaux composites pour les éléments structuraux est l'une des techniques les plus efficaces pour augmenter la résistance de ces derniers.

L'application de cette méthode de renforcement est très simple, peu exigeante en main d'œuvre, et n'est pas dérangeante pour les occupants des ouvrages.

En plus, la résistance aux substances chimiques et à la corrosion sont des atouts qui font que l'utilisation des matériaux composites conduit à prolonger la durée de vie des structures plus longue en comparaison avec les matériaux traditionnels tels que l'acier.

I.4. Matériaux composites

1.4.1. Définition du matériau composite

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes et non miscibles qui possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls n'ont pas, possédant des caractéristiques plus performantes que celles des deux matériaux séparés.

Il est constitué de deux phases :

- Une phase continue appelée matrice, Elle est généralement ductile mais possédant une faible rigidité, Elle sert de milieu de transfert des efforts vers les fibres qui sont plus rigides et résistantes et à les protéger vis-à-vis des agressions extérieures.
- Une phase discontinue appelée un renfort ou matériau renforçant. Elle se présente le plus souvent sous forme de fibres, qui assurent la tenue mécanique du matériau composite en apportant ses performances mécaniques élevées, le renfort permet aux matériaux composites d'avoir des propriétés isotropes, anisotropes ou orthotropes.

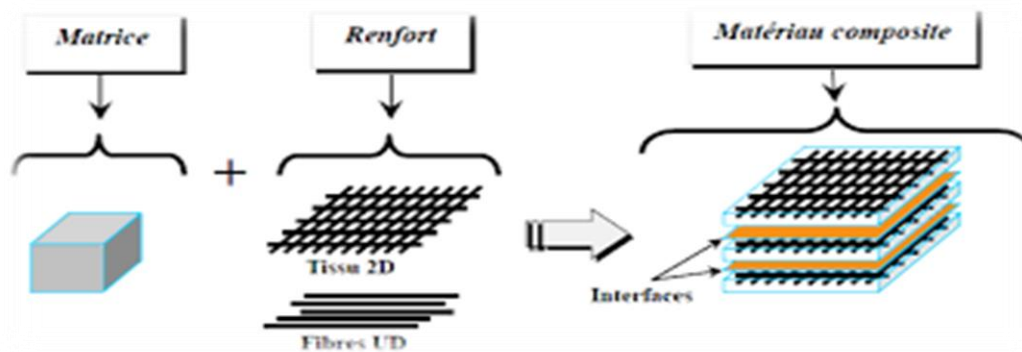


Figure I.6 : Schéma illustratif d'un matériau composite

1.4.2. Les composants des matériaux composites

En plus de la matrice et du renfort, des charges ou additifs peuvent être incorporés dans le composite.

1.4.2.1. La matrice

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis des différentes conditions environnementales (oxydation, vieillissement humide, corrosion, etc.).

La matrice est composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), et de charges dont le but est l'amélioration des caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production.

D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charge se comporte comme un matériau homogène. [9]

I.4.2.1.1. Résines

Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP).

Il existe d'autres catégories de résines telles que les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus. Toutefois l'usage de ces résines reste spécifique ce qui limite leur fabrication.

❖ Les polymères thermodurcissables (TD) :

Ils sont des polymères, qui se présentent sous forme liquide visqueuse et se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois.

• Les résines polyester insaturé

Ce sont les résines les plus utilisées dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), Il existe différents types de résines :

- Ortho-phtalique : la plus courante ;
- Iso-phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes [10]

Tableau I.3 Les caractéristiques mécaniques des résines polyesters

Masse volumique	1200 Kg/m ³
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	(2 à 5) %
Allongement à la rupture en flexion	(7 à 9) %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa

On peut citer quelques avantages et inconvénients de la résine polyester :

Tableau I.4 Avantages et inconvénients de la résine polyester

<u>Avantage :</u>	<u>Inconvénient :</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé ; • Une bonne stabilité dimensionnelle ; • Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus ; • La facilité de mise en œuvre ; • Une bonne tenue chimique ; • Un faible coût de production 	<ul style="list-style-type: none"> • Une tenue médiocre en température : inférieur à 120°C en service continu ; • Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs ; • Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 % ; • Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résine polyester d'une couche de « Gel-Coat » de manière à les rendre étanches ; • Une inflammabilité

- **Les résines de condensations**

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques [10]

Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance chimique. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter la possibilité d'utilisations dans le secteur alimentaires et la possibilité de colorer les résines.

Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyester. Elles ont l'avantage d'un durcissement plus rapide que les résines phénoliques et présentent une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

Les caractéristiques des résines de condensation sont les suivantes :

Tableau I.5 Les caractéristiques mécaniques des résines phénoliques [10]

Masse volumique	1200 Kg/m ³
Module d'élasticité en flexion	3 GPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %
Résistance en compression	250 MPa

On peut citer quelques avantages et inconvénients de la résine

Tableau I.6 avantages et inconvénients de la résine de phénolique

<u>Avantage :</u>	<u>Inconvénient :</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Une excellente stabilité dimensionnelle ; • Une bonne tenue à la chaleur et au fluage ; • Une bonne résistance aux agents chimiques ; • Un faible retrait ; • De bonnes caractéristiques mécaniques ; • Un faible cout. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une mise en œuvre sous pression, donc à faible cadences ; • Les couleurs foncées des résines ; • Un non adaptation à des utilisations dans le secteur alimentaires

- **Les résines époxydes**

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé [10].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Tableau I.7 Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes [10].

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

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°C).

Les avantages et les inconvénients des résines époxydes sont les suivants.

Tableau I.8 Avantages et inconvénients de la résine époxyde

<u>Avantage :</u>	<u>Inconvénient :</u>
<ul style="list-style-type: none"> • De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) • Une bonne tenue en température : 150 à 190°C en service continu ; • Une excellente résistance chimique ; • Un faible retrait au moulage (0,5 à 1%). • Une très bonne mouillabilité des renforts ; • Une excellente adhérence aux matériaux métalliques 	<ul style="list-style-type: none"> • Un temps de polymérisation long ; • Un coût élevé ; • La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre ; • Une sensibilité à la fissuration.

❖ Les résines thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques, fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié.

De plus, elles présentent une aptitude à l'état liquide à se mouler facilement par plasticité. Leur mise en œuvre se fait en général par injection à haute pression pour obtenir des objets moulés, ou par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes des profilés, etc.

Les principales résines thermoplastiques sont à base de polyamide, polyéthylène, polycarbonate et polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), etc.

L'ensemble des différentes familles de matrices est résumé sur l'organigramme suivant (figure I.7)

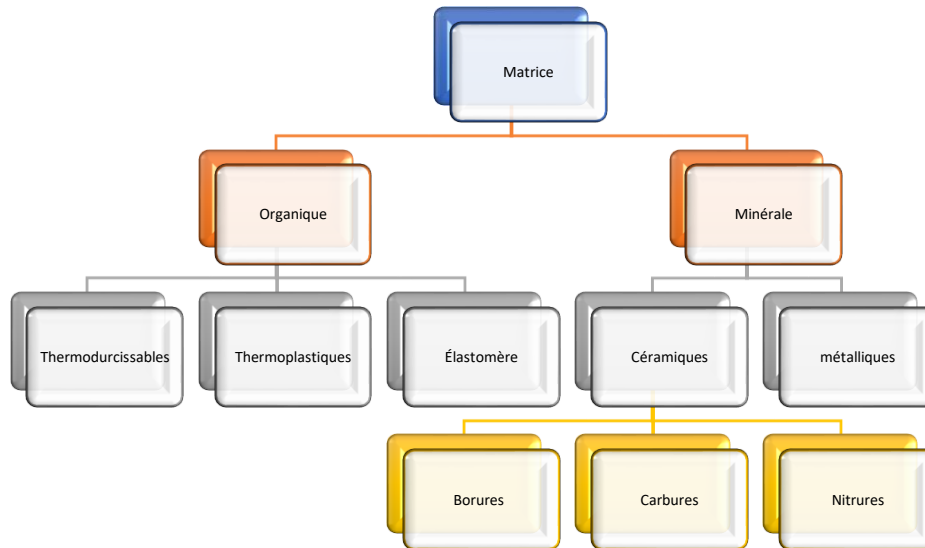


Figure 1.7 : Les différents types de matrice [11].

I.4.2.1.2. Charges et additifs

Les charges et additifs sont des substances organiques, minérales, ou végétales ajoutées au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés ainsi de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques.

❖ Les charges

a) Charges renforçantes

L'objectif de l'incorporation des charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- Charges sphériques : des sphères pleines ou creuses d'un diamètre compris entre 10 à 150 μm généralement en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.), leur intérêt est de répartir régulièrement les efforts et éviter les concentrations de contraintes dans la masse du composite
- Charges non sphériques : ou des écailles de dimension transversal 100 à 500 μm et d'épaisseur de 1 à 20 μm . Généralement elles sont ajoutées à des résines dans des applications électriques ou électroniques.

a) Charges non renforçantes :

Ces charges sont ajoutées à la résine afin de réduire le coût de la résine. Elles sont extraites de roches ou de minerais (carbonate de calcium, talc, kaolin, silices etc..). L'incorporation de ces charges à la matrice a pour effet d'augmenter certaines propriétés entre autres, la masse volumique, le module d'élasticité, la dureté, la viscosité et la stabilité dimensionnelle. Par contre, on obtient une réduction du prix, de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion du composite chargé.

❖ Les additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- **Lubrifiants et agents de démoulages :** ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et réduire la tendance de la résine aux moules, aux mandrins, etc.
- **Pigments et colorants :** les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. À partir de ces pigments, il est possible d'obtenir des pâtes colorantes constituées de dispersions de pigments dans une pâte, pour une utilisation aisée. Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté.
- **Agents anti-retrait et agents de fluage :** la polymérisation des résines conduit à une diminution des distances interatomiques du monomère initial. Il s'ensuit un retrait de la résine polymérisée, qui peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. Bien que l'incorporation des charges à la résine limite le retrait, il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti-retrait, qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

- Agents anti-ultraviolets Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines de l'action des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et d'éviter ainsi une détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation.

I.4.2.2. Les renforts

Le renfort (les fibres) a pour rôle d'accroître les propriétés mécaniques du composite comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Il est souvent sous forme filamentaire [6]. En fonction des utilisations, les renforts peuvent être de diverses natures : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc.

Les fibres sont fortes mais fines, généralement possèdent une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression, ce qui leur confère une grande souplesse.

Leur rôle principal est le renforcement des structures en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation (figure I.8). Elles permettent, donc :

- ✓ L'augmentation de la ductilité et le comportement post fissuration ;
- ✓ La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment à jeune âge ;
- ✓ La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;
- ✓ L'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- ✓ L'augmentation de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue ; à l'usure, et à l'abrasion ;
- ✓ L'amélioration de la cohésion du béton frais.

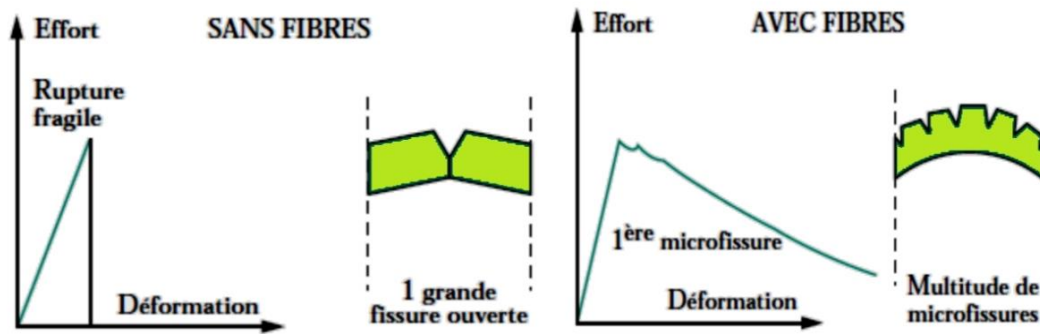


Figure I.8 : Rôle des fibres dans la fissuration.

Les fibres sont commercialisées essentiellement sous forme de fibres courtes (les feutres ou les mats) ou fibres longues (coupées au moment de la fabrication du matériau). Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridimensionnelle).

BERREUR et al [] ont synthétisé les principaux renforts, par le schéma suivant (figure I.9).

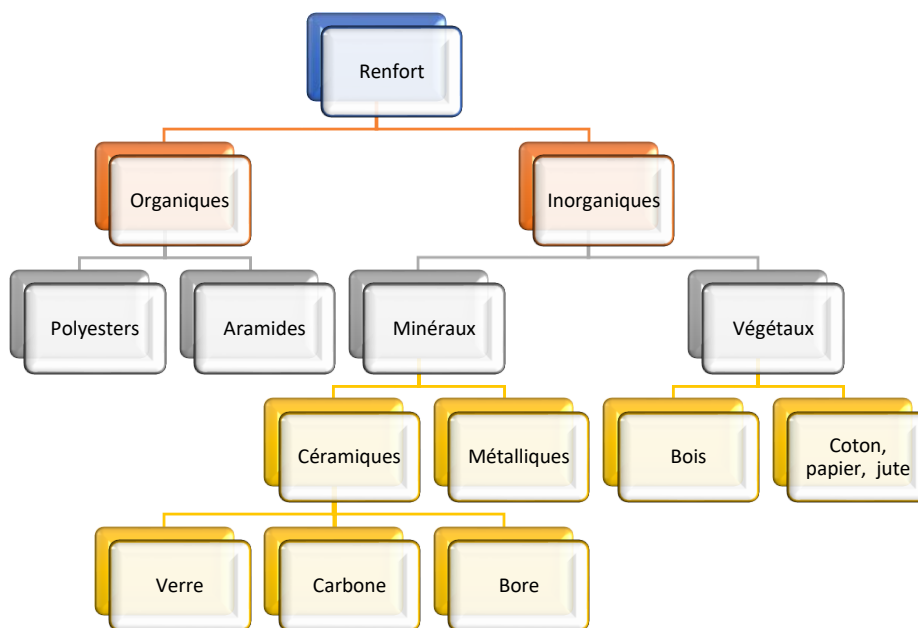


Figure 1.9 : Les différents types de renfort [12]

Les renforts diffèrent par la forme (architecture) et la nature qui peut être organique ou inorganique.

❖ Architecture du renfort :

✚ Selon la longueur :

La fibre est un ensemble de filaments élémentaires dont le diamètre est compris entre 5 et 25 μm , on peut les classer en deux types :

- i. **Fibres courtes** : quelques centimètres ou millimètres comme les feutres, les mats ou bien les fibres impactées utilisées en moulage.
- ii. **Fibres longues** : coupées au moment de la fabrication du matériau.

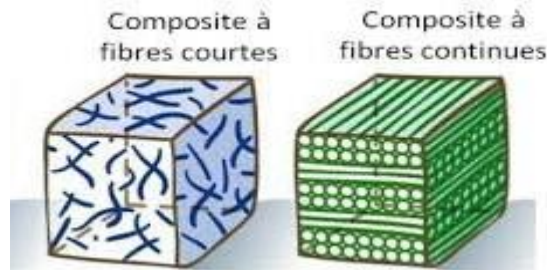


Figure I.10 : Fibres courtes et fibres longues

✚ Selon la texture :

a) **Forme linéique**

C'est une fibre d'un diamètre de quelques micromètres (environ de 10 μm), trop petite pour être utilisée sous forme unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches (figure...) qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres de différentes formes.

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou mono-filament. Les mono-filaments sont ensuite réunis en fils ou mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique.

L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1 g/km). Dans une nappe unidirectionnelle, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.

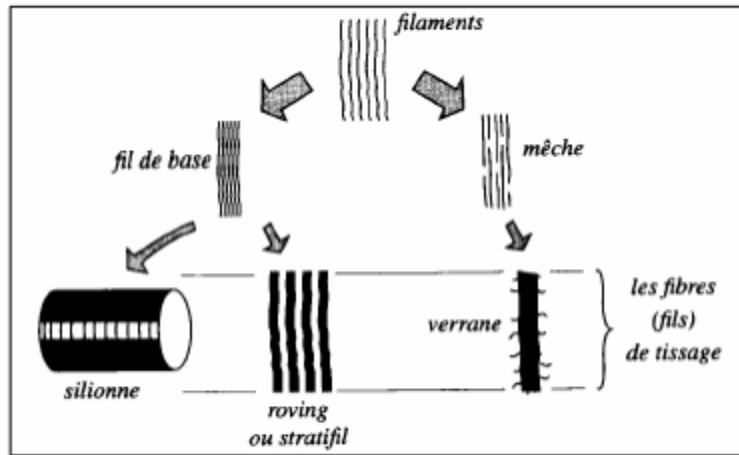


Figure I.11 : Forme linéique d'un renfort.

b) Forme surfacique

Pour réaliser les formes surfaciques, plusieurs types de fils peuvent être utilisés : mats, tissus ou rubans.

- Mats :

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan suivant une direction aléatoire, ce qui conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan. Les mats sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre.

- Tissus ou rubans :

Ensemble de fils, stratifiés ou mèches réalisées sur un métier à tisser, composé d'une chaîne (ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu), et d'une trame (ensemble de fils s'entrecroisent avec les fils de chaîne) (figure I.12).

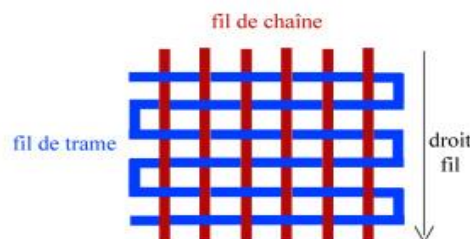


Figure I.12 : Chaîne et trame d'un tissu

Les tissus différents par le type de fils utilisés (fils simple, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et de trame. Les armures classiques utilisées sont illustrées sur la (figure I.13)

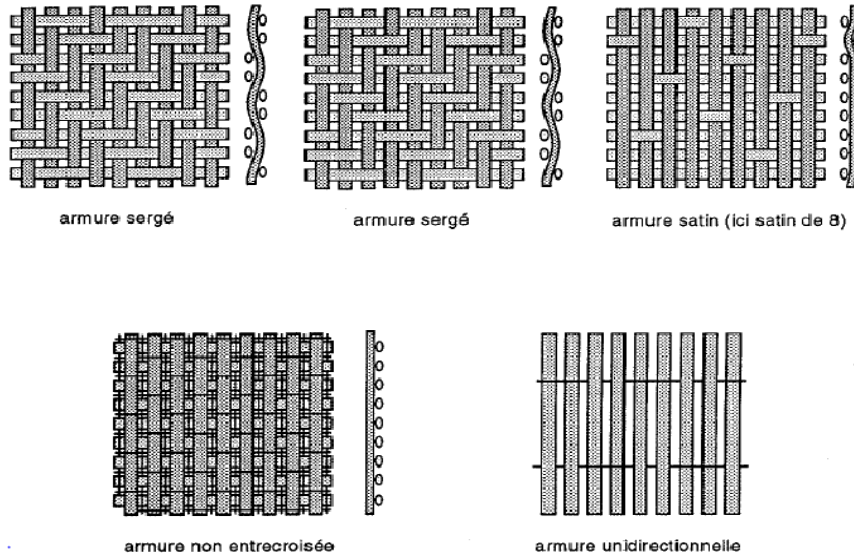


Figure I.13: Types d'armure de tissage d'un tissu

c) **Forme Multidirectionnelle**

o **Tresses et préformes**

Ce sont des tissages cylindriques ou coniques (figure I.11) avec des entrecroisements réguliers des fils qui ont la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice, le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice ; par conséquent à l'angle que font les fils entre eux. Ce tissage nous permet de réaliser des pièces de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe.

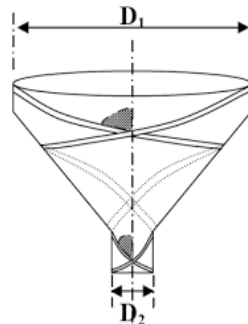


Figure I.14 : Tissage cylindro-conique

o Tissus multidirectionnels

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, ils sont utilisés par exemple pour la réalisation de tuyère. Des tissages 3D et 4D sont montrés respectivement par la figure I.15

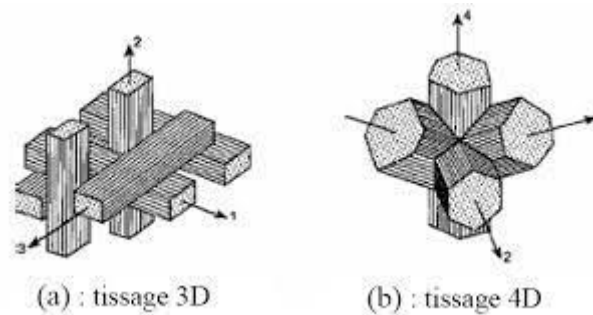


Figure I.15 : Structures multidirectionnelles

❖ Nature du renfort (fibre) :

Selon leurs natures, les fibres peuvent être classées par familles :

I.5. Fibres synthétiques

I.5.1. Fibres de verre

Les fibres de verre sont les fibres les moins chères par rapport aux autres types. C'est le matériau le plus utilisé pour les composites. Elles sont constituées essentiellement de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Leur module d'élasticité est de 70 à 85 GPa, leur allongement extrême varie de 2 à 5%, en fonction de leur qualité, en revanche les principaux inconvénients des fibres de verre sont la relaxation et la sensibilité face à l'humidité.

Il existe trois types de fibres de verre :

- E : pour les composites, de grandes diffusions et l'application courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D ou S : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



Figure I.16 : Fibre de verre

Le tableau suivant résume quelques caractéristiques mécaniques des différents types de fibres de verre :

Tableau I.9 : caractéristiques mécaniques de fibre de verre [10]

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre Dou S
Résistance à la rupture (MPa)	3400 à 3500	4400	4600
Module de Young (GPa)	73	86	87
Allongement à la rupture (%)	4.6 à 4.8	5.5	5.4
Masse volumique (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

I.5.2. Fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres de précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polycrylonitrrique (PAN). La quantité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur [13]

Les fibres de carbone (figure I.17) se caractérisent par un module d'élasticité très élevé qui de l'ordre de 200 à 800 GPa. Elles ont un allongement extrême qui peut attendre 2,5%.

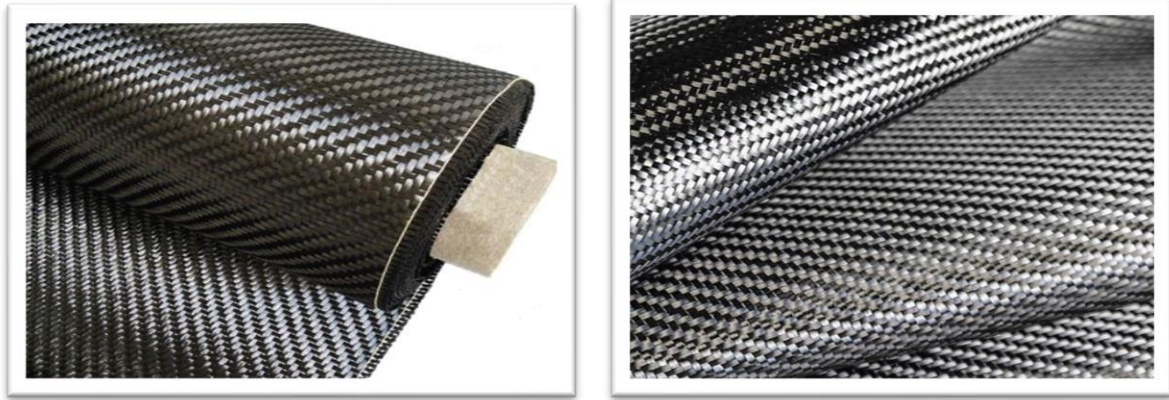


Figure I.17 : La fibre de carbone

Elles sont caractérisées par :

- Une absorption nulle de l'eau ;
- Une tenue face à plusieurs solutions chimiques ;
- Une meilleure endurance à la fatigue ;
- Une haute tenue thermique.

Cependant, la fibre de carbone présente quelques limites telles que :

- Une conductivité électrique qui peut engendrer des corrosions galvaniques au contact avec l'acier ;
- Un mauvais comportement au choc et à l'abrasion notamment ceux du type stratifié.

En fonction du taux du carbone, les fibres en carbone se divisent en trois types :

- Fibre de carbone HR « à haute résistance », issues d'une mise en œuvre par carbonisation.
- Fibre de carbone HM « à haut module », issues d'une fabrication par graphitassions.
- THM des fibres « à très haut module » ou et des fibres intermédiaires.

Les caractéristiques de ces fibres de carbone sont données dans le tableau ci-dessous

Tableau I.10 : Caractéristiques mécaniques de fibre de carbone [14]

Filament	Carbone HR	Carbone HM
Densité	1.78	1.8
Résistance à la traction (MPa)	3500	2200
Module de traction (MPa)	200000	400000
Allongement à la rupture (%)	1	0.5
Température à la fusion (°C)	2500	2500

I.5.3. Fibre d'aramide (Kevlar) :

Les fibres d'aramide (figure I.18) sont des fibres synthétiques à base de polyamides aromatiques dont les premières applications reviennent à l'année 1972. Ces fibres sont généralement développées pour renforcer les pneumatiques. Il en existe deux types principaux :

- ❖ La fibre module Kelvar 49 et Twaron HM.
- ❖ La fibre standard Kelvar 29 et Twaron HM50.

**Figure I.18** : Fibre d'aramide

Elle présente une bonne résistance à la traction, une aptitude à absorber des vibrations et des chocs ainsi qu'une dilatation thermique nulle.

Cependant, elle est caractérisée par une tenue limitée en compression, une reprise d'humidité importante et un prix élevé.

Tableau I.11 : Caractéristiques mécaniques de fibre de Kevlar [10]

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49
Masse volumique (Kg/cm ³)	1440	1450
Module de Young (GPa)	60	120
Résistance à la rupture (MPa)	3000	3000
Allongement à la rupture (%)	3.6	1.9

I.6. Fibres naturelles

L'utilisation des fibres naturelles dans la réalisation de matériaux composites est devenue une alternative de moindre impact environnemental que les fibres synthétiques telles que la fibre de verre et de carbone, grâce à leur faible densité, leur faible coût et leurs caractéristiques mécaniques intéressantes.

Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges on peut les subdiviser en trois grands groupes, fibre d'origine végétale (cellulosique), animale (protéinique), et minérale comme l'amiante.

- Végétale : extraite de plantes, de fruit et d'arbres comme le coton, le lin, l'agave, le jute, le chanvre, etc.
- Animale : extraites de poils d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, etc.
- Minérale : on trouve dans la nature des minéraux de texture fibreuse, comme l'amiante.

La figure I.19, résume l'ensemble des fibres naturelles.

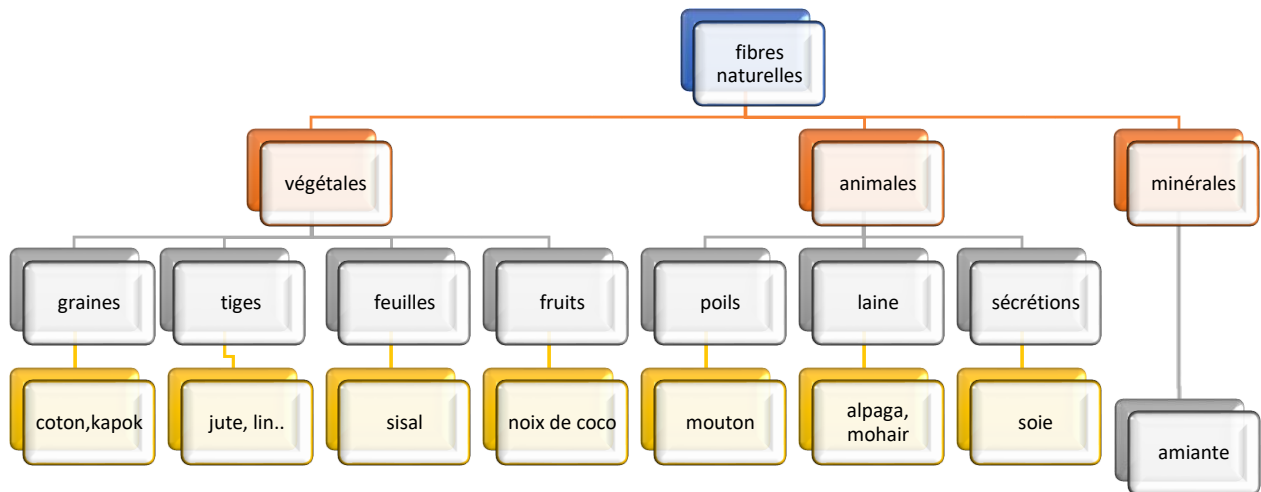


Figure I.19 : Différents types de fibres naturelles. [15]

Dans le cadre de notre travail, l'intérêt est porté sur les fibres végétales plus précisément la fibre de jute afin de la mettre en avant dans le domaine de la construction et d'optimiser son utilisation.

I.6.1. Fibre végétale

La fibre végétale est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignines en faible proportion. Les proportions de ces composants varient selon la fibre et son âge ce qui lui donne des propriétés mécaniques supérieures à celle des fibres d'origine animales. [16]

I.6.1.1. Composition chimique de la fibre végétale

Les différents constituants des fibres végétales sont :

- ✓ La Cellulose : La cellulose est le principal composant dans la quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse) [17]. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne des fibres en cellulose [18].
- ✓ Hémicellulose : Les hémicelluloses représentent le 3ème composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids à peu près 25% de la

biomasse [17]. L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [18].

- ✓ Lignine : La lignine forme avec la cellulose et l'hémicellulose la grande majorité de la biomasse, elle est 2ème après la cellulose en termes d'abondance. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition (barrière de protection biologique) [19]. La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel [18].
- ✓ Pectines : Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois) [19].
- ✓ Extractibles : Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques [19].

I.6.1.2. Classification de la fibre végétale

Les fibres végétales diffèrent selon :

- La teneur en cellulose, hémicellulose et lignine,
- L'organe de la plante dont elles sont issues (tiges ou feuilles),
- La longueur (les fibres végétales peuvent être longues ou courtes).

Les fibres issues des tiges comme celles de jute ou de sisal ont une résistance mécanique élevée et des propriétés spécifiques qui leur donnent une bonne qualité pour le renforcement des composites polymères.

I.6.1.3. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrilles cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalente à la lignine. La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radial.

Ces différentes couches 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 micro fibrilles (S1, S2, S3)

I.6.1.4. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un obstacle au niveau du développement industriel.

Tableau I-12 : Les avantages et les inconvénients des fibres végétales

<u>Avantage :</u>	<u>Inconvénients :</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible coût. ▪ Propriétés spécifiques importantes (rigidité, résistance). ▪ Demande peu d'énergie pour la production. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bon isolant thermique. ▪ Moins fragiles que les fibres synthétiques (mise en œuvre facile) ▪ Ressource renouvelable et une large gamme de variété à travers le monde ▪ Non abrasif pour les outillages 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absorption d'eau ▪ Biodégradation ▪ Renfort discontinu ▪ Variation de qualité en fonction du lieu, de croissance, et des conditions météorologiques. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible densité

Plusieurs fibres végétales ont été étudiées pour renforcer les polymères comme par exemple le jute et le sisal. Les composites à matrice polypropylène renforcés de fibres de jute sont connus pour avoir les propriétés suivantes : légèreté, bonne résistance aux agents extérieurs, esthétique et facilité de mise en œuvre et résistance moyenne, ce qui autorise leur utilisation dans les industries du meuble et de la construction.

I.6.1.4.1. La fibre de chanvre :

La fibre de chanvre (figure I.20) est une fibre naturelle très utilisée dans le milieu du textile (tapis et vêtements), les arts créatifs (remplissage des poupées ou de coussins..) mais aussi dans le domaine de la construction (isolation thermique et toitures). Elle est extraite d'une plante libérienne, dont la hauteur varie de 1 à 3m.

La fibre de chanvre présente l'avantage, en plus, d'être un matériau écologique, d'avoir une de bonnes propriétés isolantes, de bonnes qualités acoustiques et une bonne résistance mécanique.

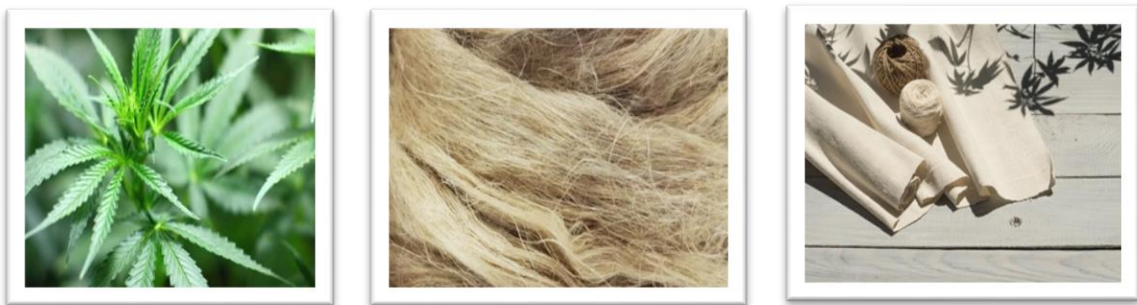


Figure I.20 : Plante et fibre de chanvre

I.6.1.4.2. La fibre de sisal

Les fibres de sisal (figure I.21) sont issues de l'agave sisal-ana une plante tropicale cultivée au Mexique et en Afrique, sa longueur moyenne est de 3mm [21]. Les feuilles de sisal sont coupées à la manchette avant de les passer dans une défibreuse. Après le défibrage, elles seront lavées puis séchées et enfin brossées afin d'éliminer les dernières impuretés.

Cette fibre est reconnue pour ses propriétés isolantes, une fois tressée elle dispose des caractéristiques idéales pour la fabrication des tapis ou des revêtements de sols.

Le sisal est une ressource renouvelable, il a une excellente capacité d'absorption de l'humidité.



Figure I.21 : Plante et fibre de sisal

I.6.1.4.3. Le jute

Le jute est une matière naturelle végétale, biodégradable et recyclable. Cette fibre végétale est issue d'une plante herbacée de la famille des Malvacées, Il existe plusieurs variétés, dont beaucoup sont restées à l'état sauvage et considérées comme de mauvaises herbes tropicales comme le trilocularis, le fascicularis, l'acutangulus, le Tridens.etc.

Les deux espèces les plus connues et cultivées à ce jour, sont l'olitorius et le capsularis, plus connues sous le nom de jute rouge ou encore « TOSHA » et Jute blanc.

Ces plantes ont une taille qui varie de 1 m à 4 mètres de hauteur selon les régions et les conditions climatiques. Les feuilles pétiolées, de limbe triangulaire ont environ 15 centimètres de long. Selon les espèces, elles terminent leur floraison par une fleur ou un fruit en forme sphérique. Elles sont de couleur jaune.



Figure I.22 : Plante et fibre de jute

❖ La culture de la plante de jute :

La culture du jute nécessite un climat tropical avec des conditions particulières comme la mousson pour se développer et rouir.

Il faut principalement de la chaleur et de l'humidité. C'est pourquoi, 95 % de la production mondiale se trouve dans le golfe du Bengale, et plus précisément au Bangladesh et au nord-est de l'Inde, dans la région de Calcutta. Lorsque la pluie tombe en abondance (environ 75-100 mm), la plante pourra commencer sa croissance pleinement. Il faut un sol particulier pour que celle-ci se développe, il doit être de type alluvial ou argilo-sableux.

Un hectare produit environ 2 tonnes de fibre sèche, c'est l'une des fibres naturelles les moins chères. Le jute se place juste derrière le coton par sa production et les divers usages possibles. Pour la filière textile c'est la tige qui sera exploitée. Après avoir été coupé, le Jute sera roui environ 3 semaines pour que les fibres puissent se détacher et se séparer. La séparation et l'extraction se fait manuellement en battant les fibres sur le sol.

Pour récupérer la fibre de jute plusieurs étapes sont nécessaires. En effet, après la récolte (**fauchage**), les tiges de Jute sont liées en bottes et immergées dans de l'eau stagnante ou à faible courant pour les libérer de la pectine et autres substances mucilagineuses qui les soudent, c'est **le rouissage**. Les méthodes de rouissage (isolement des fibres) utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige sont soit biologiques, soit chimiques, mais au vu du prix des produits chimiques, la méthode biologique (extraction traditionnelle) est plus répandue. Les tiges restent immergées dans l'eau pendant environ 20 jours, jusqu'à ce que la fibre se sépare facilement de l'écorce.

Ensuite, c'est **l'écorçage**. Les tiges sont frappées, bottes par bottes, avec un maillet de bois pour rompre l'écorce. Quand les fibres sont libérées, on les lave en les écartant en éventail afin d'enlever à la main les dernières impuretés.

Les fibres sont essorées et mises **à sécher** deux ou trois jours au soleil dans des cordes et assemblées en balles. Les reflets dorés et soyeux de la fibre de Jute lui ont valu le nom de "fibre d'or".



Figure I.23 : Etapes d'extraction de la fibre de jute

Les fibres de jute sont ensuite peignées mécaniquement afin de créer de grandes longueurs (qui varient de 1 à 4 m) et de diamètre (20 à 25 μ m) et de les débarrasser de leur impureté. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins (figure I.24).[22]

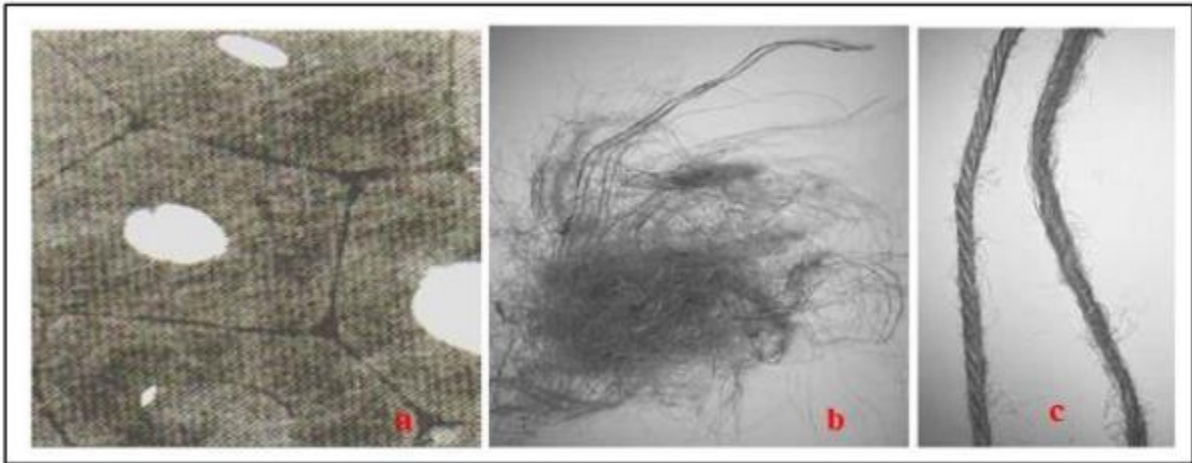


Figure I.24 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c).

I.7. Polymères renforcés de fibres

Le terme « composites amélioré », « matériaux composite renforcé » ou PRF « polymère renforcé de fibres » sont généralement destinés pour désigner les matériaux fibres organiques (Verre, Aramide, Carbone) ou inorganiques (Coton, Jute...) fixées dans la matrice (résine époxy). Ces matériaux possèdent un rapport résistance-poids plus élevé par rapport à l'acier.

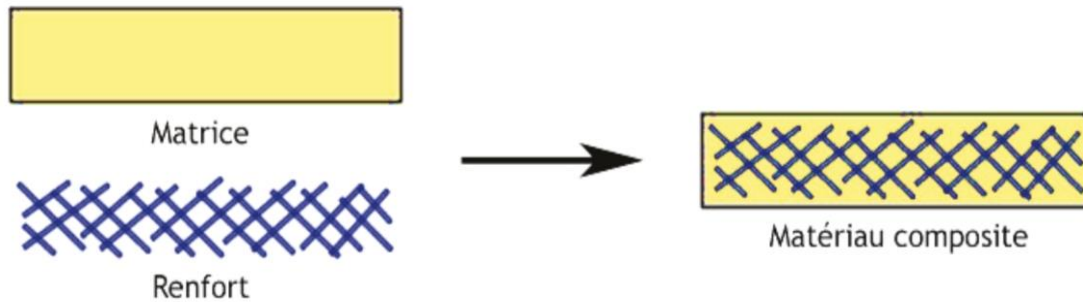


Figure I.25 : Composants d'un matériau composite de PRF

Les matériaux composites sont initialement utilisés pour les industries de défense et les industries aérospatiales. Suite à la grande demande des matériaux de construction durable et efficaces, cela a conduit à une plus grande utilisation des PRF dans les constructions civiles. Après plusieurs tentatives de développement et de recherche il a été approuvé que les matériaux composites permettent de renforcer les structures en béton armé.

On distingue deux types de matériaux composites :

- Les matériaux composites de « grande diffusion » : ces propriétés mécaniques sont faibles mais son cout est compatible avec une production en grande série.
- Les matériaux composites de « hautes performances » qui présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un cout unitaire important. Ce type de matériaux composites est souvent employé en aéronautique et dans le domaine spatial.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [23]

- Les composites à matrice organiques (**CMO**) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrice céramique (**CMC**) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaires.

- Les composites à matrices métalliques (**CMM**) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifique.

On peut citer quelques avantages et inconvénients des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics (tableau I.13)

Tableau I.13 : Avantages et inconvénients des PRF

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Faible densité ; ❖ Propriétés mécaniques longitudinales ; <ul style="list-style-type: none"> ❖ Absence de corrosion ; ❖ Très bonne tenue à la fatigue ; ❖ Facilité de manipulation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropie très marquée ; • Comportement à la rupture de type fragile des composites ; • Prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

I.8. Conclusion

Il a été souligné précédemment que les structures en béton armé nécessitent un renforcement ou une réparation pour un certain nombre de raisons. Il a été constaté que la méthode de renforcement avec les matériaux composites était une solution intéressante.

L'utilisation des matériaux composites dans la réparation des ouvrages en génie civil s'est imposée comme une solution prometteuse et efficace en raison de leurs propriétés mécaniques élevés. Cependant, le mode de rupture le plus important de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interface élevées.

Cette recherche s'inscrit dans la démarche de l'utilisation des matériaux composites dans le renforcement interne, en flexion, de poutres en béton. Un intérêt particulier est porté à l'utilisation des fibres naturelles de jute comme substitue aux fibres synthétiques de verre. Pour étudier cette possibilité, une étude expérimentale dont le détail est donné dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Compagne expérimentale

II.1. Introduction :

Suite à l'étude bibliographique ayant porté sur le béton de manière générale et les différents types de renforcement des poutres en béton armé, nous présentons dans cette section toutes les étapes du protocole expérimental réalisé au sein du laboratoire de matériaux de la faculté du génie de la construction à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Cette étude concerne le renforcement en flexion, d'éléments poutres en béton au moyen de matériaux composite.

Il s'agit d'un renforcement avec des plaques de tissu de verre, tissu de jute et PRFJ

L'objectif de notre démarche étant d'étudier la possibilité de remplacer le renforcement avec le tissu de verre par le tissu de jute. Les variables considérées dans notre travail sont la longueur du tissu jute, son nombre de plis ainsi que la dimension de la maille de jute.

Le calcul des proportions des différents constituants du béton, son malaxage, la pose du renfort ainsi que la conservation des éprouvettes sont des étapes soigneusement réalisées et bien décrites dans cette partie

Enfin une description de la procédure d'essai de flexion est donnée.

II .2. Protocole expérimental

L'expérience a porté sur une série de 24 éprouvettes prismatiques, de dimension normalisée (40x10x10) cm³, réparties en 04 groupes.

- Un groupe de 03 éprouvettes en béton non renforcées
- Un groupe de 03 éprouvettes renforcées à la partie tendue avec une plaque de tissu de verre de dimensions de 30*10 cm²,
- Un groupe de 06 éprouvettes renforcées avec une plaque de tissu de jute en considérant deux longueurs différentes de 35 et 40 cm,
- Un groupe de 06 éprouvettes renforcées avec des fibres de jute en 03 et 04 plis,
- Un groupe de 06 éprouvettes renforcées avec une plaque de tissu de jute pour deux dimensions différentes de la maille du tissu de jute.

II.3. Caractérisation des matériaux utilisés

Pour les besoins de cette recherche expérimentale, nous avons privilégié l'utilisation de matériaux locaux de proximité dans le but d'encourager l'économie locale.

II.3.1. Le béton

Le béton est un matériau composite constitué de quatre éléments principaux qui sont les granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée et sable), le ciment et l'eau. Les proportions des composants diffèrent selon le type de béton visé.

La figure II.1, montre les constituants secs du béton.

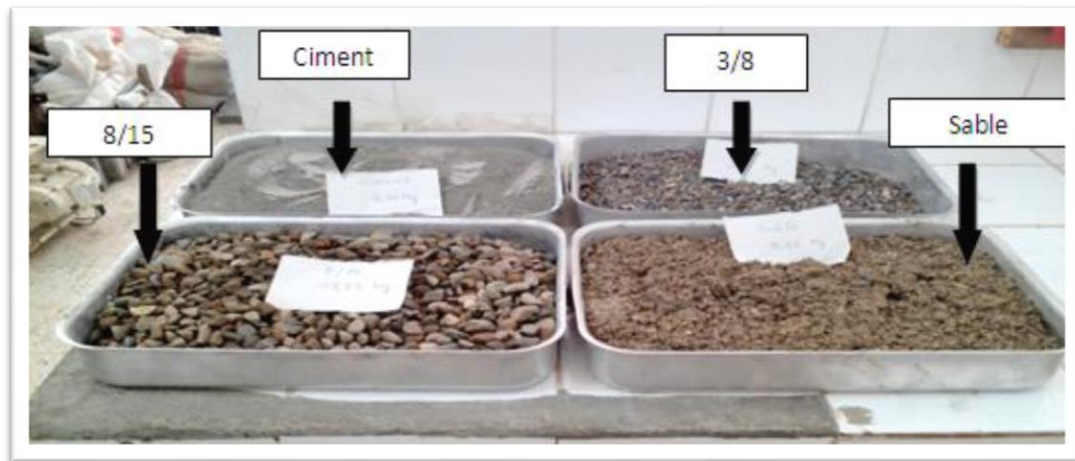


Figure II.1 : Constituants du béton

II.3.1.1. Granulats

Ils constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive.

On utilise généralement pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par des sables et des gravillons, on peut également utiliser des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes et les silicates.

Les granulats que nous avons utilisés dans cette expérience sont des granulats secs et propres. Nous avons utilisé, en effet, le sable (0/3) et les graviers de classe (3/8 et 8/15), qui ont été

lavés puis séchés à l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures puis conservés dans des bacs à l'intérieur du laboratoire.

II.3.1.2. Ciment

C'est le composé liant du béton. Sous forme de poudre très fine, il est mélangé aux granulats et, au contact de l'eau il forme une pâte faisant et durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est la réaction d'hydratation du ciment.

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ CEM II /42,5 R provenant de LAFARGE d'Alger.

II.3.1.3. L'eau d'hydrations

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient environ 30 g/l de chlorures de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet.

Le tableau II.1, résume les fractions massiques calculées par la méthode DREUX-GORISSE, pour les différents constituants du béton utilisé dans notre expérience.

Tableau II.1 : le dosage des constituants pour 1m³ de béton.

Composant	Masse en Kg
Ciment	350
Sable	824.4
Gravier 3/8	240
Gravier 8/15	784.4
Eau	200

II.3.2. Le renfort

Les matériaux composites ou les renforts utilisés dans notre recherche se sont des polymères renforcés de fibre de jute et de verre. Il s'agit de plaques à base de tissus de verre et de jute imprégnées d'une résine époxy.

II.3.2.1. Tissu en fibres de jute :

Le jute est une plante tropicale qui produit la fibre végétale la moins chère, extraite par rouissage. L'Inde est le premier pays producteur de cette fibre (60% de la production mondiale). C'est une fibre qui présente une forte résistance à la traction et une faible extensibilité

La fibre utilisée dans cette étude provient de la toile de jute usée ayant servi comme sacs d'emballage de produits alimentaires et agricoles (figure II.2).



Figure II.2 : Tissu en fibre de jute.

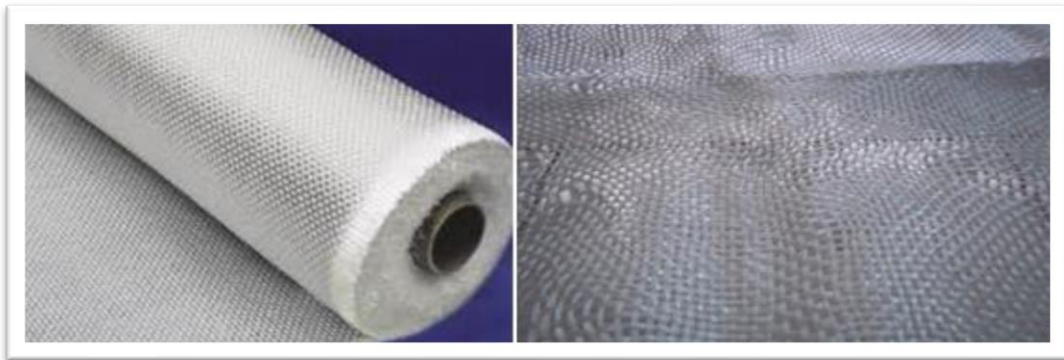
Le tableau II.2 regroupe quelques caractéristiques de la fibre de jute.

Tableau II.2 : caractéristiques de la fibre de jute

Fibre	Résistance à la traction MPa	Densité (g/cm ³)	Module de YOUNG (MPa)	Déformation (%)
Jute	393-773	1.44-1.48	26500	1.5-1.9

II.3.2.2. Fibre de verre :

Les fibres de verre sont en généralement fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de la silice associée à divers oxydes (alumine, alcalins, alcalinoterreux). Le verre en renforcement, est souvent utilisé sous forme de tissu (figure II 3).

**Figure II.3** : Fibre de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

On distingue différents types de verres selon leur fibre constitution :

- Verre E : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- Verre D : destiné aux applications de construction ou d'électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- Verre C : très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.

- Verre R ou S : destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs à ceux des autres fibres de verre.

Le tableau II.3, renferme l'essentiel des caractéristiques des différents types de la fibre de verre.

Tableau II.3 : caractéristiques de la fibre de verre

Fibre	Résistance à la traction MPa	Densité (g/cm ³)	Module de YOUNG (MPa)	Déformation (%)
Type E	3400-3500	2.54	73500	4.6 à 4.8

II.3.3. Résine

C'est l'un des composants principaux des PRF. Le polymère utilisé dans cette expérience est une résine époxy fournie par GRANITEX.

La résine organique (A) est malaxée avec un durcisseur (B) (figure II.4) dans les proportions de 2/3 et 1/3 respectivement, tel que préconisé par le fabricant.

B

A

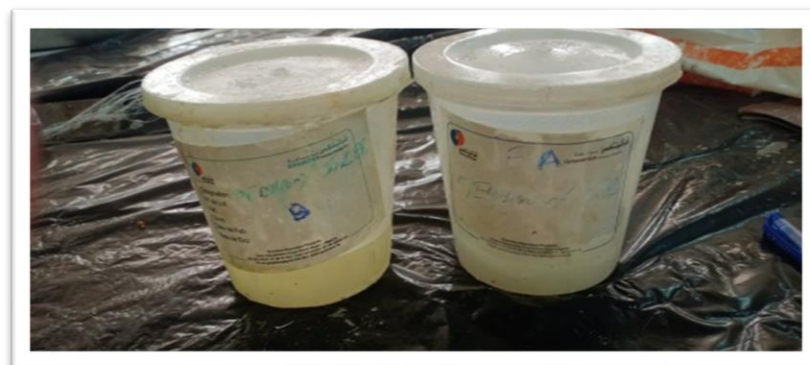


Figure II.4. Résine époxy.

Les caractéristiques de la résine époxy données par le fournisseur, sont présentées dans le tableau II.4

Tableau II.4 : Caractéristiques de la résine

Paramètres	Valeurs
Densité (ISO 758)	1.1±0.005 (kg/m ³)
Viscosité (NF T76-102)	11000 (MPa) à 25°C
DPU : duré pratique d'utilisation (NFP18 810)	1heure15minute à 20°C et 65%
Temps de durcissement à 20°C et 65%HR	Hors poisse : 6heurs, Dur, 16heurs
Résistance en compression (NA 427)	>70 (MPa)
Résistance a la flexion (NA 234)	>25 (MPa)
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 (MPa)
Durée de mise en service	10jours à 20°C
Rapport pondération (A/B)	Résine : 1 Kg, durcissement : 0.666
Résistivité à 20°C	10 ¹⁰ à 10 ¹³ (Ω.m)

Les deux composants sont mélangés pendant quelque minutes à l'aide d'une tige électrique, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène ne renfermant pas de bulles d'air. Pour éviter de gaspiller de la résine, puisqu'elle durcit assez vite, il est conseillé de la mélanger par petites quantités.

II.4.1. Confection du béton et préparation des éprouvettes :

II.4.1. Préparation des moules

Des moules métalliques en forme prismatique d'une hauteur de 10 cm, largeur de 10 cm et longueur de 40 cm conformément à la norme NF EN 12 390-1 ont été utilisés afin de confectionner les spécimens à étudier. (Figure II-5).



Figure II.5 : Moules prismatiques

II.4.2. Préparation des tissus de renfort :

Notre recherche vise un renforcement interne, par intégration de tissu de verre et de jute à l'intérieur des poutres en béton afin de renforcer les parties tendues de celles-ci.

On prépare les tissus selon les différentes longueurs pour les incorporer dans le béton lors du coulage du béton

Des bandes de tissus de verre et de jute sont mesurées et découpées (figure II.6).



Figure II.6 : Préparation des tissus de fibre de jute et de verre

Les bandes destinées au PRFJ, sont ensuite enduites de résine et laissées au séchage, pendant 24h, dans les conditions de laboratoire.



Figure II.7 : Plaque de PRFJ

Pour la variable nombre de mailles du tissu de jute, on a procédé à l'ensimage du tissu de jute. Ainsi un fil sur trois est retiré pour la 1^{ère} variante et un fil sur quatre est retiré pour la 2^{ème} variante.



Figure II.8 : Préparation des mailles

Coulage du béton

Pour une bonne réalisation de l'expérience ainsi qu'une meilleure qualité des résultats, nous avons préparé de petites gâchées.

Le malaxage s'est fait en utilisant un malaxeur à axe vertical. Les composants secs y sont d'abord introduits puis mélangé pendant une trentaine de secondes. Ils sont ensuite mouillés avec l'eau de gâchage graduellement tout en mélangeant et ce pendant 1 minute environ.

Les parois du malaxeur sont raclées à l'aide d'une truelle avant de poursuivre le malaxage pour une trentaine de secondes jusqu'à obtention d'un mélange homogène (figure II.9).



Figure II.9 : Fabrication du béton dans un malaxeur à axe vertical

Le béton est par la suite versé dans les moules prismatiques. Pour les éprouvettes renforcées, un béton d'enrobage de 2 cm est d'abord versé au fond du moule, puis le renfort est posé (textile ou PRFJ). Le béton est enfin, versé jusqu'au remplissage complet du moule (figure II.10).



Figure II.10 : Mise en place des renfort

Les moules remplis sont par la suite placés sur une table vibrante pour une vingtaine de secondes afin de compacter le béton en éliminant l'air occlus à l'intérieur (figure II.11).



Figure II.11 : Vibration du béton.

Les éprouvettes sont finalement étiquetées et laissées au séchage. Elles sont décoffrées 24h plus tard puis référencées (figure II.12.a) et conservées dans des bacs remplis d'eau à 28°C selon la norme NF2001 et ce jusqu'à maturation du béton au 28^{ème} jour d'âge (figure II.12.b).



Figure II.12 : a) Epreuves référencées b) Cure d'hydratation du béton.

II.5. Nomenclature des éprouvettes

Les éprouvettes confectionnées sont référencées relativement au renforcement, selon le système décrit dans le tableau II.5 pour l'ensemble des variables étudiées.

Tableau II.5. Nomenclatures des éprouvettes

Désignation	Nature de PRF	Longueur	Largeur	
BFV	Verre	30	10	
BT	Béton ordinaire			
Longueur PRF				
Désignation	Nature de PRF	Longueur	Largeur	
FJ 35	Jute	35	10	
FJ40	Jute	40	10	
Dimension maille PRF				
Désignation	Nature de PRF	Type de maille	Longueur	Largeur
FJM2	Jute	½	30	10
FJM3	Jute	1/3	30	10
Nombre de plis du PRF				
Désignation	Nature de PRF	Nombre de plis	Longueur	Largeur
FJ3	Jute	3	30	10
FJ4	Jute	4	30	10

II.6. Procédure d'essai de flexion

Après 28 jours de murissement et de conservation dans des conditions climatiques ambiantes, toutes les poutres confectionnées sont testées sous chargement de flexion.

L'essai de flexion 3 points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimension $10*10*40$ cm sur une machine de flexion universelle IBERTEST avec une capacité de charge maximale de 200 KN et une vitesse de 0,2 KN/s. Le dispositif de chargement se compose de deux appuis disposés perpendiculairement à l'éprouvette et d'une panne de flexion, qui applique la charge au centre de l'éprouvette. (Figure II.13)



Figure II.13 : Mise en chargement des éprouvettes

La charge croît jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La machine fournit les valeurs de la charge de rupture, de la contrainte correspondante ainsi que du déplacement vertical au centre de l'éprouvette. Le comportement des spécimens étudiés est traduit par des courbes force-déplacement.

II.7. Conclusion :

Ce chapitre a été réservé à la description de la procédure expérimentale élaboré pour la confection des éprouvettes en béton renforcées, et la méthode adoptée dans cette étude, qui est le renforcement interne à base de fibre de jute et fibre de verre.

La compagne expérimentale a été exposée, en commençant par la description des matériaux utilisés, ainsi que les proportions des différents constituants ainsi que les propriétés physiques et mécaniques des renforts utilisés. Le mode de renforcement y est bien détaillé, en mettant l'accent sur les différentes étapes et les différentes variantes considérées, allant de la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention d'éprouvettes renforcées avec des tissu de verre et jute prêtes à être soumises à un essai de flexion dont la procédure es également détaillée dans ce chapitre, en vue d'étudier la possibilité de remplacer les fibres de verre par les fibres naturelles de jute, une démarche qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Les résultats des différents essais de flexion font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et discussions

III -1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de l'expérience que nous avons réalisée, sur l'ensemble des poutres (renforcées et non renforcées). Il est à rappeler que pour le cas du jute, plusieurs variantes ont été testées en faisant varier la longueur du tissu, le nombre de plis du PRFJ ainsi que le maillage du tissu, le but étant de trouver la configuration optimale du renforcement interne proposé dans le cadre de cette étude.

Les poutres sont testées jusqu'à rupture tout en observant leurs modes de fissuration. Les résultats en termes de résistance en flexion, de rigidité et de modes de ruptures sont donnés sous forme d'histogrammes, graphes et tableaux, puis sont discutés afin de mieux appréhender le comportement de ces poutres renforcées en flexion.

III.2. Résultats de l'essai de flexion

Les résultats de l'essai de flexion sont donnés par variantes et sous forme de tableaux et de courbes (force-déplacement) ainsi que des histogrammes représentant les apports du renforcement.

III.2.1. Renforcement avec le tissu de verre

Les résultats de la résistance en flexion pour la poutre du béton témoin et celle renforcée avec le tissu de verre sont consignés dans le tableau III.1, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la figure III.1.

Tableau III.1 : Résultats du renforcement avec le tissu de verre.

Type de renforcement	Force 1 ^{ère} fissure (KN)	Déplacement 1 ^{ère} fissure (mm)	Rigidité (N/mm)	Résistance (MPa)
BT	9.442	2.059	4585.72	4.14
BFV	10.33	1.372	7529.15	4.65

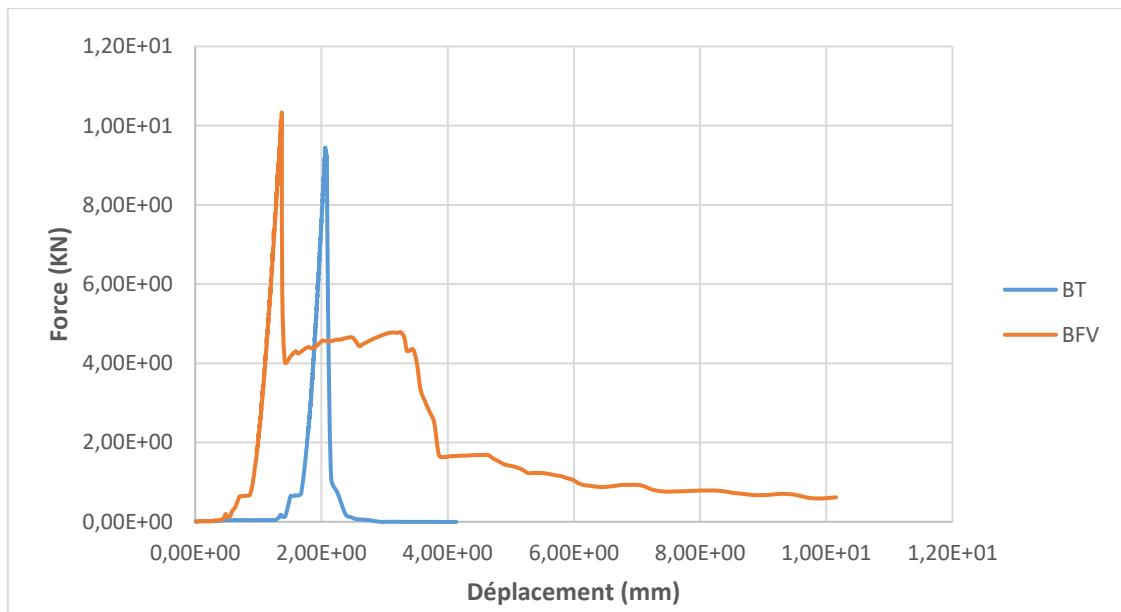


Figure III.1 : Confrontation des courbes force-déplacement pour BT et BFV.

D'après la figure, on remarque que les courbes présentent une branche linéaire où le déplacement vertical augmente rapidement avec l'augmentation de la charge appliquée, avec une vitesse moindre pour la poutre renforcée avec le tissu de verre. Ceci s'explique par l'opposition du tissu de verre à la fissuration, puisqu'après la fissuration du béton, le tissu de verre continue de résister à la charge avant de se rompre pour une valeur de 4,78 kN correspondant à une déflexion de 3,257 mm, ce qui est traduit par le second palier de la courbe.

Il est visible sur cette figure que la poutre en béton témoin, qui enregistre une charge maximale de 9,442 kN, présente une rupture fragile et brutale, contrairement à la poutre renforcée avec le tissu de verre qui atteint une charge maximale de 10,33 kN et une déflexion de 1,372 mm. Ceci confère à la poutre renforcée une rigidité supérieure à celle de la poutre non renforcée.

Les résistances ainsi que les déplacements enregistrés pour la poutre renforcée sont représentés par l'histogramme de la figure III.2.

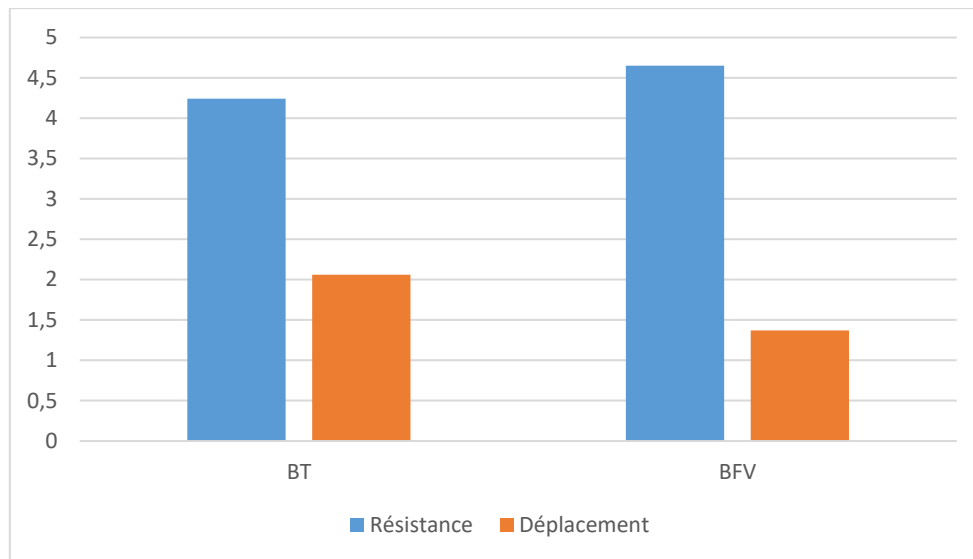


Figure III.2 : Résistance et déplacement de la poutre renforcée avec le tissu de verre et de la poutre témoin.

La comparaison des résultats enregistrés en matière de résistance à la flexion, montre une augmentation de la résistance pour la poutre renforcée avec le tissu de verre, puisque l'apport en résistance de cette poutre par rapport à la poutre non renforcée a la valeur de valeur 12.31 %. Par contre, l'utilisation du verre permet une réduction de près de 50% de la déflexion.

L'examen du mode de rupture des deux poutres (figure III.3), montre que la rupture se produit dans la zone la plus tendue, à la mi-travée où le moment de flexion est maximal. A la différence que pour la poutre non renforcée, la fissure est large, contrairement à la poutre renforcée de tissu de verre qui présente une fissure beaucoup moins large, ce qui explique le rôle du tissu dans la limitation de la fissuration.



Figure. III.3 : Modes de rupture de la poutre renforcée avec le tissu de verre et la poutre non renforcée.

III.2.2. Effet de l'utilisation du jute en remplacement du verre

Dans le but de tester l'efficacité du renforcement en utilisant le jute en remplacement du verre sur la résistance et la rigidité du béton renforcé, les résultats des spécimens renforcés pour toutes les variantes étudiées sont comparés à ceux obtenus pour le béton témoin ainsi que pour le béton renforcé avec le tissu de verre.

III.2.2.1. Influence de la longueur du tissu de jute

Deux longueurs d'un tissu bidimensionnel de jute sont testées dans le but de déduire la meilleure variante qui donnerait la meilleure réponse et pourrait, de ce fait, concurrencer le tissu de verre de longueur de 30 cm. Ainsi, les longueurs de 35 cm et 40 cm de jute ont été considérées. Les résultats sont donnés dans le tableau III.2, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la figure III.4

Tableau III.2 : Résultats du renforcement avec le jute selon différentes longueurs et du renforcement avec le tissu de verre.

Type de renforcement	Force 1 ^{ère} fissure (KN)	Déplacement 1 ^{ère} fissure (mm)	Rigidité (N/mm)	Résistance (MPa)
BT	9.442	2.059	4585.72	4.14
BFV	10.33	1.372	7529.15	4.65
FJ 35	9.26	1.795	5158.77	4.16
FJ 40	9.14	1.635	5590.21	4.11

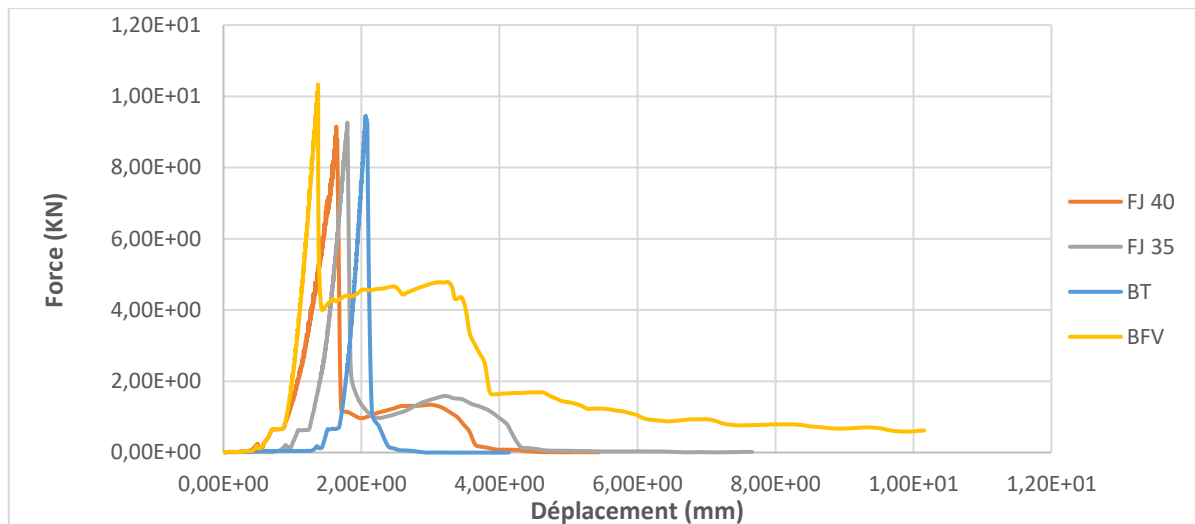


Figure III.4 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute selon différentes longueurs et du renforcement avec le verre.

Il ressort du graphe que les charges maximales pour les deux longueurs de jute testées qui sont de 9.14 kN et 9.26 kN respectivement sont légèrement inférieures à celle du béton témoin qui est de 9.442 kN, et sont également inférieures à celle du béton renforcé avec le verre qui vaut 10.33 kN. La rigidité des poutres avec jute est également améliorée par rapport à celle du béton témoin mais reste inférieure à celle du béton avec tissu de verre. Ceci est dû au fait que le jute résiste à la fissuration d'où son meilleur comportement par rapport au béton non renforcé mais pas assez pour rivaliser avec le tissu de verre qui présente une plus faible déflexion pour une charge plus élevée. Les courbes des poutres avec jute présentent également un pallier qui traduit la reprise de l'effort par le tissu de verre qui se rompt pour une charge inférieure à celle du verre, vu que la résistance du tissu de jute à la traction est inférieure à celle du tissu de verre.

L'histogramme ci-dessus Figure III.5 illustre la variation de la résistance et du déplacement vertical des poutres selon la longueur du tissu de jute contre celles renforcée avec une bande de tissu de verre de 30 cm de long.

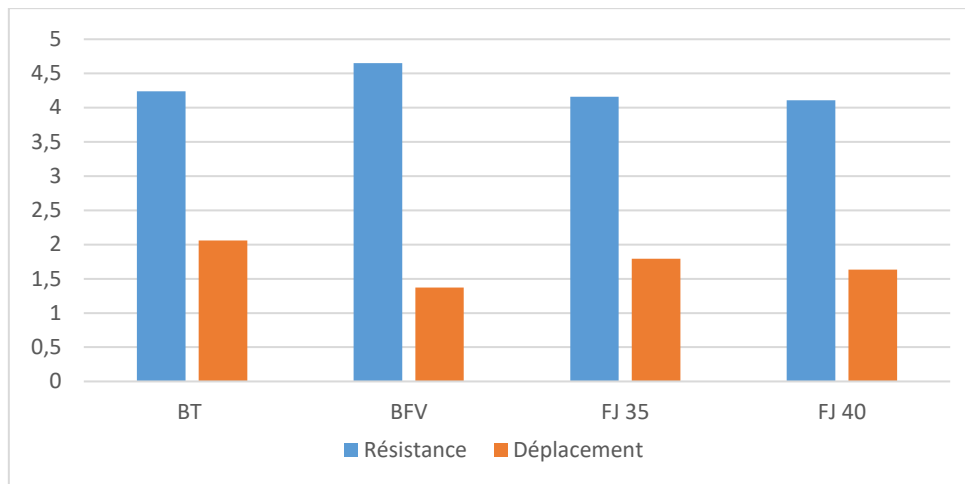


Figure III.5 : Résistance et déplacement vertical des poutres selon la longueur du tissu de jute et celle renforcée avec le tissu de verre



Figure. III.6 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin

Les poutres renforcées avec des bandes de jute de 35 cm et 40 cm de long respectivement présentent un mode de rupture analogue à celui des poutres renforcées avec le verre.

III.2.2.2. Influence de la taille de la maille

Deux dimensions de mailles ont été testées pour le renforcement des poutres avec le tissu de jute. Elles ont été obtenues après ensimage du tissu. Pour la variante FJ M2, un fil sur deux est ôté dans le sens des trames, alors qu'un fil sur trois est ôté pour la variante FJ M3. Les résultats obtenus pour les maillages considérés sont confrontés à ceux obtenus pour le verre et donnés dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Résultats du renforcement avec le jute selon différentes tailles de mailles et du renforcement avec le tissu de verre.

Type de renforcement	Force 1 ^{ère} fissure (KN)	Déplacement 1 ^{ère} fissure (mm)	Rigidité (N/mm)	Résistance (MPa)
BT	9.442	2.059	4585.72	4.14
BFV	10.33	1.372	7529.15	4.65
FJM2	12.17	1.472	8267.66	5.47
FJM3	11.081	1.328	8344.12	4.98

Le comportement des poutres renforcées avec les deux configurations de maillage du tissu de jute et celui des poutres renforcées avec le tissu de verre est décrit par les courbes de la figure III.7

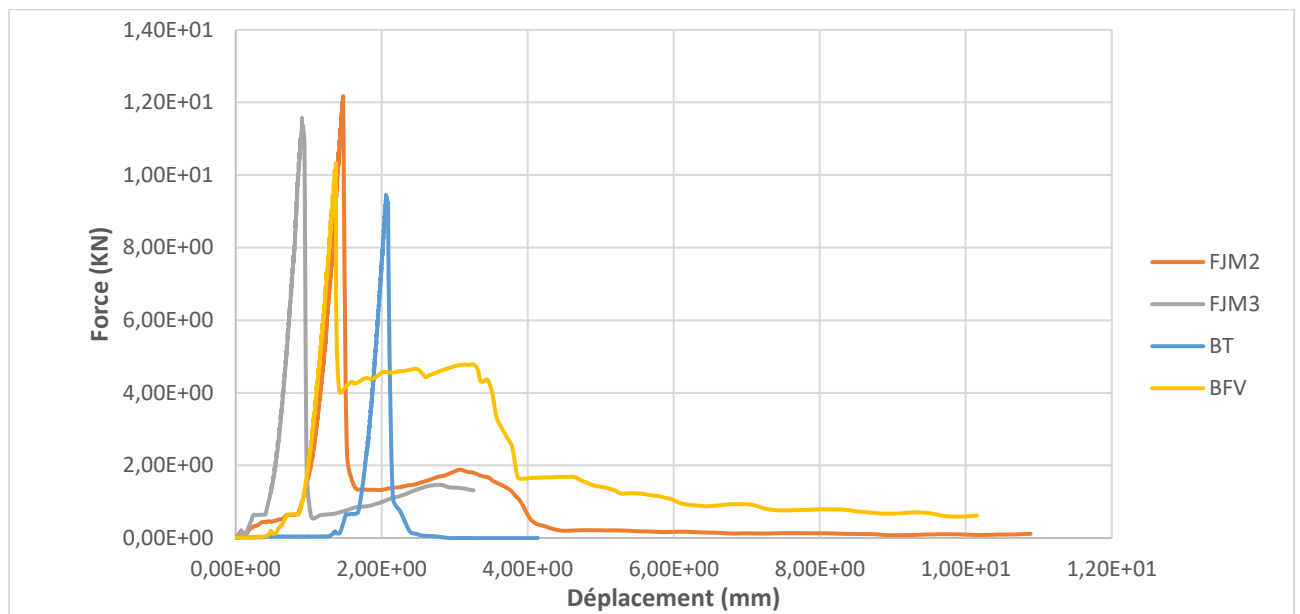


Figure III.7 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute pour les différentes mailles et du renforcement avec le verre.

Il ressort des graphes que la charge max des poutres renforcées avec le tissu de jute pour les deux tailles de mailles testées à savoir 12.17 kN et 11.081 kN pour FJM2 et FJM3 respectivement, sont supérieures à celle obtenue pour le renforcement avec le verre.

La rigidité est également améliorée de peu pour le jute vu que pour la variante FJM3 la déflexion est bien inférieure à celle de la poutre renforcée avec le verre, on enregistre un écart de 3.31% et celle de FJM2 présente un accroissement en déplacement de 7.28% par rapport à la poutre renforcée avec le verre.

Les résistances ainsi que les déplacements obtenus sont donnés dans l'histogramme de la figure III.8

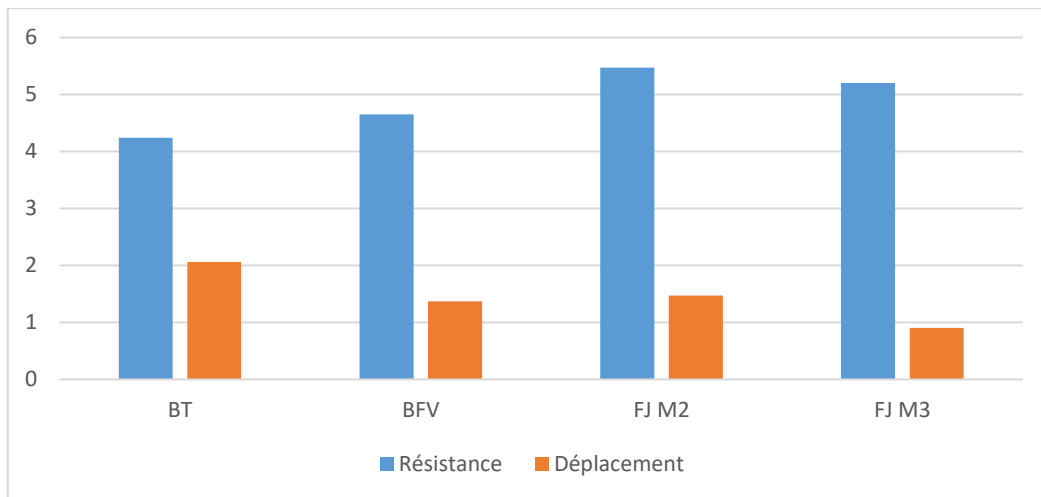


Figure III.8 : Résistance et déplacement vertical des poutres renforcées avec le jute pour les différentes mailles et du renforcement avec le verre.

Un gain de capacité portante est constaté pour les poutres FJM2 et FJM3, par rapport à la poutre renforcée avec du verre puisqu'on obtient un apport positif en termes de résistance ayant une valeur de 17.63% pour les poutres FJM2 et de 7.09% pour les poutres FJM3.

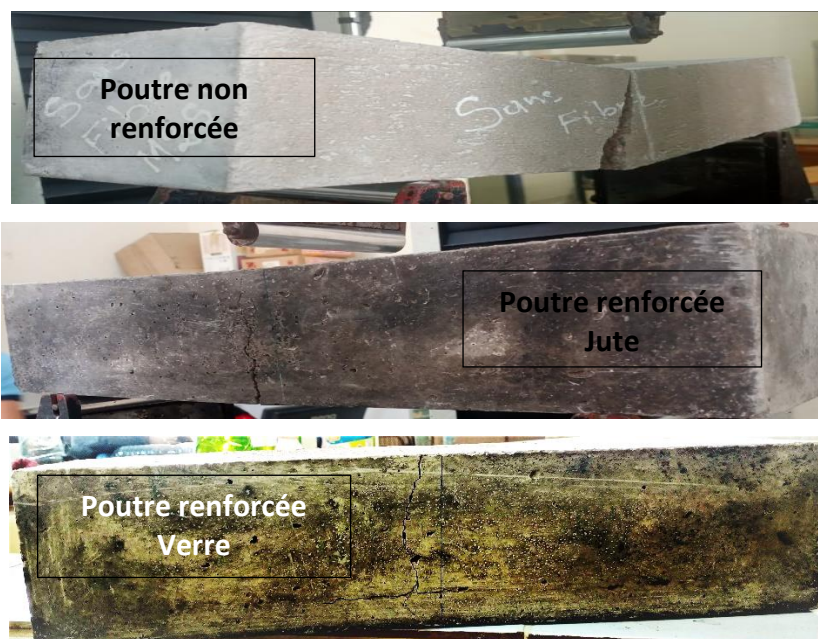


Figure. III.9 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin

Les poutres FJM2 et FJM3 présentent un mode de fissuration analogue à celui des poutres renforcées avec du verre.

L'amélioration des résultats en termes de rigidité des poutres renforcées avec le jute par rapport à celles renforcées avec le verre peut être expliquée par l'apparition d'une fissuration au niveau de l'interface verre-béton, ce qui peut engendrer une perte l'adhérence ainsi que par l'adhérence du jute au béton qui est bien meilleure que celle du verre.

Le renfort textile peut comporter une grande ou petite maille, la taille de maille du tissu influence de façon importante la pénétration de la matrice dans le renfort, ainsi que le mécanisme d'évolution de fissure dans le composite TRC (Textile Renforcé de Ciment). Il faut donc envisager la maille la plus pertinente possible, afin d'obtenir la bonne imprégnation par la matrice, mais aussi éviter un risque d'apparition de fissure dans la maille. Le taux de renfort et la position de l'armature textile ont une influence importante sur le comportement du TRC en traction. [25].

Influence du nombre de plis du PRFJ

Concernant le nombre de plis du PRFJ, deux variantes, ont été testées, à savoir 3plis et 4plis. Le but étant de les comparer au renforcement avec le verre. Les résultats obtenus en matière de mode de rupture, des résistances et courbes force-déplacement sont donnés pour chaque variante.

Les résultats de la résistance en flexion pour les trois poutres sont consignés dans le tableau III.4, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la figure III.10.

Tableau III.4 : Résultats du renforcement avec le jute selon le nombre de plis et du renforcement avec le tissu de verre.

Type de renforcement	Force 1^{ère} fissure (KN)	Déplacement 1^{ère} fissure (mm)	Rigidité (N/mm)	Résistance (MPa)
BT	9.442	2.059	4585.72	4.14
BFV	10.33	1.372	7529.15	4.65
FJ3	10.68	2.452	4355.62	4.8
FJ4	11.68	2.264	5159.01	5.34

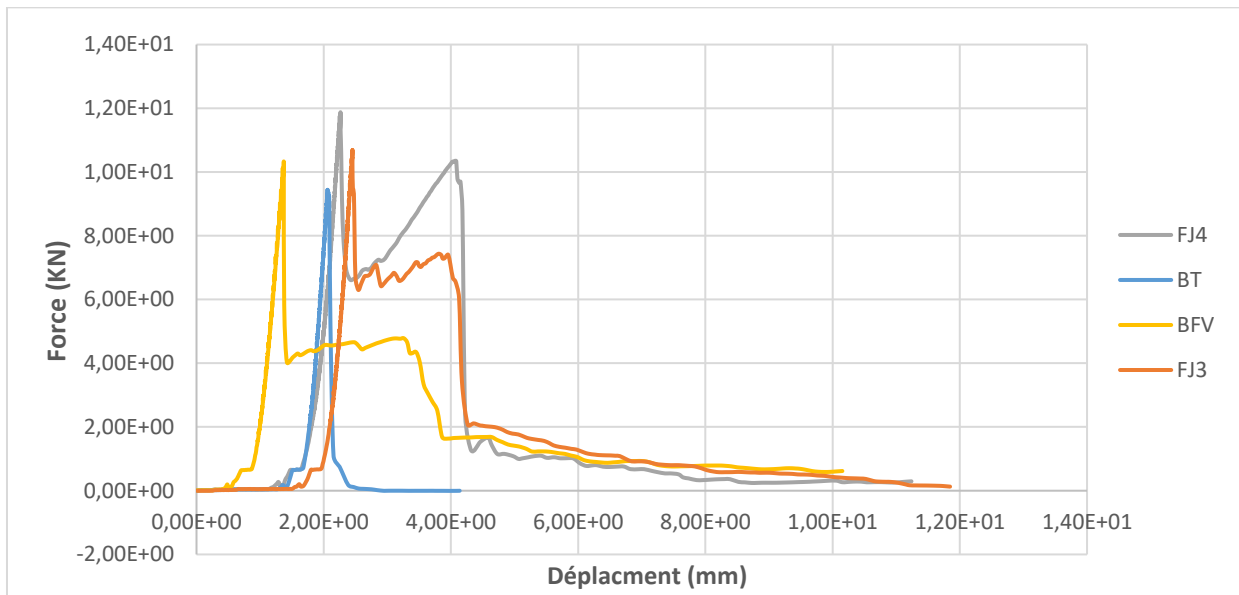


Figure III.10 : Courbes force-déplacement du renforcement avec le jute pour le nombre de plis et du renforcement avec le verre.

D’après les résultats obtenus, on constate que les poutres renforcées avec PRFJ présentent une amélioration en termes de capacité portante par rapport à celle renforcées avec le verre, puisqu’on note une valeur de la charge maximale de 10.68 kN et 11.68 kN respectivement pour FJ3 et FJ4 contre 10.33 kN pour les poutres renforcées avec le verre. Ceci se traduit par un léger gain de 3.38 % pour FJ3 et 13.06 % pour FJ4.

La rupture du PRFJ survient pour des charges supérieures à celle qui provoque la rupture du verre. Ceci vu les caractéristiques élevées du PRFJ par rapport à celles du tissu de verre.

Les résistances ainsi que les déplacements obtenus sont donnés dans l’histogramme de la figure III.11

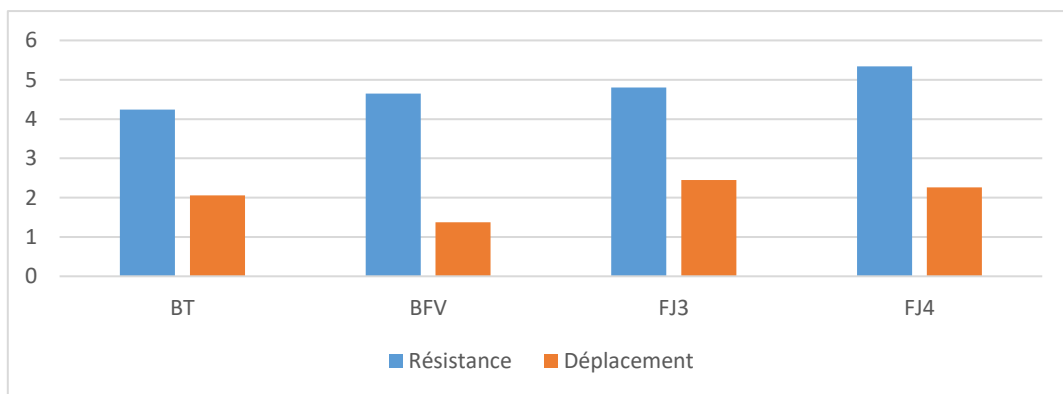


Figure III.11 : Résistance et déplacement vertical des poutres renforcées avec le nombre de plis et du renforcement avec le verre.

L'histogramme de la figure III.11 met en évidence l'amélioration de la résistance, qui présente des gains de 3.22 % pour les poutres renforcées avec PRFJ à 3 plis et 14.83 % pour celles renforcées avec PRFJ à 4 plis en comparaison avec les poutres renforcées avec le verre.

Cependant, les poutres renforcées avec le PRFJ présentent des rigidités flexionnelles inférieures à celle des poutres renforcées avec du verre. Ceci est dû au problème de la rupture de l'interface PRFJ-béton, puisqu'en examinant le mode de rupture des poutres renforcées avec le PRFJ figure III.12, on constate que celle-ci présentent une fissuration au niveau de l'interface qui cède en premier, ce qui semble acceptable puisque le PRFJ est sous forme d'une plaque rigide peu adhérente au béton.



Figure III.12 : Modes de rupture des poutres renforcées avec le verre et le jute et de la poutre témoin

III.2.3. Confortation des résultats de toutes les variantes testées

Les courbes force-déplacement de toutes les variantes testées dans le cadre de cette étude sont confrontées et présentées dans la figure III.13.

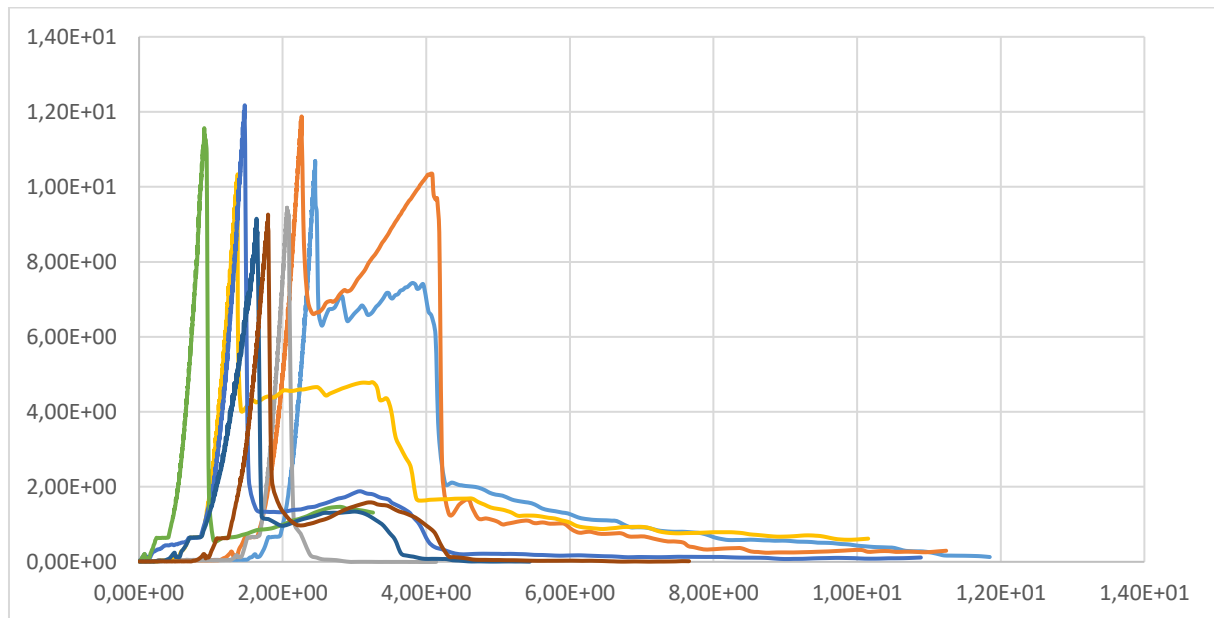


Figure III.13 : Confrontation des courbes

D'après le graphe, on constate que les variantes de renforcement des poutres avec le tissu de jute pour les deux dimensions de mailles considérées sont les meilleures variantes qui pourraient substituer celle du renforcement des poutres avec le tissu de verre puisqu'elles résistent à des charges plus élevées que celle à laquelle résistent les poutres renforcées avec le verre en présentant des rigidités flexionnelles légèrement plus grandes que celle de ces dernières.

III.3. Analyse statistique

Dans le but de valider les résultats obtenus dans l'expérience, ces derniers sont soumis à une analyse statistique. Il s'agit d'une méthode qui permet la comparaison des moyennes de la variable mesurée, à savoir la résistance, le déplacement vertical ou la rigidité, de plusieurs groupes indépendants. L'objectif étant de savoir si le facteur considéré, qui est dans notre cas le type de renforcement, a une influence ou pas sur la variable mesurée.

La méthode est appelée analyse de la variance (anova). C'est un test statistique basé sur l'hypothèse testée « H0 », qui suppose que le type de renforcement n'a pas d'effet sur la variable mesurée.

Elle est appliquée en utilisant le logiciel « R », qui fournit, après calculs, une certaine probabilité notée « p-value ». Celle-ci est comparée au risque d'erreur que l'expérimentateur fixe à une valeur de l'ordre de 5%.

La conclusion de ce test est donnée suite à la décision statistique relative à H0. La règle de décision stipule que H0 est acceptée lorsque la p-value est supérieure au risque d'erreur.

Tableau III.5 : Les résultats de l'anova conduite pour chaque variable sont résumés dans le tableau suivant.

	Force	Déplacement	Rigidité
p-value	0.0028	0.0013	0.0035
Décision	Rejeter H0	Rejeter H0	Rejeter H0
Conclusion	Le type de renforcement a un effet t hautement significatif sur la force	Le type de renforcement a un effet hautement significatif sur le déplacement	Le type de renforcement a un effet hautement significatif sur la rigidité

Puisque l'anova a montré que le type de renforcement a un effet sur chacune des trois variables, il serait intéressant de classer les différents renforcements étudiés en groupes homogènes, en utilisant le test de Newman-Keuls.

Tableau III.6 Les résultats de ce test sont résumés dans le tableau suivant.

Force			Déplacement			Rigidité		
<code>\$groups</code>			<code>\$groups</code>			<code>\$groups</code>		
	<code>F groups</code>			<code>d groups</code>			<code>rig groups</code>	
FJM2	11.850000	a	FJ3	2.261667	a	FJM3	8343.370	a
FJ4	11.513333	a	BT	2.106333	a	FJM2	8267.660	a
FJM3	11.106667	ab	FJ4	2.081333	a	V	7929.150	a
V	10.663333	ab	J35	1.778333	ab	J40	5590.210	b
FJ3	10.120000	ab	J40	1.635000	ab	FJ3	5313.440	b
J40	9.140000	b	V	1.361333	b	FJ4	5227.135	b
BT	9.038667	b	FJM2	1.318000	b	J35	5049.165	b
J35	8.760000	b	FJM3	1.314000	b	BT	3571.300	c

Il ressort de ces résultats que les poutres renforcées avec FJM2, FJM3 et le verre, appartiennent au même groupe homogène en termes de rigidité et de déplacement. Pour ce qui est de la charge, les poutres avec FJM2 appartiennent au groupe a, pendant que celles avec verre et FJM3 appartiennent au groupe ab, très proche de a. Au final, on peut conclure que les poutres renforcées avec FJM2, FJM3 et le verre présentent une réponse similaire en flexion, ce qui est en parfaite concordance avec les résultats expérimentaux.

III.4. Conclusion

Les différents résultats issus de l'analyse expérimentale montrent l'efficacité du renforcement interne du béton par textile de jute qui possède d'assez bonnes aptitude lui permettant de rivaliser avec celle du verre.

Il a été montré qu'on pouvait, en effet, remplacer le renforcement, avec le tissu de verre, des poutres étudiées par le même type de renforcement mais avec un tissu de jute en faisant varier les dimensions de ses mailles.

Conclusion

Générale

Conclusion générale et perspectives

L'utilisation des matériaux composites dans le génie civil s'est développée ces dernières années en raison de leurs propriétés mécaniques élevées, leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre sur chantier, qui constituent leurs principaux atouts par rapport aux matériaux traditionnels.

En général, des plaques de PRF et lamelles de composites sont directement collées à la surface du béton, comme alternative à l'utilisation des aciers et tôles métalliques. Cependant, le mode de rupture par décollement de la plaque composite dû aux contraintes d'interface élevées à proximité du bord de la plaque collée, constitue un problème majeur pour le renforcement par collage de matériaux composites.

Le renforcement interne peut constituer une solution à ce problème. Ces procédés impliquent souvent des fibres synthétiques telles que le verre ou le carbone. Cependant, les fibres synthétiques sont coûteuses à fabriquer et consomment beaucoup d'énergie, ce qui nuit à notre environnement. Les fibres végétales quant à elles sont exactement à l'opposé, il suffit d'optimiser leur utilisation pour qu'elles deviennent un substitut potentiel aux fibres synthétiques.

L'utilisation de composites à base de fibres végétales dans le renforcement des structures en béton est une solution pratique éprouvée en termes d'économie de matière, de résistance, de facilité de mise en œuvre, sans oublier le faible impact qu'elle a sur les personnes et l'environnement

Notre étude a un double objectif, d'une part palier le problème de décollement des plaques de composite, d'autre part d'examiner la possibilité d'utiliser des fibres de jute (fibres végétales) pour le renforcement interne du béton comme alternative aux fibres de verre (fibres synthétiques)

De manière générale, les fibres végétales restent des matériaux moins performants que les synthétiques, c'est pour cela qu'il faudrait chercher à optimiser leur utilisation pour espérer qu'ils rivalisent avec les matériaux synthétiques.

Dans notre étude qui visait le remplacement du tissu de verre par du jute, pour le renforcement en flexion de poutres en béton, plusieurs variantes ont été testées en faisant varier la longueur du tissu de jute, les dimensions de ses mailles, et le nombre de plis du PRFJ. L'expérience a porté sur une série de 24 éprouvettes prismatiques, de dimension normalisée (40x10x10) cm³,

réparties en 05 groupes selon les variantes testées. A savoir le renforcement avec le tissu de verre et avec le tissu de jute en considérant deux longueurs de celui-ci, deux dimensions de maille et deux nombres de plis en PRFJ.

Trois répétitions ont été considérés pour chaque variante.

Les résultats du test de flexion réalisé sur tous les spécimens testés, nous ont permis de conclure ce qui suit :

- Un gain de capacité portante de ...% ainsi qu'une diminution du déplacement de ...% ont été obtenus pour une poutre renforcée avec un tissu de verre en comparaison avec la poutre non renforcée.
- Il est possible de substituer le jute au verre, dans le renforcement faisant objet de cette étude, puisqu'on constate un gain de résistance ultime pour les variantes relatives à la dimension de la maille de jute ainsi que pour celle relative au nombre de plis du PRFJ.
- Aucune amélioration n'est constatée, ni en termes de résistance, ni en termes de déplacement, pour le renforcement avec différentes longueurs du tissu de jute par rapport au renforcement avec le tissu de verre.
- Pour la variante maille du tissu de jute, le gain en résistance a atteint une valeur de 17.63 % pour le béton renforcé avec la maille 1/2 (FJM2), avec une réduction du déplacement atteignant 7.28% pour FJM2 par rapport à la poutre renforcée avec la fibre de verre.
- Pour la variante nombre de plis, un gain de résistance atteignant 13.06% a été constaté pour 4 plis de jute, tant dis que le déplacement est supérieur à celui des poutres renforcées avec le verre.
- L'étude statistique réalisée nous a permis de confirmer que la variation de maille a un effet hautement significatif sur la résistance à la flexion du béton renforcé en termes de rigidité et de déplacement.
-

Pour corroborer notre travail de recherche, des travaux complémentaires devraient être réalisés.

Nous suggérons, en guise de perspectives, de :

- Tester d'autres types de textiles, notamment écologiques,
- Conforter les résultats de cette étude expérimentale par une étude numérique

- Une campagne d'essais avec plus d'échantillons serait nécessaire pour pouvoir prétendre à des propriétés mécaniques représentatives et exactes.
- Tester ce renforcement sur le béton armé et quantifier l'apport du composite dans la réponse des poutres.
- –tester ce renforcement sur des éprouvettes à une échelle plus grande, ainsi d'autres variantes de ce type de renforcement pourront être testées.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

[1] **NEZAR RAMZI**. Renforcement des poutres en béton armé par polymères renforcés des fibres (PRF) en flexion simple. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master. UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI. Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, département de Génie Civil. 2018.

[2] **Ali Ahmed C.** « optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, de structures endommagées : techniques- expérimentation et modélisation ». Thèse de doctorat, 2016.

[3] **DUQUETTE, Philippe**. Renforcement en flexion de poutres en béton arme à l'aide de plaques en matériau composite réalisées in-situ. Université Laval, 1999.

[4] **Fukuyama, H. et Sugano, S.** (2000) "Studies Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake", Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 59-79.

[5] **Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh** « Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton ». Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp. 264, 2010, 978-613-1-55146-8.

[6] **Merdas Abde-ELGHANI**, « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA » Université Des frères Mentouri-Constantine, Thèse de Magister2005.

[7] **Luyckx, J., 1999**. Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Ed. Techniques Ingénieur.

[8] **TAGHDI, Mustafa, BRUNEAU, Michel, et SAATCIOGLU, Murat**. Seismic retrofitting of low-rise masonry and concrete walls using steel strips. Journal of Structural Engineering, 2000, vol. 126, no 9, p. 1017-1025.

- [9] **OULD EL HACEN zein el abidine** « renforcement du béton par les matériaux. Composites » Université de Tébessa, Mémoire de Master 2016.
- [10] **J.M. Berthelot.** « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN : 2-7430-0771-0. Pp 72.
- [11] **Djellad Zohra Amal** « contribution à l'étude des dalles renforcées par des composites : analyse expérimentale et modélisation » université mouloud Mammeri Tizi Ouzou, mémoire de magister 2015
- [12] **BERREUR, Louis, DE MAILLARD, Bertrand, et NÖSPERGER, Stanislas.** L'industrie française des matériaux composites. Etude stratégique (Rapport de synthèse) réalisée par Nodal consultants pour le compte de la Digitip/SIM, 2002, vol. 14.
- [13] **Laurent Gornet,** Généralités sur les matériaux composites, <http://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296/fr/>.
- [14] **Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh** « Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton ». Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp. 264, 2010, 978-613-1-55146-8.
- [15] **Mohamed El Hadi BOURAHLI** « Caractérisation d'un composite verre / époxy » université Ferhat Abbas Sétif 1, thèse de doctorat 2014.
- [16] **F. Michaud,** « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage » université Laval thèse Phd 2003.

[17] DALLEL, Mohamed. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil. 2012. Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace-Mulhouse, 12 Jul 2013.

[18] MOKHTARI, Abdessamad. Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier. 2006. Thèse de doctorat. Ouargla, Université Kasdi Merbah. Faculté des Sciences et Sciences de L'ingénieur.

[19] YAHIAOUI Lamia. Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres Végétales (Diss). Thèse de Magister. Université Ferhat Abbas-Setif-ufas (Algérie), 2011

[20] CARMA Centre d'animation régional en matériaux avancés -, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origines renouvelable. CARMA, 2006.

[21] CHAPUIS, DenisVE, AERTS, Vincent, et BONNEVILLE, Richard. Chapitre 8 : Apport de la chimie au développement de matériaux pour l'aéronautique par Marie-Joelle Menu, Marie Gressier, Pierre Alphonse et Florence Ansart. In : Chimie, aéronautique et espace. EDP Sciences, 2021. P. 151-170.

[22] HALLONET, Anne. Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin : application au renforcement de structures en béton par collage externe. 2016. Thèse de doctorat. Université de Lyon.

[23] CONTAMINE, Raphaël. Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier : application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant. 2011. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard-Lyon I.