

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI 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, avec matériaux composites,
depoutres en béton.*

Présenté par : MERZOUKI Brahim

TEHARI Malik

Devant le jury composé de :

Dr DEHMOUS H.	Maitre de conférences A	Président	UMMTO
Dr ALI AHMED C.	Maitre de conférences A	Encadrant	UMMTO
Dr AIT TALEB S.	Maitre de conférences A	Examineur	UMMTO

Promotion : 2022/ 2023

Remerciements

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Mme ALI AHMED C. pour son soutien précieux et son engagement pour la réalisation de cette recherche. Sa contribution a été d'une grande importance, nous sommes très reconnaissants pour tout ce qu'elle a fait pour nous.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont bien accepté d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par leurs remarques.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous les enseignants qui ont contribué à notre formation en enrichissant nos connaissances et notre savoir.

Nos remerciements vont aussi au personnel du laboratoire de Génie Civil de l'UMMTO, en particulier Mme MEDJBAR et à M. BOUHERRAOUA, qui nous ont offert un accueil chaleureux et une aide précieuse tout au long de notre expérimentation. Votre soutien a été d'une importance capitale pour nous et a grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers nos précieuses amies et camarades, M. RANDA et M. DJADJIGA, pour leur assistance constante et précieuse ainsi que pour les encouragements inestimables qu'elles nous ont apportés tout au long de notre travail. Leur amitié et leurs encouragements ont joué un rôle fondamental en nous insufflant inspiration et motivation. Nous tenons à les remercier chaleureusement pour leur présence et leur soutien infaillibles lorsque nous en avons le plus besoin.

Dédicace

Je me fais un immense plaisir en dédiant ce travail à tous ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur, avec une grande satisfaction et un profond sentiment de générosité.

Je dédie ce travail de mémoire de fin d'étude à mes chers parents, ainsi qu'à mes frères et sœurs, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur soutien, leur amour et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique. Leur présence a été une source d'inspiration inestimable pour moi, et cette réussite leur est dédiée.

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mon cher neveu et nièce (non ?)

MOHAMED & ANIA

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

Remercîments	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1. Introduction	4
I.2. Les cause du renforcement.....	4
I.3. Renforcement des poutres.....	5
I.4. Les type de renforcement.....	7
I.4.1. Renforcement en flexion.....	7
I.4.2. Renforcement en cisaillement.....	7
I.4.3. Renforcement à la compression	8
I.5 Méthode de renforcement	9
I.5.1. Renforcement par chemisage en béton	9
I.5.2. Renforcement par projection.....	10
I.5.3. Renforcement à l'aide des tollés collés.....	11
I.5.4. Renforcement des éléments structuraux par matériaux composite.....	12
I.6 matériaux composite	13
I.6.1. éléments constitutifs des matériaux composites	14
I.6 .1.1. La matrice	14
I.6.2. les Fibres	17
I.6.2.1. Fibres de carbone	18
I.6.2.2 Fibres de verre.....	18
I.6.2.3. Fibre d'aramide.....	19
I.6.2.4. Fibres naturelles	20
I.6.3. classification des fibres	20
I.6.3.1. fibres végétale	21
I.6.3.2 caractéristique physique et mécanique des fibres végétale.....	25
I.6.3.3. application des fibres végétale	25

I.7 comportement des poutres en béton armé.....	26
I.8 mécanisme de rupture des poutres renforcées par collage externe de composites	27
II.9. Conclusion	27

Chapitre II : Compagne expérimentale

II.1. Introduction	28
II.2. matériaux utilisés	28
II.2.1. Le béton	28
II.2.2. Granulats.....	29
II.2.3. Ciment	30
II.2.4. L'eau d'hydrations.....	30
II.2.5. Le renfort	30
II.2.6. Tissu en fibres de jute	31
II.2.7. Résine	31
II.2.8.le ferrailage	33
II.3. Procédure expérimentale	33
II.3.1. Préparation des moules	33
II.3.2. préparation du ferrailage.....	33
II.3.3 préparation des tissus de renforts.....	34
II.3.4. mis en œuvre du renfort	34
II.3.5.confection des éprouvettes.....	35
II.4. Nomenclature des éprouvettes	37
II.5. Procédure de l'essai de flexion	37
II.6. Conclusion	39

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction	40
III.2. Résultats de l'essai de flexion	40
III.2.1. Effet de la largeur du tissu de jute.....	40
III.2.2. Effet du nombre de tours de la bande de jute	43
III.2.3 Effet du nombre de plis du PRFJ	46
III.3 étude de corrélation	49
III.4. analyse du mode de rupture.....	51
III.5. conclusion.....	52
Conclusion Générale et perspectives.....	54

Références bibliographique

Résumé

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I.1 : Renforcement de structure BA par matériaux composites.....	6
Figure I.2 : Rupture en flexion de la poutre	7
Figure I.3 : Rupture en cisaillement de la poutre	8
Figure I.4 : Rupture de poteaux	8
Figure I.5 Chemisage en béton armé d'un poteau.....	9
Figure I.6 : projection du béton.....	11
Figure 1.7 : renforcement à l'aide de tôles collées.....	11
Figure I.8 : renforcement des structuraux par les matériaux composites.....	12
Figure 1.9 : Renforcement des poutres avec PRF	13
Figure I.10 : Divers types de résines.....	17
Figure I.11 : Défirent matériaux de renfort	18
Figure I.12 : Fibre de carbone.....	18
Figure I.13 : Fibre de verre	19
Figure I.14 Fibre d'aramide	19
Figure I.15 : classification des fibres naturelles selon l'origine	21
Figure I.16 : Fibres de végétales	24
Figure I.17 : Mode de rupture des poutres en béton armé	26
Figure I.18 : Mode de rupture renforcé avec des matériaux composites	27

Chapitre II : Compagne expérimentale

Figure II.1 : Constituants du béton	29
Figure II.2 : Granulats de béton.....	29
Figure II.3 : tissu de fibre de jute	31
Figure II.4 : résine époxy.....	32
Figure II.5 : moules prismatique.....	33
Figure II.6 : ferrailage des poutres.....	34
Figure II.7 : Préparation des bandes de jute.....	34
Figure II.8 : mis en place du renfort.....	35
Figure II.9 : application de la résine sur les bandes de jute	35
Figure II.10 : malaxage du béton	36
Figure II.11 : coulage des poutres.....	36
Figure II.12 : éprouvettes confectionnées.....	37
figure II.13 : Poutre soumis à un essai de flexion	38

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : la variable largeur de la bande41

Figure III.2 : Résistance et déplacement de la variable largeur de la band42

Figure. III.3 : gain en résistance et déplacement pour la variable largeur de la band42

Figure III.4 : Courbes force-déplacement du renforcement pour la variante nombre de tours44

Figure III.5 : Résistance et déplacement pour la variante nombre de tours45

Figure. III.6 : gain en résistance et de placement des poutres pour la variante nombre de tours de la band.....46

Figure III.7 : Courbes force-déplacement du renforcement pour la variant nombre de plis47

Figure III.8 : Résistance et déplacement selon le nombre de plis48

Figure III.9 : gain en résistance déplacement des poutres pour la variante nombre de plis48

Figure III.10 : régressions linéaires pour la variable largeur de la band49

Figure III.11 : régression linéaires pour la variable nombre de tours49

Figure III.12 : régression linéaires pour la variable nombre de plis.....50

Figure III.13 : poutre non renforcé endommagé51

Figure III.14 : Poutres renforcé endommagés51

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé..... 10
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des tôles collées 12
Tableau I.3 Les caractéristiques mécaniques de la différente fibre 16
Tableau I.4 Les caractéristiques mécaniques des fibres végétales..... 20
Tableau I.5 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales 25

Chapitre II : Compagne expérimentale

Tableau II.1 : dosage des constituants pour 1M3 de béton 30
Tableau II.2 : caractéristique de fibre de jute 31
Tableau II.3 : caractéristique de la résine 32
Tableau II.4 : variantes étudiées 37

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1 : résistance et déplacement pour la variable largeur de la band 53
Tableau III.2 : résistance et déplacement selon le nombre de tours des bans de jute 56
Tableau III.3 : résistance et déplacement selon le nombre de plis 59

Introduction

Générale

Dans le domaine de la construction, le béton armé, l'acier et le bois sont des matériaux couramment utilisés pour l'élaboration de divers ouvrages tels que les bâtiments, les ponts, les chaussées et les fondations. Le béton armé est particulièrement populaire en raison de ses performances et de sa polyvalence, ce qui lui permet d'être utilisé dans de nombreux aspects du génie civil.

Cependant, l'un des défauts majeurs de la construction consiste en la dégradation des structures. De nombreuses structures montrent des signes de faiblesse avec le temps et ne satisfont plus aux normes pour lesquelles elles ont été initialement conçues. Les raisons de cette dégradation sont variées, et elles peuvent inclure des erreurs de conception ou de construction, des charges supplémentaires, des modifications dans l'utilisation de la structure, la corrosion des armatures, des incidents tels que les séismes ou les chocs, etc.

Pour remédier à ces problèmes, de nombreuses techniques ont été développées pour renforcer les structures en béton armé, en vue de réhabiliter ou d'améliorer leur résistance. Ces techniques impliquent généralement le remplacement des matériaux dégradés ou l'ajout de nouveaux matériaux, quitte à augmenter la section de base, pour améliorer les performances de la structure d'origine.

L'utilisation d'aciers en tant que renforts externes, soit de manière passive ou active, est courante dans ces techniques, en raison de leurs hautes performances. Cependant, les aciers présentent des inconvénients tels que la corrosion, le poids élevé, et les difficultés d'adaptation aux formes complexes de la structure. C'est pourquoi l'utilisation de matériaux composites devient de plus en plus intéressante pour le renforcement des structures en béton armé. Ces matériaux offrent une grande facilité d'adaptation à différentes formes de structures en plus d'autres avantages tels que leur faible poids, leur haute résistance en traction, et leur résistance à la corrosion.

Ainsi, la technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles stratifiées à base de fibres de carbone est aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue dans le monde entier [1-3].

L'utilisation des matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres (PRF), présente en plus des avantages cités précédemment, une facilité de mise en œuvre, l'absence de corrosion, et la possibilité de créer des formes complexes avec un minimum d'opérations.

De nombreux travaux de recherche ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments composites utilisés comme renforcement externe [4], [5].

De nombreuses études ont démontré le potentiel des composites comme élément de renforcement en flexion et en cisaillement de poutres en béton armé [6].

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.

Cependant, il est important de noter que l'une des principales causes de défaillance dans ces renforcements, lorsqu'ils sont appliqués à la surface du béton, est le décollement du matériau composite au niveau de l'interface entre le béton et le composite. Par conséquent, il est nécessaire de rechercher des alternatives, comme le renforcement interne des structures en béton armé avec des matériaux composites, pour résoudre ce problème.

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer la capacité de renforcement en flexion des poutres en béton en utilisant des fibres naturelles, en l'occurrence la fibre de jute. C'est une fibre d'origine végétale qui présente de nombreux avantages, notamment sa disponibilité, sa facilité de fabrication et de mise en œuvre, sa légèreté, sa flexibilité, sa solidité, son faible coût et son caractère biodégradable.

Nous avons ainsi, testé le renforcement interne de poutre en béton à l'aide de bandes d'un tissu bidirectionnel de fibres de jute. Plusieurs paramètres sont considérés, à savoir la largeur de la bande, le nombre de tours de la bande autour des armatures de la poutre et le nombre de plis de la bande appliquée sous forme de PRF de jute (PRFJ).

Dans le but de répondre à la question posée quant à l'efficacité du renforcement testé, une étude comparative est menée entre les différentes configurations de renforcement des poutres et la poutre en béton non renforcée

Nous avons, ainsi, structuré le mémoire en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique qui succède à une introduction générale de la recherche. Il rassemble des informations essentielles sur les textiles, les matériaux composites et les techniques de renforcement du béton. Il offre un aperçu des connaissances existantes dans ces domaines.

Le deuxième chapitre concerne l'investigation expérimentale qui y est détaillée. Il décrit en profondeur le processus de l'élaboration des échantillons d'essai, en mettant en avant les matériaux utilisés. De plus, il expose la méthodologie expérimentale, y compris la procédure d'essai en flexion.

Le troisième et dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats obtenus et à leur interprétation.

Chapitre I

synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Tout au long de leur cycle de vie, les structures en béton armé peuvent nécessiter des opérations de renforcement ou de réparation pour garantir leur sécurité et leur fonctionnalité. L'examen des problèmes structurels de ces ouvrages met en évidence des dommages causés principalement par des erreurs de conception, des modifications dans les conditions d'exploitation, et le vieillissement des matériaux.

Selon la nature des problèmes rencontrés, les opérations de maintenance peuvent inclure les actions suivantes :

- La protection de la structure en limitant la corrosion et en améliorant l'étanchéité.
- La réparation visant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance.
- Le renforcement pour augmenter les performances et la durabilité de l'ouvrage.

Parmi les approches de réhabilitation relativement récentes, l'utilisation de matériaux composites pour les éléments standards en béton armé est devenue courante. Ces matériaux présentent l'avantage de combiner des propriétés mécaniques robustes avec un poids réduit.

De nombreuses recherches ont, en effet, démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des structures par collage de matériaux composites qui sont utilisés comme renforcement externe [9-20].

Notre recherche se concentre principalement sur le renforcement interne en flexion des poutres en béton armé en utilisant des polymères renforcés de fibres (PRF) à base de fibres végétales de jute. Cette méthode présente un intérêt particulier pour éviter la réparation par l'application externe de plaques composites, qui souffre de problèmes liés à l'interface entre le composite et le substrat.

En plus de ses avantages économiques évidents, l'utilisation de fibres de jute présente des aspects écologiques intéressants, car leur production nécessite moins d'énergie que les fibres synthétiques, entraînant ainsi une réduction des émissions de CO₂. De plus, les fibres végétales sont biodégradables, ce qui s'aligne avec les principes du développement durable.

I.2. Les cause du renforcement

Les raisons qui peuvent conduire à la nécessité de renforcer une structure sont diverses, et les plus courantes peuvent être résumées comme suit [21] :

- Augmentation des charges :

Cela peut résulter de plusieurs facteurs, tels que le changement d'utilisation de la structure, une augmentation de l'activité à l'intérieur de la structure (par exemple, l'augmentation du trafic sur d'anciens ponts), ou l'installation de matériel lourd dans les bâtiments industriels.

Défauts dans la conception ou l'exécution : Ces problèmes peuvent découler de la mauvaise qualité des matériaux, de dimensions insuffisantes des éléments structuraux, ou encore de la mise en place d'armatures insuffisantes ou mal positionnées.

➤ Rénovation des structures anciennes :

Cette nécessité peut découler du vieillissement des matériaux, entraînant une perte de leurs caractéristiques initiales, de la prise de conscience des insuffisances des méthodes de calcul utilisées lors de la conception, de restrictions montrées par des structures conçues à une époque donnée, ou encore de la nécessité de renforcer la structure en raison de sollicitations qui n'avaient pas été prises en compte lors de la conception initiale, telles que les vibrations, les actions sismiques, etc.

➤ Changement de la forme de la structure :

Ceci peut survenir à la suite de modifications telles que la suppression de poteaux, de piliers ou de murs porteurs, l'élargissement des portées de calcul, ou l'ouverture de passages dans les dalles pour la construction d'escaliers ou d'ascenseurs.

En ce qui concerne le renforcement des poutres en béton armé, de nombreuses structures présentent une résistance insuffisante aux charges prescrites par les normes les plus récentes. Par conséquent, il devient nécessaire de renforcer ces poutres pour augmenter ou restaurer leur capacité de charge. Plusieurs études ont mis en évidence le potentiel des composites en tant que moyen de renforcer les poutres en béton armé, que ce soit en flexion ou en cisaillement.

I.3. Renforcement des structures en béton

Dans le domaine de la construction en béton armé, les composants de base peuvent être regroupés en deux catégories principales : les éléments verticaux, tels que les poteaux et les voiles, et les éléments horizontaux, tels que les poutres et les dalles. Tout au long de la durée de vie d'une structure, de la phase de conception à la fin de sa vie utile, plusieurs raisons peuvent nécessiter le renforcement de ces éléments afin de garantir leur sécurité et leur fonctionnalité. Ces raisons peuvent inclure une conception initiale déficiente, une mise en œuvre incorrecte (par exemple, des problèmes liés au positionnement des armatures passives), ou encore des problèmes de durabilité.

L'une des solutions envisageables pour remédier à ces problèmes consiste à appliquer des matériaux composites sur la plupart des composants standards en béton (figure I.1). Ce type de réparation peut avoir plusieurs avantages, notamment l'augmentation de la résistance à la

rupture, l'amélioration de la ductilité (la capacité du matériau à se déformer sans se rompre), et la limitation de l'ouverture des fissures [22]



Figure I.1 : Renforcement de structures BA par matériaux composites [22]

Ce chapitre examine les diverses méthodes de renforcement des structures en béton armé à l'aide de matériaux composites, en les adaptant aux sollicitations spécifiques à chaque type de structure et aux modes de rupture associés. Généralement, les méthodes de renforcement peuvent être classées en trois catégories principales :

➤ **Renforcement en flexion**

Cette approche concerne le renforcement des structures pour résister aux charges qui induisent une flexion, c'est-à-dire des forces qui provoquent des déformations et des contraintes de flexion dans les éléments structuraux [22].

➤ **Renforcement en cisaillement**

Ce type de renforcement est utilisé pour améliorer la capacité d'une structure à résister aux sollicitations en cisaillement, où les forces agissent de manière parallèle et opposée, provoquant un glissement relatif entre les parties de la structure [22].

➤ **Renforcement en compression** (par confinement)

Lorsqu'il est nécessaire de renforcer la capacité de la structure à supporter des charges en compression, notamment pour éviter le flambement ou améliorer la résistance aux charges

axiales, cette approche de renforcement est mise en œuvre. Elle implique souvent l'utilisation de matériaux composites pour confiner et renforcer les éléments en béton soumis à une compression

Ces différentes méthodes de renforcement sont adaptées en fonction des besoins spécifiques de la structure et des contraintes auxquelles elle est soumise, permettant ainsi d'améliorer sa performance et sa durabilité [22].

I.4. Types de renforcement

I.4.1. Renforcement en flexion

Ce type de renforcement est utilisé pour les structures exposées à des contraintes provoquées par des charges de flexion. Les fissures ou les dommages surviennent généralement dans la région soumise à une tension des poutres ou des dalles [23].



Figure.I.2 : Rupture en flexion de la poutre [23].

Le matériau de renforcement est introduit, dans ce cas, dans la partie tendue de la poutre, comme c'est le cas du renforcement avec les matériaux composites où l'on colle généralement des feuilles de PRF sur la surface de la poutre.

I .4.2. Renforcement en cisaillement

Il est essentiel de dimensionner correctement une poutre en béton armé pour qu'elle puisse pleinement résister à la flexion, garantissant ainsi une rupture ductile en cas de charge extrême. En effet, si une poutre présente des insuffisances en termes de résistance au cisaillement et qu'elle est soumise à une surcharge, cela peut entraîner une rupture soudaine en cisaillement (figure I.4), ce qui est extrêmement dangereux [23].

Pour renforcer une poutre en béton armé afin d'améliorer sa résistance au cisaillement, plusieurs techniques de renforcement externe sont couramment utilisées. Deux approches principales font appel à l'utilisation de matériaux composites. La première consiste à appliquer des bandes

composites sur les parois verticales de la poutre, tandis que la seconde implique l'installation de bandes en forme de U autour de la section de la poutre. De plus, ces renforts peuvent être réalisés de manière continue le long de la poutre ou de manière discontinue, en fonction des besoins spécifiques du renforcement.



Figure I.3 : Rupture en cisaillement de la poutre [23]

I.4.3. Renforcement à la compression

La défaillance en compression survient fréquemment dans le cas des poteaux ou des voiles qui ne disposent pas d'un renforcement transversal adéquat, ou qui sont sous-dimensionnés en termes de résistance aux forces sismiques. Cette dégradation se manifeste généralement par l'écrasement du béton, parfois en conjonction avec des charges de flexion.



Figure I.4 : Rupture de poteau (insuffisance de renfort transversal) [23].

I.5. Méthodes de renforcement

Le renforcement d'une structure en béton armé vise à améliorer les propriétés mécaniques de ses composants, de manière à les rendre plus résistants aux contraintes et aux charges imposées par les conditions d'utilisation normales et les situations extrêmes. Ce renforcement peut être réalisé au moyen de diverses techniques, notamment celles qui agissent sur les sections des éléments de la structure, telles que le chemisage ou la projection, ainsi que d'autres techniques qui impliquent l'incorporation de profils métalliques et de tôles.

Plus récemment, l'utilisation de matériaux composites a émergé comme une méthode de renforcement très efficace

I.5.1. Renforcement par chemisage en béton

Le renforcement par chemisage peut être défini comme un processus consistant à entourer la section primaire d'une structure en béton armé avec une nouvelle couche secondaire en béton armé. Cette nouvelle couche adhère à la structure d'origine, ce qui permet d'augmenter la résistance globale en augmentant la section de béton et en ajoutant une section d'armature supplémentaire.

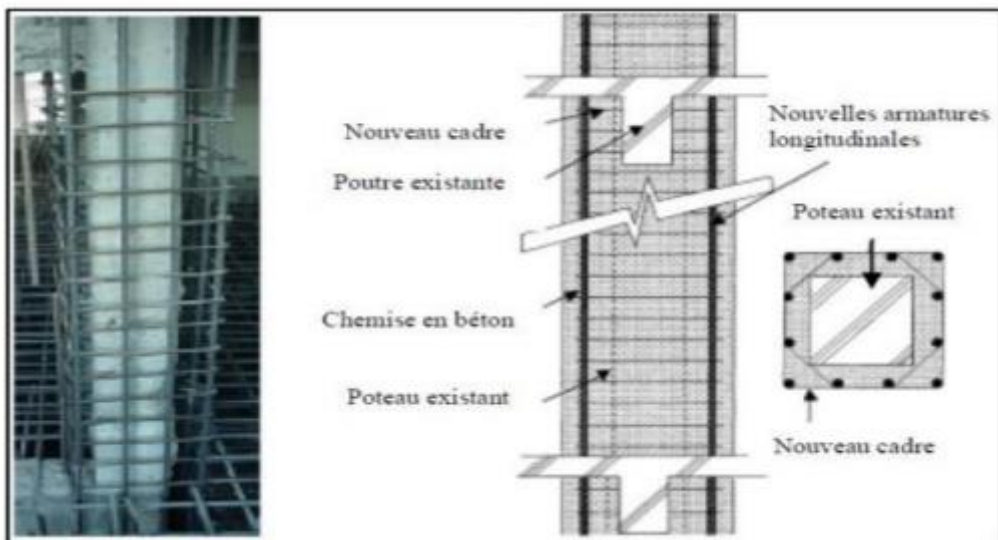


Figure I.5 : Chemisage en béton armé d'un poteau [24]

Le tableau I.1 résume les avantages et les inconvénients de la méthode de chemisage du béton.

Tableau I.1.Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé [25]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Technique peu couteuse 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.5.2. 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 consiste à projeter le béton sur la surface à renforcer à l'aide d'air comprimé. En fonction du degré de détérioration, on peut distinguer deux types de réparation par béton projeté :

➤ Réparations superficielles :

Ces réparations sont effectuées sur des surfaces en béton présentant des défauts mineurs, tels que des ségrégations légères. Le but est de restaurer la surface du béton et de corriger ces imperfections sans nécessiter de renfort structural majeur.

➤ Réparations profondes :

Ces réparations sont plus substantielles et visent à renforcer la structure elle-même en ajoutant de nouvelles armatures ou en renforçant les armatures existantes. Elles sont mises en œuvre lorsque la détérioration de la structure est plus sévère et nécessite des mesures de renforcement pour garantir sa stabilité et sa résistance aux charges.

Le choix entre une réparation superficielle ou profonde dépendra de l'état de la structure et des objectifs spécifiques de la réparation [26].



Figure I.6 : Projection du béton [26]

I.5.3. Renforcement à l'aide de tôles collées

Cette technique est devenue possible grâce au développement de colles adhésives à base d'époxy. L'époxy présente la particularité d'avoir une excellente adhérence, permettant ainsi de transmettre efficacement les charges. La première utilisation documentée de cette technique a eu lieu à Durban, en Afrique du Sud, où le renforcement était nécessaire pour compenser l'omission d'acier lors de la construction de l'ouvrage [26].

Par la suite, cette méthode a été étudiée de manière approfondie en tant que technique de renforcement des poutres soumises à la flexion. Plusieurs chercheurs ont confirmé son efficacité, ce qui a conduit les Japonais à l'utiliser pour la réparation de 240 ponts à faible capacité (David, 1999). En 1977, Freyssinets Internationaux a obtenu un brevet pour la technique des tôles perforées, améliorant ainsi l'adhérence des tôles au béton grâce à l'utilisation de résine.



Figure I.7 : Renforcement à l'aide de tôles 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.5.4. Renforcement des éléments structuraux par matériaux composite

La technique de renforcement par des matériaux composites (généralement en PRF) pour les éléments structuraux (figure I.8) est l'une des techniques les plus efficaces pour augmenter la résistance de ces derniers.

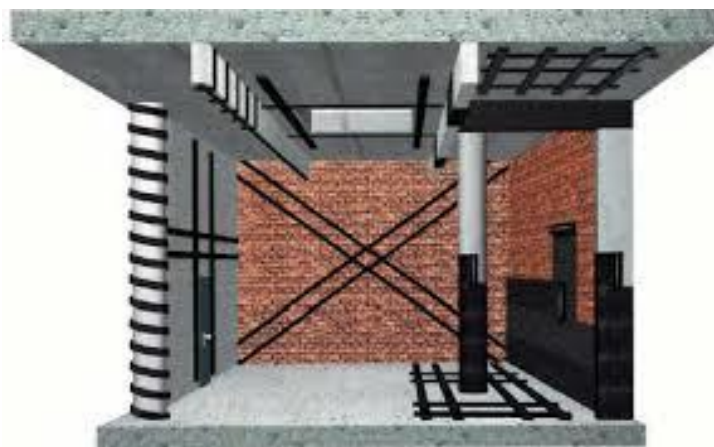


Figure I.8 : Renforcement des éléments structuraux par les matériaux composites.

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.

Les différentes méthodes de renforcement des poutres avec des PRF, sont résumées sur la figure I.9.

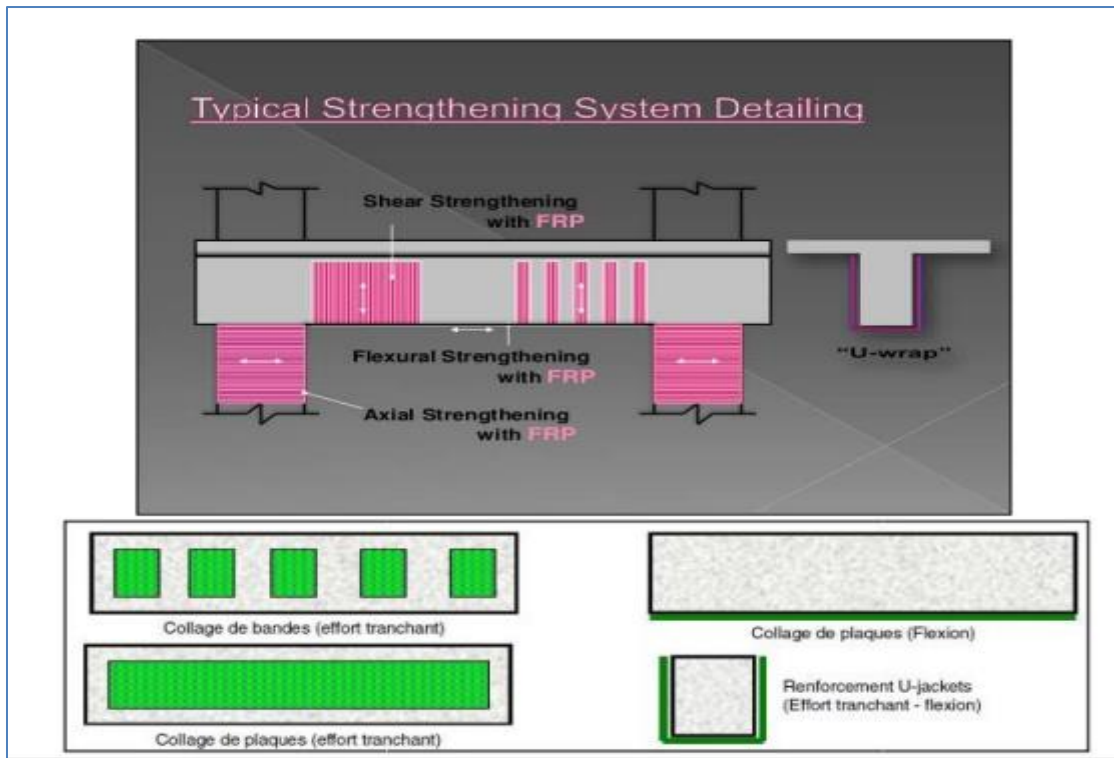


Figure I.9 : Renforcement des poutres avec PRF [27]

I.6. Matériaux composites

Un matériau composite est créé en combinant au moins deux matériaux distincts qui, naturellement, ne se mélangent pas. Ce matériau composite présente des caractéristiques améliorées par rapport à chacun de ses composants individuels, ce qui lui confère des propriétés supérieures. Il se compose principalement de deux parties :

1. Une phase continue, appelée matrice, qui est généralement flexible mais moins rigide. Sa principale fonction est de transférer les forces vers les fibres, qui sont plus rigides et résistantes, tout en les protégeant contre les influences extérieures.

2. Une phase discontinue, souvent sous forme de fibres, qui agit comme un renfort ou matériau de renforcement. Ces fibres confèrent au matériau composite des propriétés mécaniques exceptionnelles, permettant au matériau d'afficher des caractéristiques isotropes, anisotropes ou orthotropes en fonction de leur disposition et de leur orientation.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [28].

I.6.1. Eléments constitutifs des matériaux composites

Outre la matrice et le renfort, il est possible d'intégrer des charges ou des additifs dans le composite.

I.6.1.1. La matrice

La matrice joue un rôle essentiel dans la composition des matériaux composites. Elle est généralement constituée d'un matériau organique léger et flexible qui accomplit trois fonctions clés : tout d'abord, elle répartit la charge mécanique sur l'ensemble des renforts ; ensuite, elle assure la cohésion des fibres pour garantir une uniformité globale ; enfin, elle protège les renforts contre diverses conditions environnementales telles que l'oxydation, l'exposition à l'humidité, la corrosion, etc.

La matrice elle-même se compose généralement d'une résine (comme le polyester, l'époxy, etc.) et de charges qui visent à améliorer les propriétés de la résine tout en réduisant les coûts de production. Sur le plan mécanique, l'ensemble résine-charge présente un comportement similaire à celui d'un matériau homogène [28].

Les matériaux composites utilisent principalement deux types de résines polymères : les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP). Les résines thermodurcissables sont des polymères qui, une fois durcis, deviennent rigides et ne peuvent pas être ramollis ou fondus à nouveau par la chaleur. Les résines thermoplastiques, en revanche, sont des polymères qui peuvent être ramollis et remodelés lorsqu'ils sont chauffés, puis refroidis pour conserver leur forme.

En outre, il existe d'autres catégories de résines, notamment les résines thermostables et les polymères thermoplastiques capables de résister à des températures élevées, souvent supérieures à 200°C. Cependant, leur utilisation est généralement limitée à des applications spécifiques en raison de leurs propriétés thermiques particulières.

a- Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables, sont un type de polymères qui durcissent de façon permanente lorsqu'ils sont exposés à la chaleur et à un agent durcissant, tel qu'un durcisseur chimique ou une réaction thermique. Une fois durcies, ces résines deviennent rigides et solides, et elles ne peuvent pas être ramollies ou fondues à nouveau par la chaleur. Cela les distingue des résines thermoplastiques, qui peuvent être ramollies et remodelées sous l'effet de la chaleur.

Les résines thermodurcissables sont largement utilisées dans la fabrication de matériaux composites en raison de leur capacité à fournir une excellente stabilité dimensionnelle, une résistance élevée à la chaleur et une résistance chimique. Elles sont couramment utilisées

comme matrice dans les composites, où elles durcissent et se lient aux renforts pour former un matériau solide et résistant. Les résines thermodurcissables sont employées dans diverses applications, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la construction et bien d'autres secteurs où une grande résistance mécanique et thermique est nécessaire [28].

b- Résines polyester

La résine polyester est un type de résine thermodurcissable largement utilisée dans l'industrie des matériaux composites et de la construction. Elle est fabriquée à partir de réactions chimiques impliquant des polyesters insaturés, des monomères réactifs et des agents de durcissement. Une fois mélangée avec un durcisseur approprié et exposée à la chaleur ou à une réaction chimique, la résine polyester durcit de manière irréversible pour former un matériau solide et rigide.

Les résines polyester ont plusieurs caractéristiques importantes, notamment leur résistance à la corrosion, leur résistance aux intempéries, leur facilité d'utilisation et leur coût relativement bas. Elles sont souvent utilisées comme matrice dans la fabrication de composites renforcés de fibres de verre, de composites en stratifié, de pièces moulées, de revêtements de surface et de produits de construction tels que les réservoirs, les coques de bateaux et les panneaux de construction [28].

c- Résines de condensation

La résine de condensation est un type de résine utilisée dans la fabrication de polymères et de matériaux composites. Elle est appelée ainsi en raison du processus de réticulation qui se produit pendant sa polymérisation, où des molécules de résine se lient les unes aux autres en libérant une petite molécule (comme de l'eau) en tant que sous-produit, ce qui est souvent désigné comme une "condensation".

Les résines de condensation sont couramment utilisées dans la production de plastiques thermodurcissables, de revêtements, de composites et d'autres produits. Elles sont généralement mélangées avec des agents durcissant et d'autres additifs, puis chauffées pour déclencher la réaction de condensation, ce qui entraîne le durcissement de la résine et la formation d'un matériau solide et durable.

Un exemple bien connu de résine de condensation est la résine époxy, qui est largement utilisée dans l'industrie pour sa résistance mécanique et chimique élevée, ainsi que sa capacité à adhérer à divers matériaux. Cette résine est souvent utilisée dans la production de composites renforcés de fibres, de revêtements de surface et de colle époxy, entre autres applications [28].

d- Résines époxydes

Les résines époxydes, couramment appelées résines époxy, sont des types de polymères thermodurcissables largement utilisés dans diverses industries pour leurs propriétés exceptionnelles de résistance mécanique, de durabilité et d'adhésion. Ces résines sont constituées de monomères d'époxyde, qui sont des composés chimiques caractérisés par la présence d'un groupe époxy, également appelé groupe oxirane, qui est un anneau à trois atomes d'oxygène.

Les résines époxydes réagissent lorsqu'elles sont mélangées avec un durcisseur approprié, ce qui déclenche une réaction chimique dite "d'époxydation" ou "réaction époxy". Au cours de cette réaction, les monomères d'époxyde se lient entre eux et forment une structure polymérique tridimensionnelle, créant ainsi un matériau solide et rigide. Cette polymérisation ne dépend pas de la chaleur extérieure et peut être réalisée à température ambiante, ce qui la rend pratique pour diverses applications.

Les résines époxydes sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment la construction, l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, la fabrication de composites renforcés de fibres, la fabrication de revêtements, la réparation de matériaux et bien d'autres. Leur adhérence exceptionnelle aux surfaces et leur résistance à diverses conditions environnementales en font un choix populaire pour des applications diverses [28].

L'ensemble des caractéristiques mécaniques des résines époxy sont résumées dans le tableau.1.3.

Tableau I.3.Caractéristiques mécaniques des résines époxy [28]

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

e- Résines thermoplastiques (TP)

Les résines thermoplastiques, souvent abrégées en TP, sont un type de polymères utilisés dans la fabrication de plastiques et de matériaux polymères. Ce groupe de polymères se distingue par sa capacité à devenir temporairement malléable lorsqu'il est chauffé, puis à se solidifier à

nouveau lorsqu'il refroidit, sans subir de dégradation chimique significative. Cette propriété de ramollissement sous l'effet de la chaleur et de durcissement par refroidissement permet aux résines thermoplastiques d'être fondues, moulées et remodelées de manière réversible.

Les résines thermoplastiques sont utilisées dans une grande variété d'applications en raison de leur polyvalence, de leur facilité de mise en forme et de leur recyclabilité. Elles se trouvent dans de nombreux produits de la vie quotidienne, tels que des emballages en plastique, des pièces automobiles, des produits électroniques, des jouets, des films plastiques, des tuyaux, des textiles techniques et bien d'autres [28].

La figure I.10, résume les différents types de résines.

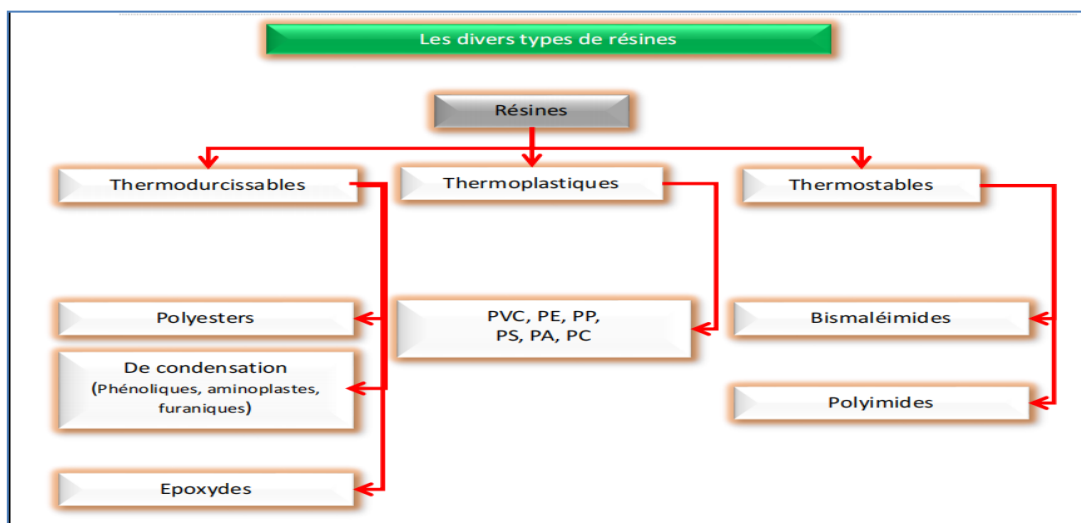


Figure I.10 : Divers types de résines.

I.6.2. Les fibres

Elles fournissent la résistance et la rigidité au composite. De ce fait, les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres [29], [30]. Il existe actuellement une large gamme de fibres, mais les plus utilisées demeurent les fibres de carbone, de verre et d'aramide.

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

Les différents matériaux de renfort sont représentés par la figure I.11.

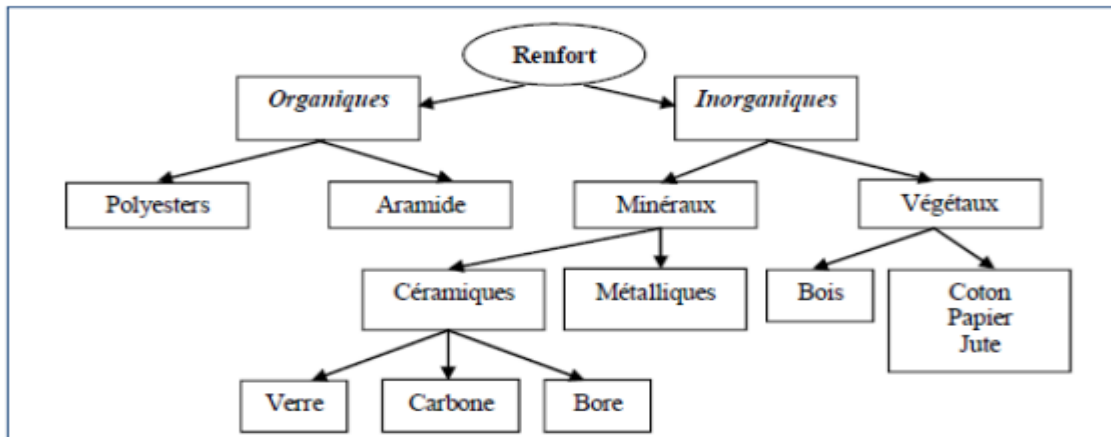


Figure I.11 : Différents matériaux de renfort [28]

I.6.2.1. Fibres de carbone

Les fibres (figure I.12) présentent un haut module d'élasticité (200 à 800 GPa) et un allongement ultime de 0,3 à 2,5%. Elles résistent remarquablement à la fatigue et ont une faible relaxation et résistent bien à l'humidité. On distingue plusieurs types de fibres de carbone, selon le taux de carbone qu'elles contiennent : des fibres à haute résistance « HR », des fibres à haut module, « HM », des fibres à très haut module « THM » et des fibres intermédiaires [31].



Figure I.12 : Fibres de carbone.

I.6.2.2. Fibres de verre

Les fibres (figure I.13) sont très utilisées dans plusieurs domaines en raison de leur coût, moins élevé par rapport à celui du carbone (environ 1/10 du prix du carbone). Leur module d'élasticité varie de 70 à 85 GPa et leur allongement ultime varie de 2 à 5%. Leur association à une matrice adéquate, réduit leur sensibilité à l'humidité.

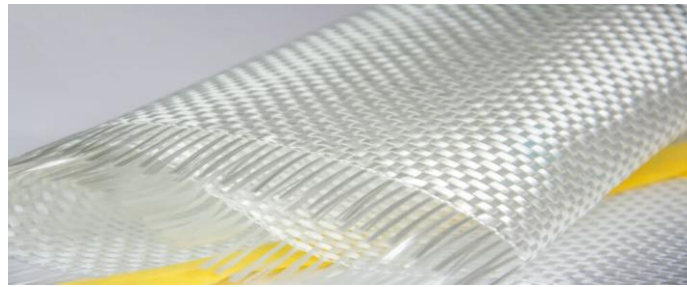


Figure I.13 : Fibres de verre.

I.6.2.3. Fibres d'aramide

Les fibres (figure I.14) se caractérisent par une grande énergie de fracture, des modules d'élasticité variant de 70 à 200 GPa et un allongement ultime de 1,5 à 5%. Néanmoins ces fibres ne sont pas largement utilisées, vu leur sensibilité à l'humidité et aux températures élevées ainsi qu'aux radiations 'UV'.



Figure I.14 : Fibres d'aramide.

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

Tableau. I.4. Caractéristiques mécaniques de différentes fibres [28]

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

I.6.2.4. Fibres naturelles

Utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés des fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries.

Les fibres naturelles sont des substances filamenteuses issues de végétaux et d'animaux, susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables à la société.

I.6.3. Classification des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont pour la plupart d'origine végétale ; animale et minérale (figure I.15).

- ✓ **Végétale** : extraite de plantes, de fruit et d'arbres comme le coton, le lin, l'agave, le jute, le chanvre, etc.
- ✓ **Animale** : extraites de poil d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, etc.
- ✓ **Minérale** : on trouve dans la nature des minéraux dont la texture fibreuse. il s'agit d'une matière toxique, comme l'amiante) [32].

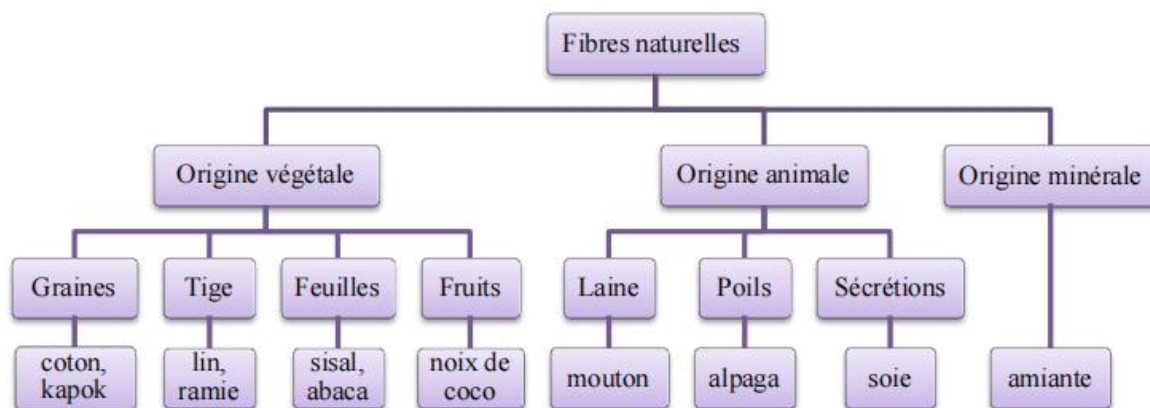


Figure I.15 : Classification des fibres naturelles selon l'origine [32]

I.6.3.1. Fibres végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicellulose et de lignine [33]. Aussi dans des proportions relativement faibles, d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. La cellulose représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre [34], l'hémicellulose est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [35] tant dis que la lignine apporte de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition [36].

Une classification des fibres naturelles est établie selon l'origine de la fibre dans la plante. [32]

a- Les fibres de feuilles

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont [37]

➤ L'abaca

L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm .

➤ Lesisal

Le sisal est une espèce d'agave, ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal dont le nom scientifique est *agave sisalana*. Originaires du Yucatan (près des Antilles), elle est essentiellement cultivée en Amérique du sud, en Afrique et en extrême orient.

Un plant de sisal produit jusqu'à 300 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Ces dernières sont relativement rigides et flexibles et sont multicellulaires avec des

cellules ayant différentes formes. La longueur des fibres de sisal varie de 0,6 à 1,2 m avec un diamètre moyen de 200µm leur couleur est crème. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres ressemblent étroitement à celles du lin.

b- Les fibres de tiges

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Les fibres de tige les plus utilisées sont [37] :

➤ **Palmier dattier**

Les palmiers sont des végétaux ligneux. Les palmiers appartiennent à la famille des Arecaceae (anciennement Palmae).

➤ **Le jute**

Le jute est la filasse extraite de la tige des plantes herbacées du genre *Corchorus* issues de la famille des Tiliacées. Il pousse en grande partie au Bangladesh, sa hauteur varie de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm. Il existe deux espèces de jute : une blanche et un rouge.

La fibre de jute contient des paquets de cellules fondamentales qui contiennent des microfibrilles orientées et reliées entre elles sous la forme d'une spirale. Leur structure est assez similaire à celle du lin, du chanvre et du sisal. La fibre est très courte et très lignifiée, son extraction est obtenue par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau [37]

➤ **Le lin**

Le lin est une plante annuelle de la famille des linacées, cultivée pour ses graines ou pour ses fibres (lin textile). Un plant de lin textile possède généralement une tige unique, qui atteint 0,60 à 1,20 m de hauteur. Le lin est récolté par déracinage des plants qui sont ensuite empilés pour sécher.

Après la récupération des graines, la paille est traitée par rouissage permettant la séparation de la partie ligneuse des fibres. Les pailles sont plongées dans des mares ou ruisseaux où les micro-organismes favorisent la décomposition.

Après le rouissage, vient alors le teillage où les fibres de lin sont broyées. Cette étape donne naissance à deux sortes de fibres : les fibres linéaires (droites et longues) et la fillasse (fibres enchevêtrées et emmêlées). Les deux variétés de fibres sont employées dans l'industrie des composites. [37]

➤ **Le chanvre**

Le chanvre (*Cannabis sativa*) est une plante herbacée annuelle d'Eurasie appartenant à la famille des cannabacées. La hauteur des tiges varie de 1 à 5 m. La tige est creuse et recouverte d'une écorce fibreuse, ce sont les fibres de cette écorce qui servent de renfort après avoir subi le même traitement que celui des fibres de lin. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie et légèrement plus lignifiée que celle du lin. [37]

➤ **Le Kénaf**

Connu aussi sous le nom de d'ah ou hibiscus hemp, le kénaf provient d'une plante cultivée en Inde, en Guyane et dans l'île de Java. Les fibres de kénaf sont aussi extraites de la plante *hibiscus cannabinus* (espèce d'hibiscus originaire des Antilles). D'une couleur blanche dorée, la fibre de kénaf a des qualités comparables à celles du jute [37]

c- Les fibres de bois [37]

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments

➤ **Le bambou**

Le bambou est une herbe dont le nom scientifique est Gramineae (*Poaceae*). Il fait partie de la sous-famille des *Bambusoideae* et de la branche des *Bambuseae*. Les bambous sont très faciles à cultiver, très appropriés pour les régions tropicales et subtropicales, ils poussent en touffes.

d- Les fibres de surface

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres [37]

➤ **Le coton**

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters.

Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm .

➤ **Le coco**

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien.

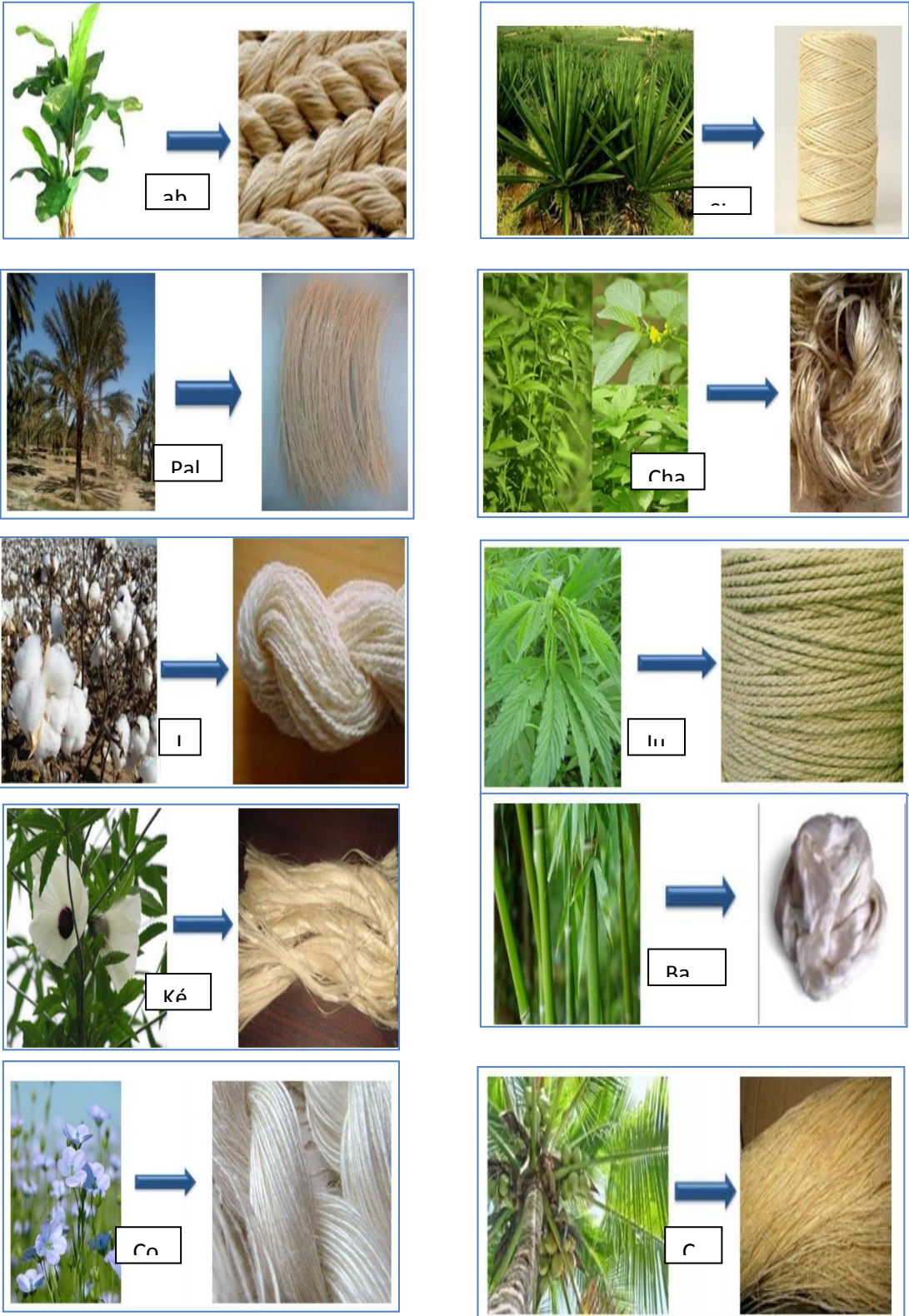


Figure I.16 : Fibres végétales. [37]

I.6.3.2. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité. [38]

Tableau I.5 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales [38].

Fibre	Densité (g/cm³)	Module de traction (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Lin	1,5	28	345-1100	2.7-3.2
Jute	1.45	13-27	350-550	1,2-2,5
Chanvre	1,48	29-70	550-900	1,6-3,5
Ramie	1,5	20-70	550-900	1,6-4
kénaf	1,47	6-8	1580	2,7
Abaca	1,35	20	900	3,5
Sisal	1,45	9-20	400-700	2-14
Coco	1,15	4-6	130-120	15-40
Coton	1,5	5-12	300-800	3-10

I.6.3.3. Applications des fibres végétales

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les matériaux traditionnels. Les principaux marchés sont aujourd'hui l'automobile et la construction. [39]

a- Dans l'automobile

Les entreprises comme Opel Audi, BMW, Renault, Ford, Seat, fabriquent des composites renforcés de fibres végétales : garnitures et panneaux de portes, planches arrière, revêtements intérieurs et passage de roues, voûte interne de pneu, pare-chocs, tableau de bord, etc.

b- Dans la construction

Les fibres végétales sont utilisées en renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment, profilés de portes, de fenêtre, panneaux décoratifs, etc.

- Infrastructure : Trottoirs, digues, signalisation routières, isolants phoniques, etc.
- Autres applications : Les palettes, le mobilier (table de camping ou chaise), équipement de jeux publics

I.7. Comportement des poutres en béton armé

Lorsqu'on sollicite les poutres en béton armé, différents types de fissures peuvent apparaître. Des fissures horizontales situées dans la zone comprimée de la poutre ou des fissures verticales dans la zone tendue de celle-ci. Ces deux types de fissuration apparaissent en général dans les cas d'une rupture en flexion. Par contre, dans le cas d'une rupture en cisaillement, les fissures sont inclinées.

La rupture d'une poutre en béton armé est atteinte lorsque les charges qui la sollicitent excèdent sa résistance. Le mode de rupture dépend de plusieurs paramètres tels que le type de chargement, la géométrie de la section, les propriétés mécaniques des matériaux et leurs taux d'utilisation. La variation de ces paramètres impacte le comportement de la poutre à l'état ultime ainsi que son mode de rupture.

La figure I.17, résume les différents modes de rupture d'une poutre en béton armé.

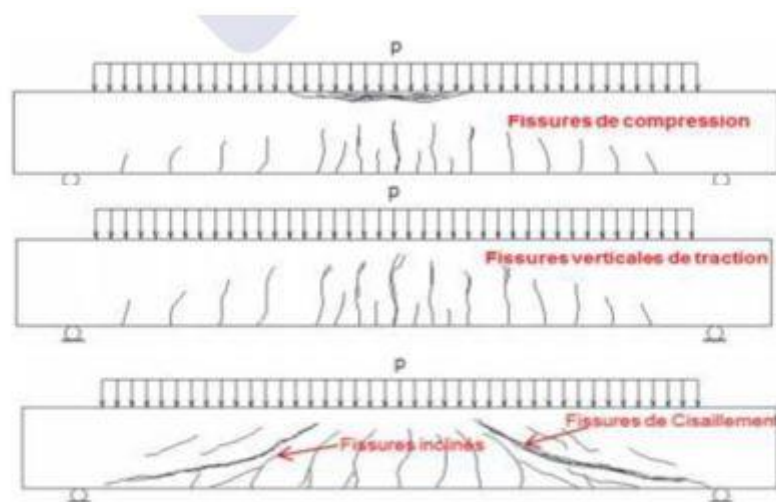


Figure I.17 : Modes de rupture des poutres en béton armé [40]

I.8. Mécanismes de rupture des poutres renforcées par collage externe de composites

Lorsqu'une poutre renforcée est soumise à une charge de flexion, quatre modes de rupture sont souvent constatés : une rupture due à la flexion, une due à l'effort tranchant, une due au décollement du tissu et une due à la rupture de l'enrobage du béton (Figure I.18).

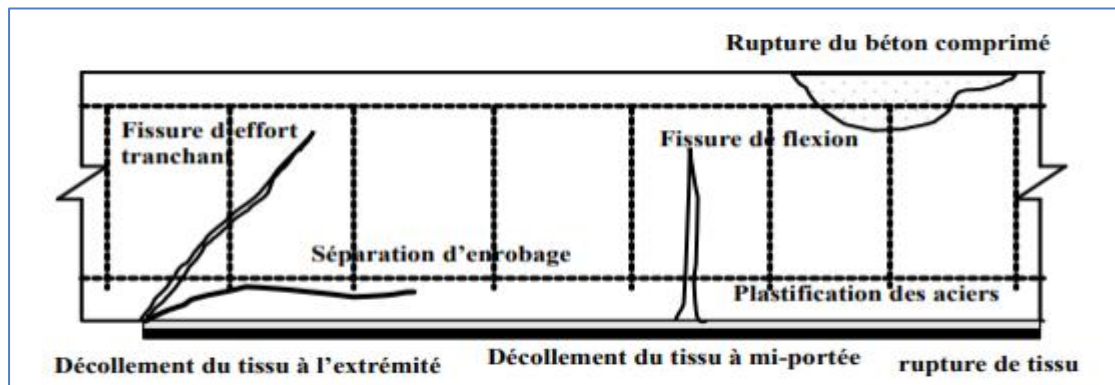


Figure I.18 : Modes de rupture d'une poutre renforcée avec matériaux composites [41]

La rupture en flexion des poutres renforcées est provoquée par l'une des raisons suivantes : la ruine brutale du béton comprimé lorsque la poutre est fortement armée avec acier ou PRF, l'importante plastification des armatures tendues et la ruine du tissu en PRF en traction lorsqu'elle est moyennement à faiblement armée. La rupture de poutres renforcées due à l'effort tranchant se produit lorsque la résistance à l'effort tranchant des poutres sans renforcement est insuffisante.

La rupture due à la rupture de l'enrobage de béton ou délaminage du tissu composite provient de la concentration de contrainte de cisaillement dans l'interface tissu-béton (couche de colle).

I.9. Conclusion

Le renforcement de structures en béton armé par les matériaux composite est en plein essor, surtout que l'utilisation de ces matériaux essentiellement sous forme de PRF a montré son efficacité.

Les méthodes couramment utilisées dans le renforcement des poutres se résument au collage externe de PRF. Ceci a permis d'améliorer les performances mécaniques des poutres sans pour autant augmenter leur poids puisque ces matériaux de renforcement sont caractérisés par une grande légèreté.

La rareté des travaux sur le renforcement interne avec les matériaux composites nous a incités à proposer une méthode de renforcement de poutres avec des bandes d'un tissu de jute.

L'ensemble de la démarche expérimentale adoptée est détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Compagne expérimentale

II.1. Introduction

Dans cette section, nous exposons le protocole expérimental mené au sein du laboratoire de matériaux de la Faculté du génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Notre étude porte sur le renforcement des poutres en béton à l'aide de matériaux composites. Notre intérêt a porté, en effet, sur le renforcement de poutres en béton à l'aide d'un tissu de jute sous forme de bandes disposées en hélices autour du squelette d'armatures de celle-ci.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser et d'examiner l'impact des variables étudiées à savoir la largeur de la bande de jute, le nombre de plis de la bande de jute incorporée sous forme de PRFJ et le nombre de tours de la bande de jute sur la résistance à la flexion des poutres en béton.

Les différentes étapes de notre protocole expérimental sont détaillées dans cette partie, notamment le calcul des proportions des différents constituants du béton, le processus de malaxage, la mise en place du renfort, la conservation des éprouvettes ainsi que, la procédure d'essai de flexion que nous avons employé pour évaluer l'efficacité de notre renforcement.

II.2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés, dans le cadre de notre expérimentation, sont le béton, le tissu de jute et la résine.

II.2.1. Le béton

Le béton est un matériau composite composé de quatre éléments essentiels : les granulats) grossiers (gravier ou la pierre concassée) et fins (sable), le ciment, et l'eau. Les quantités relatives de ces composants varient en fonction du type spécifique de béton que l'on souhaite obtenir. Les graviers utilisés pour confectionner notre béton sont de classes 3/8 et 8/15(Figure II.1).

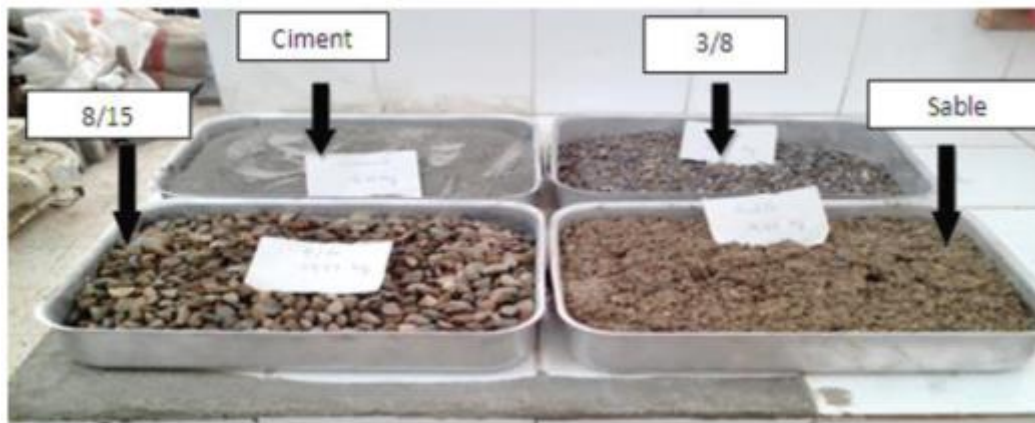


Figure II.1 : Constituants du béton confectionné.

II.2.2. Granulats

Ces éléments constituent l'armature structurelle du béton, et il est crucial qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le ciment, l'eau et l'air. Les sources géologiques pour la production de granulats destinés au béton peuvent être de diverses natures, notamment détritique (surtout alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive.

En général, pour des projets de construction courants, on utilise des granulats composés de sable et de gravier. Il est également possible d'opter pour des granulats légers, souvent fabriqués à partir de matériaux minéraux tels que l'argile, le schiste et les silicates.

Les granulats que nous avons employés dans cette expérience sont des granulats secs et exempts d'impuretés. Comme indiqué sur la figure II.2, nous avons utilisé du sable (0/3) ainsi que des graviers de classe (3/8 et 8/15), qui ont été soumis à un processus de lavage puis séchés dans une étuve à une température de 105°C pendant 24 heures.



Figure II.2 : Granulats du béton.

II.2.3. Ciment

Durant notre travail de recherche, nous avons utilisé un seul type de ciment durant toute la campagne de coulage du béton, qui est le CEM II/A-L 42.5R. Il s'agit d'un ciment portland composé recommandé pour les bétons et mortiers à performances élevées avec une prise rapide, destiné à la réalisation des infrastructures ainsi que pour le domaine de préfabrication. Il provient de la région de (Biskra) et est conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).

II.2.4. L'eau d'hydratation

En règle générale, l'eau utilisée pour la préparation du béton doit présenter des caractéristiques similaires à celles de l'eau potable. Il est strictement déconseillé d'utiliser de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorures de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. Dans notre cas, l'eau de gâchage que nous avons utilisée provient de l'approvisionnement en eau potable du réseau public.

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

Tableau II.1 : Dosage des constituants pour 1m³ de béton.

Composant	Masse (en Kg)
Ciment	385
Sable	907.5
Gravier 3/8	263.88
Gravier 8/15	863.61
Eau	220

II.2.5. Le renfort

Les matériaux de renforcement utilisés sont à base d'un tissu de jute. Le tissu est directement utilisé sous forme de bandes sauf pour la variante étudiant le nombre de plis où ces dernières sont imprégnées d'une résine epoxy formant ainsi le composite PRFJ.

II.2.6. Tissu en fibres de jute

Le tissu de jute utilisé (figure II.6) est un tissu bidirectionnel (chaîne et trame).il est utilisé sous forme de bandes qui sont découpées en considérant différentes longueurs et différentes largeurs.



Figure II.3 : Tissu de fibres de jute.

Le tableau II.2 présente un récapitulatif de certaines propriétés 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.2.7. Résine

La résine joue un rôle essentiel parmi les composants des PRF. Elle permet, en effet, la transmission des charges au renfort. Dans cette étude, nous avons utilisé une résine époxy fournie par GRANITEX. Le produit final qui servira d'adhésif, est obtenu par le malaxage de la résine organique (composant A) avec un durcisseur (composant B), comme illustré dans la Figure II.4, et ce dans les proportions recommandées par le fabricant, à savoir 2/3 pour la résine organique et 1/3 pour le durcisseur.

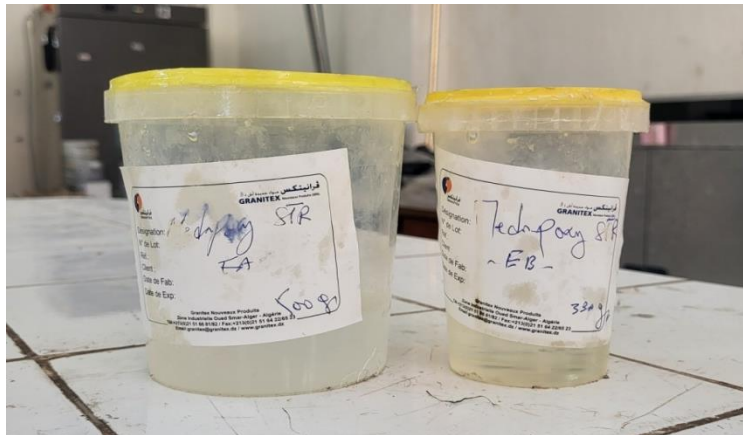


Figure II.4. Résine époxy.

Les données fournies par le fabricant concernant les propriétés de la résine époxy sont résumées dans le Tableau II.4.

Tableau II.3 : 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 à 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 malaxés à l'aide d'une tige pendant quelques minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme exempt de bulles d'air. Pour éviter le gaspillage de résine, vu qu'elle a tendance à durcir rapidement, il est recommandé de la mélanger en petites quantités.

II.2.8. Le ferrailage

Le ferrailage conçu dans le cadre de cette expérience est formé de 4 barres longitudinales. Il est mis en place essentiellement pour servir de support à la bande de jute.

II.3. Procédure expérimentale

Notre expérience s'est déroulée en respectant les différentes étapes détaillées ci-dessous.

II.3.1. Préparation des moules

Dans le but de confectionner les échantillons à analyser, nous avons utilisé des moules métalliques conformes à la norme NF EN 12 390-1. Ces moules ont une forme prismatique avec une hauteur de 10 cm, une largeur de 10 cm et une longueur de 40 cm, comme illustré dans la Figure II-8.



Figure II.5 : Moules prismatiques

Les moules ont été bien nettoyés afin d'éliminer toute poussière ou autre résidu d'anciens bétons. Ils ont ensuite été bien serrés puis huilés pour faciliter le décoffrage des éprouvettes.

II.3.2. Préparation du ferrailage

Quatre barres de 6 mm de diamètres et de 37 cm de longueur sont découpées. Elles sont maintenues aux extrémités par des cadres de même diamètre (figure II.9).

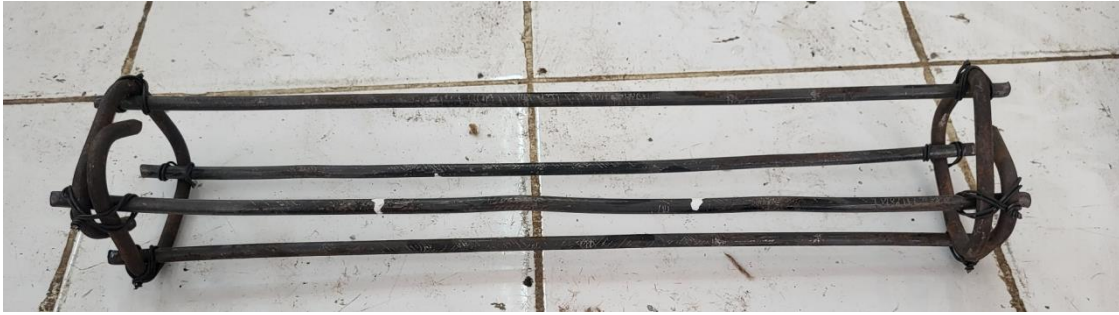


Figure II.6 : Ferrailage des poutres

II.3.3 Préparation des tissus de renfort

Les bandes de jute (figure II.10) sont découpées selon différentes longueurs et différentes largeurs pour qu'elles puissent servir de renfort dans les variantes étudiées.



Figure II.7 : Préparation des bandes de jute.

Deux largeurs de bandes sont considérées à savoir 3 et 4 cm, ainsi que 3 tours et 4 tours respectivement comme pas de l'hélice que forme la banse de jute.

II.3.4. Mise en œuvre du renfort

Les bandes de jute sont placées selon une trajectoire hélicoïdale autour de l'armature (figure II.11), elles sont fixées à l'aide de résine au niveau de tous les points de contact.



Figure II.8 : Mise en place du renfort

Pour la variante nombre de plis, les bandes sont enduites de résine (figure II.12) et sont superposées formant ainsi le PRFJ qui sera posé autour de l'armature de la même façon que précédemment.



Figure II.9 : Application de la résine sur les bandes de jute.

Il est à noter que pour toutes les éprouvettes, une bande de jute est posée aux extrémités du ferrailage en faisant un tour et un quart de tour, l'objectif étant de permettre à la bande de renfort de développer pleinement sa résistance à la traction.

II .3.5. Confection des éprouvettes :

Le malaxage du béton a été réalisé en utilisant un malaxeur à axe vertical. Tout d'abord, les composants secs ont été placés dans le malaxeur et mélangés pendant environ trente secondes (figure II.13). Ensuite, l'eau de gâchage a été ajoutée progressivement tout en continuant à mélanger, ce processus a duré environ une minute.



Figure II.10 : malaxage du béton

Par la suite, le béton est coulé dans les moules prismatiques. Dans le cas des éprouvettes renforcées, nous commençons par verser une couche de béton d'enrobage de 2 cm au fond du moule, puis nous disposons l'armature avec le renfort, qu'il s'agisse de matériau textile ou de PRFJ (figure II14). Enfin, nous coulons le béton jusqu'à ce que le moule soit entièrement rempli.



Figure II.11 : Coulage des poutres.

Ensuite, les moules remplis sont positionnés sur une table vibrante pendant quinze secondes. Cette étape vise à compacter le béton en éliminant l'air emprisonné à l'intérieur.

Les éprouvettes sont ensuite étiquetées et laissées au séchage (figure II.15). Après une période de 24 heures, elles sont démoulées, étiquetées avec un numéro de référence, et placées dans des récipients remplis d'eau à une température de 28°C conformément à la norme NF2001. Elles restent immergées jusqu'à la maturation complète du béton, atteinte au 28ème jour d'âge.

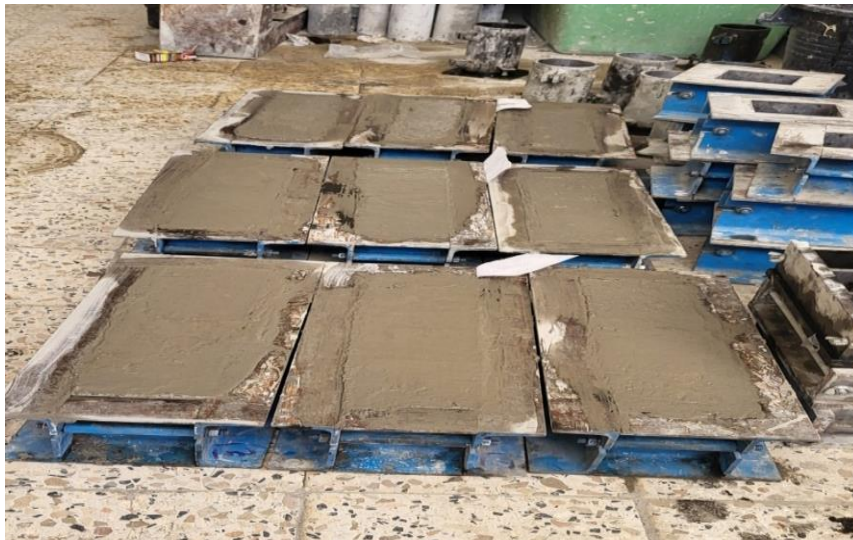


Figure II.12 : Epreuves confectionnées

II.4. Nomenclature des éprouvettes

Les éprouvettes préparées sont référencées en fonction du type de renforcement, en utilisant le système décrit dans le tableau II.4 pour l'ensemble des variantes examinées dans cette étude.

Tableau II.4. Variantes étudiées

variante	Nombre de tours	Largeur de la bande (cm)	Nombre de plis	Nomenclature
Béton témoin	/	/	/	BT
Variante 1	4	3	1	BR3T4CM1P
Variante 2	4	4	1	BR4T4CM1P
Variante 3	4	3	1	BR4T3CM1P
Variante 4	4	3	2	BR4T3CM2P
Variante 5	4	3	3	BR4T3CM3P

II.5. Procédure de l'essai de flexion

Après une période de 28 jours de maturation, toutes les poutres fabriquées sont soumises à un test de flexion. L'essai de flexion à trois points est réalisé en utilisant une

machine de flexion universelle IBERTEST dotée d'une capacité de charge maximale de 200 KN et d'une vitesse d'application de charge de 0,2 KN/s. Le dispositif de chargement est composé de deux appuis positionnés perpendiculairement par rapport à l'éprouvette, avec une poutre de flexion qui applique la charge au centre de l'éprouvette (figure II.17).

La charge est progressivement augmentée jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne le point de rupture. La machine fournit des valeurs telles que la charge à la rupture, la contrainte correspondante, ainsi que le déplacement vertical au centre de l'éprouvette. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de courbes montrant la relation entre la force et le déplacement, ce qui permet d'analyser le comportement des spécimens testés.

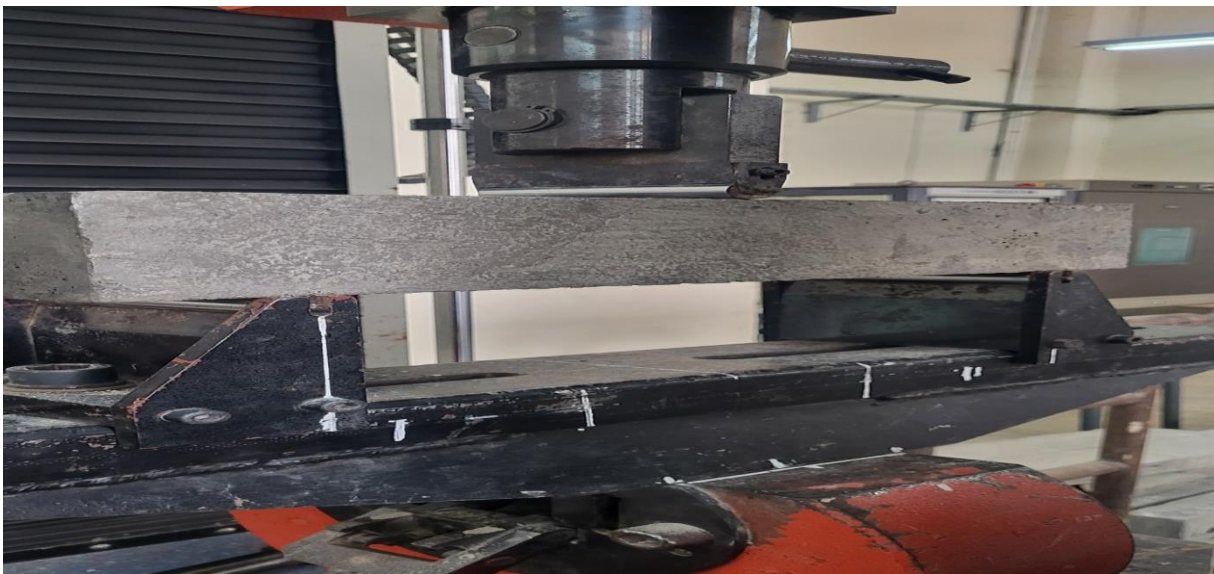


Figure II.13 : Poutre soumise à un essai de flexion.

II.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la description de la procédure expérimentale élaborée pour la fabrication des éprouvettes en béton renforcées, ainsi qu'à la méthode adoptée dans cette étude, qui repose sur le renforcement interne à l'aide d'un tissu à base de fibres de jute.

La campagne expérimentale est présentée en détail, en commençant par une description des matériaux utilisés, y compris les proportions des différents composants, ainsi que les propriétés physiques et mécaniques des renforts en fibres de jute. Le processus de renforcement est également expliqué en mettant l'accent sur les différentes étapes et les diverses variantes considérées, depuis la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention des éprouvettes renforcées avec du tissu de jute, prêtes à être soumises à un essai de flexion dont la procédure est également détaillée dans ce chapitre. Les résultats des tests de flexion ainsi que leur interprétation feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats & Discussions

III .1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les conclusions de notre expérience qui a été menée sur l'ensemble des poutres, qu'elles soient renforcées ou non. Il est important de noter que, dans le cas du matériau en jute, nous avons effectué plusieurs variations en modifiant la longueur du tissu, le nombre de couches de PRFJ, ainsi que le nombre de tours de tissu. L'objectif était de déterminer la configuration optimale pour le renforcement interne que nous avons proposé dans le cadre de cette étude.

Les poutres ont été soumises à des tests jusqu'à ce qu'elles se rompent, tout en surveillant attentivement leurs modes de fissuration. Les résultats relatifs à leur résistance en flexion, leur rigidité et leurs modes de rupture sont présentés sous forme d'histogrammes, de graphiques et de tableaux. Ensuite, nous discutons de ces résultats afin de mieux comprendre le comportement des poutres renforcées en flexion.

III.2. Résultats de l'essai de flexion

Les résultats de l'essai de flexion réalisé sur les poutres sont présentés en fonction des différentes variantes sous forme de tableaux, de courbes force-déplacement et d'histogrammes afin d'illustrer la contribution du renforcement avec le tissu de jute.

Dans le but d'évaluer l'impact du renforcement avec des bandes de tissu de jute sur la résistance du béton, les résultats des spécimens renforcés pour toutes les variantes étudiées sont comparés à ceux obtenus pour le béton non renforcé.

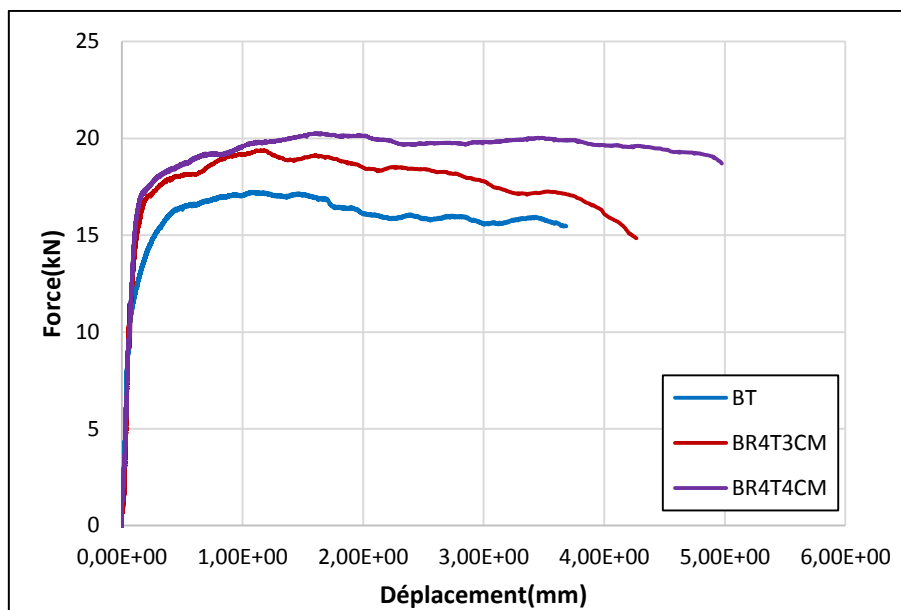
III.2.1. Effet de la largeur du tissu de jute

Deux largeurs différentes d'un tissu bidimensionnel en jute ont été considérées dans le but de déterminer la variante offrant la meilleure réponse. Des bandes ayant 3 cm et 4 cm de largeur ont été testées. Une largeur de 3 cm a été comparée à une largeur de 4 cm de jute. Les résultats des tests obtenus pour les poutres ayant été renforcées avec ces deux largeurs en opposition à ceux obtenus pour les poutres non renforcées sont résumés dans le tableau III -1.

Tableau III.1 : Résistances et déplacements des poutres pour la variable largeur de la bande.

Type de renforcement	BT	BR4T3CM1P	BR4T4CM1P
Force max (kN)	17,24	19,37	22,53
Déplacement rupture (mm)	3,68	4,26	4,97

La confrontation des courbes force-déplacement de ces poutres est représentée dans la figure III-1.

**Figure III.1** : Courbes force-déplacement des poutres pour la variable largeur de la bande.

L'ensemble des courbes présente la même allure ; elles comportent un palier linéaire qui traduit le comportement élastique du béton et un second palier qui traduit le comportement ductile des poutres dû à la présence des aciers et du tissu de jute.

Il ressort du graphe que les charges maximales pour les deux nombres de tours de la bande de jute testés qui sont de 22,53 kN et 19,37 kN respectivement sont supérieures à celle du béton témoin qui est de 17,24 kN. Le même constat est réalisé pour le déplacement puisqu'on note une valeur de 4,26 mm pour la poutre renforcée avec une bande de 3cm de largeur contre une valeur de 4,97 mm pour la poutre renforcée avec une bande de 4cm, tant dis que le déplacement enregistré pour la poutre témoin est de 3,68 mm.

Afin d'évaluer les écarts obtenus et de mettre en évidence les apports du renforcement en termes de résistance et de ductilité, les histogrammes de la figure III-2 ont été tracés.

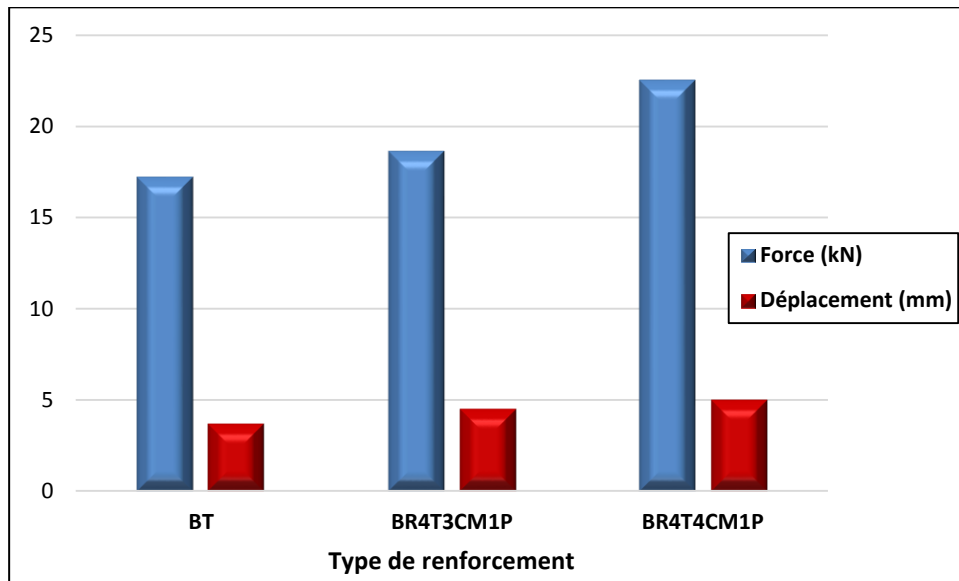


Figure III.2 : Résistances et déplacements des poutres pour la variable largeur de la bande.

La comparaison des résultats enregistrés en matière de résistance à la flexion, montre une augmentation de la résistance pour les poutres renforcées avec le tissu de jute et ce pour les deux largeurs testées par rapport à la poutre témoin.

En effet, des apports de 12,35% et de 30,68% en matière de résistance ont été enregistrés pour les poutres renforcées avec des bandes de jute ayant les largeurs 3cm et 4 cm respectivement par rapport à la poutre non renforcée (figure III.3).

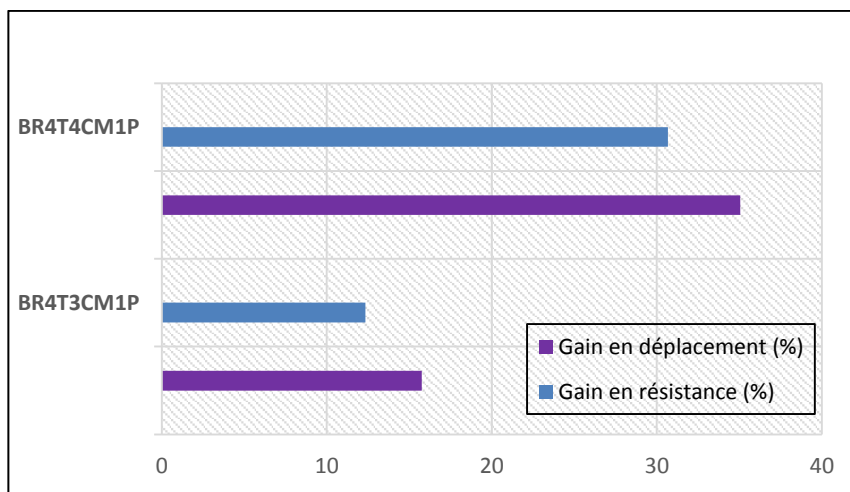


Figure III.3 : Gains en résistances et déplacements des poutres pour la variable largeur de la bande.

De même pour la ductilité, puisque les poutres renforcées avec des bandes de 3 cm et 4 cm gagnent en termes de déplacement des taux de 15.76% et 35.05% respectivement (Figure III.3).

III.2.2. Effet du nombre de tours de la bande de jute

Trois configurations distinctes du renforcement des poutres avec des bandes de tissu de jute ont été considérées afin de déterminer l'effet du nombre de tours que fait la bande de jute autour du squelette d'armatures sur le comportement des poutres renforcées. Ainsi, deux nombres de tours ont été testés, à savoir 3 et 4 tours.

Les résultats relatifs aux tests effectués sur les poutres renforcées avec 3 tours et 4 tours de jute, en opposition à ceux des poutres non renforcées, sont consignés dans le tableau III-2.

Tableau III.2 : Résistances et déplacements selon le nombre de tour des bandes de jute.

Type de renforcement	BT	BR3T4CM1P	BR4T4CM1P
Force max (kN)	17,24	18,64	22,53
Déplacement rupture (mm)	3,68	4,48	4,97

La comparaison des courbes force-déplacement de ces poutres est représentée dans la figure III-4.

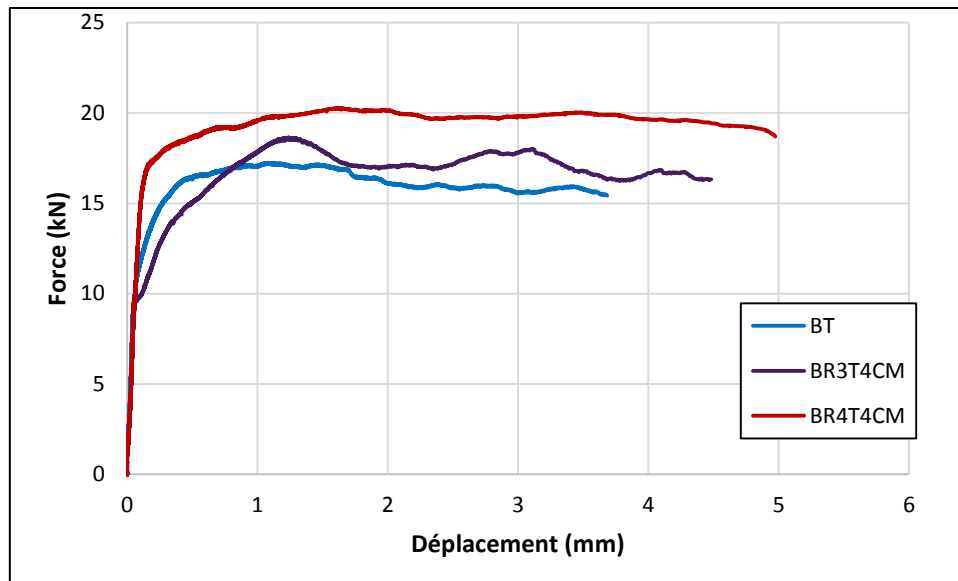


Figure III.4 : Courbes force-déplacement des poutres pour la variable nombre de tours de la bande.

Les données graphiques indiquent que les charges maximales pour les deux cas de renforcement, en l'occurrence 3 tours et 4 tours de jute, sont supérieures à celle du béton témoin. Elles atteignent, en effet, les valeurs respectives de 18,64 kN et 22,53 kN contre une capacité portante de 17,24 kN pour les poutres non renforcées.

Un constat similaire peut être fait en ce qui concerne la déformation. La poutre renforcée avec une bande à 3 tours affiche une valeur du déplacement de 4,48 mm, tandis que celle avec une bande à 4 tours donne une valeur de 4,97 mm. En revanche, la valeur du déplacement enregistrée pour la poutre témoin est de 3,68 mm.

Pour analyser plus en détail les écarts entre ces différentes poutres, les histogrammes présentés dans la figure III-5 sont introduits.

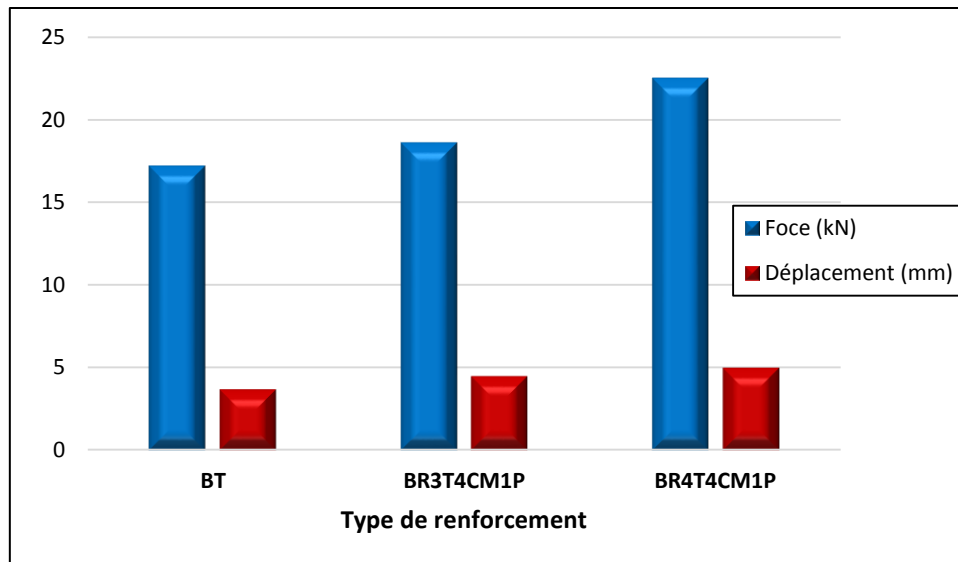


Figure III.5 : Résistances et déplacements des poutres pour la variable nombre de tours de la bande.

La comparaison des résultats concernant la résistance à la flexion révèle une amélioration de cette caractéristique pour les poutres renforcées avec du tissu de jute, quelle que soit la configuration en termes de nombre de tours. Des gains de 8,12 % et de 30,68 % en termes de résistance (Figure III.6) ont été ainsi enregistrés pour les poutres renforcées respectivement avec des bandes de jute à 3 et à 4 tours, par rapport aux poutres non renforcées. Ces améliorations démontrent une augmentation significative de la capacité de charge des poutres renforcées par rapport à la poutre témoin.

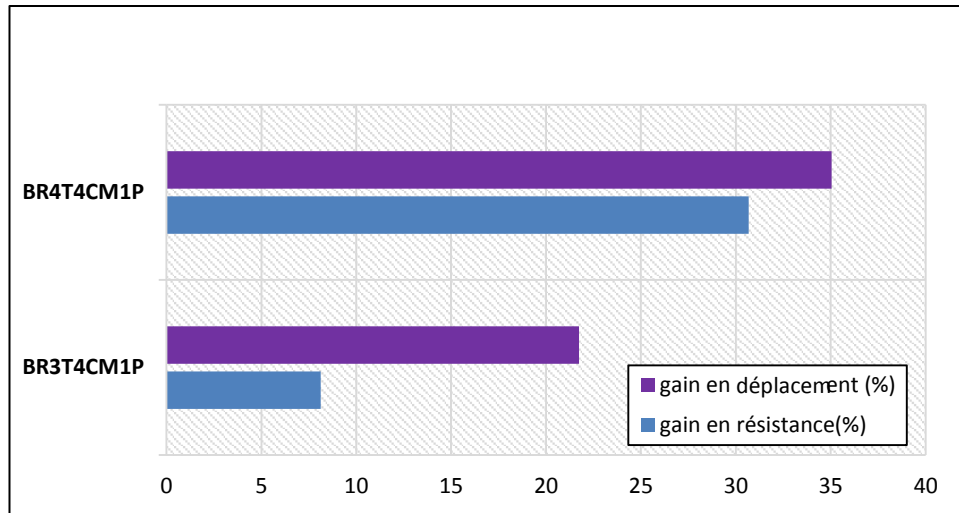


Figure III.6 : Gains en résistances et déplacements des poutres pour la variable nombre de tours de la bande.

La même figure met en évidence les gains en ductilité puisque des apports de 21,74% et 35,05% sont obtenus pour les poutres avec 3 tours et 4 tours de jute respectivement.

III.2.3 Effet du nombre de plis du PRFJ

Dans le but de tester l’effet du nombre de plis sur le comportement des poutres renforcées avec des bandes de tissu de jute trois variantes ont été considérées, à savoir 1 pli, 2 plis et 3 plis. Les résultats obtenus, pour les tests de flexion appliqués aux différentes poutres en termes de force et de déplacement, sont présentés ci-dessous.

Le tableau III.3, regroupe les résultats des forces et des déplacements pour la variante nombre de plis.

Tableau III.3.Résistances et déplacements des poutres selon le nombre de plis

Type de renforcement	BT	BR4T3CM1P	BR4T3CM2P	BR4T3CM3P
Force max (kN)	17,24	19,37	20,34	24,67
Déplacement rupture (mm)	3,68	4,26	4,75	5.18

La confrontation des courbes force-déplacement des différentes poutres selon le nombre de plis est représentée dans la figure III-7

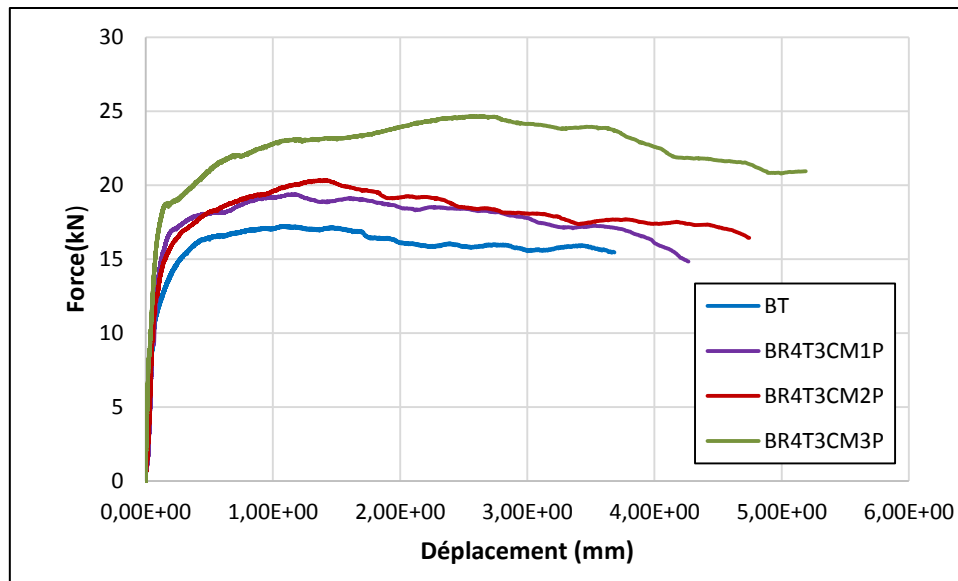


Figure III.7 : Courbes force-déplacement des poutres pour la variable nombre de plis.

Selon les résultats obtenus, on observe une amélioration significative de la capacité portante des poutres renforcées avec des bandes de jute par rapport à celle de la poutre témoin. En effet, les capacités portantes des poutres avec 1 pli, 2 plis et 3 plis ont respectivement les valeurs de 18,64 kN, 20,34 kN et 24,67 kN comparées à 17,24 kN pour les poutres non renforcées.

Une augmentation de la déformabilité est également constatée, puisqu'on note les valeurs de 4,26 mm, 4,75mm et 5,18mm respectivement pour les poutres renforcées avec une bande de jute en 1 pli, 2 plis et 3 plis, en opposition à 3,68 mm pour la poutre témoin.

Afin d'évaluer les écarts obtenus pour les différentes poutres, les histogrammes de la figure III-8 ont été tracés.

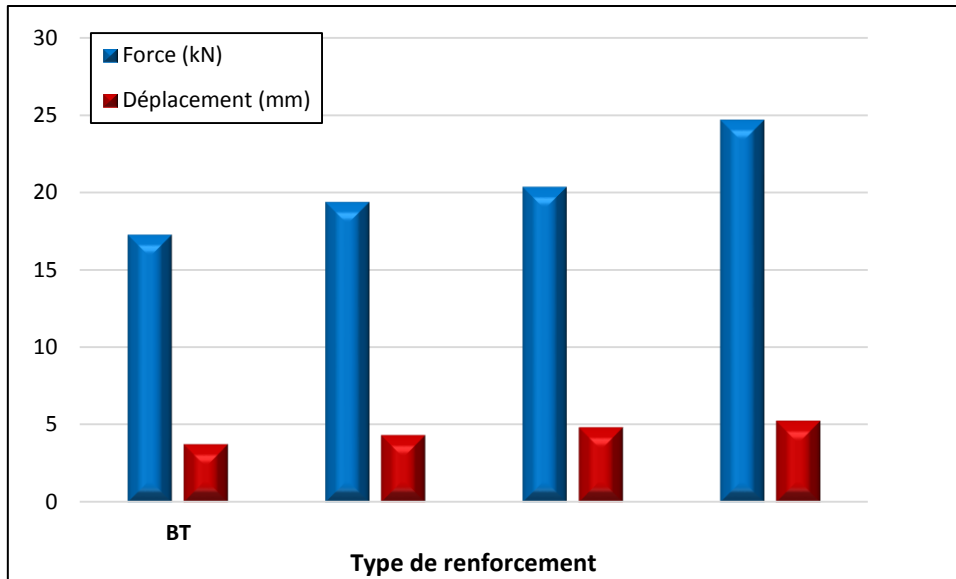


Figure III.8 : Résistances et déplacements des poutres selon le nombre de plis du PRFJ.

Il ressort du graphe que pour les poutres renforcées avec le tissu de jute, quel que soit le nombre de plis utilisé, la résistance est améliorée par rapport à celle de la poutre témoin. En effet, on observe des gains de 12,35 %, 17,68 % et 43,09 % en termes de résistance (figure III.9) pour les poutres renforcées respectivement avec 1 pli, 2 plis et 3 plis de bandes de jute par rapport à la poutre non renforcée.

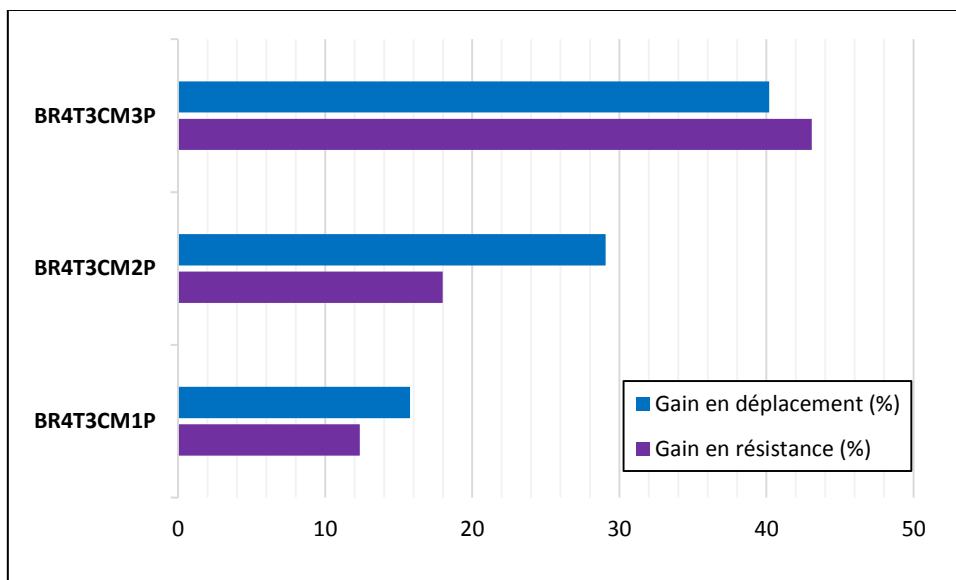


Figure III.9 : Gains en résistances et déplacements des poutres pour la variable nombre de plis du PRFJ.

La figure précédente met également en évidence les gains en termes de ductilité. Elle montre, ainsi que des apports de 15,76%, 29,07% et 40,17% sont obtenus pour les poutres renforcées

respectivement avec 1pli, 2 plis et 3 plis de bandes de jute par rapport à la poutre non renforcée.

III.3. Etude des corrélations

Les relations entre les caractéristiques mécaniques mesurées, à savoir la capacité portante des poutres ainsi que leurs déformations sont mises en évidence par le calcul de régressions linéaires (figures III.10, III.11 et III.12). Un lien linéaire est établi entre chacune des trois variables et la force d'une part et entre chacune des variable et le déplacement d'autre part.

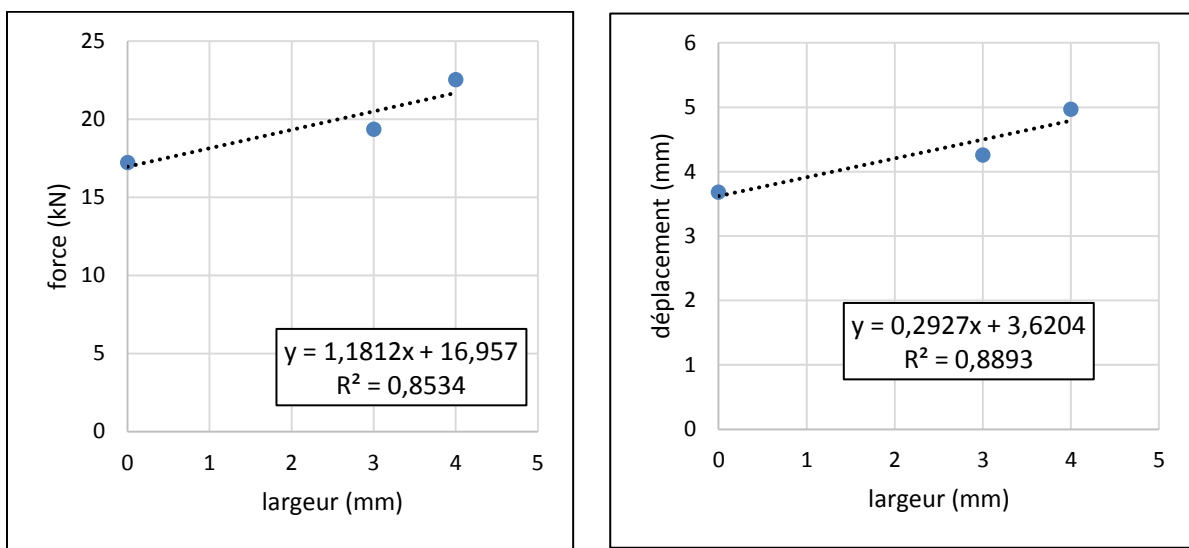


Figure III.10 : Régressions linéaires pour la variable largeur de la bande.

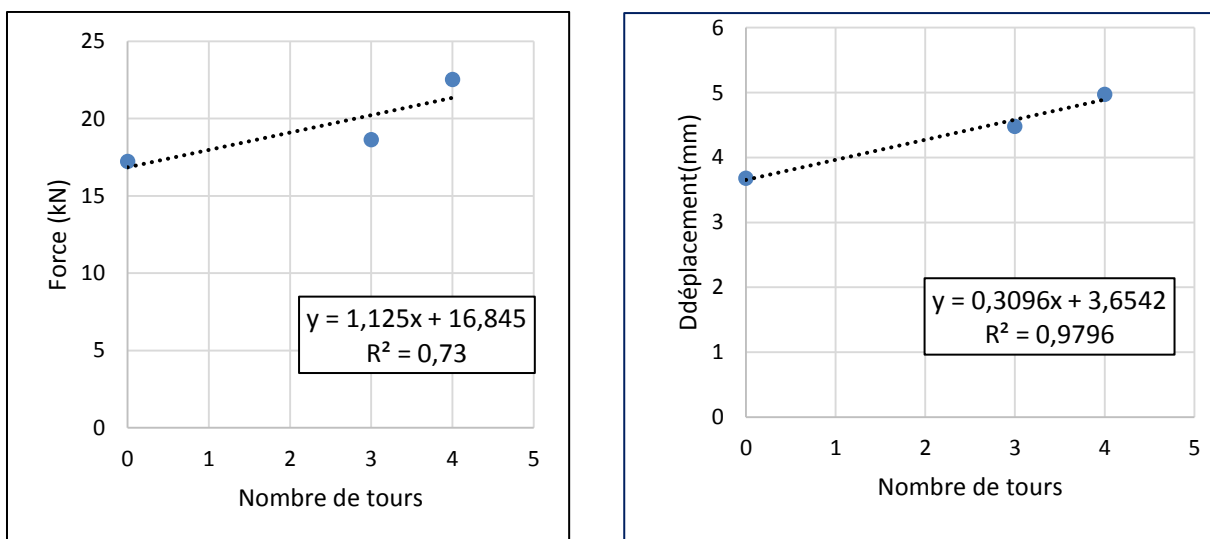


Figure III.11 : Régressions linéaires pour la variable nombre de tours de la bande.

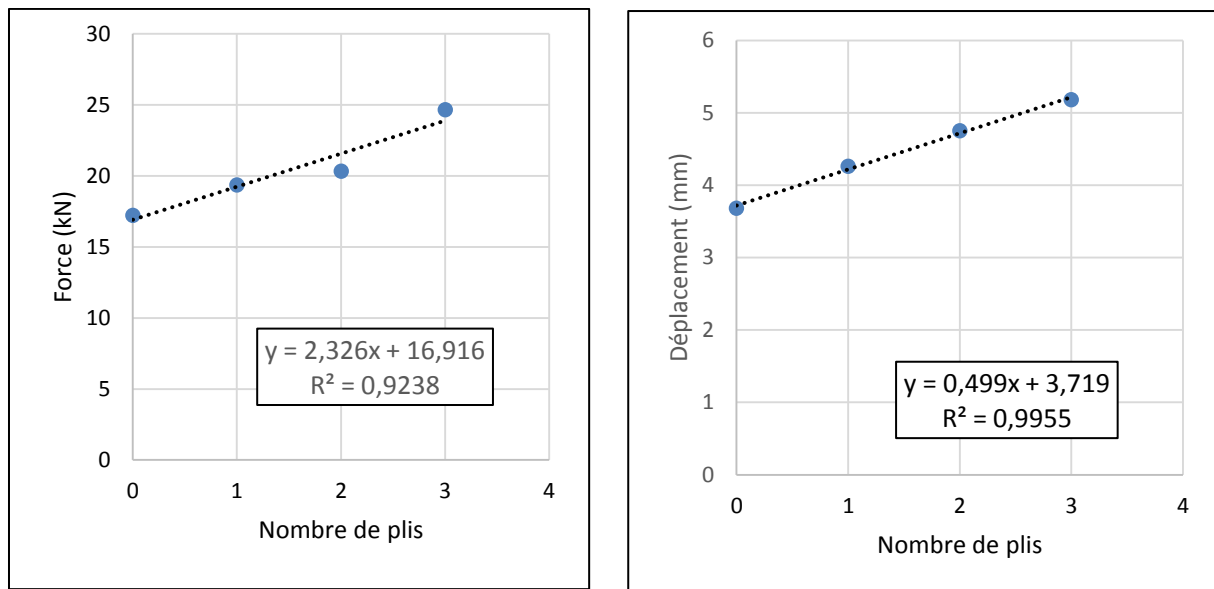


Figure III.12 : Régressions linéaires pour la variable nombre de plis du PRFJ.

L'analyse des graphes montre que les liens linéaires qui existent entre chacun des paramètres force et déplacement avec les trois variables sont significatifs. En effet, la force et le déplacement des poutres augmentent avec l'augmentation des paramètres de renforcement qui sont la largeur de la bande, le nombre de tours de la bande ainsi que le nombre de plis du PRFJ.

III.4. Analyse du mode de rupture

Les modes de rupture typiques des poutres testées sont illustrés sur les figures III.13 et III.14.



Figure III.13 : Poutre non renforcée endommagée.

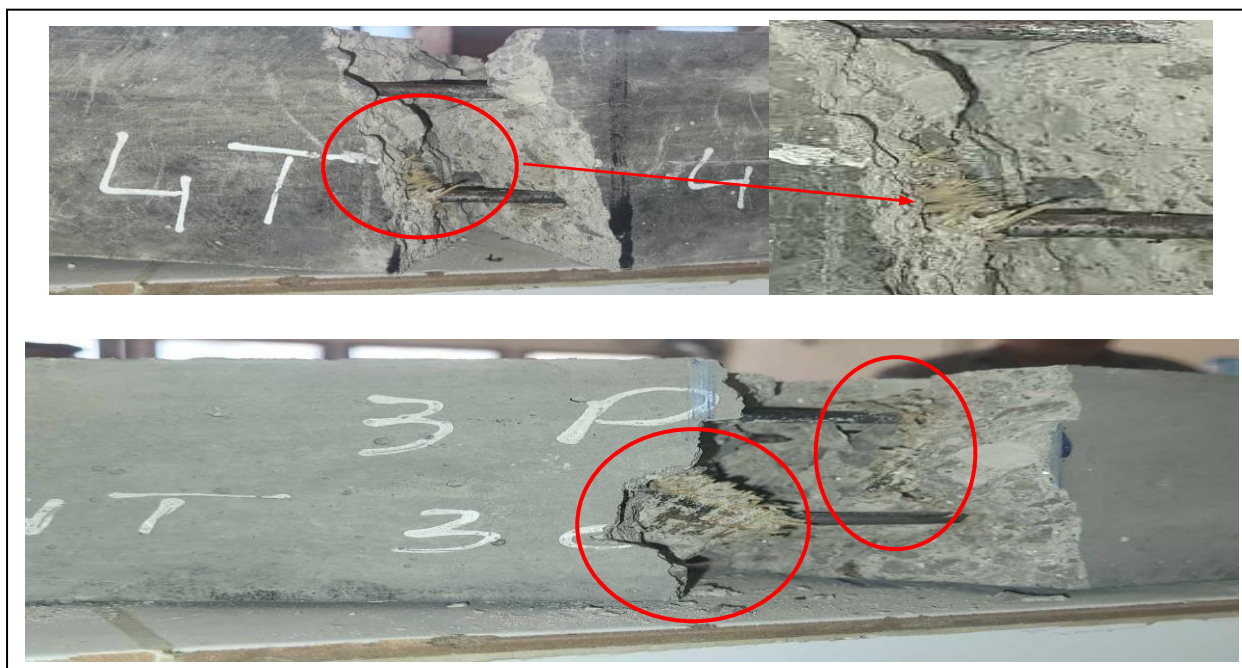


Figure III.14 : Poutres renforcées endommagées.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle le renforcement avec les bandes de jute améliore le comportement des poutres, puisqu'une amélioration de la résistance à la flexion et de la ductilité est notée.

Toutes les poutres présentent un mode de rupture en flexion. L'examen du mode de rupture des poutres renforcées pour toutes les configurations de renforcement indique que les bandes de jute ont été sollicitées puisque leur rupture est visible sur les figures illustratives ci-dessus.

Lorsque le béton atteint sa résistance ultime, le confinement du noyau béton est activé du fait de la présence des bandes de jute, qui reprennent les efforts tout en limitant la propagation rapide des fissures, ce qui améliore la ductilité des poutres renforcées par rapport à la poutre témoin.

La contribution en ductilité confère aux poutres renforcées une capacité portante intéressante grâce aux performances mécaniques du tissu jute utilisé notamment celles du PRFJ, sans omettre la densité de renforcement qui impacte également les performances des poutres.

III.5. Conclusion

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence l'intérêt du renforcement appliqué dans le cadre de cette étude.

Le renforcement des poutres en béton à l'aide de bandes de tissu de jute a permis, en effet, d'améliorer les performances mécaniques en termes de capacité portante et de ductilité.

L'augmentation de chacun des paramètres de renforcement, à savoir la largeur de la bande, le nombre de tours de la bande et le nombre de plis du PRFJ, permet un apport positif en résistance à la flexion et en ductilité.

Conclusion générale

Ces dernières années, l'utilisation de matériaux composites dans le domaine du génie civil a connu une expansion considérable en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, leur résistance à la corrosion, leur légèreté, et leur facilité d'application sur les chantiers. Ces caractéristiques font des composites un choix attrayant par rapport aux matériaux conventionnels notamment dans le renforcement des structures en béton.

C'est dans ce contexte que cette recherche est élaborée. Elle a pour objet le renforcement de poutres en béton armé de dimensions 10cm x10cm x40cm à l'aide de bandes d'un tissu bidirectionnel de jute et des PRFJ posés sous forme d'une hélice autour de l'armature.

Les variables considérées dans cette étude étant la largeur de la bande de jute, le nombre de tours qu'elle fait autour de l'armature et le nombre de plis de PRFJ.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser et d'évaluer l'impact des variables testés sur la résistance à la flexion des poutres ainsi que leur déformabilité.

Des tests de flexion trois points sont conduits sur les 18 éprouvettes testées qui représentent cinq variantes de renforcement avec le jute en plus de celle représentant le béton témoin qui est non renforcé. Il est à noter que chaque configuration est répétée trois fois.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation de composites à base de fibres de jute pour renforcer les poutres en béton s'avère être une solution économique, qui permet d'améliorer la résistance et la déformabilité des poutres, c'est une technique facile à mettre en œuvre, tout en étant respectueuse de l'environnement et de la santé des personnes.

En effet, une augmentation significative de la résistance ultime ainsi que de la déformabilité pour toutes les variantes de renforcement notamment celle qui concerne le renforcement avec le PRFJ.

Des apports de 12,35% et de 30,68% en matière de résistance ont été, ainsi, enregistrés pour les poutres renforcées avec des bandes de jute ayant les largeurs 3cm et 4 cm respectivement par rapport à la poutre non renforcée.

De même pour la ductilité, puisque les poutres renforcées avec des bandes de 3 cm et 4 cm gagnent en termes de déplacement des taux de 15.76% et 35.05% respectivement

Concernant la variable nombre de tours, des gains de 8,12 % et de 30,68 % en termes de résistance et de 21,74% et 35,05% en termes de déplacement ont été obtenus pour les poutres renforcées respectivement avec des bandes de jute à 3 et à 4 tours.

Par ailleurs, pour la variable nombre de plis, des gains de 12,35 %, 17,68 % et 43,09 % en termes de résistance ont été enregistrés pour les poutres renforcées respectivement avec 1 pli, 2 plis et 3 plis de bandes de jute par rapport à la poutre non renforcée.

Il est également à noter que des gains de 15,76%, 29,07% et 40,17% sont obtenus pour les poutres renforcées respectivement avec 1 pli, 2 plis et 3 plis de bandes de jute par rapport à la poutre non renforcée.

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette recherche dénotent l'intérêt de l'utilisation du jute dans le renforcement des poutres en béton notamment sous forme de PRF puisqu'ils améliorent les performances mécaniques de ces poutres. Ceci ouvre les horizons sur plusieurs perspectives à ce travail, à savoir :

Etudier l'effet d'autres tissus de renforcement tels que le verre ou le carbone.

- ✓ Tester d'autres valeurs des variables étudiées.
- ✓ Tester ce type de renforcement sur des poutres normalement armées (présence d'armatures transversales)
- ✓ Tester ce type de renforcement en combinaison avec le renforcement interne dans la zone tendue de la poutre.

References
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **ACI COMMITTEE 440.2R-08**, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2008).
- [2] **Cromwell J.R., Harries K.A. and Shahrooz B.M.**, “Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures”, *Construction and Building Materials* 25(5), pp. 2528-2539, (2011).
- [3] **Quiertant M.**, “Matériaux organiques spécifiques pour la construction”, Yves Mouton (Ed.), Chapitre 23, pp. 503–525, ISTE, Londres (2011).
- [4] **Lam, L. et Teng, J.G.** (2003a) “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.
- [5] **Mirmiran, A. et Shahawy, M.** (1997) “Behavior of concrete columns confined by fiber composites”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No.5, pp. 583-590.
- [6] **DUQUETTE, Philippe.** Renforcement en flexion de poutres en béton armé à l'aide de plaques en matériau composite réalisées in-situ. Université Laval, 1999.
- [7] **Luyckx, J., 1999.** Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Ed. Techniques Ingénieur.
- [8] **Ali ahmed C., Si salem A., Ait taleb S., and Ait tahar K.** (2022), "Experimental behavior and reliability of predamaged concrete column externally repaired with FRP spiral strips under axial compression ", *World Journal of Engineering*. 12p.
- [9] **Li, P., Ren, Y., Zhou, Y., Zhu, Z. and Chen, Y.** (2022), “Experimental study on the mechanical properties of corroded RC columns repaired with large rupture strain FRP”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 54, p. 104413.
- [10] **Ait Taleb, S. and Si Salem, A.** (2015), “Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double confined with FRP-jacket”, *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 165-172.
- [11] **Sirach, N., Smith, S.T., Yu, T. and Mostafa, A.** (2022), “Axial compressive behaviour of circular FRP-confined multi-tube concrete columns”, *Composite Structures*, Vol. 281, p. 114972.

- [12] **Ismail, R., Rashid, R.S., Chan, W.C., Jaafar, M.S. and Hejazi F.** (2019), “Compressive behavior of concrete cylinder fully and partially confined by carbon fibre-reinforced polymer (CFRP)”, *Construction and Building Materials*, Vol. 201, pp. 196-206.
- [13] **Huang, L., Su, L., Xie, J., Lu, Z., Li, P., Hu, R. and Yang, S.** (2022), “Dynamics splitting behaviour of ultra-high performance concrete confined with carbon-fibre-reinforced polymer”, *Composite Structures*, Vol. 284, p. 115155.
- [14] **Shayanfar, J., Barros, J.A. and Rezazadeh, M.** (2022), “Unified model for fully and partially FRP confined circular and square concrete column subjected to axial compression”, *Engineering Structures*, Vol. 251, p. 113355.
- [15] **Guo, Y.C., Xiao, S.H., Zeng, J.J., Su, J.Y., Li, T.Z. and Xie, Z. H.** (2022), “Behavior of concrete-filled FRP tube columns internally reinforced with FRP-steel composite bars under axial compression construction and”, *Building Materials*, Vol. 315, p. 125714.
- [16] **Chen, G., Wang, Y., Yu, T., Wan, B., Zhang, B. and Liu, Q.** (2021a), “Behavior and design-oriented model for elliptical FRP-confined concrete under axial compression”, *Engineering Structures*, Vol. 249, p. 113387.
- [17] **Chen, Q.S., Yu, B. and Li, B.** (2021b), “Probabilistic calibration of strength and strain enhancement models for FRP-confined concrete in circular section”, *Construction and Building Materials*, Vol. 304, p. 124673
- [18] **Zeng, J.J., Duan, Z.J., Guo, Y.C., Xie, Z.H. and Li, L.J.** (2019), “Novel fiber-reinforced polymer cross wrapping strengthening technique: a comparative study”, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 23 No. 5, pp. 979-996
- [19] **Zhu, Z., Zhou, Y., Li, Z., Li, H., Hu, B. and Li, P.** (2022), “A versatile continuous model for predicting various post-peak patterns of FRP-confined concrete”, *Composite Structures*, Vol. 294, p. 115750.
- [20] **Wang, W., Sheikh, M.N., Zeng, J.J. and Hadi, M.N.** (2022), “Ultimate strain prediction of partially FRP confined concrete considering strain localization”, *Construction and Building Materials*, Vol. 346, p. 128486.
- [21] **Ali Ahmed C.** «Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation», Thèse de Doctorat, Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [22] **A. Bouselham**, “comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l’aide de matériaux composites avancés,” Département génie de la construction. Montréal, École de technologie supérieure, 2005.

- [23] **L. Michel**, Approches locales et globales du comportement de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites. 2007.
- [24] **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
- [25] **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
- [26] **Merdas Abde-ELGHANI**, « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA » Université Des frères Mentouri-Constantine, Thèse de Magister 2005
- [27] **Abdelmadjid Si Salem** ; « Développement d’une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, 2016.
- [28] **J.M. Berthelot**. « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN : 2-7430-0771-0. Pp 72.
- [29] **Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002)** “FRP strengthened RC structures”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245 p.
- [30] **Carolyn, A. (2003)**, “Carbone fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements”. Doctorate Thesis, Lulea University of technology, 178p.
- [31] **Chatain, M. (2001)**, “Matériaux composites: présentation générale”, AM 5000, Technique de l’Ingénieur, traité plastiques et composites, Vol. AM 6.
- [32] **"Glossaire des matériaux composites,"** Centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006
- [33] **F. Michaud**, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage » université Laval thèse Phd 2003. Références bibliographiques
- [34] **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.
- [35] **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.

- [36] **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.
- [37] **Yim J-H, Cho S-Y, Seo Y-J et. Jang B-Z**. "A study on material damping of 0° laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer". Composites structures 2003 ; 60:367-374
- [38] **Mustapha Malha**, « Mise en oeuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de Doum », Université Mohammed V –AGDAL, Mars2013
- [39] **A. BOUDENNE**, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003
- [40] **Bertero et al**, (1983) "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitation", University of California, rapport no UCB/EFRC-83/23 of the national Science foundation, 1983.
- [41] **Ze Yi Wu**. Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. Français. NNT : 2004ENPC0021 pastel-00001266.

Résumé

Au cours des dernières années, l'utilisation de matériaux composites pour le renforcement des structures en béton a suscité un vif intérêt parmi de nombreux chercheurs. Cette tendance découle de l'accroissement des besoins en matière de renforcement, de réparation et de réhabilitation des ouvrages en béton. Les matériaux composites offrent une approche captivante en remplacement des matériaux traditionnels de renforcement et de réparation. Ces matériaux composites trouvent une variété d'applications, que ce soit en tant que renforcement interne ou externe des éléments structuraux.

Une série d'expériences a été menée sur des échantillons prismatiques en béton renforcé avec des bandes de tissu de jute, en faisant varier différents paramètres de renforcement tels que la largeur de la bande, le nombre de tours et le nombre de plis de PRFJ. Ces échantillons ont été soumis à des tests de flexion jusqu'à la rupture, dans le but de mettre en évidence les performances mécaniques de ces spécimens par rapport au béton non renforcé. Les résultats de cette étude ont montré l'intérêt d'utiliser le jute dans le renforcement interne des poutres en béton. Cela permet d'accroître la résistance mécanique et d'améliorer la déformation de la poutre. De plus, de la légèreté, les avantages économiques et environnementaux font de ces matériaux une excellente alternative aux matériaux coûteux et polluants.

Abstract

In recent years, the use of composite materials for strengthening concrete structures has attracted great interest among many researchers. This trend results from the increase in needs for reinforcement, repair and rehabilitation of concrete structures. Composite materials offer an exciting approach to replacing traditional reinforcement and repair materials. These composite materials have a variety of applications, whether as internal or external reinforcement of structural elements.

A series of experiments was carried out on prismatic concrete samples reinforced with jute fabric strips, varying different reinforcement parameters such as strip width, number of turns and number of plies of JFRP. These samples were subjected to bending tests until failure, with the aim of highlighting the mechanical performance of these specimens compared to unreinforced concrete. The results of this study showed the benefit of using jute in the internal reinforcement of concrete beams. This increases the mechanical strength and improves the deformation of the beam. In addition to lightness, the economic and environmental advantages make these materials an excellent alternative to expensive and polluting materials.