

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de GENIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Par

➤ MOUSSAOUI Achref

➤ ZOUAOUI Aimen

Intitulé

**Etude du comportement mécanique des poutres en béton à
haute performance, renforcées de fibres de carbone et de
végétale**

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

Dr. Ammar Noui

Université de BBA

Président

Dr. Belkadi Ahmed Abderraouf

Université de BBA

Encadrant

Dr. Kessal Oussama

Université de BBA

Co-encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu de nous avoir donné la force, le courage et la persistance pour accomplir ce modeste travail.

À Monsieur BELKADI abderraouf et KESSAL oussama qui nous a guidées à chaque étape de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier monsieur BILLEL de nous avoir aidées dans la réalisation de la partie expérimentale.

Nous tenons à remercier tous les techniciens du laboratoire pour leur attitude professionnelle, leur modestie et leur bonne humeur.

Ils nous ont beaucoup facilité le travail.

Résumé

Le parc immobilier mondial est vieillissant. C'est pourquoi plusieurs méthodes de renforcement des structures ont vues le jour ces dernières décennies. Le renforcement est souvent préféré à la démolition pour son aspect économique.

Une des méthodes de réparation couramment utilisée consiste à l'application de matériaux composites pour renforcer les structures béton armé. Les coûts relativement acceptables et la mise en œuvre rapide en font une solution technique de plus en plus appréciée. La technique de renforcement par matériaux composites se traduit par l'encollage de tissu ou de plats réalisés à partir de fibres de carbone ou de verre sur un support en béton. Ces types de matériaux ne sont pas d'origine naturelle, leur production provoque de forts impacts sur l'environnement et de plus, ces matériaux ne sont pas dégradables à leur fin de vie. Donc pour répondre à la question du développement durable qui demande que tous les domaines respectent l'environnement, un nouveau matériau écologique pouvant remplacer ces matériaux dans le renforcement de structure béton armé est toujours demandé. La fibre de Lin est un matériau d'origine naturelle qui présente de bonnes propriétés mécaniques. A l'heure actuelle, la fibre de Lin est appliquée dans plusieurs domaines : l'automobile, le sport, ... Dans le domaine génie civil, avec ses bonnes propriétés mécaniques, la fibre de lin peut être utilisée dans le domaine du renforcement des structures béton armé en substitution des fibres courantes (fibre de carbone, fibre de verre...)

Le but de ce mémoire est l'évaluation de la capacité d'utilisation des fibres de Lin dans le renforcement de poutres béton armé. L'étude se focalisera au cas de renforcement en flexion qui n'est pas bien documenté dans la littérature, qui sera comparé avec le renfort par des fibres de carbone. Les résultats montrent que le renfort par fibre de Lin présente des effets significatifs dans le renforcement en flexion des poutres béton (augmentation de la résistance de flexion de 8% à 20%). Le renfort par fibres de Lin présente un potentiel dans le renforcement de structure béton armé.

Mots clés :

Renforcement, flexion, fibre de lin, fibre de carbone, poutre

Abstract

The global housing stock is aging. This is why several methods of strengthening structures have emerged in recent decades. Reinforcement is often preferred to demolition for its economic aspect.

One of the commonly used repair methods is the application of composite materials to reinforce reinforced concrete structures. The relatively acceptable costs and rapid implementation make it an increasingly popular technical solution. The technique of reinforcement by composite materials results in the gluing of fabric or plates made from carbon or glass fibers on concrete support. These types of materials are not of natural origin, their production causes strong impacts on the environment and moreover, these materials are not degradable at the end of their life. So, to answer the question of sustainable development which requires that all areas respect the environment, a new ecological material that can replace these materials in the reinforcement of reinforced concrete structures is always in demand. Linen fiber is a material of natural origin which has good mechanical properties. Currently, flax fiber is applied in several fields: automotive, sports, etc. In the civil engineering field, with its good mechanical properties, flax fiber can be used in the field of structural reinforcement. reinforced concrete as a substitute for common fibers (carbon fiber, fiberglass, etc.)

The purpose of this thesis is the evaluation of the capacity of use of flax fibers in the reinforcement of reinforced concrete beams. The study will focus on the case of bending reinforcement which is not well documented in the literature, it will be compared with the reinforcement by carbon fibers. The results show that the Flax fiber reinforcement has significant effects in the flexural strengthening of concrete beams (increase in flexural strength from 8 % to 20 %). Flax fiber reinforcement has potential in reinforcing reinforced concrete structures.

Key words:

Reinforcement, bending, flax fiber, carbon fiber, beam

الملخص

المساكن العالمية تكبر. هذا هو السبب في ظهور عدة طرق لتقوية الهياكل في العقود الأخيرة. غالبًا ما يُفضل التعزيز على الهدم بسبب جانبه الاقتصادي.

إحدى طرق الإصلاح الشائعة الاستخدام هي استخدام المواد المركبة لتقوية الهياكل الخرسانية المسلحة. التكاليف المقبولة نسبيًا والتنفيذ السريع تجعله حلاً تقنيًا ذا شعبية متزايدة. ينتج عن تقنية التعزيز بالمواد المركبة لصق القماش أو الألواح المصنوعة من ألياف الكربون أو الزجاج على دعامة خرسانية. هذه الأنواع من المواد ليست من أصل طبيعي ، وإنتاجها يسبب تأثيرات قوية على البيئة ، وعلاوة على ذلك ، هذه المواد ليست قابلة للتحلل في نهاية حياتها. للإجابة على سؤال التنمية المستدامة الذي يتطلب أن تحترم جميع المناطق البيئية ، هناك طلب دائمًا على مادة بيئية جديدة يمكن أن تحل محل هذه المواد في تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة. ألياف الكتان مادة ذات أصل طبيعي لها خصائص ميكانيكية جيدة. حاليًا ، يتم استخدام ألياف الكتان في العديد من المجالات: السيارات ، والرياضة ، وما إلى ذلك. في مجال الهندسة المدنية ، مع خصائصها الميكانيكية الجيدة ، يمكن استخدام ألياف الكتان في مجال التعزيز الهيكلي. الخرسانة المسلحة كبديل للألياف الشائعة (الكربون والألياف الزجاجية وما إلى ذلك)

الغرض من هذه الأطروحة هو تقييم قدرة استخدام ألياف الكتان في تقوية عوارض الخرسانة المسلحة. ستركز الدراسة على حالة تقوية الانحناء التي لم يتم توثيقها جيدًا في الأدبيات، وستتم مقارنتها مع التعزيز بألياف الكربون. أظهرت النتائج أن تقوية ألياف الكتان لها تأثيرات كبيرة في تقوية الانحناء للعوارض الخرسانية (زيادة قوة الانحناء من 8% إلى 20%). تعزيز ألياف الكتان لديه القدرة على تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة.

الكلمات الدالة:

التعزيز ، الانحناء ، ألياف الكتان ، ألياف الكربون ، الرافدة

Table des matières

Résumé	2
Abstract	4
المخلص	5
Introduction générale	1
Chapitre 1 Etat de l'art sur le renforcement des éléments structuraux	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Renforcement par un matériau en Polymère Renforcé de Fibres (PRF)	4
1.3 Polymère renforcé de fibres conventionnelles (Verre et carbone)	5
1.4 Problème ce type de renforcement.....	7
1.5 Polymère renforcé de fibres naturelles	7
1.5.1 Fibre de lin.....	8
1.6 Revue bibliographique sur les modes de renforcement les types de composites	9
1.6.1 Types de systèmes et de produits de renforcement en PRF	9
1.6.2 Types d'applications de renforcement du FRP en béton armé	10
1.7 Applications en flexion	10
1.8 Comportement en cisaillement des poutres BA renforcées par des matériaux composites naturels (fibres de lin)	13
1.9 Conclusion	15
Chapitre 2 Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai	
2.1 Introduction.....	17
2.2 Composition du béton	17
2.2.1 Granulats (sable et gravier)	18
2.3 Formulation de BHP	19
2.3.1 Procédure e de la formulation	19
2.3.2 Composition retenue	19
2.4 Préparation des poutres	19
2.4.1 Dimension des poutres	19
2.4.2 Coffrage.....	20
2.4.3 Coulage des poutres	20
2.5 La résine	21
2.6 Configuration générale du système d'essai	21
2.7 Fibre de lin :.....	22
2.9 Mode opératoire de renforcement	23
2.10 Conclusion	25

Chapitre 3 Résultats et discussion

3.1	Introduction.....	27
3.2	Paramètres d'étude.....	27
3.3	Caractéristiques à l'état frais et durci des BHP.....	28
3.4	Etude du comportement flexionnel des poutres armées.....	28
3.4.1	Effet le nombre des couches de fibre de lin.....	28
3.4.2	Effet de traitement thermique de la fibre de lin.....	29
3.4.3	Comparaison entre les modes de renforcement.....	30
3.4.4	Effet de la forme de tissu de carbone.....	31
3.5	Conclusion.....	31
	Conclusion générale.....	32
	Références	

Figure 1. 1	Poutre en béton armé renforcée (site web).....	5
Figure 1. 2	Fibres de carbone et fibre de verre (site web).	6
Figure 1. 3	Composants d'un renfort (site web).	6
Figure 1. 4	Différents problèmes rencontrés lors de renforcement des poutres en béton armé (site web).	7
Figure 1. 5	Fibre de lin.	8
Figure 1. 6	Différents modes de renforcement des poutres (Naser et al., 2019).....	11
Figure 1. 7	Différents mode de rupture des poutres (Naser et al., 2019).	12
Figure 1. 8	Différents types de dégradation des poutres (Ferrier et al., 2021).....	14
Figure 1. 9	Courbe charge déformation (Ferrier et al., 2021).....	15

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, le béton armé est un matériau le plus couramment utilisé pour construire des bâtiments, des ponts... Avec sa grande histoire, il y a un très grand nombre d'ouvrages qui se retrouvent dégradés pour de multiples raisons tels que les accidents routiers, l'évolution de trafic, les modifications de chargement dans les bâtiments ou les actions climatiques... Pour résoudre ces problèmes, deux possibilités principales s'offrent aux maîtres d'ouvrage : la reconstruction ou la réparation. La reconstruction est une solution intéressante mais coûte très cher et ne peut pas être appliquée pour tous les ouvrages (ouvrages historiques ...). La deuxième solution est donc souvent utilisée pour maintenir les ouvrages dans un bon état de service. Une des méthodes de réparation couramment utilisées consiste à l'application de matériaux composites pour renforcer les structures béton armé. Les coûts relativement acceptables et la mise en œuvre rapide en font une solution technique de plus en plus appréciée.

La technique de renforcement externe de structure en béton armé est une technique utilisée pour réhabiliter ou augmenter la résistance de structures en béton armé (BA) lorsque celles-ci présentent des dégradations de matériaux, des défauts de conception ou de bien exécution ou lorsque le chargement actuel demande une structure plus résistante pour la sécurité. Le principe de cette technique est le remplacement des matériaux dégradés et/ou l'ajout de nouveaux matériaux, d'utiliser des matériaux beaucoup plus performants que la section de structure initiale, d'augmenter la section de structure par l'ajout de matériau (béton...). La technique a recours le plus souvent à l'utilisation des aciers en tant que renforts externes passifs ou actifs qui présentent des avantages comme une haute performance... mais présentent aussi des inconvénients : corrosion, poids élevé, adaptation difficile vis-à-vis des sections complexes de structure... C'est pourquoi l'utilisation de matériaux composites devient un moyen intéressant en remplacement de l'acier dans le renforcement de structure en béton armé. Ces matériaux présentent un bon potentiel de facilité d'adaptation à n'importe quelle section de structure donc une mise en œuvre très facile grâce à leur faible poids, leur haute performance en traction, anticorrosion...

Bien que les fibres courantes : fibres de carbone, fibre de verre... présentent plusieurs avantages, un inconvénient important est celui de l'impact des FRP au

niveau du développement durable. La production de ces matériaux est d'origine pétrolière et provoque de forts impacts sur l'environnement. Dans leur cycle de vie, ces matériaux ont besoin de centaines d'années pour se dégrader. Dans la nature, il existe des plantes qui donnent des fibres présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et bien sûr écologiques (fibre de lin, fibre de jute, fibre de sisal...), l'impact sur l'environnement étant dans ce cas lié aux méthodes d'extraction et de transformation. Ces fibres peuvent donc remplacer les fibres de renforcement classique. L'étude présentée ici doit permettre d'évaluer la capacité des fibres naturelles dans le renforcement des structures en béton.

Le but de ce travail est de renforcer des poutres en BHP par deux méthodes différentes en utilisant des tissus de carbone et des tissus de lin.

Notre mémoire se divise en 1 chapitre théorique et deux chapitres consistent à une étude expérimentale.

Chapitre 1 destiné à l'état de l'art sur le renforcement des éléments structuraux

Chapitre 2 consiste à la caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

Chapitre 3 concerne résultats et discussions.

Chapitre 1

Etat de l'art sur le renforcement des éléments structuraux

1.1 Introduction

Dans les structures en béton armé, les éléments constitutifs peuvent être divisés en deux catégories : éléments verticaux (poteaux, voiles) et éléments horizontaux (poutres, dalles). Aux différentes étapes de l'évolution de la vie d'un ouvrage, à la fin de vie d'un ouvrage, plusieurs raisons peuvent conduire à renforcer un ouvrage pour maintenir sa sécurité ou sa fonction. On peut donc citer les causes de dégradation telles que : une mauvaise conception, une mauvaise implémentation ou des défauts de durabilité. Une solution possible consiste à appliquer des matériaux composites à la plupart des éléments en béton standard. Ce type de réparation peut augmenter la résistance à la rupture, augmenter la ductilité et limiter l'ouverture des fissures. Ce chapitre décrit les types de structures en bétons armé renforcées en composite selon les exigences de chaque structure.

1.2 Renforcement par un matériau en Polymère Renforcé de Fibres (PRF)

Fibre Reinforced Polymer FRP est un matériau composite, Il est constitué d'une matrice et d'un agencement de fibres continues ou discontinues. En général, Des fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. Force mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que la fibre. En raison de l'orientation particulière des fibres les matériaux composites sont généralement anisotropes. Dans le domaine de la construction, les matériaux composites sont souvent utilisés dans le renforcement et la réparation de structures en béton armé telles que poutres, murs, poteaux, surtout dans les bâtiments, les ponts, etc. Le substrat utilisé est généralement dérivé du pétrole. On peut citer notamment les résines polyester thermodurcissables, les résines époxy, les résines vinylester ou résine encore les résines thermoplastiques (polyamides...).



Figure 1. 1 Poutre en béton armé renforcée (site web).

1.3 Polymère renforcé de fibres conventionnelles (Verre et carbone)

Les fibres utilisées pour le renforcement structural sont généralement des fibres de carbone, de verre, d'aramide ou de basalte (Figure 1-2). Ces fibres présentent un comportement élastique avant rupture, avec une résistance à la traction et un module d'élasticité très élevés, comme le montre le tableau. Du fait de leurs très bonnes propriétés mécaniques, ces fibres sont développées et commercialisées plusieurs domaines. Dans la construction, ces fibres peuvent être utilisées pour remplacer l'acier ou faire partie des renforts (Figure 1-2). Les avantages de l'utilisation de ces fibres dans le renforcement des structures sont nombreux : performances élevées, résistance à la corrosion sans modification des dimensions de la structure... L'efficacité de ces fibres a été prouvée par de nombreuses études.

Tableau 1. 1 Différentes caractéristiques des fibres (Ngo, 2016)

Matériau	Résistance en traction (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation à la rupture (%)
Verre FRP	480-1600	35-51	1.2-3.1
Basalte FRP	1035-1650	45-59	1.3-3.0
Aramide FRP	1720-2540	41-125	1.9-4.4
Carbone FRP	1720-3690	120-580	0.5-1.9

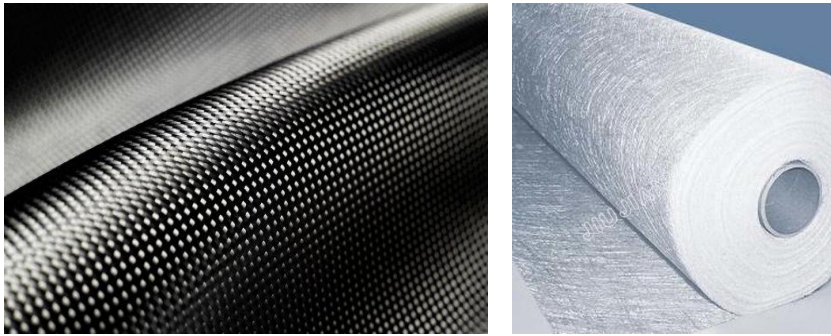


Figure 1. 2 Fibres de carbone et fibre de verre (site web).

La matrice dans les composites est la phase continue qui assure la cohésion, le transfert et la distribution contraintes, protéger les renforts contre les agressions extérieures et contrôler la mise en œuvre. Dans le domaine du renforcement externe des structures, les matrices composites peuvent être divisées en deux types : *Résines thermodurcissables* : Le durcissement est définitif dans le cycle de polymérisation et le processus de transformation est irréversible. - *Résine thermoplastique* : Le polymère est formé par chauffage et formage, la transformation est réversible. Les résines souvent utilisées pour le renforcement des structures sont des résines thermodurcissables en raison de leur facilité de mise en œuvre. La résine époxy est l'un des types de résine les plus couramment utilisés dans le renforcement structurel.

Dans le renforcement composite des murs extérieurs, les matériaux composites présentent une efficacité significative de la capacité structurelle.

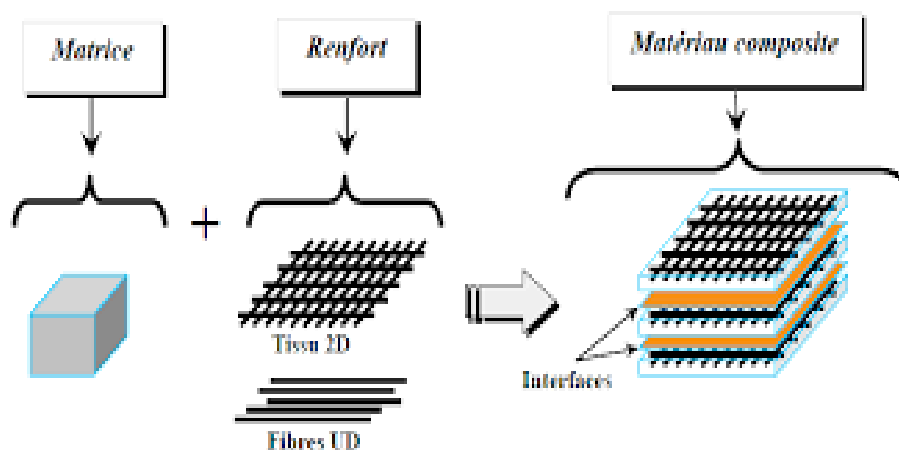


Figure 1. 3 Composants d'un renfort (site web).

1.4 Problème ce type de renforcement

Un problème fréquent dans ce type de renforcement est le délaminage du composite (Figures 1-4). Ce problème limite la contribution des matériaux composites à la résistance structurelle. Plusieurs types de ruptures peuvent survenir : a) Le béton recouvrant les barres d'acier tombe ; b) Le détachement de l'extrémité de la barre d'armature composite ; c) Délaminage local des armatures sous fissuration par cisaillement ; d) Séparation locale des armatures sous les fissures de flexion.

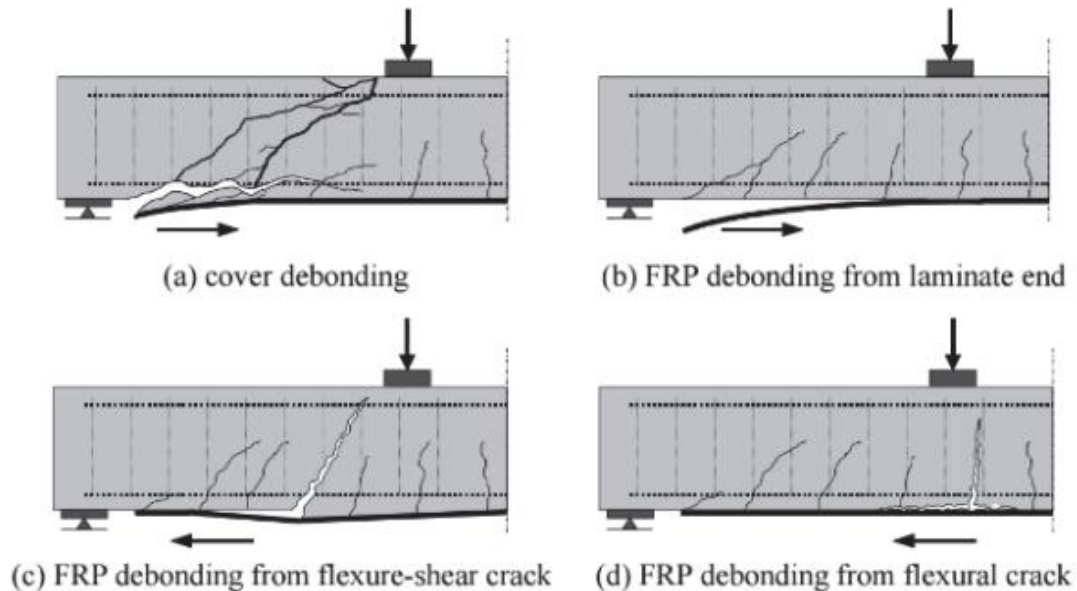


Figure 1. 4 Différents problèmes rencontrés lors de renforcement des poutres en béton armé (site web).

Pour limiter ces phénomènes, différents systèmes d'ancrage peuvent être appliqués aux extrémités du ruban composite ou sur toute sa longueur. De cette manière, la force de liaison entre le béton et le matériau composite est augmentée, augmentant ainsi la contribution du matériau composite à la résistance structurelle.

1.5 Polymère renforcé de fibres naturelles

Dans la nature, il existe de nombreux types de fibres naturelles, mais seuls quelques-uns ont des propriétés mécaniques suffisantes justifient leur utilisation comme renforts de composites. Les fibres naturelles présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, ses ingrédients proviennent du milieu naturel correspond à des ressources biodégradables, donc elles existent un faible impact environnemental (intensité énergétique 6 fois inférieure à la fibre de verre, 12 fois inférieure à la fibre

de carbone (Hawileh et al., 2019)). En termes de prix, ils coûtent très peu : jusqu'à neuf fois moins cher que la fibre de verre et cinq cents fois moins cher que la fibre de carbone (Rasheed et al., 2017). Enfin, en termes de densité, par rapport aux fibres traditionnelles, les fibres naturelles ont une densité qui peut être réduite à la moitié. De plus, dans ce cadre de la construction, les fibres végétales ont des avantages en matière d'isolation et d'inertie chaude. Malgré tous ces avantages, l'un des principaux inconvénients à limiter l'utilisation de matériaux composites naturels sont dérivés des propriétés naturelles de ces fibres, qui peuvent avoir un impact faible vis-vis de la durabilité ou performances mécaniques.

1.5.1 Fibre de lin

La fibre de lin est une fibre naturelle dérivée des tiges des plantes. Les fibres sont issues au broyage le corps de la plante par action mécanique (Figure 1-4). Les fibres de lin ont de très bonnes propriétés mécaniques par rapport aux autres fibres naturelle, il se classe à l'avant, par rapport aux fibres traditionnelles, il se classe à l'arrière fibre de carbone. Les fibres de lin ont les propriétés spécifiques suivantes : - faible densité (fibre de verre $1,5 \text{ g/cm}^3$ vs $2,54 \text{ g/cm}^3$) ; - Rigidité spécifique plus élevée que la fibre de verre ; absorbe plus de vibrations que la fibre de verre et de carbone ; - L'isolation thermique et phonique est supérieure à celle du verre et de la fibre de carbone ; - Moins d'impact environnemental que le verre et la fibre de carbone (Figure 1-4)



Figure 1. 5 Fibre de lin.

1.6 Revue bibliographique sur les modes de renforcement les types de composites

1.6.1 Types de systèmes et de produits de renforcement en PRF

Les matériaux en PRF sont fabriqués dans une variété de produits et sont principalement classés en deux groupes, à section constante et à section pultrudée. Les formes structurelles composites en FRP à section constante sont souvent produites pour être utilisées dans l'industrie de la construction, en particulier dans les bâtiments et les ponts, tandis que les sections pultrudées sont principalement utilisées dans les tabliers de ponts routiers et les passages pour piétons. De plus, les produits FRP peuvent être classés comme ceux développés pour être utilisés dans de nouvelles structures et ceux utilisés pour le renforcement et la modernisation de structures existantes. Les armatures en PRF pour les nouvelles structures peuvent être divisées en trois produits principaux : (1) les barres en PRF à utiliser comme armature interne, (2) les tendons en PRF pour les éléments en béton précontraint et (3) les coffrages en PRF restant en place pour les éléments renforcés (éléments en béton (Hollaway, 2010)).

L'utilisation de matériaux FRP pour renforcer et/ou réparer les éléments porteurs dans les structures existantes est appelé « rénovation ». Les applications de mise à niveau peuvent être globalement classées en deux types. Le premier type est appelé « renforcement », où la résistance ou la ductilité initiale de la structure doit être améliorée pour tenir compte de nouveaux services ou niveaux de chargement. Cette augmentation peut être rendue nécessaire par le souhait de rendre la structure compatible avec les réglementations de construction existantes ou peut être souhaitée en raison de changements dans l'utilisation prévue de la structure. L'autre type de mise à niveau en FRP peut être classé comme "réparation". Dans ce dernier cas, les PRF sont utilisés pour réparer une structure existante et détériorée afin de ramener sa capacité de charge, sa ductilité ou sa stabilité au niveau pour lequel elle a été conçue.

De toute façon, les produits FRP les plus couramment utilisés sont fabriqués sous forme de plaques, barres, feuilles et ancrages préfabriqués. Les propriétés

mécaniques des différents types de matériaux composites FRP (Smith & Teng, 2002) utilisés sur le marché de la construction sont fournies dans le tableau 1. Il convient de noter que les éléments préfabriqués en PRF sont généralement rigides et difficiles à plier ou à utiliser comme renfort interne. Le tissu FRP, d'autre part, est disponible en feuilles unidirectionnelles continues fournies qui peuvent être facilement adaptées à n'importe quelle géométrie et enroulées autour de profils complexes. Les tissus FRP peuvent être collés sur le côté tension des éléments structuraux (par exemple, des dalles ou des poutres) pour fournir un renforcement de tension supplémentaire pour augmenter la résistance à la flexion et améliorer les caractéristiques de ductilité et de dissipation d'énergie.

1.6.2 Types d'applications de renforcement du FRP en béton armé

Les structures au cours des trois dernières décennies, l'intégration des systèmes de renforcement du FRP a été augmentée en raison des caractéristiques supérieures de ces composites. Cela a été dûment noté dans la littérature ouverte par le nombre de recherches et de travaux publiés. Cette section vise à mettre en évidence certaines des investigations expérimentales, numériques et analytiques notables menées ces dernières années. En particulier, des études liées au renforcement de flexion, de cisaillement, de torsion, axiale et sismique sont présentées dans la partie suivante :

1.7 Applications en flexion

La capacité de flexion des éléments en béton ordinaire et armé (BA) peut être amélioré en fixant des plaques, des bandes ou des tissus en FRP collés à l'extérieur des poutres simplement appuyées (voir Figure 1. 5).

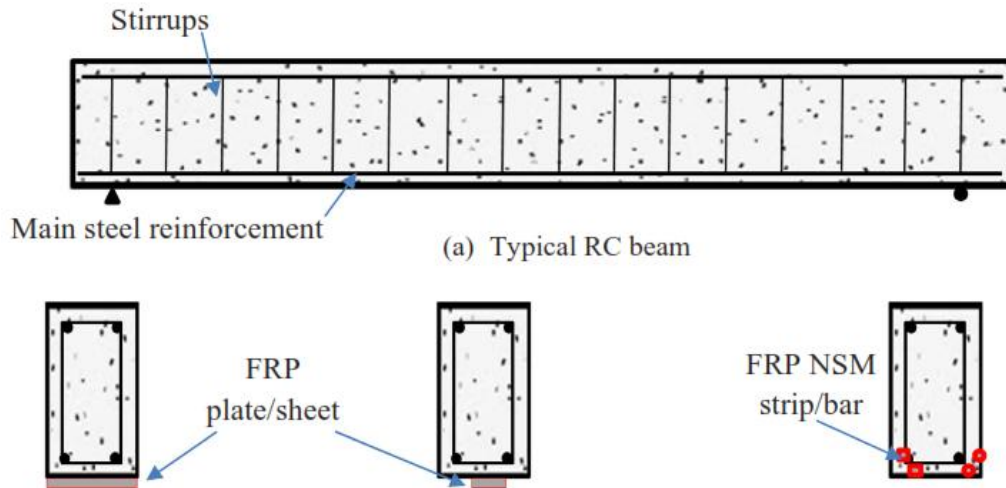


Figure 1. 6 Différents modes de renforcement des poutres (Naser et al., 2019)

Plusieurs modes de défaillance ont été observés expérimentalement sur les poutres et les dalles en BA lorsqu'elles sont renforcées extérieurement avec des stratifiés FRP. Selon les directives de conception actuelles de l'ACI 440.2R-08 (Aiello et al., 2014), la plastification de l'acier suivie de la rupture des stratifiés de FRP, le décollement du FRP de la surface de béton adjacente et la séparation de l'enrobage en béton (délaminage de l'enrobage) sont des modes de défaillance courants des éléments en BA renforcés en flexion avec des composite FRP. La rupture du stratifié de FRP lié à l'extérieur se produira si la déformation dans le FRP atteint sa déformation ultime, avant que le béton dans la fibre de compression supérieure n'atteigne sa déformation de rupture. Le décollement du FRP ou le délaminage de la couverture se produit généralement si la force axiale dans l'armature de flexion en FRP ne peut pas être supportée par le substrat en béton.

Le décollement des stratifiés FRP est généralement initié par flexion et / ou des fissures de cisaillement en flexion au voisinage de la région de moment maximal de l'élément renforcé, puis progressent le long de la longueur du FRP à travers le liant (colle époxy ou matrice ciment). Tel les fissures s'ouvrent et s'élargissent sous le chargement et développeront ainsi des niveaux contraints élevés de cisaillement à l'interface entre les feuilles/plaques de FRP et le substrat en béton, provoquant le décollement du FRP. La séparation de la couverture de béton (délaminage de la couverture) est un autre type de mode de rupture fragile par décollement qui est généralement initié par la formation d'une fissure au point de concentration de contrainte élevée près de l'extrémité (réduction) du stratifié FRP.

La fissure se propagera ensuite vers et le long du niveau des armatures flexionnelles en acier, provoquant la séparation de l'enrobage de béton. La rupture de l'enrobage en béton est initiée par la formation d'une fissure près de l'extrémité de la plaque. Les modes de défaillance potentiels des éléments en BA flexionnels renforcés à l'extérieur avec des stratifiés FRP sont illustrés à la Fig. 1.6.

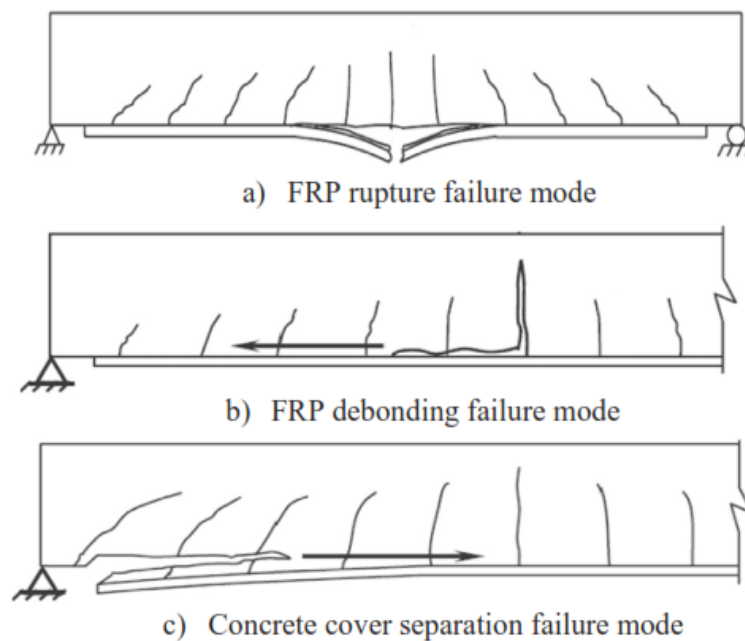


Figure 1. 7 Différents mode de rupture des poutres (Naser et al., 2019).

Alternativement, des bandes ou des tiges montées près de la surface (NSM) avec une direction des fibres parallèle à l'axe longitudinal de l'élément peuvent également être utilisées. Cette utilisation de plaques collées extérieurement et de systèmes NSM, pour renforcer les poutres RC en flexion a été bien étudiée au cours des trois dernières décennies et certaines de ces études sont mises en évidence ici. Dans une première étude de Ritchi et al. en 1991, des poutres RC renforcées avec des plaques de GFRP et de CFRP collées ont été testées jusqu'à la rupture.

Les poutres testées avaient une longueur de 2,75 m et étaient soumises à des effets de flexion dominants. Les résultats de cette enquête ont révélé que les poutres renforcées ont abouti une augmentation de 17 à 95 % de la rigidité et une augmentation de 40 à 97 % de la résistance ultime par rapport à des poutres de contrôle similaires non renforcées.

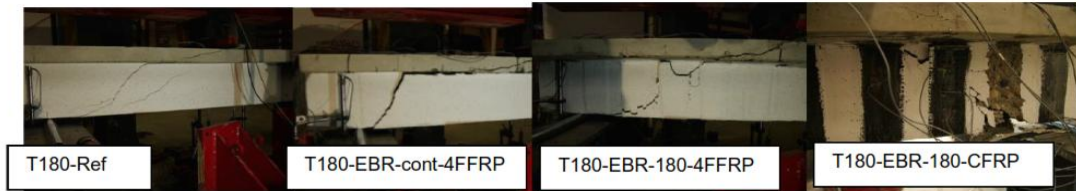
1.8 Comportement en cisaillement des poutres BA renforcées par des matériaux composites naturels (fibres de lin)

Le contexte de l'étude de (Ngo, 2016) est l'analyse du renforcement au cisaillement d'une poutre en béton à l'aide d'un nouveau matériau naturel. Ils ont fait des essais expérimentaux de l'armature de cisaillement des poutres en béton avec un polymère renforcé de fibres de lin (FFRP) en utilisant la méthode de liaison externe (EB) et la méthode de montage près de la surface (NSM). Un total de 16 poutres a été testées avec des tests de flexion en trois points. Les poutres avaient des sections rectangulaires et une portée de 2 mètres et un profilé en T d'une portée de 2,5 m. Les paramètres suivants ont été étudiés : (i) le pourcentage de renforcement de lin (continu vs non continu), (ii) le pourcentage d'acier transversal (étriers), (iii) la méthode de renforcement (EB vs NSM), (iv) et l'interaction entre le FFRP et les étriers.





(a) Group R



(b) Group T

Figure 1. 8 Différents types de dégradation des poutres (Ferrier et al., 2021)

Les résultats obtenus ont montré que la charge ultime augmentait de 10 % à 35 % pour ces poutres renforcées ; cependant, ce type de renforcement n'a pas contribué à une modification du type de rupture ou du comportement des poste-rupture. Les résultats ont également montré que la méthode NSM est plus efficace que la méthode EB. De plus, la présence de renforts transversaux réduit la contribution des fibres de lin dans la résistance au cisaillement de la poutre. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus sont comparés avec succès à différentes équations de code de conception.

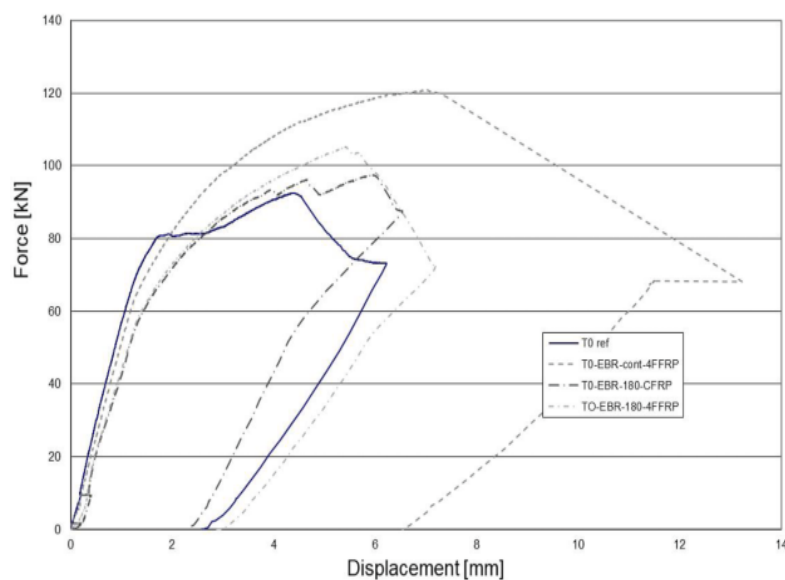


Figure 1. 9 Courbe charge déformation (Ferrier et al., 2021)

1.9 Conclusion

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilité de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistances mécaniques assez importante que les autres moyens de renforcements. Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permet de l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé.

Chapitre 2

Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

2.1 Introduction

Le but du présent chapitre est de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, les compositions des bétons et le dispositif expérimental mis en place.

Lors de cette étude expérimentale investie au laboratoire de Génie Civil de l'Université MOUHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI de BORDJ BOU ARRERIDJ, plusieurs éprouvettes de béton sont confectionnées, dans lesquels nous essayons de valoriser le comportement d'un béton renforcé par des fibres de verres, lin, carbone et végétales. À la lumière des résultats des essais mécaniques à la compression et à la traction par flexion trois points. Pour les besoins des essais mécaniques de compression et de traction, nous avons réalisé plusieurs gâchés de fibres. Pour chaque variante, un total de trois éprouvettes a été réalisées. Le programme expérimental de notre étude est subdivisé en deux parties :

La première partie est consacrée à la confection des poutres en BHP formulé selon la méthode de Sherbrooke puis testées sous une charge de flexion quatre points.

La seconde partie est consacrée en premier lieu à la réparation avec plusieurs méthodes de poutre pré-fissurée.

2.2 Composition du béton

Dans Le béton étudié dans ce travail est un béton de haute performance (BHP), confectionné à partir d'un ciment Portland CEM I/42.5 R délivré par la cimenterie de LAFARGE wilaya de BISKRA ; Sa surface spécifique Blaine (SSB) est de 3400cm²/g et sa densité de 3.2.

La fumée de silice utilisée a une densité de 2.2 et une SSB de 8755 cm²/g. L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé sous le nom MEDAFLOW30 délivré par la société GRANITEX, sa densité est de 1.07 avec un extrait sec de 30%.

Le détail de la composition chimique du ciment et du fumé de silice et minéralogique du ciment sont présentés dans les tableaux 2.1, 2.2.

Tableau 2. 1 Composition Chimique du ciment et du fumé de silice.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	P.A.F
Ciment (%)	21.79	4.29	5	64.37	/	2.11	0.24	/	0.87

Fumée de silice (%)	88.72	0.78	2.54	/	3.70	1.06	2.817	0.141	/
----------------------------	-------	------	------	---	------	------	-------	-------	---

Tableau 2. 2 Composition minéralogique du ciment.

Minéraux	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur (%)	63.26	14.43	2.49	15.9

2.2.1 Granulats (sable et gravier)

Dans cette étude on a utilisé un sable (0-5) avec un équivalent de sable selon la norme (EN 18-598) de 90.30% et un module de finesse après correction d'ordre 2.5 ; pour les granulats concassés deux fractions ont été utilisées (3/8 et 8/16). Les propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés sont présentés dans le tableau 2.3. L'analyse granulométrique des granulats utilisés réaliser selon la norme (NF EN 933-5) est représenté dans la figure 3.1.

Tableau 2. 3 Propriétés physiques et mécaniques des agrégats.

Propriétés	Sable	Gravier	
	(0/5)	(3/8)	(8/16)
ρ (g/cm ³)	2.62	2.61	2.67
γ (g/cm ³)	1.48	1.48	1.47
LA (%)	/	21.04	17.80
A (%)	4	3.27	1.25

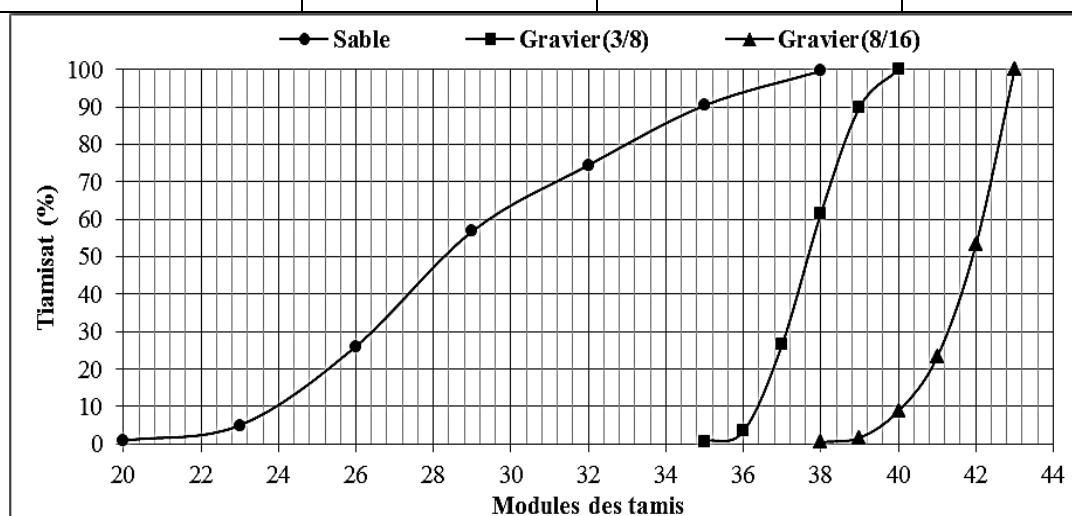


Figure 2. 1 Courbes granulométriques des granulats utilisés.

2.3 Formulation de BHP

Pour la formulation de béton à haute performance une méthode développée à l'université de Sherbrooke a été utilisée. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1.1L Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basés sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme une partie de la quantité d'eau de gâchage.

2.3.1 Procédure e de la formulation

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

1. le rapport eau / liant ;
2. le dosage en eau ;
3. le dosage en super plastifiant ;
4. le dosage en gros granulat ;
5. la teneur en air.

2.3.2 Composition retenue

Les bétons testés ont été confectionnés selon la méthode de l'université de Sherbrooke avec un rapport E/L = 0.30. Le tableau 3.4 regroupe les dépenses on matériaux pour 1 m³ de béton frais.

Tableau 2. 4 Composition des bétons étudiés pour 1m³ de béton.

Constituants	Ciment	FS	Eau	G 3/8	G 8/15	Sable	SP
Quantités (Kg/m ³)	406.9	40.9	139,2	356,10	676,22	761,524	5.5

2.4 Préparation des poutres

2.4.1 Dimension des poutres

Des poutres en béton à haute performance ont été fabriquées puis testées sous une charge de flexion trois points (*Figure 2.2*). Les poutres ont une section transversale rectangulaire de 100×100 mm², et une longueur totale de 400 mm.



Figure 2. 2 *Caractéristiques géométriques des poutres préparées.*

2.4.2 Coffrage

Ces moules démontables, constitués de tôle d'acier, ont été imprégnés par un agent démoulant pour faciliter l'extraction des poutres après la prise du béton. Tous ont la même section transversale de 100mm x 100mm (largeur x hauteurs) et une longueur de 400 mm.



Figure 2. 3 Le coffrage utilisé.

2.4.3 Coulage des poutres

Le coulage des poutres a été réalisé en 2 couches, chacune vibrée pendant 30 secondes à l'aide d'une table vibrante. Après 24 h de séchage, les poutres ont été retirées et conservé dans l'eau de laboratoire à une température de 25 °C.



Figure 2. 4 Coulage les poutres en BHP.

2.5 La résine

Désigne un produit polymère (naturel, artificiel ou synthétique) qui est une matière de base pour fabriquer par exemple des matières plastiques, textiles, peintures (liquides ou en poudre), adhésifs, vernis, mousses de polymère. Elle peut être thermoplastique ou thermodurcissable.



Figure 2. 5 Résine.

2.6 Configuration générale du système d'essai

Les poutres sont placées sur un bâti approprié pour être soumises à la flexion « trois points ». Il s'agit d'une machine équipée d'une cellule de charge de 400 kN de capacité maximale, pilotée en déplacement (1,0mm/mn). La machine se compose

d'une traverse supérieure mobile et d'une traverse inférieure qui permet de mettre en place les spécimens. L'acquisition de la flèche a été accomplie à l'aide d'un capteur de déplacement, l'enregistrement s'effectue numériquement chaque 0.5 kN.

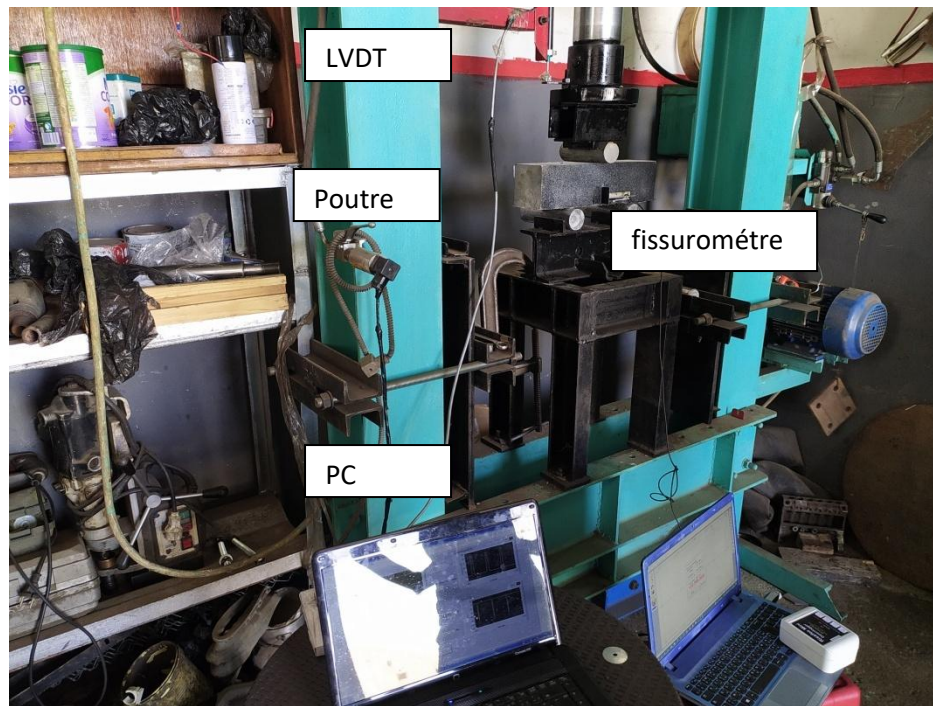


Figure 2. 6 Dispositif d'essai adopté pour les essais de flexion.

2.7 Fibre de lin :

Le lin est une fibre cellulosique dérivée de la tige de la plante de lin ou d'un tissu fabriqué à partir de ces fibres. Les fibres de lin sont beaucoup plus fortes et plus brillantes que le coton ; ils donnent des tissus froids et absorbants qui se froissent facilement.



Figure 2. 7 La lin.

2.8 Fibre de carbone

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ cinq à dix micromètres de diamètre, et est composée principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre.

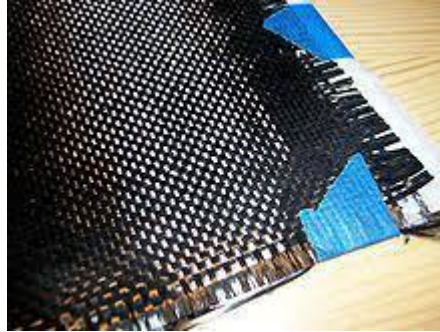


Figure 2. 8 Tissu de carbone

2.9 Mode opératoire de renforcement

- Tout d'abord on a créé des entailles dans les échantillons pour diminuer la résistance du béton.



Figure 2. 9 Création de fissure et nettoyage.

- Laver le tissu de lin et le sécher à l'air libre.
- Couper le tissu de lin et de verre sur les mesures de l'échantillon.
- Mélanger le MEDAPOXY REP.



Figure 2. 10 préparation des matériaux.



Figure 2. 11 Différentes poutres renforcées.

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les essais de caractérisation des matériaux de base des différents mélanges. Les constituants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les bétons hydrauliques. Ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes sollicitations. De plus, on a montré différents modes de renforcement des poutres qu'on a utilisé.

Chapitre 3.

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Notre travail de recherche a pour objectif de voir la meilleure méthode de renforcement des poutres en BHP probablement fissurées dues à la charge de flexion en 03 points.

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux vis-à-vis du renforcement à la flexion de poutres en BHP renforcées par des fibres naturelles et de verre avec une résine polymère. Les fibres sont des fibres de Lin et deux méthodes de disposition sont appliquées : la méthode de collage externe (EB) sur la façade inférieure de la poutre et la méthode de collage externe sur la façade inférieure et latérale. Le programme expérimental est réalisé sur un lot de poutre : des poutres rectangulaires (10 x 10 x 40 cm³). Pour évaluer la capacité de la fibre de Lin par rapport aux fibres courantes (fibre de carbone, fibre de verre...) une comparaison avec un renforcement par fibre de verre sera réalisée avec les mêmes configurations de renforcement.

Le but de ce travail est l'évaluation de la capacité de renforcement des fibres de Lin notamment dans le renforcement en flexion avec une comparaison avec les fibres classiques, comme les fibres de carbone. En outre, les normes de calcul existantes et les recherches qui expriment l'effet d'un renforcement FRP à la flexion de structure en béton armé n'utilisent que les cas de fibres courantes : fibres de carbone, fibres de verre... A travers cette étude, la possibilité d'appliquer les codes de calcul, prévus pour les cas de fibres de carbone ou fibres de verre, au calcul de la capacité en flexion de structures renforcées par des fibres de Lin sera étudié.

3.2 Paramètres d'étude

La littérature a permis d'identifier les paramètres qui influencent le comportement flexionnel de poutres renforcées par matériaux composites courants (CFRP, GFRP, AFRP...). Pour des soucis de comparaison, dans le cas de la nouvelle application de fibre de Lin dans le renforcement de poutres béton armé, les paramètres suivants sont étudiés :

- Fibre de Lin vs fibre de carbone
- Nombre de couche des fibres de lin (1 à 3 couches)
- Traitement thermique des fibres de lin (20°C et 80°C).

3.3 Caractéristiques à l'état frais et durci des BHP

Le tableau 3.1 regroupe les différentes caractéristiques des BHP utilisés pour confectionner les poutres à l'état frais et durci.

Tableau 3. 1 Caractéristiques des BHP utilisés.

Résistance à la compression à 28 jours (MPA)	Ouvrabilité (Affaissement) (cm)
60.4	10

D'après le tableau 3.1 on constate que notre BHP subis une bonne fluidité et une bonne résistance mécanique.



Figure 3. 1 Affaissement du BHP essai de cône d'Abrams.

3.4 Etude du comportement flexionnel des poutres armées

3.4.1 Effet le nombre des couches de fibre de lin

Figure 3.2 illustre l'effet des couches de la fibre de lin sur le comportement flexionnel des poutres en BHP.

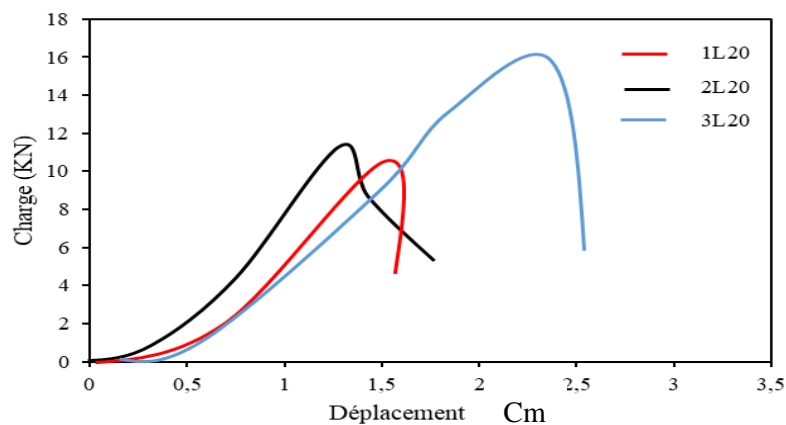


Figure 3. 2 Courbe charge déformation

La poutre 3L20 est renforcée de façon continue par 3 couches de Lin présente un meilleur comportement flexionnel que celles avec une et deux couches. Cette augmentation de la résistance est de 60% par rapport 1L20. La ruine est initiée par une rupture au niveau du renfort. En effet, au droit de la fissure la couche superficielle du béton a rompu (figure 4.3).

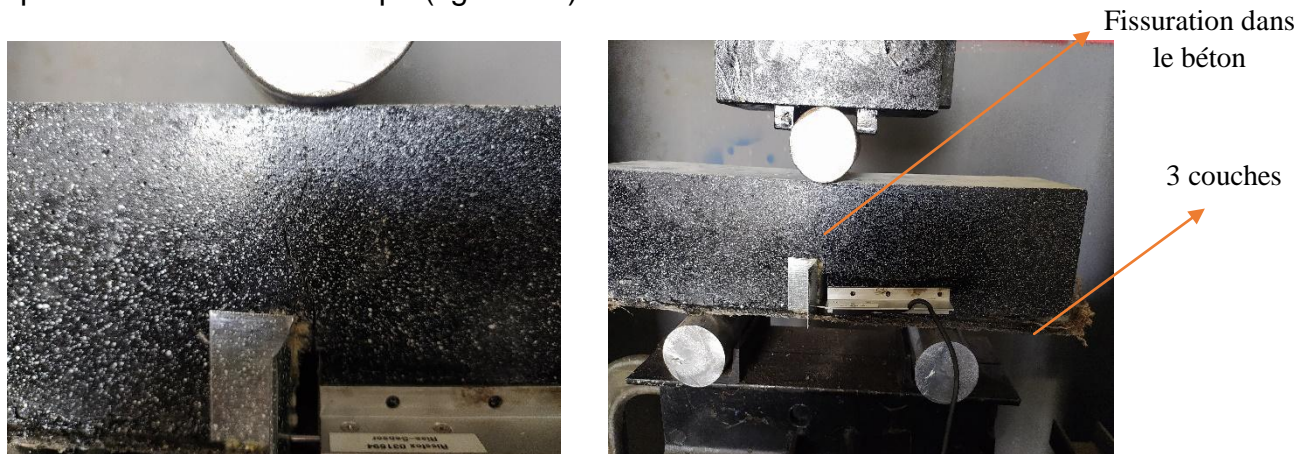


Figure 3. 3 Mode de rupture de la poutre 3L.

3.4.2 Effet de traitement thermique de la fibre de lin

Figure 3.4 illustre l'effet de traitement thermique de la fibre de lin (80°C) sur le comportement flexionnel des poutres en BHP.

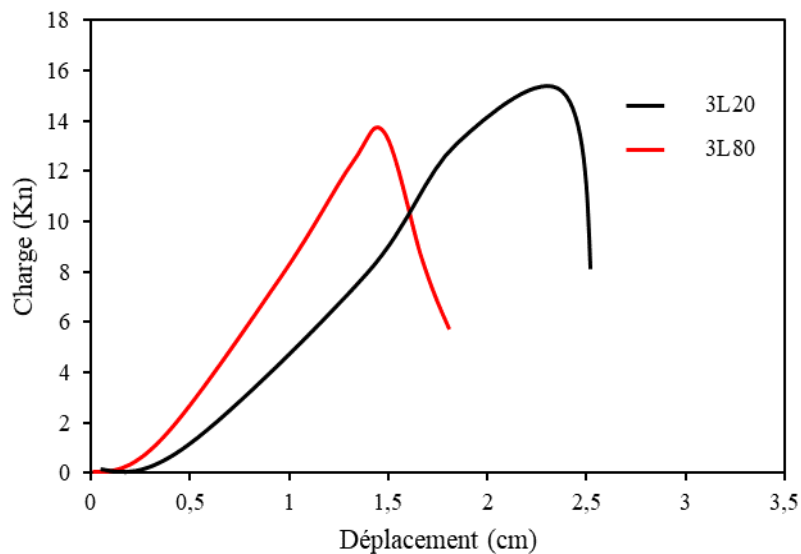


Figure 3. 4 Courbe charge déformation.

D'après la figure 3.4 on constate que le traitement thermique à 80 °C n'est pas un effet significatif. Le meilleur comportement concerne les poutres renforcées avec des fibres conservées à 20°C.

3.4.3 Comparaison entre les modes de renforcement

Figure 4.5 illustre l'effet de mode de renforcement (carbone vs lin) sur le comportement flexionnel des poutres en BHP.

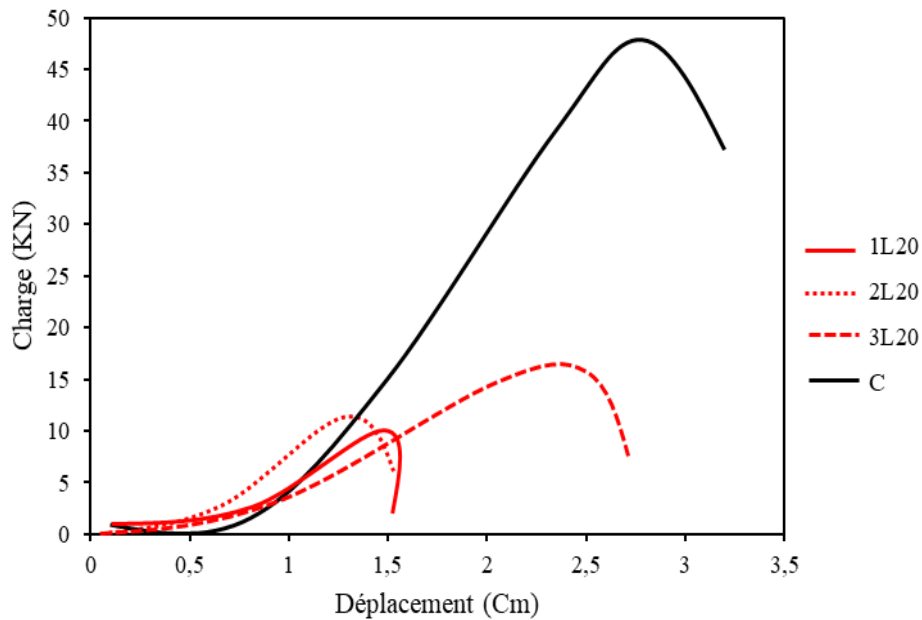


Figure 3. 5 Courbe charge déformation pour différents modes de renforcement.

D'après la figure 3.5 on constate que le renforcement par des tissus de verre révèle des résultats meilleurs par rapport au renforcement avec des fibres de lin. Cependant

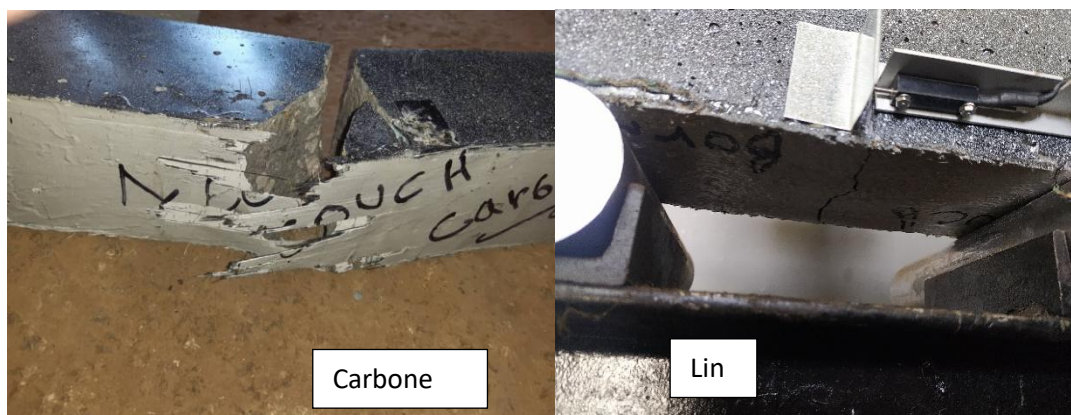


Figure 3. 6 Illustre le mode de rupture des poutres renforcées.

3.4.4 Effet de la forme de tissu de carbone

Figure 4.6 illustre l'effet de la forme de tissu de carbone sur le comportement flexionnel des poutres en BHP.

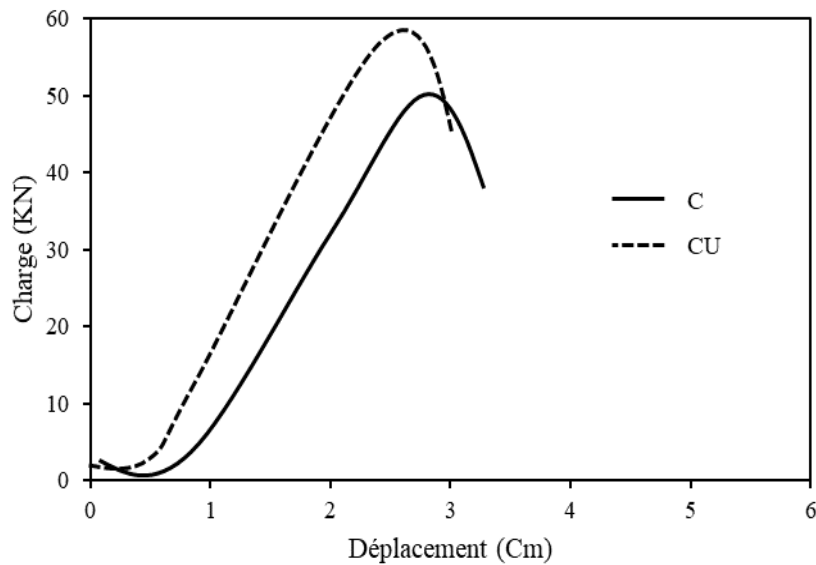


Figure 3. 7 Courbe charge déformation pour différents modes de renforcement.

D'après la figure 3.6 on constate que le renforcement par des tissus de carbone en forme révèle des résistances élevées par rapport au renforcement que dans la partie inférieure. Figure 4.7 illustre le mode de rupture des poutres renforcées.

3.5 Conclusion

D'après cette recherche on peut conclure que :

- Le renforcement des poutres ou des éléments structuraux est un sujet important afin d'augmenter leur durée de vie et leur durabilité.
- On a appliqué les paramètres de renforcement suivants : composite avec : la fibre de Lin, fibre de carbone, nombre de couche des fibres de lin (1 à 3 couches), et traitement thermique des fibres de lin (20°C et 80°C).
- La nouvelle technique de renforcement par la fibre de lin est montrée une faible résistance par rapport ceux avec fibre de carbone.
- L'effet de traitement thermique de la fibre de lin est moins efficace par rapport à la fibre témoin

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est l'évaluation de la capacité des fibres naturelles (fibre de Lin) dans le renforcement à la flexion des poutres béton. Le programme de mémoire est basé sur des tests expérimentaux. Les paramètres suivants sont étudiés dans le test expérimental :

- Fibre de Lin vs fibre de carbone
- Nombre de couche des fibres de lin (1 à 3 couches)
- Traitement thermique des fibres de lin (20°C et 80°C).

L'étude de bibliographie a confirmé l'efficacité de renforcement à la flexion des poutres béton par des renforts de fibre de carbone par des méthodes de renforcement : collage externe (EB), le collage dans des rainures en surface du béton (NSM), et le collage dans des réservations perforées au sein de la section de béton (ETS) ...et l'interaction entre le renfort du composite par le collage externe et le renfort interne de l'acier transversal.

Dans l'étude expérimental, le test expérimental est réalisé sur des essais de flexion simple trois points sur des poutres rectangulaires avec le renforcement par des fibres de Lin et fibre de verre. Les résultats montrent que le système de renforcement par fibre de Lin peut augmenter significativement la capacité en flexion de poutre béton de 8 à 20%. En comparant entre les deux renforcements par la fibre de lin et la fibre de carbone, le résultat montre que le renforcement par fibre de lin présente une capacité mécanique moins à celle de fibre de carbone dans le renforcement en flexion de poutres béton.

De plus, le traitement thermique des fibres de lin n'est pas recommandé. Ce résultat est contradictoire ceux qu'a trouvé dans la littérature.

Références

- Aiello, M. A., Ascione, L., Baratta, A., Bastianini, F., Battista, U., Benedetti, A., Berardi, V. P., Bilotta, A., Borri, A., & Briccoli, B. (2014). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures.
- Ferrier, E., Michel, L., & Ngo, M. (2021). Experimental study on the shear behavior of RC beams reinforced by natural composite materials (flax fibers). (Ed.),^(Eds.). Structures.
- Hawileh, R., Abdalla, J., & Naser, M. (2019). Modeling the shear strength of concrete beams reinforced with CFRP bars under unsymmetrical loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(15), 1290-1297.
- Hollaway, L. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and building materials*, 24(12), 2419-2445.
- Naser, M., Hawileh, R., & Abdalla, J. (2019). Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*, 198, 109542.
- Ngo, M. D. (2016). *Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites naturels (fibre de lin)*, Université de Lyon].
- Rasheed, H. A., Abdalla, J., Hawileh, R., & Al-Tamimi, A. K. (2017). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded Aluminum Alloy plates. *Engineering Structures*, 147, 473-485.
- Smith, S. T., & Teng, J. (2002). FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, 24(4), 385-395.