

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي بوج بوعريوچ
Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A
قسم الهندسة المدنية
Département de génie civil



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

***Innovations et Stratégies Avancées dans le Renforcement du Béton
pour des Applications Polyvalentes dans le Secteur de la Construction***

Présenté par : BADIS mohammed chakib

SEHILI lekhmissi

Encadré par : Dr. BELKADI Ahmed Abdelraouf

Mme. Benaddache

Promotion 2023 / 2024

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier toute personne ayant contribué à l'aboutissement de ce modeste travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos encadrants, Dr. BELKADI Ahmed Abdelraouf et Dr. NOUI Ammar, pour leur encadrement exceptionnel, leur patience, leur rigueur et leur disponibilité constante tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Leurs conseils avisés et leur expertise nous ont permis de progresser considérablement et d'approfondir nos connaissances dans le domaine.

Nous tenons également à remercier Mme. BENADDACHE Lysa pour son soutien et son aide précieuse dans la recherche de solutions et l'avancement de notre travail. Sa présence constante et ses encouragements nous ont motivés.

Un spécial remerciement aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance au personnel du laboratoire génie civil pour leur disponibilité et leur expertise technique nous ont été d'une grande utilité tout au long de notre projet.

Enfin, nous remercions l'ensemble du corps professoral et du personnel administratif de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj pour leur soutien et leur contribution à notre formation.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à nos chers parents.

*Que Dieu leur accorde une bonne santé et une
longue vie remplie de bonheur.*

Résumé

Ce mémoire explore l'utilisation innovante de composites à fibres végétales, notamment de fibres de lin (FFRP) et de palmier dattier (PDFRP), pour le renforcement en flexion des poutres en béton armé. Une campagne expérimentale approfondie a été menée pour évaluer et comparer les performances structurales offertes par ces différents matériaux composites, selon diverses configurations de renforcement. Les résultats ont démontré des améliorations substantielles en termes de résistance à la flexion et de rigidité pour les poutres renforcées avec les composites FFRP, PDFRP et GFRP. Parmi ceux-ci, les renforts PDFRP et FFRP se sont révélés légèrement supérieurs aux GFRP, offrant des capacités de charge ultimes s'accroissent de 6% et 4% respectivement. La méthode dite EBROG, impliquant le rainurage du béton et l'ancrage mécanique du composite, s'est révélée particulièrement efficace. La configuration EBROG-1Eg-2, avec une rainure aux extrémités de 8 x 10 mm, a permis d'augmenter la capacité de charge ultime de 34% et la rigidité moyenne de 80% par rapport aux poutres témoins. L'analyse des modes de rupture a mis en lumière le rôle clé des propriétés inspirées des fibres végétales dans le contrôle de la fissuration et la distribution des contraintes. Les renforts FFRP à fibres de lin ont démontré une capacité supérieure à limiter l'ouverture et la propagation des fissures principales. Ces résultats soulignent le potentiel prometteur des composites à fibres végétales comme solution durable et performante pour le renforcement des structures en béton armé, offrant des avantages environnementaux et économiques considérables.

Summary

This dissertation explores the innovative use of plant fiber composites, including flax (FFRP) and date palm (PDFRP) fibers, for flexural reinforcement of beams in reinforced concrete. An in-depth experimental campaign was carried out to evaluate and compare the structural performances offered by these different composite materials, according to various reinforcement configurations. The results demonstrated substantial improvements in terms of bending strength and stiffness for beams reinforced with composites FFRP, PDFRP and GFRP. Among these, the PDFRP and FFRP reinforcements were found to be slightly superior to GFRP, providing ultimate load capacities accumulate by 6% and 4% respectively. The so-called EBROG method, involving concrete grooving and anchoring mechanics of the composite, has proven to be particularly effective. The EBROG configuration 1Eg-2, with a groove at the ends of 8 x 10 mm, made it possible to increase the capacity of ultimate load of 34% and average stiffness of 80% compared to the control beams. Analysis modes of rupture highlighted the key role of properties inspired by plant fibers in the control of cracking and stress distribution. FFRP fiber reinforcements flax have demonstrated a superior ability to limit the opening and propagation of cracks main. These results highlight the promising potential of plant fiber composites as a durable and efficient solution for reinforcing reinforced concrete structures, offering considerable environmental and economic benefits.

ملخص

تستكشف هذه الأطروحة الاستخدام المبتكر لمركبات الألياف النباتية، بما في ذلك ألياف الكتان (FFRP) وألياف النخيل (PDFRP) لتقوية الانحناء للعوارض في الخرسانة المسلحة. تم إجراء حملة تجريبية متعمقة للتقييم والمقارنة الأداء الهيكلي الذي تقدمه هذه المواد المركبة المختلفة، وفقا لمختلف تكوينات التعزيز. وأظهرت النتائج تحسينات كبيرة في من حيث قوة الانحناء والصلابة للعتبات المسلحة بالمواد المركبة FFRP ، PDFRP و GFRP. ومن بين هذه التعزيزات، تبين أن تعزيزات قوات PDFRP و FFRP كانت قليلة متفوق على GFRP ، مما يوفر سعة تحميل نهائية متراكمة بنسبة 6% و 4% على التوالي. ما يسمى بطريقة EBROG ، والتي تتضمن حفر الخرسانة وتثبيتها أثبتت ميكانيكا المركب فعاليتها بشكل خاص. تكوين إبروغ 1Eg-2، مع أبعاد في نهايات 8 × 10 مم، جعل من الممكن زيادة قدرة حمل نهائي 34% ومتوسط صلابة 80% مقارنة بعوارض التحكم. تحليل سلطت أنماط التمزق الضوء على الدور الرئيسي للخصائص المستوحاة من الألياف النباتية في السيطرة على التشقق وتوزيع الإجهاد. تعزيزات الألياف FFRP أثبت الكتان قدرة فائقة على الحد من فتح الشقوق وانتشارها رئيسي. تسلط هذه النتائج الضوء على الإمكانيات الواعدة لمركبات الألياف النباتية كحل دائم وفعال لتعزز الهياكل الخرسانية المسلحة، تقديم فوائد بيئية واقتصادية كبيرة.

Table des matières

Introduction générale	12
I. Chapitre 1 : Principes Et Méthodologies De Flexion Des Poutres Béton	15
I.1. Introduction.....	16
I.2. Flexion des poutres : Fondamentaux [1] [2].....	16
I.2.1. Définition de la flexion	16
I.3. Fondamentaux de la flexion dans les structures en béton.	18
I.3.1. Loi de Hooke.....	18
I.3.2. Hypothèse de Bernoulli.....	18
I.3.3. Répartition des contraintes	19
I.3.4. Relation contrainte-déformation.....	19
I.3.5. Fleche	19
I.4. Modes de flexion dans les poutres	21
I.5. Types d'Essais de Flexion sur poutre en Béton : Comparaison et Applications [3]...22	
I.5.1. Essai de flexion par flexion simple (ou essai de flexion à trois points).....	22
I.5.2. Essai de flexion par flexion double (ou essai de flexion à quatre points).....	24
I.5.3. Essai de flexion par flexion dynamique	26
I.6. Méthodologie générale de réhabilitation et de renforcement des structures	27
I.6.1. Évaluation et diagnostic	27
I.6.2. Réparation initiale.....	27
I.6.3. Réhabilitation générale :	27
I.6.4. Renforcement structurel :.....	27
I.7. Mécanisme de rupture en flexion [10].....	28
I.7.1. Matériaux ductiles, tels que poutre en béton armé	28
I.7.2. Matériaux fragiles, tels que la céramique ou le béton non armé	28
I.7.3. Matériaux composites, tels que la fibre de carbone renforcée	28
I.8. Modes de rupture en flexion des poutres en béton armé [11] [12] [13].....	29

I.9.	Méthodes de renforcement des poutres en flexion [14] [15] [16] [17]	29
I.9.1.	Renforcement par ajout d'armatures extérieures	30
I.9.2.	Renforcement par matériaux composites	30
I.9.3.	Chemisage en béton armé	31
I.9.4.	Renforcement par post- tension.....	32
I.10.	Choix entre les différentes méthodes de renforcement	33
I.11.	Conclusion.....	34
II.	Chapitre 2 : Renforcement en flexion avec des matériaux composites	35
II.1.	Introduction.....	36
II.2.	Définition matériaux composites (polymère renforcé de fibres « PRF ») [18]	36
II.3.	Constituants des matériaux composites	37
II.3.1.	Les résines dans les matériaux composites	37
II.3.2.	Résines thermoplastiques [20]	37
II.4.	Les fibres Synthétiques dans les matériaux composites	39
II.4.1.	Fibre de verre (GFRP)	39
II.4.2.	Fibre de carbone (CFRP)	41
II.4.3.	Fibres d'aramide (AFRP)	42
II.5.	Les fibres Naturelles dans les matériaux composites [25], [26]	43
II.5.1.	Principales composants des fibres [27] [28]	43
II.5.2.	Fibre de lin	45
II.5.3.	Fibre de jute	46
II.5.4.	Fibre de chanvre	46
II.6.	Orientation des Fibres dans les Composites [29] [30]	47
II.6.1.	Fibres Unidirectionnelles	47
II.6.2.	Fibres Bidirectionnelles	48
II.6.3.	Tissages Multidirectionnels	48
II.6.4.	Fibres Tressées	49

II.6.5. Fibres 3D.....	49
II.7. Renforcement structurel de poutres en flexion par des composites en PRF	49
II.7.1. Méthodes de renforcement [31] [32].....	50
II.8. Revue de la littérature.....	53
II.9. Conclusion	55
III. Chapitre 3 : Programme Expérimentale.....	56
III.1. Introduction	57
III.2. Variables étudiées et plan expérimental	57
III.3. Caractéristiques des spécimens	57
III.4. Caractéristique des matériaux.....	58
III.4.1. Béton	58
III.4.2. Résine Epoxy	60
III.4.3. Fibre de lin.....	61
III.4.4. Fibre de verre	61
III.5. Fixation des fibres sur des surfaces en béton à l'aide des méthodes EBR et EBROG..	62
III.6. Procédure de test.....	66
III.7. Conclusion.....	68
IV. Chapitre 4 : Résultats Et Discussions	69
IV.1. Introduction	70
IV.2. Évaluation Comparative de la capacité des Composites FFRP, PDFRP et GFRP .	70
IV.3. Evaluation de l'effet des dimensions des rainures.....	71
IV.4. Evaluation du nombre de rainure.....	74
IV.5. Modes de défaillance	75
IV.6. Conclusion.....	77
V. Conclusion Générale Et Perspectives	78
Références Bibliographiques.....	80

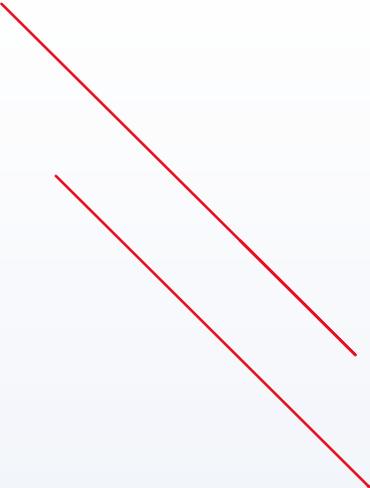
Liste des figures

Figure 1 : Poutre simplement appuyée sous charge concentrée.....	16
Figure 2 : Distribution des zones de compression et de traction dans une poutre fléchie.	17
Figure 3 : Types de chargements et sollicitations pour une poutre en flexion.	18
Figure 4 : Illustration de l'hypothèse des sections planes de Bernoulli pour la flexion des poutres.....	19
Figure 5: contrainte déformation d'une section rectangulaire soumise à la flexion	19
Figure 6 : Schéma de la distribution de charge uniforme sur une poutre simplement appuyée et son impact sur la flèche.	20
Figure 7 : Illustration des indicateurs de déplacement à cadran pour la mesure de la flèche. ...	20
Figure 8 : Illustration des Capteurs LVDT pour la mesure de la flèche dans les tests de déplacement	21
Figure 9 : Configuration expérimentale pour la mesure de déformations par DIC sur une poutre en béton.....	21
Figure 10 : Schéma descriptif de l'essai de flexion à trois points montrant la répartition.	23
Figure 11 : Essais de flexion à trois points sur des échantillons de béton.	24
Figure 12 : Schéma descriptif de l'essai de flexion à quatre points montrant la répartition.	25
Figure 13 : Essais de flexion à quatre points sur des échantillons de béton.	25
Figure 14 : Renforcement par ajout d'armatures extérieures	30
Figure 15 : Renforcement par matériaux composites.....	31
Figure 16 : Chemisage en béton armé	32
Figure 17 : Renforcement par post- tension.....	33
Figure 18 : Comparaison du tracé contrainte-déformation des fibres [24].....	39
Figure 19 : fibre de verre.	40
Figure 20 : fibre de carbone.	41
Figure 21 : fibre d'aramide.	43
Figure 22 : Constituant structurel des fibres végétales	44
Figure 23 : Fibre de lin.	46
Figure 24 : fibre de jute.	46
Figure 25 : fibre de chanvre.	47
Figure 26 : Fibres Unidirectionnelles.	48
Figure 27 : Fibres Bidirectionnelles.	48
Figure 28 : Fibres Tissages Multidirectionnels.	48

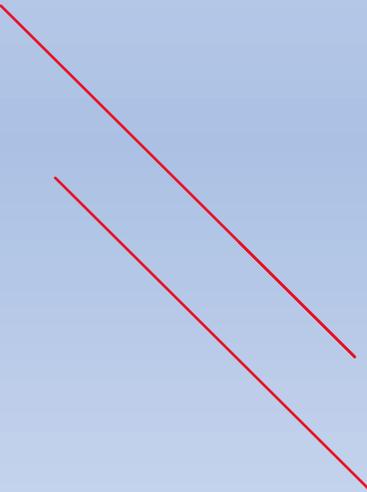
Figure 29 : Fibres Tressées.	49
Figure 30 : Fibres 3D.....	49
Figure 31 : Renforcement structurel par la méthode EBR.....	51
Figure 32 : schéma du renforcement d'une poutre avec la méthode EBR.	51
Figure 33 : Méthode EBROG.	52
Figure 34 : Méthode EBRIG.....	52
Figure 35 : Dimensions minimales des rainures[31].....	53
Figure 36 : Modèles de rainures longitudinales ; (a) rainurage complet ; (b) rainure d'extrémité ; (c) rainurage intermittent.	54
Figure 37 : préparation des matériaux pour les éprouvettes.	59
Figure 39 : résine MEDAPOXY REP	60
Figure 6 : Renforcement EBROG avec 1 rainure.	63
Figure 49 : Configuration expérimentale pour la mesure de déformation.....	67
Figure 50 : Courbes charge-déflexion pour les poutres CB et renforcées par F-EFR, DP-EFR, et G-EFR.	70
Figure 51 : Courbes charge-déflexion des configurations EBROG-Fg et EBROG-1Eg.	71
Figure 52 : Courbes charge-déflexion des configurations EBROG-1Eg et EBROG-2Eg.	74
Figure 53 : Mécanismes de défaillance des échantillons du groupe 1.	75
Figure 54 : Mécanismes de défaillance des échantillons du groupe 2 et 3.....	76

Liste des tableau

Tableau 1 : Propriétés des résines polymères thermodurcissables[20] [23].	38
Tableau 2 : Propriétés des fibres de verre [20] [23].	39
Tableau 3 : Propriétés des fibres de carbone[20] [23].	41
Tableau 4 : Propriétés des fibres d'aramide [20] [23].....	42
Tableau 5 : sont principales composant des fibres végétales [27].....	46
Tableau 6 : configuration des éprouvettes.	57
Tableau 7 : Propriétés des fibres de lin [42]	60
Tableau 8 : Propriétés des fibres de verre [43].....	60



Introduction générale



Introduction générale

L'optimisation des performances des structures en béton armé est un enjeu majeur de l'ingénierie civile, confrontée aux défis du vieillissement des infrastructures, de l'augmentation des charges d'exploitation, et des nouvelles exigences en matière de durabilité et de sécurité. Les méthodes traditionnelles de renforcement peuvent se révéler insuffisantes pour répondre à ces exigences, ce qui soulève la nécessité d'explorer des solutions innovantes. Parmi celles-ci, l'utilisation des matériaux composites, notamment les polymères renforcés de fibres (PRF), offre une alternative prometteuse en raison de leur haute performance en termes de résistance, légèreté et résistance à la corrosion. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail intitulé "Innovations et Stratégies Avancées dans le Renforcement du Béton pour des Applications Polyvalentes dans le Secteur de la Construction".

Ce mémoire se focalise sur le renforcement en flexion des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites, explorant à la fois les composites traditionnels tels que les fibres de verre et de carbone, et les composites à base de fibres naturelles comme le lin et le jute. À travers une approche méthodique, ce travail examine les fondamentaux de la flexion des poutres, les propriétés des matériaux composites, et leur application dans le renforcement des structures en béton. L'objectif est d'offrir une compréhension approfondie des interactions entre ces matériaux et les structures qu'ils sont destinés à renforcer, en évaluant leur efficacité et en identifiant les meilleures pratiques et innovations potentielles dans le domaine du renforcement structurel.

Le premier chapitre, Présente les principes de la flexion des poutres en béton et les méthodes traditionnelles de renforcement. Il commence par définir la flexion et explique les forces de compression et de traction qui appartiennent aux poutres. Le chapitre présente aussi les différentes propriétés du béton qui influencent sa capacité à résister à ces forces, telles que la ductilité et la résistance à la rupture. Il discute également des techniques conventionnelles de renforcement et examine leurs avantages et limites pour diverses applications de construction. Cette section établit un cadre solide pour comprendre les défis et solutions associés au renforcement des structures en béton.

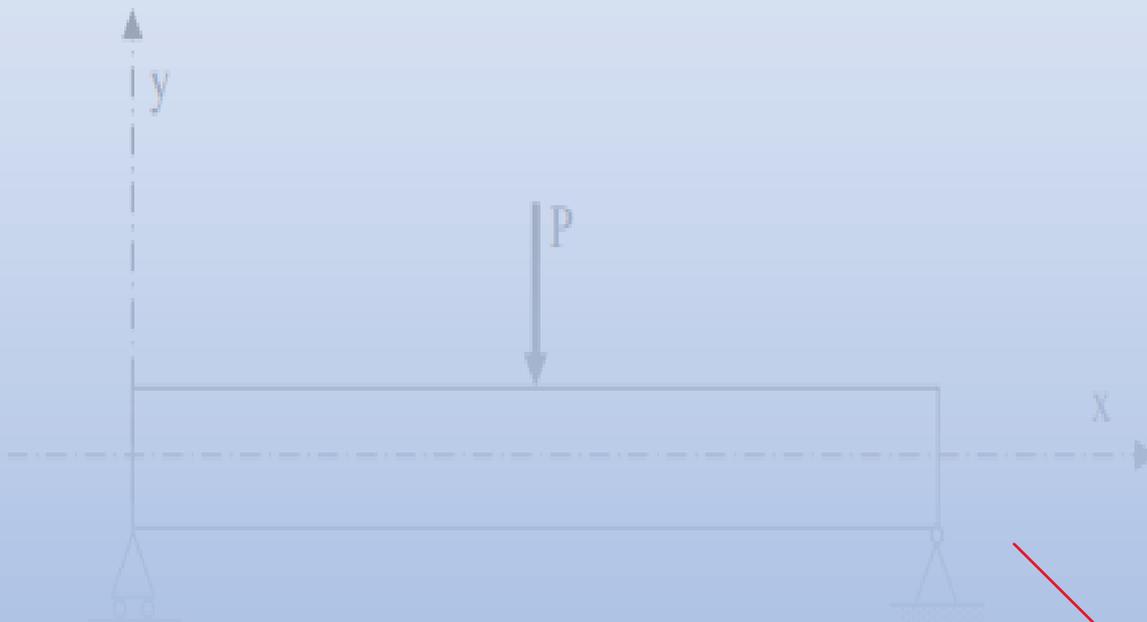
Le second chapitre, se concentre sur les propriétés et applications des matériaux composites dans le renforcement des poutres en béton. Il détaille les caractéristiques des composites comme les composites de Polymères Renforcés de Fibre de Carbone (CFRP) et Polymères Renforcés de Fibre de Verre (GFRP).

Troisième chapitre, décrit un programme expérimental élaboré pour tester l'efficacité des matériaux composites sur des poutres en béton. La méthodologie inclut la préparation des échantillons de poutres, les configurations de test, et les instruments de mesure utilisés pour évaluer les propriétés comme la résistance à la flexion. Il fournit une explication détaillée des protocoles d'essai, de la collecte de données et de leur analyse.

Enfin, le chapitre quatre, L'analyse des résultats obtenus à partir des tests expérimentaux est présentée dans ce chapitre, avec une discussion sur leurs implications pour les futures recherches et applications pratiques. Il est évalué si les matériaux composites répondent aux attentes théoriques et performe bien sous conditions contrôlées. Le chapitre identifie également les limites des études actuelles.

I. Chapitre 1 :

Principes Et Méthodologies De Flexion Des Poutres Béton



I.1. Introduction

Ce chapitre explore les fondements théoriques et les méthodes pratiques du renforcement des poutres en flexion. En mettant en lumière l'importance de la compréhension des mécanismes de flexion et de déformation sous divers types de charges, nous introduisons les principales techniques utilisées pour augmenter la résistance et la rigidité en flexion des poutres en béton. Ces fondements théoriques et les méthodes pratiques nous permettront de mieux comprendre les enjeux, les avantages et les inconvénients de chaque technique, afin de poser les bases pour l'étude du renforcement des poutres en flexion avec des matériaux composites, qui sera abordée dans les chapitres suivant.

I.2. Flexion des poutres : Fondamentaux [1] [2]

Comprendre la flexion des poutres revêt une importance capitale dans le domaine de l'ingénierie des constructions et des structures. En effet, la capacité d'une poutre à résister à la flexion détermine sa performance et sa durabilité dans diverses applications telles que les ponts, les bâtiments, les machines, etc. Une compréhension approfondie de la flexion permet d'optimiser la conception des éléments structuraux, de garantir leur sécurité et leur fiabilité, et d'assurer une utilisation efficace des matériaux.

I.2.1. Définition de la flexion

La flexion des poutres désigne la déformation d'une poutre sous l'effet d'une charge transversale appliquée perpendiculairement à son axe longitudinal. Cette charge provoque une courbure de la poutre, représentée par le déplacement vertical observé sur l'image.

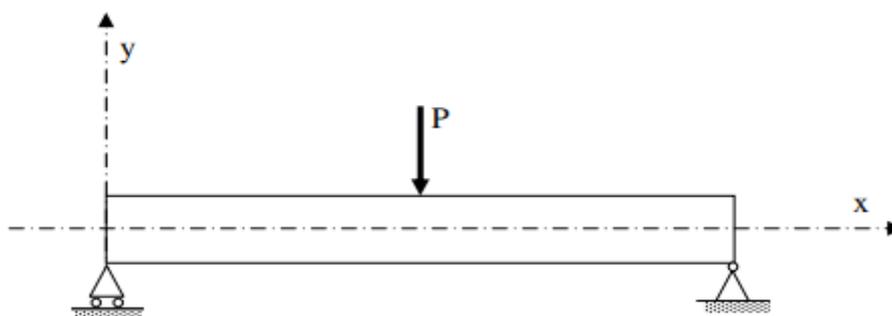


Figure 1 : Poutre simplement appuyée sous charge concentrée.

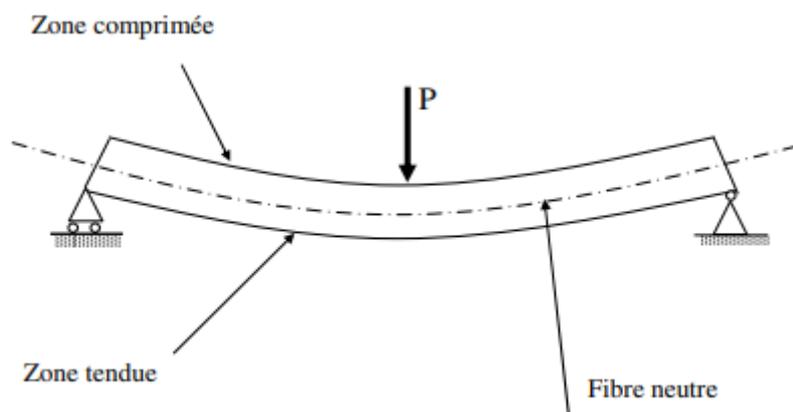


Figure 2 : Distribution des zones de compression et de traction dans une poutre fléchie.

Lorsqu'une poutre est soumise à une charge qui induit une flexion, elle subit des déformations qui se manifestent différemment le long de sa section transversale, en particulier au niveau des fibres inférieure et supérieure.

- **Zone de Compression (Fibres Inférieures) :** Cette zone se trouve du côté où la poutre se courbe vers l'intérieur sous l'effet de la charge appliquée, affectant principalement les fibres situées en dessous de l'axe neutre. Dans cette zone, les fibres inférieures sont comprimées, entraînant une contraction longitudinale et une augmentation des contraintes internes. La capacité de la poutre à résister à cette compression dépend de la résistance du matériau constitutif dans cette région, ainsi que de la géométrie de la section transversale.
- **Zone de Traction (Fibres Supérieures) :** À l'opposé de la zone de compression, la zone de traction concerne principalement les fibres situées au-dessus de l'axe neutre, où la poutre se courbe vers l'extérieur sous l'effet de la charge. Dans cette zone, les fibres supérieures subissent une tension, provoquant un allongement longitudinal et une augmentation des contraintes internes. La résistance à la traction des fibres supérieures est essentielle pour maintenir l'intégrité structurelle de la poutre dans cette zone et pour assurer sa capacité à supporter les charges appliquées.
- **Appuis :** Les poutres reposent sur des appuis qui déterminent leur réaction aux forces extérieures. Les différents types d'appuis (fixes, articulés, glissants) influent sur le comportement de la poutre en flexion.
- **Chargement :** Les poutres peuvent être soumises à différents types de chargements tels que des charges concentrées, des charges réparties, des moments, etc. Chaque type de chargement induit des contraintes spécifiques dans la poutre.

- **Chargement concentré** : Une force appliquée en un point spécifique de la poutre, générant un moment fléchissant localisé.
- **Chargement réparti** : Une charge uniformément répartie le long de la poutre, créant un moment fléchissant continu sur sa longueur.
- **Moments** : Des moments peuvent également être appliqués, induisant des courbures spécifiques dans la poutre.

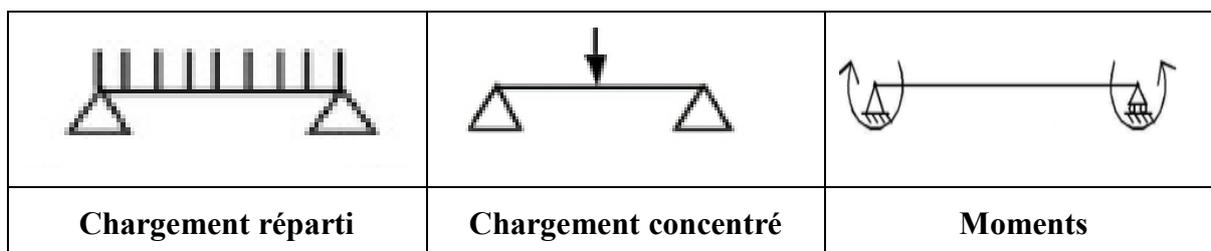


Figure 3 : Types de chargements et sollicitations pour une poutre en flexion.

I.3. Fondamentaux de la flexion dans les structures en béton.

Les principes de base de la flexion sont des concepts fondamentaux en mécanique des structures et en résistance des matériaux. Ils décrivent le comportement des éléments structurels, comme les poutres, lorsqu'ils sont soumis à des charges qui provoquent leur courbure. Voici les principes clés :

I.3.1. Loi de Hooke

Dans le domaine élastique linéaire, la contrainte σ est proportionnelle à la déformation ε , selon la relation $\sigma = E \cdot \varepsilon$, où E est le module d'élasticité du matériau (module de Young). Cela signifie que la courbure d'une poutre est directement proportionnelle au moment fléchissant appliqué. En d'autres termes, lorsque des forces sont appliquées à un matériau, celui-ci se déforme dans une mesure qui dépend de la force appliquée. Dans le contexte de la flexion d'une poutre, cette loi implique que la courbure de la poutre est directement proportionnelle au moment fléchissant appliqué. Cette relation linéaire entre la contrainte et la déformation est une caractéristique fondamentale des matériaux élastiques et est essentielle pour comprendre le comportement des structures sous charge.

I.3.2. Hypothèse de Bernoulli

Les sections transversales qui sont perpendiculaires à l'axe neutre avant la déformation restent planes et perpendiculaires à cet axe après la déformation.

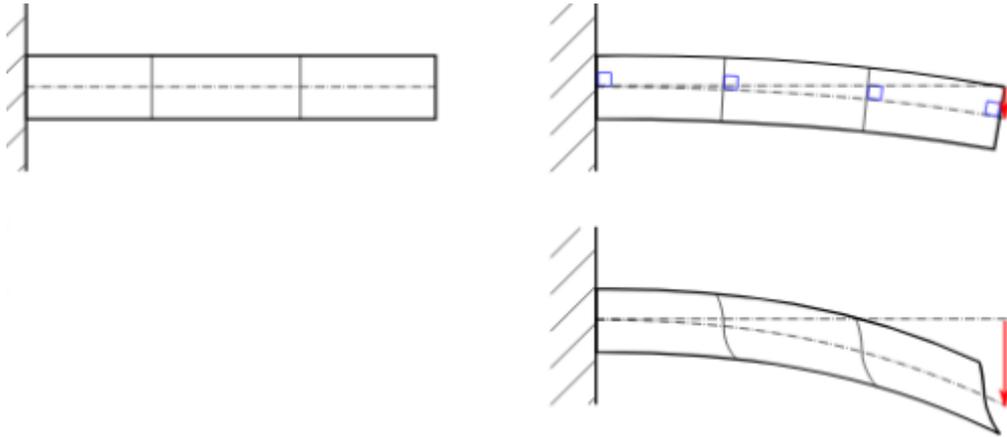


Figure 4 : Illustration de l'hypothèse des sections planes de Bernoulli pour la flexion des poutres.

I.3.3. Répartition des contraintes

Les contraintes normales varient linéairement sur la hauteur de la section transversale, atteignant un maximum aux fibres les plus éloignées de l'axe neutre.

I.3.4. Relation contrainte-déformation

La déformation ε d'une fibre située à une distance x de l'axe neutre est proportionnelle à cette distance, selon la relation $\varepsilon = (x/\rho)$, où ρ est le rayon de courbure de la poutre à cet endroit. Combinée avec la loi de Hooke, cela donne $\sigma = E \cdot (x/\rho)$. En d'autres termes, plus une fibre est éloignée de l'axe neutre, plus elle subit de déformation sous l'effet de la flexion, conformément à la loi de Hooke.

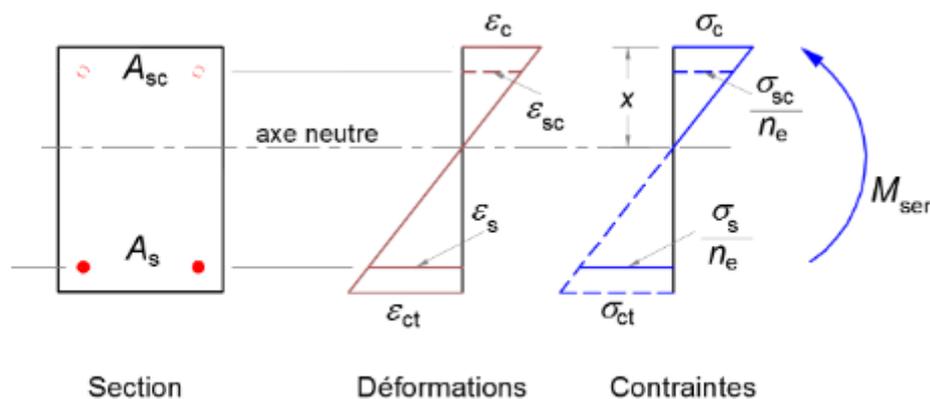


Figure 5: contrainte déformation d'une section rectangulaire soumise à la flexion

I.3.5. Fleche

La flèche, ou déplacement vertical, elle désigne la déformation transversale maximale d'une structure sous charge. Ce paramètre est particulièrement pertinent dans les études de renforcement en flexion des éléments structuraux tels que les poutres et les dalles. En contexte de flexion, la flèche est une mesure cruciale de la déformation due aux moments fléchissant

Chapitre 1 : Principes et Méthodologies de flexion des poutres en béton

induits par les charges appliquées. Elle est généralement calculée à partir de la théorie de la flexion des poutres d'Euler-Bernoulli, qui suppose que la déformation est proportionnelle au moment fléchissant et inversement proportionnelle à la rigidité de la poutre, cette dernière étant le produit du module d'élasticité du matériau et du moment d'inertie de la section transversale. Elle est obtenue en intégrant deux fois l'équation différentielle de la ligne élastique, qui relie la courbure de la poutre ($1/\rho$) au moment fléchissant $M(x)$ le long de la poutre, selon l'équation : $(1/\rho) = M(x) / (E \cdot I)$ où I est le moment d'inertie de la section transversale.

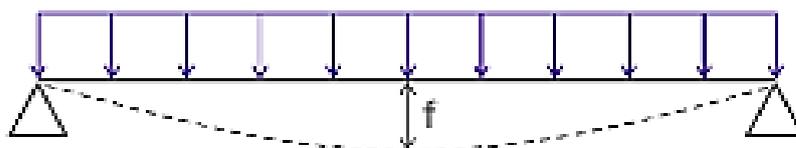


Figure 6 : Schéma de la distribution de charge uniforme sur une poutre simplement appuyée et son impact sur la flèche.

Pour mesurer expérimentalement la flèche, divers outils et dispositifs peuvent être utilisés, parmi lesquels :

- **Indicateurs de déplacement à cadran (Dial Indicators) :** Ce sont des instruments très précis qui permettent de mesurer de petits déplacements et sont souvent utilisés pour les tests de flèche sur des échantillons de matériaux dans des laboratoires.

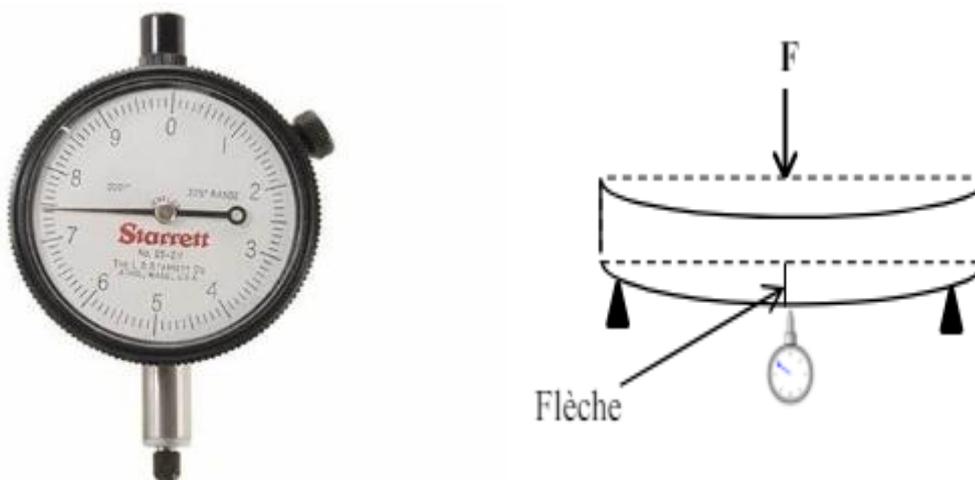


Figure 7 : Illustration des indicateurs de déplacement à cadran pour la mesure de la flèche.

- **Capteurs de déplacement linéaire (LVDT, Linear Variable Differential Transformer) :** Ces capteurs offrent une méthode électronique pour mesurer la flèche en fournissant des données numériques précises sur les déplacements.

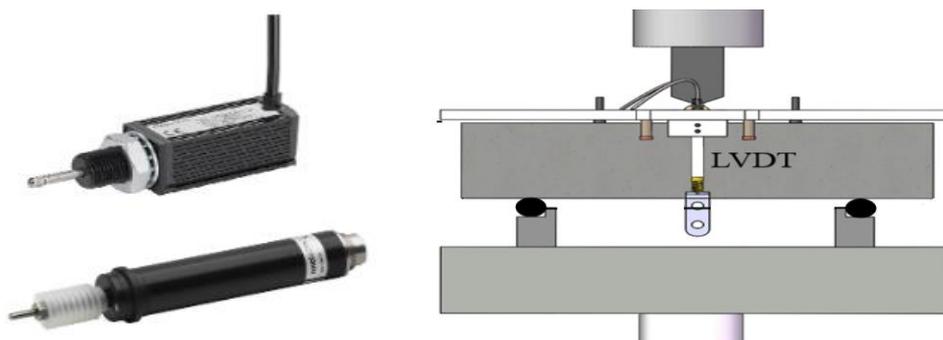


Figure 8 : Illustration des Capteurs LVDT pour la mesure de la flèche dans les tests de déplacement

- **Photogrammétrie (DIC, Digital Image Correlation)** : Cette technique utilise la capture d'image pour mesurer les déplacements et les déformations des structures en utilisant des caméras à haute résolution. Elle est particulièrement utile pour les grandes structures où les méthodes de contact ne sont pas pratiques.

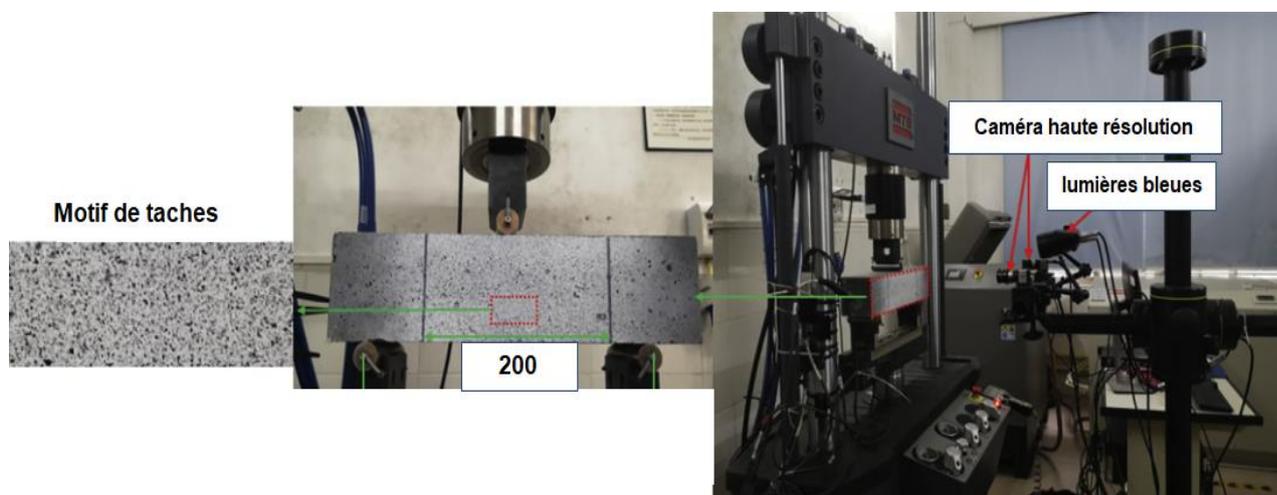


Figure 9 : Configuration expérimentale pour la mesure de déformations par DIC sur une poutre en béton.

I.4. Modes de flexion dans les poutres

- **Flexion pure** C'est le cas idéal où la poutre est soumise uniquement à un moment fléchissant constant, sans effort normal ni effort tranchant. Les sections restent planes après déformation.
- **Flexion simple** Une poutre soumise à des charges transversales subit une flexion autour d'un de ses axes principaux d'inertie. Les efforts internes sont le moment fléchissant $M(x)$ et l'effort tranchant $V(x)$.
- **Flexion composée** Lorsqu'il y a simultanément un effort normal N (compression ou traction) et un moment fléchissant $M(x)$. Les efforts internes sont N , $M(x)$ et $V(x)$.
- **Flexion déviée** Cas particulier de flexion composée où N et $M(x)$ ne sont pas dans les plans principaux d'inertie. Les efforts sont N , M_x , M_y et V .

- **Flexion composée déviée** C'est une combinaison de la flexion composée et de la flexion déviée. La poutre est soumise à un effort normal N excentré, engendrant des moments fléchissants M_x et M_y autour des deux axes principaux, ainsi qu'un effort tranchant V . Les efforts internes sont N , M_x , M_y et V .
- **Flexion biaxiale** La poutre est fléchie autour de ses deux axes principaux par des moments M_x et M_y . Les efforts sont M_x , M_y et V .

I.5. Types d'Essais de Flexion sur poutre en Béton : Comparaison et Applications [3]

Lors d'un essai de flexion sur un matériau, diverses caractéristiques peuvent être évaluées. Les données obtenues, telles que la résistance à la flexion ou la déflexion maximale, révèlent la performance spécifique du matériau à la surface soumise aux contraintes de flexion.

Les résultats d'essai / grandeurs caractéristiques typiques sont :

- Essai de résistance des matériaux
- Calcul des contraintes et déformations de flexion
- Le module de flexion
- Rigidité à la flexion
- Résistance à la flexion
- La contrainte à un allongement
- Les contraintes et allongements à la limite d'élasticité et à la rupture éprouvette
- etc.

I.5.1. Essai de flexion par flexion simple (ou essai de flexion à trois points)

L'essai de flexion par flexion simple, également connu sous le nom d'essai de flexion à trois points, est l'un des essais les plus courants et des plus simples à mettre en œuvre. Cet essai est souvent utilisé pour les matériaux fragiles, tels que certains types de céramiques ou de verres. Cet essai est bien adapté à ces matériaux car il permet de déterminer leur résistance à la flexion ou leur résistance à la rupture sous une charge concentrée, ce qui est particulièrement utile pour évaluer les matériaux qui n'ont pas une grande capacité de déformation avant de rompre.

Dans l'essai à trois points, le fait que la charge soit appliquée en un seul point central produit une concentration de contrainte qui peut provoquer la rupture du matériau à ce point. Pour les matériaux fragiles, qui ont tendance à se briser plutôt qu'à se déformer de manière plastique, cet essai permet de mesurer directement la charge maximale que le matériau peut supporter

Chapitre 1 : Principes et Méthodologies de flexion des poutres en béton

avant de se fissurer ou de se rompre. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et fournit des informations précieuses sur la résistance mécanique des matériaux fragiles sous des charges de flexion. Cependant, bien qu'utile pour déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau telles que la résistance à la flexion et le module d'élasticité, présente des limitations lorsqu'il s'agit de tester des matériaux ductiles jusqu'à la rupture. Cet essai est souvent utilisé pour évaluer le comportement des matériaux jusqu'à leur limite élastique, mais pas toujours jusqu'à la rupture complète, surtout si le matériau est très ductile.

Dans un essai de flexion à trois points, le matériau est supporté à deux points à ses extrémités et une charge est appliquée au milieu. Pour les matériaux ductiles, le point de charge peut induire une concentration de contrainte locale (**fig. 8**) qui peut mener à une déformation plastique sans nécessairement causer la rupture de l'échantillon, surtout si l'échantillon est suffisamment ductile pour se déformer considérablement sans se rompre.

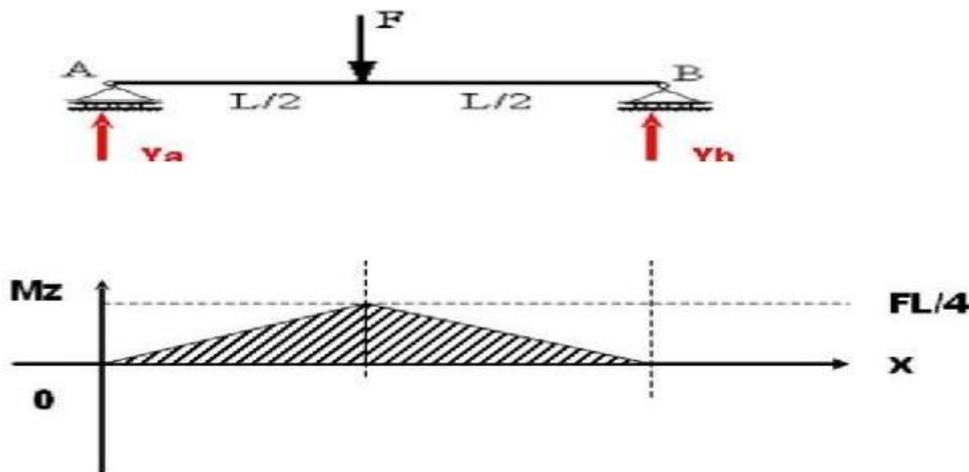


Figure 10 : Schéma descriptif de l'essai de flexion à trois points montrant la répartition.

Le mode opératoire de cet essai implique les étapes suivantes : préparation de l'éprouvette selon les normes ASTM C78 / C78M [4], positionnement de l'éprouvette sur la machine de flexion universelle, application d'une charge à mi-portée sur l'éprouvette jusqu'à la rupture ou jusqu'à atteindre une déformation spécifiée, enregistrement des données de charge et de déformation, et calcul de la résistance à la flexion et du module de flexion du béton.

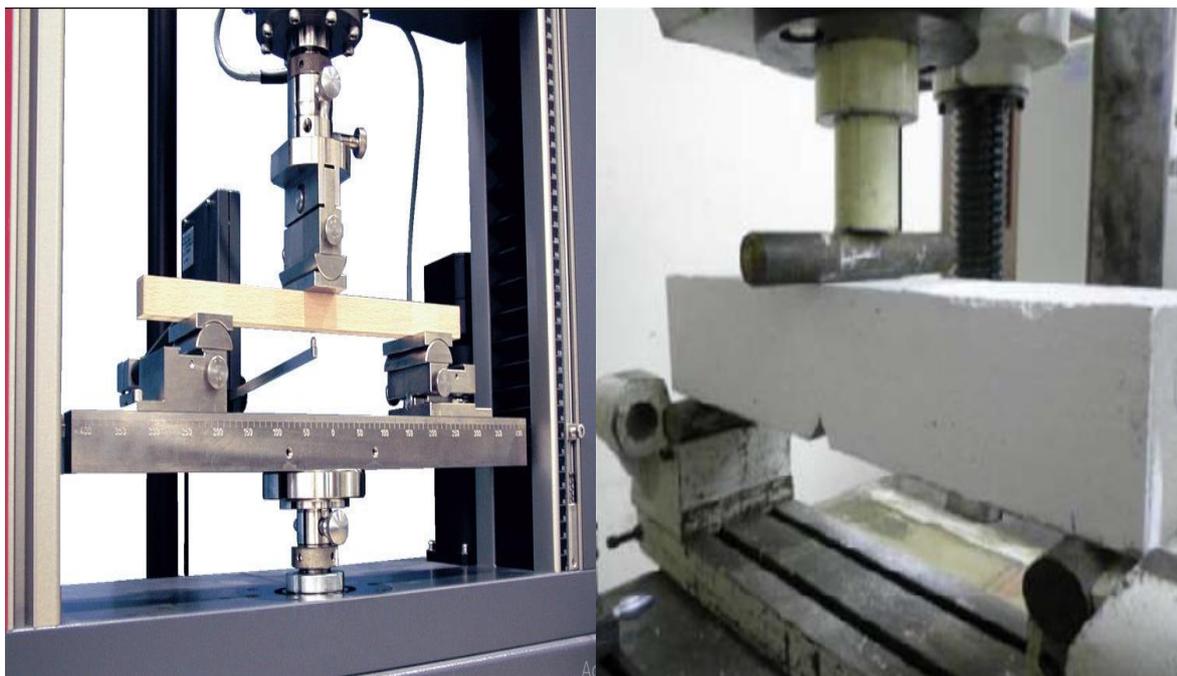


Figure 11 : Essais de flexion à trois points sur des échantillons de béton.

Le dispositif utilisé pour cet essai est une machine de flexion universelle composée d'un cadre rigide avec des supports réglables pour placer l'éprouvette. Un dispositif de chargement à trois points est utilisé pour appliquer la charge à mi- portée sur l'éprouvette. Des capteurs de force et de déplacement sont intégrés pour mesurer la charge appliquée et la déformation de l'éprouvette pendant l'essai.

1.5.2. Essai de flexion par flexion double (ou essai de flexion à quatre points)

L'essai de flexion par flexion double, également appelé essai de flexion à quatre points est considéré comme un essai de flexion pure. Cet essai peut être plus approprié pour tester des matériaux ductiles jusqu'à la rupture. Cette méthode offre certains avantages par rapport à l'essai de flexion à trois points, en particulier dans la manière dont la charge et les contraintes sont distribuées sur l'échantillon.

Dans un essai de flexion à quatre points, la charge est appliquée via deux forces égales, mais séparées, situées entre les deux appuis. Cela crée une région de moment constant entre les deux points de charge, où la contrainte est plus uniformément répartie sur une plus grande longueur de l'échantillon. Cette configuration permet d'éviter la concentration de contrainte excessive au point de charge que l'on trouve dans l'essai à trois points.

Pour les matériaux ductiles, cela signifie que l'échantillon peut être testé de manière plus équilibrée, augmentant la probabilité d'observer la rupture réelle du matériau plutôt que simplement sa déformation plastique. L'essai à quatre points peut donc fournir une meilleure

Chapitre 1 : Principes et Méthodologies de flexion des poutres en béton

compréhension de la résistance à la rupture et de la ductilité d'un matériau. Cependant, cet essai nécessite un dispositif de chargement plus complexe et est généralement plus coûteux à mettre en œuvre que l'essai à trois points.

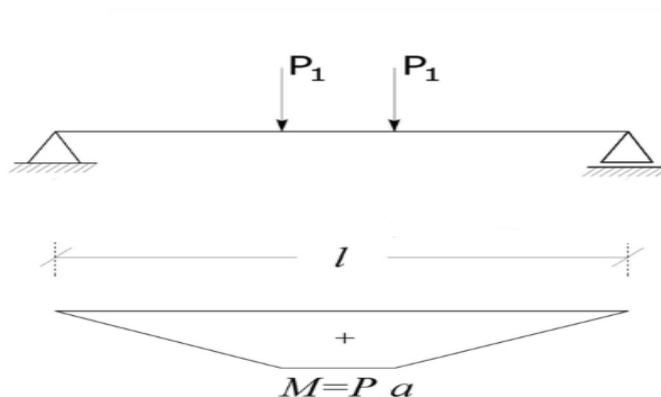


Figure 12 : Schéma descriptif de l'essai de flexion à quatre points montrant la répartition.

Le mode opératoire de cet essai comprend les étapes suivantes : préparation de l'éprouvette selon les normes ASTM C293/C293M[5], positionnement de l'éprouvette sur la machine de flexion à quatre points, application de charges sur les deux zones de flexion de l'éprouvette jusqu'à la rupture ou jusqu'à atteindre une déformation spécifiée, enregistrement des données de charge et de déformation, et calcul de la résistance à la flexion et du module de flexion du béton.



Figure 13 : Essais de flexion à quatre points sur des échantillons de béton.

La machine de flexion à quatre points est similaire à la machine de flexion universelle mais dispose de deux dispositifs de chargement à quatre points chacun, créant ainsi deux zones de flexion. Les charges sont appliquées sur les deux zones de flexion de manière symétrique pour évaluer le comportement de l'éprouvette dans des conditions de flexion plus complexes.

I.5.3. Essai de flexion par flexion dynamique

L'essai de flexion dynamique, également connu sous le nom d'essai de fatigue en flexion, est utilisé pour évaluer la résistance à la fatigue et la durabilité des poutres en béton armé sous des charges cycliques répétitives. Cet essai simule les conditions de service réelles auxquelles les structures sont soumises, comme les charges de trafic ou les charges sismiques.

Lors de cet essai, une charge cyclique est appliquée sur l'éprouvette, généralement à l'aide d'un dispositif de flexion à trois ou quatre points. Les données de charge et de déformation sont enregistrées pendant un certain nombre de cycles, permettant d'analyser le comportement de l'éprouvette sous des conditions de fatigue.

Les modes de rupture observés lors de l'essai de flexion dynamique peuvent inclure la rupture par fatigue, caractérisée par la formation et la propagation progressive de fissures, ou la rupture par surcharge, lorsque l'éprouvette atteint sa limite de résistance ultime sous les charges cycliques.

L'avantage principal de l'essai de flexion dynamique est qu'il fournit des informations cruciales sur la durabilité et la résistance à long terme des poutres en béton armé, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité des structures soumises à des charges répétitives.

Le mode opératoire de cet essai implique les étapes suivantes : préparation de l'éprouvette selon les normes, positionnement de l'éprouvette sur la machine d'essai de fatigue ou de flexion dynamique, application d'une charge cyclique sur l'éprouvette pour simuler des conditions de flexion répétées, enregistrement des données de charge et de déformation pendant un certain nombre de cycles, et analyse de la résistance à la fatigue et de la durabilité du béton armé sous des conditions de charge variables.

La machine d'essai de fatigue ou de flexion dynamique est conçue pour appliquer des charges cycliques sur l'éprouvette. Elle est équipée de capteurs de force, de déplacement et parfois de température pour surveiller les paramètres pendant l'essai. Certains dispositifs peuvent également inclure des systèmes de contrôle pour programmer des cycles de charge spécifiques. Ces essais dynamiques permettent d'évaluer le comportement des poutres en béton armé sous des charges répétitives, simulant ainsi les conditions réelles de service auxquelles elles seront soumises.

I.6. Méthodologie générale de réhabilitation et de renforcement des structures

La réhabilitation et le renforcement des structures existantes nécessitent une approche méthodique rigoureuse afin de garantir l'intégrité et la pérennité de l'ouvrage. Cette méthodologie globale comprend plusieurs étapes clés : l'évaluation initiale de l'état de la structure, les réparations préliminaires, la réhabilitation générale, et si nécessaire, le renforcement structurel pour répondre aux nouvelles exigences [6] [7].

I.6.1. Évaluation et diagnostic

Avant de commencer tout travail de réhabilitation, il est essentiel de réaliser une évaluation complète de l'état de la structure, incluant l'identification des pathologies. Cela comprend l'inspection visuelle, l'analyse des matériaux, les tests de résistance, les évaluations de la charge, etc. Cette étape permet d'identifier les problèmes existants, les zones de détérioration, les défauts structurels et les besoins de réparation ou de renforcement, ainsi que les pathologies éventuelles.

I.6.2. Réparation initiale

Dans de nombreux cas, les pathologies spécifiques identifiées lors de l'évaluation initiale peuvent nécessiter des réparations immédiates pour prévenir une détérioration supplémentaire de la structure. Par conséquent, les réparations localisées, telles que le colmatage des fissures, le remplacement de sections endommagées ou le renforcement de zones critiques, peuvent être effectuées en premier pour stabiliser la structure.

I.6.3. Réhabilitation générale :

Une fois que les réparations initiales ont été effectuées, la réhabilitation générale de la structure peut commencer, prenant en compte les pathologies identifiées. Cela implique souvent des travaux plus importants pour restaurer la fonctionnalité et la durabilité de la structure dans son ensemble. Il peut s'agir de travaux tels que le remplacement de pièces structurelles importantes, la correction de défauts de conception, l'amélioration de l'isolation thermique ou acoustique, etc [8].

I.6.4. Renforcement structurel :

Si nécessaire, le renforcement structurel est effectué après la réhabilitation générale pour améliorer la capacité de la structure à supporter des charges supplémentaires, à résister à des contraintes sismiques ou à prolonger sa durée de vie, tout en tenant compte des

pathologies identifiées. Cela peut impliquer l'ajout d'armatures supplémentaires, de matériaux de renforcement, de systèmes de précontrainte, etc. Le renforcement vise à augmenter la résistance et la stabilité de la structure selon les exigences spécifiques du projet, en prenant en compte les pathologies diagnostiquées [9].

I.7. Mécanisme de rupture en flexion [10]

Les mécanismes de rupture courants en flexion pour différents types de matériaux sont :

I.7.1. Matériaux ductiles, tels que poutre en béton armé

Déformation plastique progressive : Sous une charge croissante, la poutre subit une déformation élastique initiale. Au-delà de la limite élastique, le matériau commence à se déformer plastiquement, ce qui signifie qu'il conserve une déformation permanente même après le retrait de la charge. Cette déformation plastique peut se produire de manière progressive, avec une courbe de contrainte-déformation caractéristique montrant un plateau après la limite élastique avant de monter à nouveau.

Formation de zones de déformation : En flexion, les zones de compression et de traction se forment sur la poutre. Les zones de compression sont soumises à des contraintes compressives, tandis que les zones de traction subissent des contraintes de traction. Ces zones peuvent se déplacer le long de la poutre à mesure que la charge augmente, entraînant une déformation continue jusqu'à ce que la rupture se produise.

I.7.2. Matériaux fragiles, tels que la céramique ou le béton non armé

Rupture par propagation de fissures : Les matériaux fragiles ont tendance à se rompre brusquement sans montrer de déformation plastique significative. Sous une charge de flexion, des fissures commencent à se former à des points de contrainte élevée, tels que les coins ou les défauts microscopiques dans le matériau. Ces fissures se propagent rapidement à mesure que la charge augmente, entraînant une rupture brutale de la poutre sans avertissement préalable.

I.7.3. Matériaux composites, tels que la fibre de carbone renforcée

Combinaison de déformations plastiques et de rupture par délamination : Les matériaux composites présentent une combinaison de comportements ductiles et fragiles en fonction de leur composition et de la direction de la charge. La délamination, où les couches du composite se séparent, peut se produire sous une charge de flexion, entraînant une perte de résistance structurelle.

Interaction entre les phases : Les matériaux composites ont souvent une matrice polymère et des renforts fibreux. La rupture peut survenir au niveau de l'interface entre ces phases, où les contraintes peuvent être concentrées.

I.8. Modes de rupture en flexion des poutres en béton armé [11] [12] [13]

Les poutres en béton armé soumises à la flexion peuvent subir différents modes de rupture en fonction de la conception, des matériaux, du chargement et des conditions environnementales. Voici une explication plus détaillée des principaux modes de rupture en flexion :

a) Rupture par traction dans le béton : Ce mode de rupture se produit lorsque les contraintes de traction dans le béton dépassent sa résistance à la traction. Des fissures se forment d'abord dans la zone tendue, généralement du côté inférieur de la poutre. Ces fissures se propagent progressivement vers le haut, entraînant finalement une rupture fragile de la poutre.

b) Rupture par écrasement du béton en compression : Dans ce cas, les contraintes de compression dans le béton atteignent la résistance ultime en compression du béton, provoquant un écrasement local des fibres comprimées, généralement dans la zone supérieure de la poutre. Cela entraîne une perte de capacité portante et peut conduire à une rupture soudaine de la poutre.

c) Rupture par flambement des armatures longitudinales : Lorsque les armatures longitudinales sont insuffisamment maintenues par les étriers transversaux, elles peuvent flamber sous l'effet des contraintes de compression élevées, entraînant une perte de capacité portante.

d) Rupture par cisaillement : Ce mode de rupture se produit lorsque les efforts tranchants dépassent la résistance au cisaillement de la poutre. Des fissures diagonales apparaissent, généralement dans les zones d'effort tranchant élevé, près des appuis ou des charges concentrées.

e) Rupture par adhérence : Dans ce cas, la liaison entre le béton et les armatures longitudinales est compromise, entraînant un glissement relatif entre les deux matériaux. Cela peut se produire en raison d'une mauvaise conception des longueurs d'ancrage ou d'un recouvrement insuffisant du béton.

I.9. Méthodes de renforcement des poutres en flexion [14] [15] [16] [17]

Les principales méthodes de renforcement des poutres en flexion abordées comprennent le renforcement par l'ajout d'armatures extérieures, le renforcement par matériaux composites, le chemisage en béton armé, et le renforcement par post-tension.

I.9.1. Renforcement par ajout d'armatures extérieures

- **Principe**

Cette méthode consiste à ajouter des barres d'armature supplémentaires à l'extérieur de la poutre existante, en les fixant généralement à l'aide de boulons d'ancrage. Ces armatures extérieures sont positionnées de manière à augmenter la résistance à la flexion et à limiter les contraintes de traction dans le béton.



Figure 14 : Renforcement par ajout d'armatures extérieures

- **Avantages et inconvénients**

L'avantage principal de cette technique est sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût relatif. Cependant, elle présente également des inconvénients tels que l'augmentation de la section transversale de la poutre, ce qui peut poser des problèmes d'espace ou d'intégration architecturale, ainsi que la nécessité de protéger les armatures extérieures contre la corrosion.

- **Applications**

Le renforcement par ajout d'armatures extérieures est couramment utilisé pour les poutres de bâtiments résidentiels ou commerciaux, les poutres de ponts ou de passerelles, ainsi que pour les structures industrielles où l'augmentation de la capacité portante est requise.

I.9.2. Renforcement par matériaux composites

- **Principe**

Cette méthode implique l'utilisation de matériaux composites à fibres, tels que les fibres de carbone (CFRP) ou les fibres d'aramide (AFRP), pour renforcer les poutres en flexion. Ces

matériaux sont généralement appliqués sur la surface tendue de la poutre sous forme de tissus, de stratifiés ou de lamelles, en utilisant une résine époxy comme adhésif.



Figure 15 : Renforcement par matériaux composites

- **Avantages et inconvénients**

Les principaux avantages des matériaux composites sont leur haute résistance à la traction, leur légèreté et leur facilité d'application. Cependant, leur coût élevé, leur sensibilité aux dommages mécaniques et aux conditions environnementales (comme les rayons UV et les températures élevées), ainsi que la nécessité d'une préparation minutieuse de la surface, sont des inconvénients à prendre en compte.

- **Applications**

Le renforcement par matériaux composites est particulièrement adapté aux structures où l'espace est limité ou lorsqu'il est nécessaire de minimiser l'augmentation des charges permanentes. Il est couramment utilisé pour le renforcement de poutres dans des bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels, ainsi que pour les ponts et les infrastructures de transport.

1.9.3. Chemisage en béton armé

- **Principe**

Cette technique consiste à envelopper la poutre existante avec une nouvelle couche de béton armé, généralement renforcée par des barres d'armature supplémentaires. Le chemisage en béton armé augmente la section transversale de la poutre, améliorant ainsi sa résistance à la flexion et au cisaillement.

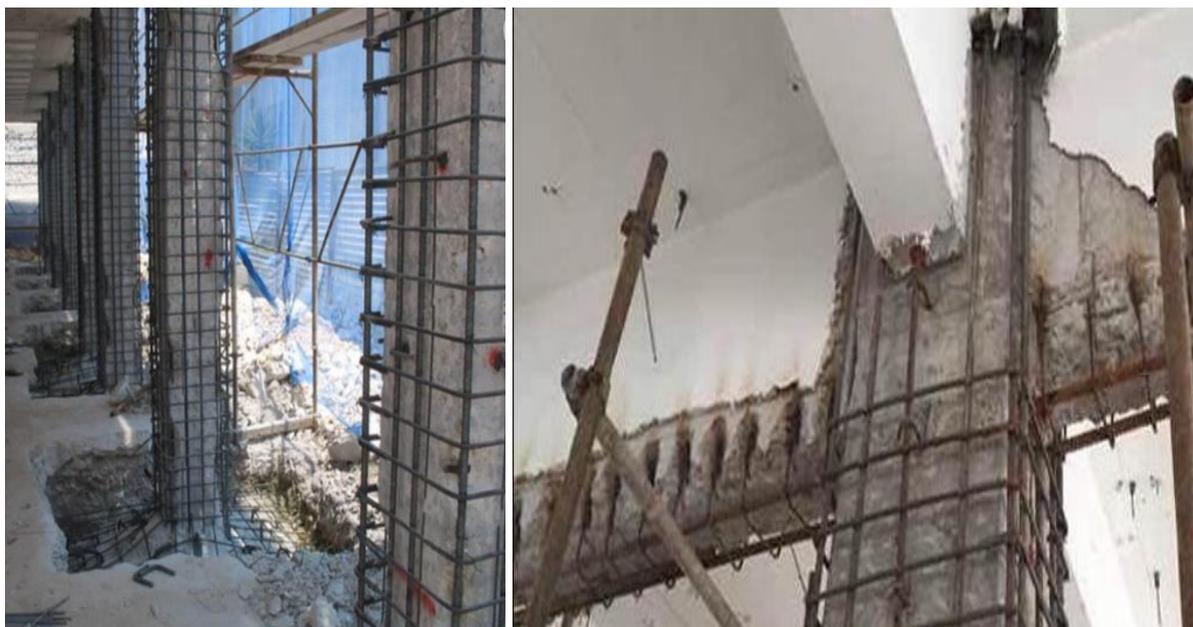


Figure 16 : Chemisage en béton armé

- **Avantages et inconvénients**

L'avantage principal du chemisage en béton armé est l'augmentation significative de la capacité portante de la poutre, ainsi que la protection offerte contre les dommages environnementaux. Cependant, cette méthode est coûteuse, nécessite des travaux importants et entraîne une augmentation considérable des charges permanentes sur la structure.

- **Applications**

Le chemisage en béton armé est souvent utilisé pour le renforcement de poutres dans des bâtiments industriels, des entrepôts ou des infrastructures de transport, où l'augmentation des charges permanentes n'est pas une préoccupation majeure.

1.9.4. Renforcement par post- tension

- **Principe**

Cette méthode implique l'ajout de câbles de précontraints extérieurs le long de la poutre, qui sont ensuite tendus pour introduire des forces de compression dans la section transversale. Ces forces de compression contrebalancent les efforts de traction dus à la flexion, augmentant ainsi la capacité portante de la poutre.

- **Avantages et inconvénients**

Le renforcement par post- tension offre l'avantage d'une augmentation significative de la résistance à la flexion sans augmenter considérablement les charges permanentes. Cependant, cette méthode est complexe et coûteuse, nécessitant une conception et une mise en œuvre précises, ainsi qu'un contrôle rigoureux des pertes de précontrainte au fil du temps.



Figure 17 : Renforcement par post- tension

- **Applications**

Le renforcement par post- tension est souvent utilisé pour les poutres de ponts, de passerelles ou de bâtiments industriels et commerciaux, où une augmentation importante de la capacité portante est requise sans augmenter de manière significative les charges permanentes.

I.10. Choix entre les différentes méthodes de renforcement

Le choix de la méthode de renforcement la plus appropriée pour une poutre en béton armé dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- a) Objectif du renforcement :** Augmenter la résistance à la flexion, la rigidité, la ductilité ou une combinaison de ces facteurs.
- b) Conditions d'exposition :** Les conditions environnementales auxquelles la poutre sera exposée (température, humidité, rayons UV, agents chimiques, etc.) peuvent influencer le choix des matériaux de renforcement.
- c) Contraintes d'espace :** Dans certains cas, l'augmentation de la section transversale de la poutre peut être limitée par des contraintes d'espace, favorisant ainsi des méthodes de renforcement plus minces comme l'utilisation de matériaux composites.
- d) Coût :** Le coût initial des matériaux, de la main-d'œuvre et de la mise en œuvre doit être pris en compte, ainsi que les coûts d'entretien à long terme.
- e) Durabilité :** La durée de vie prévue de la structure renforcée et la résistance aux dommages environnementaux sont des facteurs cruciaux à considérer.

f) Facilité de mise en œuvre : Certaines méthodes de renforcement peuvent nécessiter des équipements ou des compétences spécialisées, ce qui peut influencer le choix en fonction des ressources disponibles.

g) Considérations architecturales : Dans certains cas, l'apparence visuelle de la méthode de renforcement peut être un critère important, en particulier pour les bâtiments historiques ou les structures à valeur architecturale.

h) Réversibilité : La possibilité de démonter ou de retirer le système de renforcement peut être un facteur à prendre en compte pour certains projets.

I.11. Conclusion

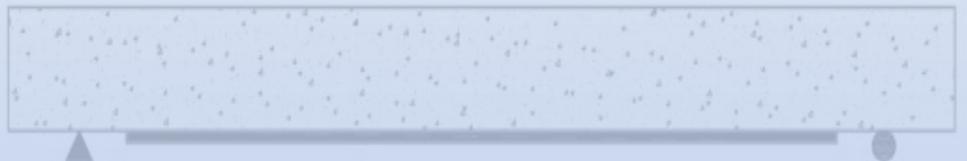
Ce chapitre a présenté un aperçu complet des différentes méthodes de renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion. Nous avons exploré les principes fondamentaux de la flexion, les essais pertinents et les méthodologies globales de réhabilitation et de renforcement des structures. Ensuite, nous avons examiné en détail les techniques spécifiques de renforcement en flexion, notamment l'ajout d'armatures extérieures, l'utilisation de matériaux composites, le chemisage en béton armé et la post-tension.

Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients qu'il est important de prendre en compte lors du choix de la technique la plus appropriée pour un projet donné. L'utilisation de matériaux composites, en particulier, offre des perspectives intéressantes en termes de gain de résistance et de rigidité, tout en minimisant l'augmentation des charges permanentes.

Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur l'étude approfondie du renforcement des poutres en flexion avec des matériaux composites. Nous examinerons les différents types de matériaux composites, leurs propriétés mécaniques, les principes de conception et les méthodes d'application. Cette analyse détaillée nous permettra de mieux comprendre les avantages et les défis liés à cette technique de renforcement prometteuse.

II. Chapitre 2 :

Renforcement en flexion avec des matériaux composites



II.1. Introduction

Le renforcement des structures en béton armé constitue un enjeu majeur de l'ingénierie civile moderne. Face à des défis tels que le vieillissement des infrastructures, l'augmentation des charges d'exploitation, et les nouvelles exigences environnementales et de sécurité, les méthodes traditionnelles de renforcement peuvent souvent se révéler insuffisantes ou inadaptées. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux composites émerge comme une solution innovante offrant des performances améliorées en termes de durabilité, de résistance et de légèreté. Ce chapitre se concentre sur l'exploration des matériaux composites, tel que les fibres de carbone (CFRP) et les fibres de verre (GFRP) etc., utilisés pour le renforcement en flexion des poutres en béton armé. Ces matériaux, réputés pour leur haute résistance mécanique et leur résistance à la corrosion, représentent une avancée significative par rapport aux méthodes conventionnelles. L'objectif est de fournir une compréhension détaillée des propriétés de ces composites, de leurs modes d'application, ainsi que de leur performance dans divers contextes d'ingénierie.

En plus de couvrir les matériaux composites bien établis, ce chapitre introduira également des innovations récentes dans le domaine, tel que l'utilisation de biocomposites, qui pourraient révolutionner les techniques de renforcement des poutres en béton dans les années à venir. À travers une revue de littérature approfondie, des études de cas, et une analyse des dernières recherches, nous explorerons comment ces technologies émergentes peuvent être intégrées dans les pratiques de renforcement pour répondre aux défis actuels et futurs de l'ingénierie civile.

II.2. Définition matériaux composites (polymère renforcé de fibres « PRF ») [18]

Les matériaux composites, spécifiquement les polymères renforcés de fibres (PRF), sont des assemblages de deux composants principaux : une matrice polymère et un renfort fibreux. Cette configuration permet de combiner les propriétés uniques de chaque composant pour obtenir un matériau avec des performances supérieures à celles des matériaux individuels.

La matrice, souvent composée de résines thermoplastiques ou thermodurcissables, joue plusieurs rôles cruciaux au sein du composite. En premier lieu, elle agit comme un liant pour les fibres, assurant leur cohésion et leur alignement correct. En traction, la matrice contribue à la distribution de l'effort d'une fibre endommagée vers les fibres adjacentes saines, aidant ainsi à maintenir l'intégrité structurale du matériau. En compression, elle prévient le flambement des fibres en les stabilisant. La matrice assure également une protection vitale contre les influences

environnementales, telles que l'humidité, les produits chimiques et les variations thermiques. Parmi les résines utilisées, l'époxy, une résine thermodurcissable, domine largement le marché en raison de sa robustesse mécanique et de sa résistance chimique.

Renforcement fibreux confèrent au composite sa haute résistance mécanique et sa rigidité. Elles peuvent être disposées de manière aléatoire ou organisée, et peuvent être courtes ou continues selon les spécifications requises du matériau fini. Dans le domaine du génie civil, les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les principaux matériaux de renfort utilisés[19].

II.3. Constituants des matériaux composites

II.3.1. Les résines dans les matériaux composites

Les résines jouent un rôle crucial dans la constitution des matériaux composites, agissant comme le liant qui unit les renforts fibreux et assure la transmission des contraintes externes. Elles sont également essentielles pour protéger les renforts des agressions chimiques, de l'humidité et des dommages mécaniques tels que l'abrasion.

Dans le choix d'une résine pour un composite, plusieurs critères sont à considérer. La densité de la résine doit être faible pour maintenir les propriétés mécaniques élevées du composite tout en minimisant son poids total. Cependant, les résines répondant à ces exigences sont souvent les polymères les plus couramment utilisés dans les projets de génie civil.

On distingue principalement deux grandes familles de polymères utilisés comme résines dans les composites :

II.3.2. Résines thermoplastiques [20]

Ces résines ont la capacité d'être moulées plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs. Elles sont moins fréquemment utilisées dans le génie civil en raison de leur faible résistance chimique, de leur retrait élevé et de leur faible ténacité. Les exemples incluent les polyéthylènes, les polycarbonates, les polychlorures et les polystyrènes. Malgré leurs limitations, leur principal avantage réside dans leur coût relativement bas, bien que cela limite leur utilisation dans les applications nécessitant des performances mécaniques élevées.

I.1.1.1. Résines thermodurcissables [21] [22] [23]

Ces résines ne peuvent être formées qu'une seule fois, mais elles offrent des propriétés mécaniques supérieures aux résines thermoplastiques. Elles sont largement utilisées dans les projets de renforcement et de réhabilitation en génie civil en raison de leur résistance mécanique et chimique, de leur stabilité thermique et de leur durabilité. Les résines les plus couramment utilisées dans ce domaine sont les époxydes et les phénoliques.

a. Les résines époxydes

Les résines époxydes se distinguent par leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux agressions environnementales. Parmi leurs avantages figurent une bonne résistance à la traction, à la compression et à la flexion, une excellente résistance chimique, un faible retrait lors du moulage et une bonne tenue aux températures élevées. Cependant, leur coût élevé et leur temps de polymérisation plus long sont des inconvénients à prendre en compte. Leurs propriétés sont données dans le **tableau 1**.

b. Les résines phénoliques

Les résines phénoliques sont les plus anciennes et offrent une résistance à la fissuration supérieure aux résines polyester et ont une résistance au feu supérieure, tout en présentant des performances similaires. Leurs avantages incluent une meilleure résistance à la corrosion et aux agressions chimiques, ainsi que de bonnes propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, aux chocs et à la fatigue. Ces caractéristiques justifient leur coût relativement élevé.

c. Les résines polyesters

Les résines polyesters sont les plus économiques parmi les résines thermodurcissables. Elles offrent une gamme de propriétés allant de la flexibilité à la dureté, et sont classées en résines rigides, semi-rigides et souples. Les avantages des résines rigides incluent un module d'élasticité élevé, une bonne résistance chimique, un coût de production réduit, une facilité de mise en œuvre et un durcissement rapide. Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur retrait significatif lors du durcissement.

d. Les résines vinylester

Les résines vinylester présentent une excellente résistance chimique et une bonne adhérence aux fibres. Elles sont souvent utilisées dans les composites pour des applications nécessitant une résistance élevée à la corrosion, telles que les réservoirs de stockage chimique, les revêtements de conduites et les composants marins.

e. Les résines polyuréthanes

Les résines polyuréthanes offrent une flexibilité et une ténacité élevées, ainsi qu'une bonne résistance à l'abrasion et aux chocs. Elles sont utilisées dans diverses applications telles que les revêtements de sols, les mousses isolantes et les composants automobiles.

Tableau 1 : Propriétés des résines polymères thermodurcissables[20] [23].

Matériel	Densité (g/cm ³)	Module de traction (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement maximum (%)	Température de transition vitreuse (°C)
Polyester	1.20	4.0	65	2.5	70-120
Époxy	1.20	3.0	90	8.0	100-270
Vinylester	1.12	3.5	82	6.0	102-150
Phénolique	1.24	2.5	40	1.8	260
Polyuréthane	varie	2.9	71	5.9	135-140

II.4. Les fibres Synthétiques dans les matériaux composites

Le verre, le carbone et l'aramide sont les fibres synthétiques les plus courantes. Elles jouent un rôle crucial dans le renforcement des matériaux composites grâce à leurs propriétés spécifiques qui leur sont conférées par des procédés de fabrication chimique.

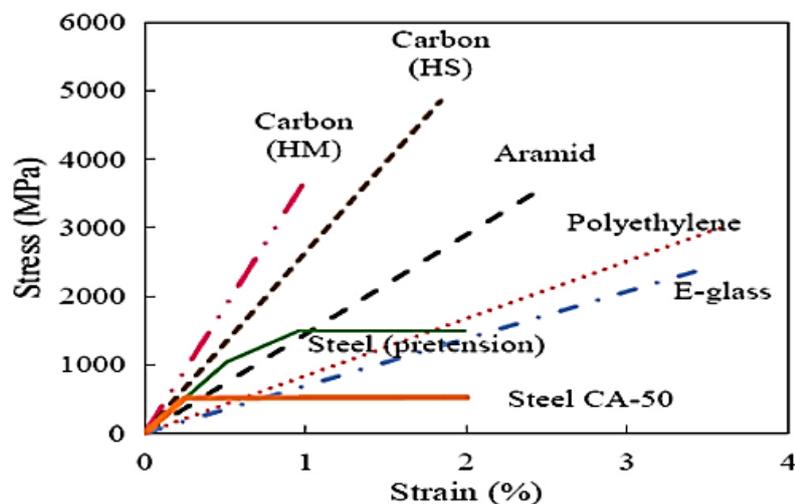


Figure 18 : Comparaison du tracé contrainte-déformation des fibres [24].

II.4.1. Fibre de verre (GFRP)

Les fibres de verre (**Fig. 2**) offrent de nombreux avantages en tant que renforts des matériaux composites polymères, ce qui explique leur large utilisation. Elles séduisent par leur coût abordable et leurs excellentes propriétés comme une résistance à la traction élevée, une grande stabilité chimique et une bonne tenue aux températures élevées. Grâce à leur modularité intéressante, les fibres de verre permettent d'obtenir des composites aux performances mécaniques remarquables. Leur facilité de mise en œuvre constitue un autre atout pour ces renforts. De plus, leur durabilité et leur résistance à la fatigue satisfaisantes les rendent adaptées à de nombreuses applications structurales exigeantes. Les fibres de verre représentent ainsi un choix judicieux et polyvalent pour la conception de composites performants à un coût

compétitif. Les fibres de verre sont utilisées pour fabriquer des profilés, des barres d'armature et des feuilles FRP. Ils se déclinent en quatre qualités différentes, Leurs propriétés sont données dans le **tableau 2**.

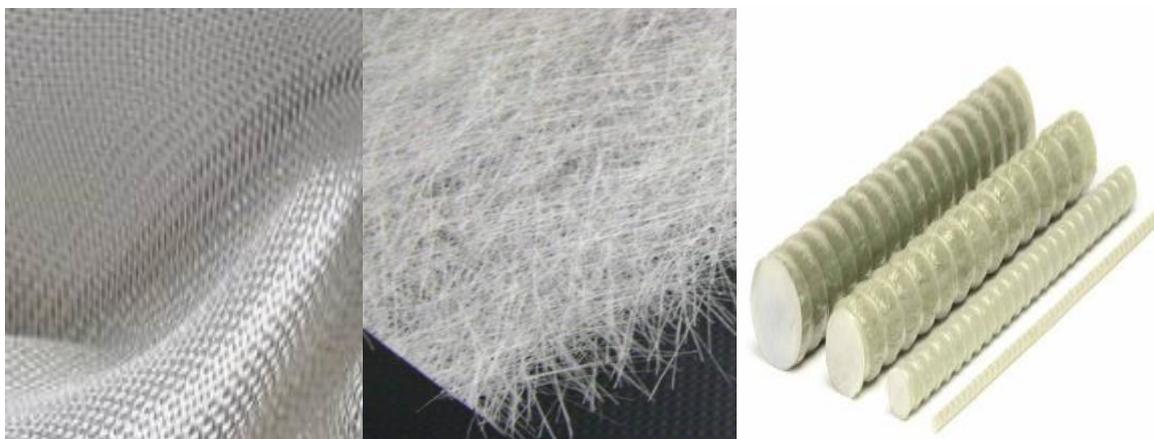


Figure 19 : fibre de verre.

- a. **Verre E (Électrique)** : Utilisé principalement pour les applications structurales nécessitant une isolation électrique en raison de ses propriétés diélectriques.
- b. **Verre A (Vitre à vitres)** : Employé pour des applications moins exigeantes mécaniquement.
- c. **Verre C (Résistant à la corrosion)** : Connus aussi sous le nom de verre AR ou verre résistant aux alcalis, il est préféré dans des environnements chimiquement agressifs.
- d. **Verre S (Structural ou haute résistance)** : Utilisé dans des applications demandant une haute résistance mécanique, comme dans l'industrie aéronautique, bien que son coût soit supérieur aux autres types de verre.
- e.

Tableau 2 : Propriétés des fibres de verre [20] [23].

Propriétés	Fibres de verre E	Fibres de verre A	Fibres de verre S	Fibres de verre C
Densité (g/cm ³)	2,57	2,46	2,47	2,46
Résistance à la traction (GPa)	72,5	73,0	88,0	74,0
Module d'élasticité (MPa)	3400	2760	4600	2350
Allongement (%)	2,5	2,5	3,0	2,5
Architecture de la fibre	Isotrope			

II.4.2. Fibre de carbone (CFRP)

Les fibres de carbone (**Fig. 3**) sont généralement utilisées pour des applications de renforcement : bandes, feuilles, barres d'armature et tendons de précontrainte en CFRP. Les fibres de carbone ont des résistances élevées à la traction, au fluage et à la fatigue. Leur module de traction est supérieur à celui des fibres de verre et d'aramide ; ils ont une excellente résistance chimique et une faible absorption d'humidité. L'anisotropie, le coût de production élevé et la conductivité thermique sont leurs inconvénients. Les fibres de carbone ont une couleur noir anthracite. Les fibres de carbone sont produites en plusieurs grades.

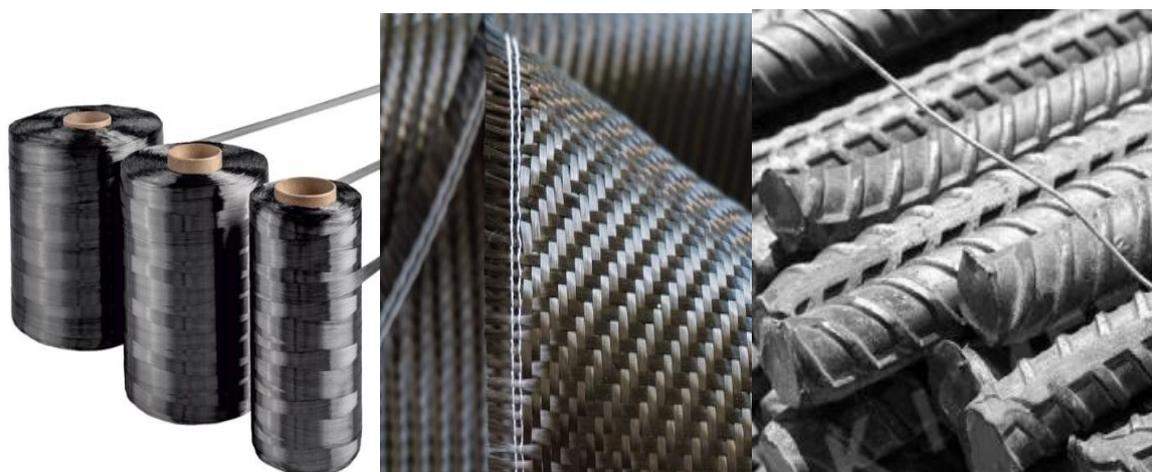


Figure 20 : fibre de carbone.

f. Module standard (SM)

Le grade de SM des fibres de carbone est le plus couramment utilisé dans les applications générales où la résistance et la rigidité sont importantes mais sans exigences extrêmes. Ces fibres offrent un bon équilibre entre coût et performance, rendant les matériaux composites accessibles pour des utilisations commerciales et industrielles largement répandues, telles que les composants automobiles, les produits de loisirs (comme les cadres de vélo) et les matériaux de construction. Aussi, Les SM sont largement utilisés dans le génie civil en raison de leur bon rapport coût-efficacité et de leurs propriétés mécaniques suffisantes pour de nombreuses applications. Elles sont employées pour renforcer des structures telles que les ponts, les routes, et les bâtiments, où elles améliorent la résistance au fléchissement et à la traction sans ajouter un poids significatif. Leurs propriétés sont données dans le **tableau 3**.

g. Module intermédiaire (IM)

Les fibres de carbone IM présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles du module standard. Elles sont souvent choisies pour des applications nécessitant une rigidité accrue sans

atteindre les extrêmes du module ultra élevé. Ces fibres sont typiquement utilisées dans l'industrie aéronautique, où une résistance élevée à des charges structurales est cruciale, tout en conservant une certaine flexibilité et résilience sous des contraintes dynamiques. Aussi, Le grade d'IM est également utilisé dans le génie civil, particulièrement dans les projets qui nécessitent une rigidité supérieure à celle offerte par le module standard. Ces fibres sont souvent choisies pour des applications où la performance structurale est critique, telles que les éléments précontraints ou post-tensionnés qui doivent supporter de grandes charges ou des conditions environnementales difficiles.

h. Haute résistance (HS)

Le grade de HS est optimisé pour maximiser la résistance à la traction avant rupture. Ces fibres sont idéales pour les applications où la résistance à des forces de traction élevées est critique. Le grade HS est souvent utilisé dans les applications sportives de haut niveau, comme les mâts de voile, les cannes à pêche, et les clubs de golf, où la capacité à supporter des charges répétées sans rupture est essentielle.

i. Module ultra élevé (UHM)

Les fibres UHM représentent le sommet de la technologie des fibres de carbone en termes de rigidité. Elles sont principalement utilisées dans des applications spécialisées nécessitant une rigidité exceptionnelle, comme les satellites, les télescopes, et certains composants aérospatiaux. Ces fibres peuvent être extrêmement coûteuses et sont généralement réservées à des applications où le poids minimal et la performance maximale sont absolument nécessaires.

Tableau 3 : Propriétés des fibres de carbone[20] [23].

Propriétés	SM	IM	HS	UHM
Densité (g/cm ³)	1,70	1,80	1,90	2,10
Résistance à la traction (MPa)	3700	4800	3000	2400
Module d'élasticité (GPa)	250	250	500	500
Allongement (%)	1,2	1,4	0,5	0,2
Architecture de la fibre	Anisotrope			

II.4.3. Fibres d'aramide (AFRP)

Bien que moins utilisées en ingénierie structurale, les fibres d'aramide (**Fig.4**) sont précieuses pour leur capacité à absorber les énergies élevées, rendant les composites particulièrement utiles pour les équipements de sécurité. Les configurations unidirectionnelles sont courantes pour les applications nécessitant une résistance maximale dans une direction, tandis que les

configurations bidirectionnelles sont utilisées là où les besoins en résistance sont plus isotropes. Ses propriétés sont données dans le tableau 4.

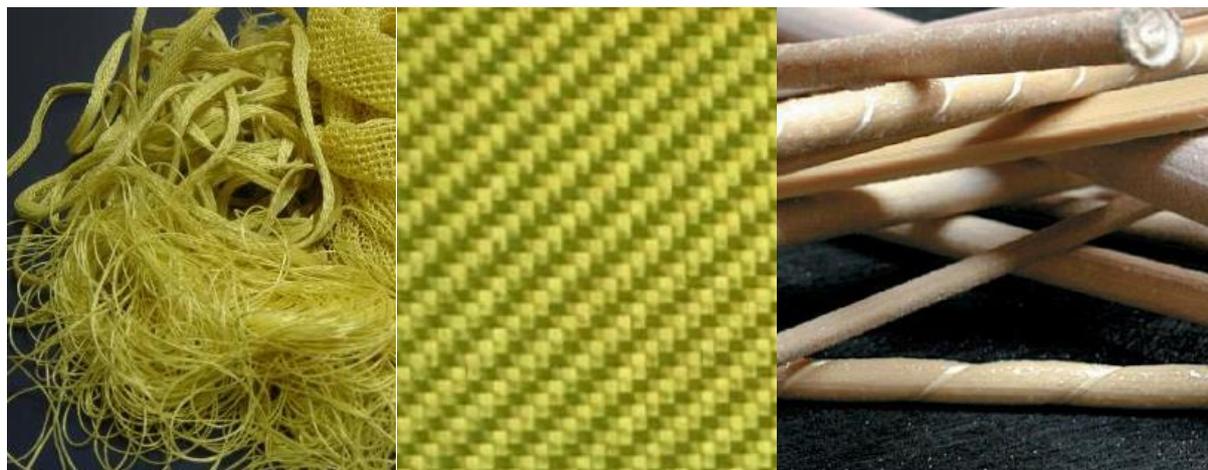


Figure 21 : fibre d'aramide.

Tableau 4 : Propriétés des fibres d'aramide [20] [23].

Propriétés	Fibre d'aramide
Densité (g/cm ³)	1,40
Résistance à la traction (MPa)	2800-4100
Module d'élasticité (GPa)	70 - 190
Allongement (%)	2 – 2,4
Architecture de la fibre	Anisotrope

II.5. Les fibres Naturelles dans les matériaux composites [25], [26]

Les fibres végétales sont des matériaux d'origine naturelle qui sont extraits de diverses parties des plantes. Elles sont principalement composées de cellulose, hémicellulose, lignine et pectine (**Tableau 5**). Ces fibres sont renouvelables, biodégradables, et possèdent des propriétés mécaniques intéressantes, ce qui les rend attractives pour une utilisation dans les matériaux composites, notamment pour renforcer des polymères.

Les fibres végétales telles que le jute, le lin et le chanvre sont couramment utilisées comme renforts dans les matériaux composites en raison de leur faible coût, de leur faible densité, et de leur caractère moins nocif comparé aux fibres synthétiques.

II.5.1. Principales composants des fibres [27] [28]

Les fibres naturelles dans les composites incluent quatre composants clés (fig. 2) : cellulose, hémicellulose, lignine et pectine. Ces éléments définissent les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des fibres, affectant leur intégration et performance dans les composites. Leur compréhension aide à optimiser l'utilisation et le développement de matériaux durables.

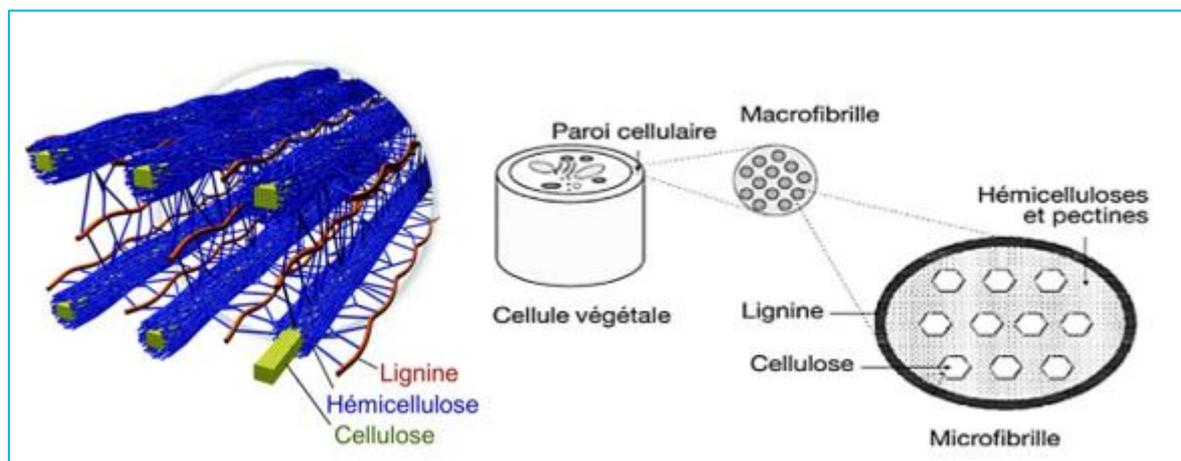


Figure 22 : Constituant structurel des fibres végétales.

Cellulose : Le principal constituant structurel des fibres végétales, la cellulose, est responsable de leur rigidité et résistance mécanique. Elle forme des microfibrilles qui sont les unités de base de la structure de la fibre.

Hémicellulose : Moins cristalline que la cellulose, l'hémicellulose agit comme un liant entre les fibrilles de cellulose et contribue à la flexibilité de la fibre.

- **Stabilité thermique faible** : L'hémicellulose possède une stabilité thermique inférieure par rapport à la cellulose, ce qui peut limiter les processus de traitement thermique des composites.
- **Compatibilité avec les matrices** : L'hémicellulose peut présenter des défis en termes de compatibilité avec les résines polymères, affectant négativement l'interface fibre-matrice.
- **Sensibilité aux traitements alcalins** : L'hémicellulose est sensible aux traitements alcalins souvent utilisés pour améliorer l'adhésion des fibres avec les matrices polymères, ce qui peut conduire à sa dégradation et affecter les propriétés finales du composite.

Lignine : La lignine confère rigidité et résistance aux attaques chimiques et biologiques. Elle agit également comme un agent de liaison entre les fibres, augmentant la résistance globale des matériaux composites.

- **Absorption d'humidité** : La lignine peut absorber l'humidité, ce qui peut compromettre la stabilité dimensionnelle et la durabilité des composites en environnements humides ou variables.

- **Compatibilité avec les matrices** : La lignine a une faible compatibilité avec certaines matrices polymères, ce qui peut entraîner une mauvaise adhésion entre la fibre et la matrice, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du composite.
- **Traitement difficile** : La présence de lignine peut compliquer le traitement des fibres, nécessitant souvent des traitements chimiques ou thermiques pour améliorer l'adhésion de la fibre avec la matrice polymère.

Pectine : Présente en quantités variables, la pectine aide à l'adhésion des cellules entre elles et peut influencer les propriétés d'absorption d'eau de la fibre.

- **Absorption d'eau** : Comme la lignine, la pectine a une forte propension à absorber l'eau, ce qui peut affecter la stabilité dimensionnelle des composites et leur résistance mécanique sous charge humide.
- **Dégradation biologique** : La pectine est biologiquement active et peut être dégradée par des micro-organismes, ce qui affecte la durabilité et la longévité du composite.
- **Influence sur le traitement** : Le contenu en pectine peut nécessiter des traitements spécifiques pour éliminer ou modifier cette composante avant l'utilisation des fibres dans les composites pour assurer une meilleure adhésion et stabilité.

II.5.2. Fibre de lin

La fibre de lin (**fig.3**) est récoltée à partir de la tige de la plante de lin. Elle est très résistante et offre une bonne compatibilité avec de nombreuses résines. Les fibres de lin peuvent atteindre jusqu'à 90 cm de longueur. Elles sont principalement utilisées sous forme de fils ou de tissus dans les composites, permettant ainsi une manipulation et une intégration efficace dans diverses matrices polymères.

Propriétés :

- **Chimiques** : Résistance à la dégradation chimique.
- **Physiques** : Légèreté, absorption d'humidité relativement faible.
- **Mécaniques** : Excellente résistance à la traction, bonne rigidité.



Figure 23 : Fibre de lin.

II.5.3. Fibre de jute

La fibre de jute (**fig.4**) est récoltée à partir de la tige de la plante de jute et est une des fibres naturelles les plus abondantes et économiques après le coton. Elle peut mesurer de 1 à 4 mètres de long, ce qui lui permet d'être transformée en fils et tissus pour une utilisation dans les matériaux composites.

Propriétés :

- **Chimiques** : Résistante à la pourriture et recyclable.
- **Physiques** : Bonne résistance à l'humidité, isolant acoustique.
- **Mécaniques** : Haute résistance à la traction, module élastique modéré.



Figure 24 : fibre de jute.

II.5.4. Fibre de chanvre

La fibre de chanvre, provenant de la plante de *Cannabis sativa*, est reconnue pour sa robustesse et sa durabilité exceptionnelles. Les fibres peuvent atteindre une longueur allant jusqu'à 2 mètres, offrant une flexibilité substantielle pour leur utilisation en fils ou en tissus dans les composites.

Propriétés :

- **Chimiques** : Bonne résistance aux moisissures et bactéries.
- **Physiques** : Faible densité, bonne isolation thermique.
- **Mécaniques** : Bonne résistance mécanique, absorption des chocs.



Figure 25 : fibre de chanvre.

Tableau 5 : sont principales composant des fibres végétales [27]

Fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)
Jute	45 - 71	12 - 26	12 - 15	Traces
Lin	65 - 75	15 - 20	2 - 3	1 - 2
Chanvre	70 - 80	5 - 15	5 - 8	Traces

II.6. Orientation des Fibres dans les Composites [29] [30]

L'orientation des fibres dans les matériaux composites est cruciale pour déterminer les propriétés mécaniques et structurelles des matériaux utilisés dans le génie civil. Les fibres peuvent être orientées unidirectionnellement ou bidirectionnellement, chacune offrant des avantages spécifiques adaptés à différentes exigences structurelles.

II.6.1. Fibres Unidirectionnelles

Dans les composites unidirectionnels (**fig 2**), les fibres sont alignées dans une seule direction, optimisant ainsi la résistance et la rigidité dans cette direction spécifique. Cette orientation est particulièrement bénéfique pour les composants subissant des charges prédominantes dans un seul axe, car elle maximise la résistance à la traction et le module d'élasticité. L'utilisation de fibres unidirectionnelles réduit également le poids et le coût du matériau, évitant un surplus de résistance là où elle n'est pas nécessaire. Cela rend les composites unidirectionnels idéaux pour

les poutres, les dalles de construction, et les câbles de précontrainte dans le génie civil, où une force maximale est requise dans une direction spécifique sans ajouter de poids inutile.

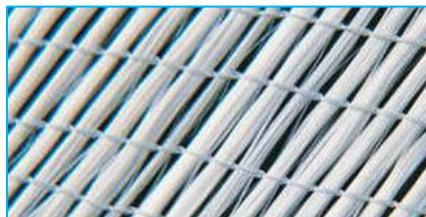


Figure 26 : Fibres Unidirectionnelles.

II.6.2. Fibres Bidirectionnelles

Les fibres bidirectionnelles (**fig 3**) sont tissées en deux directions, souvent perpendiculaires entre elles, augmentant ainsi la résistance et la stabilité structurelle dans ces deux directions. Cette configuration est essentielle pour les applications où les charges sont imprévisibles ou changent de direction, telles que dans les murs soumis à des forces sismiques ou les fondations subissant des charges multidirectionnelles. Les composites bidirectionnels offrent une meilleure répartition des charges et une durabilité accrue, résistant mieux aux impacts et réduisant les risques de délaminage.

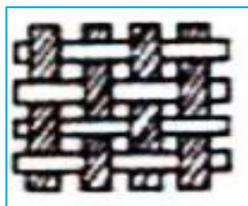


Figure 27 : Fibres Bidirectionnelles.

II.6.3. Tissages Multidirectionnels

Les composites multidirectionnels (**fig 4**) impliquent des fibres orientées dans plus de deux directions. Ceux-ci sont souvent utilisés pour créer des matériaux qui nécessitent une résistance isotrope ou quasi-isotrope, c'est-à-dire des propriétés mécaniques similaires dans toutes les directions. Ces composites sont particulièrement utiles pour les applications où les charges peuvent venir de multiples directions et où une uniformité de propriétés est cruciale.

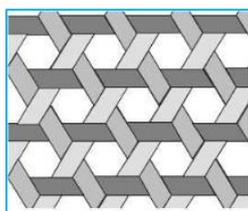


Figure 28 : Fibres Tissages Multidirectionnels.

II.6.4. Fibres Tressées

Les fibres tressées (**fig 5**) sont une autre forme de disposition où les fibres sont entrelacées en motifs complexes. Cette technique augmente la résilience du matériau aux charges multidirectionnelles et améliore sa durabilité et sa résistance à la délamination. Les composites tressés sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une grande robustesse, telles que les coques de bateaux, les composants aéronautiques et les équipements sportifs.

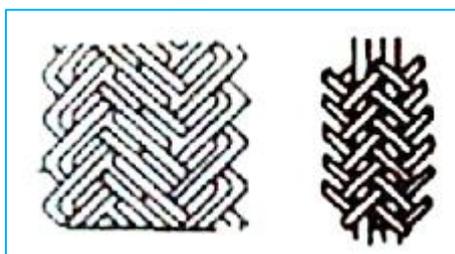


Figure 29 : Fibres Tressées.

II.6.5. Fibres 3D

Les composites 3D (**fig 6**) intègrent des fibres dans trois dimensions, plutôt que de les limiter à un plan bidimensionnel. Cela permet une résistance accrue dans toutes les directions et une meilleure intégrité structurelle. Les composites 3D sont utilisés dans des applications de haute technologie, telles que dans l'aérospatial et les industries militaires, où les propriétés mécaniques supérieures sont nécessaires dans toutes les orientations.

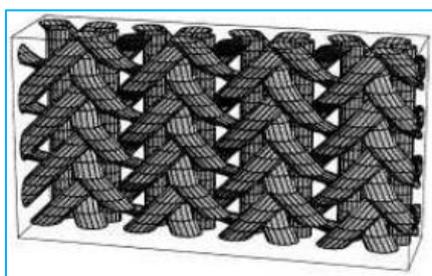


Figure 30 : Fibres 3D.

II.7. Renforcement structurel de poutres en flexion par des composites en PRF

Le renforcement structurel de poutres en flexion par des composites PRF implique généralement deux techniques principales : le collage externe (EBR) de tissus ou lamelles PRF sur la face tendue de la poutre, et la méthode NSM (Near Surface Mounted) où des barres ou lamelles PRF sont insérées dans des rainures préalablement réalisées sur la surface tendue de la poutre. Dans les deux cas, le renforcement est appliqué là où les efforts de traction sont les

plus importants. Ces techniques permettent d'augmenter la capacité portante de la poutre en flexion en améliorant sa résistance à la traction et en retardant l'apparition de fissures.

II.7.1. Méthodes de renforcement [31] [32]

II.7.1.1. Méthode EBR

La méthode EBR (**Fig. 14, 15**) consiste à coller des tissus ou lamelles PRF sur la face tendue extérieure de la poutre à l'aide d'une résine adhésive. Bien que relativement simple à mettre en œuvre, cette technique peut présenter des défis en termes de préparation de surface et de transfert des efforts aux extrémités. Aussi, Le décollement prématuré est le principal problème de cette méthode car il peut empêcher d'atteindre la pleine capacité de traction des composites FRP, ce qui peut gaspiller des matériaux FRP coûteux

- **Étapes de Mise en Œuvre**

Préparation de la Surface : Avant l'application du composite, la surface de la structure en béton doit être préparée par nettoyage, ponçage ou grenailage pour garantir une bonne adhérence de la résine.

Application de l'Adhésif : Un adhésif époxy est généralement appliqué sur la surface préparée pour créer une base collante qui aidera à fixer le matériau composite.

Placement du Matériau Composite : Les feuilles ou bandes de matériau composite sont ensuite appliquées sur la surface encollée. Les matériaux sont soigneusement positionnés et lissés pour éliminer les bulles d'air et assurer une bonne adhérence.

Cure de l'Adhésif : L'adhésif doit durcir complètement, un processus qui peut durer plusieurs heures ou jours selon le type de résine utilisée et les conditions environnementales.

- **Avantages de la Méthode EBR**

Amélioration de la Résistance et de la Durabilité : L'utilisation de composites renforcés augmente significativement la résistance à la traction de la structure, prolongeant ainsi sa durée de vie.

Légèreté : Les matériaux composites sont beaucoup plus légers que les alternatives en acier, ce qui réduit la charge totale sur les fondations.

Facilité et Rapidité de Mise en Œuvre : Comparée à d'autres méthodes de renforcement, l'EBR est relativement rapide et ne nécessite pas de lourdes modifications structurelles.

Versatilité : Peut être appliquée sur diverses géométries et types de structures.

Considérations et Limitations

Dépendance à la Qualité de l'Adhésif : La performance du renforcement dépend largement de la qualité de l'adhésif utilisé et de son application correcte.

Protection contre les Environnements Hostiles : Les matériaux composites peuvent nécessiter des protections supplémentaires contre les UV, l'humidité et les produits chimiques.

Coût : Bien que le coût des matériaux composites ait diminué, les coûts initiaux peuvent être plus élevés que pour d'autres méthodes de renforcement.

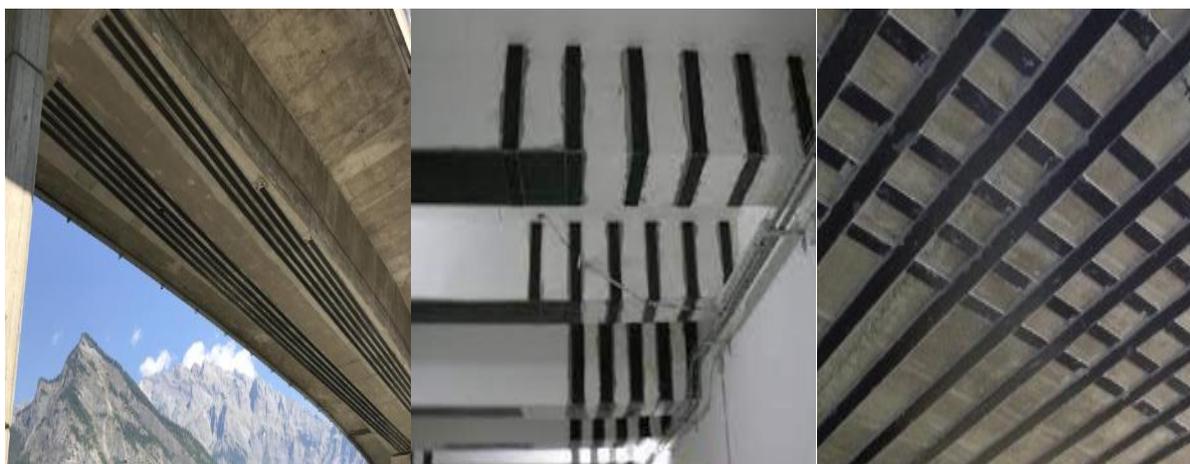


Figure 31 : Renforcement structural par la méthode EBR.

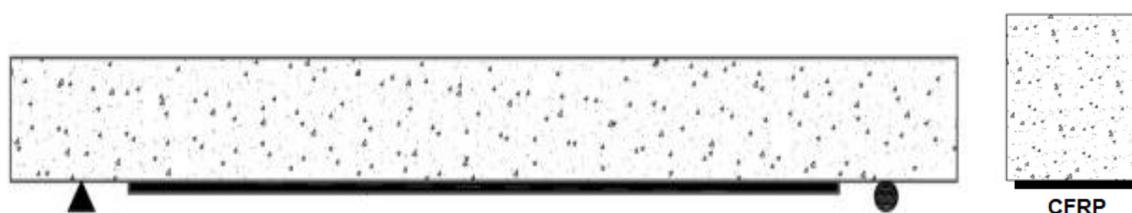


Figure 32 : schéma du renforcement d'une poutre avec la méthode EBR.

Pour résoudre le problème du décollement prématuré du composite FRP, Mostofinejad et Mahmoudabadi ont suggéré une nouvelle méthode appelée méthode de rainurage (GM)[33], dans laquelle les contraintes interfaciales étaient transférées dans des couches de poutres plus fermes en créant des rainures sur la face de traction des poutres. Deux techniques d'installation ont été adoptées dans la méthode de rainurage (Fig. 16, 17). Le renforcement lié extérieurement sur la rainure (EBROG) et le renforcement lié extérieurement dans la rainure (EBRIG) sont des techniques importantes pour réaliser la méthode de rainurage.

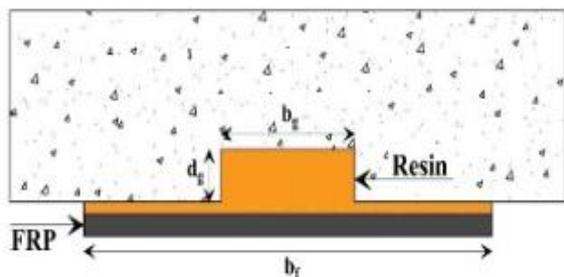


Figure 33 : Méthode EBROG.

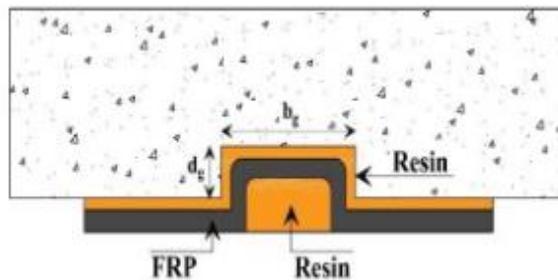


Figure 34 : Méthode EBRIG.

II.7.1.2. Méthode NSM

La méthode NSM, quant à elle, implique de créer des rainures étroites dans le béton sur la face tendue de la poutre, puis d'y insérer des barres ou lamelles PRF à l'aide d'une résine adhésive. Cette méthode offre généralement une meilleure liaison avec le substrat en béton, permettant un transfert d'efforts plus efficace. Cependant, elle nécessite davantage de préparation et de travail de maçonnerie.

- **Dimensions des rainures**

La largeur minimale de la rainure doit être au moins 1,5 fois le diamètre de la barre PRF ronde insérée.

Pour des barres rectangulaires à grand rapport d'aspect, une taille minimale de $3,0 \times a_b \times 1,5 \times b_b$ est suggérée, où a_b est la plus petite dimension de la barre (**Fig 18**).

- **Espacement des rainures**

L'espacement libre minimal entre les rainures doit être supérieur à deux fois la profondeur de la rainure pour éviter un chevauchement des contraintes de traction autour des barres PRF.

- **Distance aux bords**

Une distance libre minimale de quatre fois la profondeur de la rainure doit être prévue par rapport aux bords pour minimiser les effets de bord pouvant accélérer le délaminage.

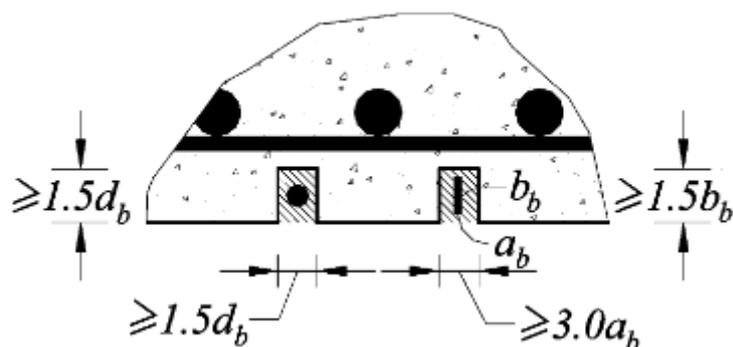


Figure 35 : Dimensions minimales des rainures[31].

Ces exigences dimensionnelles visent à assurer une liaison mécanique adéquate entre les renforts PRF et le béton, ainsi qu'à éviter les problèmes liés au chevauchement des contraintes et aux effets de bord.

Le reste du processus comprend la mise en place précise des renforts PRF dimensionnés, l'injection d'une résine époxy de haute résistance enrobant complètement les barres/lamelles, et potentiellement l'utilisation d'ancrages mécaniques aux extrémités.

II.8. Revue de la littérature

Mostofinejad et Mahmoudabadi [33] ont proposé une nouvelle méthode appelée « méthode de rainurage (GM) » pour retarder le décollement prématuré des feuilles de FRP du substrat en béton. Les résultats ont démontré que des rainures d'une largeur de 3 mm et d'une profondeur de 2 mm dans des dispositions transversales, diagonales et longitudinales pouvaient augmenter la capacité de charge de 9,0, 15,0 et 27,0 % par rapport aux poutres renforcées par la méthode EBR. De plus, les rainures d'une largeur de 3 mm et d'une profondeur de 10 mm ont modifié le mode de défaillance du décollement des composites FRP à la rupture et ont augmenté la capacité de charge d'environ 82,0 % [33]. A. Codina et al. [34] ont montré que la technique EBROG a augmenté la capacité d'adhérence et de flexion des éprouvettes par rapport à l'EBR en transférant les contraintes aux couches plus profondes du béton. De plus, la capacité EBROG pour les deux types d'essais s'est améliorée, passant de 1 rainure à 2 rainures, mais il n'y a pas eu d'amélioration significative lors du passage de 2 rainures à 3 rainures. Moshiri et al [35] ont étudié l'impact de la méthode EBROG sur la capacité de flexion des poutres BA avec une configuration de rainure de 4 rainures de 10 mm × 10 mm avec un espacement de 15 mm pour un stratifié CFRP de 100 mm × 1,4 mm. D. Mostofinejad et al. [36], ont conclu que l'utilisation de GM (largeur 8 mm, profondeur 10mm) dans différents modèles longitudinaux (**fig. 18**) a augmenté la capacité de charge ultime par rapport aux échantillons EBR. L'amélioration

maximale se produisait généralement dans les rainures d'extrémité et l'augmentation minimale concernait le motif de rainures intermittentes. L'augmentation de la charge ultime des éprouvettes renforcées par GM avec rainure d'extrémité par rapport à celle de la méthode EBR pour une et trois couches de tôle CFRP était de 23,5 % et 24,5 %, respectivement. L'augmentation de la charge ultime mentionnée ci-dessus pour deux couches de CFRP était de 23,1 % lorsque le modèle de rainure complet était utilisé.

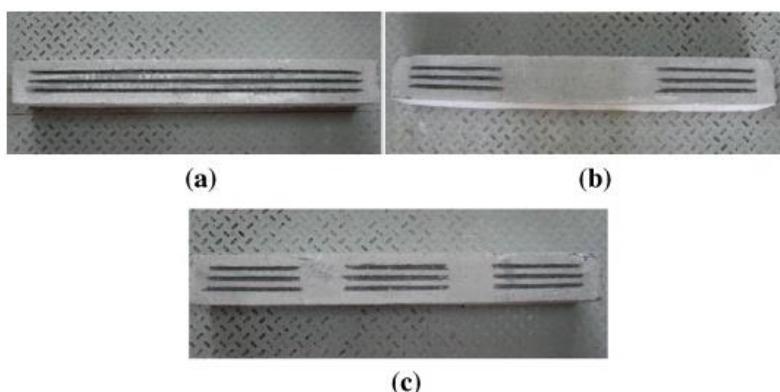


Figure 36 : Modèles de rainures longitudinales ; (a) rainurage complet ; (b) rainure d'extrémité ; (c) rainurage intermittent.

Les travaux de J. Sabzi et al. [37] ont également étudié les performances de la méthode EBROG en comparaison avec la méthode EBR (collage externe) conventionnelle. Leurs résultats ont mis en évidence que l'utilisation de rainures de dimensions 8 x 10 mm (largeur x profondeur) pour la technique EBROG a conduit à une augmentation significativement supérieure des propriétés mécaniques, telles que la résistance et la ductilité, par rapport aux échantillons renforcés par la seule méthode EBR. Dans leur étude sur l'effet des caractéristiques des rainures sur le comportement d'adhérence des joints CFRP-béton pour la technique EBROG, A. Hosseini et al. [38] ont rapporté que les rainures de dimensions 5 mm x 10 mm (largeur x profondeur) ont présenté les meilleures caractéristiques mécaniques. Dans une étude complémentaire, A. Moghaddas et al. [39] se sont intéressés à l'influence des dimensions des rainures sur les caractéristiques mécaniques des poutres renforcées par la méthode EBROG. Leur approche a consisté à tester quatre configurations de rainures distinctes : 5 x 5, 5 x 10, 10 x 10 et 10 x 15 mm (largeur x profondeur). Bien que couvrant une gamme de dimensions différentes, leurs résultats ont convergé vers la même conclusion que les travaux précédents, identifiant la rainure de 10 x 5 mm comme offrant les meilleures performances d'adhérence FRP-béton parmi les cas étudiés. Parallèlement à l'étude de Hosseini et Moghadda les travaux de S. Zolfaghari, D. et al. [40] ont également examiné l'influence des dimensions des rainures sur les performances de la méthode EBROG. Cependant, au lieu d'évaluer une configuration fixe, ils ont exploré une gamme plus large de largeurs (2,5, 5, 10 et 15 mm) et de profondeurs (2,5, 5, 7,5, 10 et 15 mm).

Leurs résultats ont révélé que les profondeurs optimales variaient selon la largeur, à savoir 5 mm pour 2,5 et 15 mm de large, 10 mm pour 5 mm de large, et 5 mm pour 10 mm de large. Parmi toutes les combinaisons testées, la rainure de 10 mm x 5 mm (largeur x profondeur) s'est démarquée en offrant la force d'adhérence FRP-béton maximale, corroborant ainsi les conclusions d'A. Moghaddas et al. sur les dimensions avantageuses.

II.9. Conclusion

Les matériaux composites renforcés de fibres offrent des solutions innovantes et performantes pour le renforcement en flexion des poutres en béton armé. Grâce à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, leur légèreté et leur durabilité, ces matériaux permettent d'augmenter significativement la capacité portante et la durée de vie des structures existantes.

Parmi les techniques explorées, la méthode de renforcement par collage extérieur (EBR) s'est avérée simple et efficace, mais sujette au décollement prématuré des composites. Pour remédier à cette limitation, des méthodes alternatives telles que la méthode de rainurage (GM), et plus particulièrement l'EBROG (Externally Bonded Reinforcement on Grooves) et l'EBRIG (Externally Bonded Reinforcement in Grooves), ont été développées. Ces techniques visent à transférer les contraintes vers des couches plus profondes du béton grâce à la création de rainures, améliorant ainsi l'adhérence et retardant le décollement.

Après une revue approfondie de la littérature, la méthode EBROG a été sélectionnée pour notre étude en raison de ses performances prometteuses en termes d'augmentation de la capacité de charge et de maîtrise du décollement. Les principales variables à explorer seront les dimensions des rainures, en étudiant spécifiquement les configurations 8x10 mm (largeur x profondeur) et 10x5 mm, ainsi que l'emplacement des rainures (continues, intermittentes ou aux extrémités). Cette étude vise à contribuer à l'optimisation de la méthode EBROG et à fournir des informations précieuses sur les configurations les plus efficaces pour maximiser les performances des poutres renforcées. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre l'influence des paramètres géométriques et de l'emplacement des rainures. Le chapitre suivant détaillera le programme expérimental mis en place pour explorer ces variables et évaluer leurs effets sur le comportement mécanique des poutres renforcées par la méthode EBROG.

III. **Chapitre 3 :** **Programme Expérimentale**



III.1. Introduction

Ce chapitre explore l'efficacité de fibres naturelles et synthétiques dans le renforcement de structures en béton. Nous expérimenterons avec des fibres de lin et de palmier dattier, choisies pour leur potentiel écologique, comparées aux fibres de verre traditionnelles. Ces essais visent à évaluer si ces alternatives végétales peuvent concurrencer ou surpasser les performances des renforts synthétiques. Cette étude s'inscrit dans une démarche de génie civil plus durable, cherchant à intégrer des matériaux à faible impact environnemental sans compromettre la qualité structurale.

III.2. Variables étudiées et plan expérimental

Dans le cadre de ce programme expérimental, plusieurs paramètres ont été soigneusement sélectionnés afin d'évaluer leur influence sur les performances des poutres en béton armé renforcées par la méthode EBROG. Les méthodes de renforcement étudiées comprennent l'EBR conventionnelle, servant de référence, ainsi que l'EBROG, méthode innovante impliquant le collage des composites PRF sur des rainures préalablement réalisées dans la poutre, dans le but d'améliorer l'adhérence et de retarder le décollement. Trois types de fibres seront explorés : les fibres de verre synthétiques couramment utilisées, les fibres de lin naturelles et renouvelables, ainsi que les fibres de palmier dattier issues d'une ressource locale, évaluées dans une optique d'éco-conception. Les configurations de renforcement incluent l'étude de 1 et 2 rainures, avec deux dimensions (8x10 mm et 10x5 mm de largeur x profondeur), choisies sur la base des recommandations de la littérature. Deux emplacements des rainures seront évalués : continu sur toute la longueur de la poutre et aux extrémités seulement, afin d'étudier leur impact sur le transfert des efforts et le contrôle du décollement. Enfin, les essais seront réalisés en flexion trois points, une configuration couramment utilisée pour l'évaluation des poutres en béton armé et garantissant une pertinence pratique pour les applications structurelles réelles.

III.3. Caractéristiques des spécimens

Les éprouvettes coulées pour cette étude étaient 30 poutres en béton sans armature longitudinale soumises à un chargement de flexion en trois points jusqu'à la rupture. Les poutres avaient une longueur de $L = 400$ mm, une largeur de $b = 100$ mm et une hauteur de $h = 100$ mm. Ces dimensions ont été choisies pour les poutres après quelques calculs et expériences initiaux en considérant les dimensions et la capacité du dispositif d'essai, la possibilité d'effectuer toutes les techniques de renforcement envisagées, la possibilité d'obtenir une rupture de FRP pour

Chapitre 3 : Programme Expérimentale

toutes les poutres renforcées avec une seule couche de feuille de FRP, et la disponibilité du matériel, des appareils et de la main-d'œuvre. Afin de garantir les modes de rupture en flexion pour toutes les poutres et d'éviter toute rupture en cisaillement indésirable pendant les essais.

Ces 30 poutres ont été réparties en 3 groupes principaux (**Tableau 1**). Le Groupe 1 comprenait 3 poutres de contrôle non renforcées (CB) et 9 poutres renforcées par la méthode EBR conventionnelle, chacune utilisant un type de fibre différent : lin (F-EBR), palmier dattier (DP-EBR) et verre (G-EBR). Le Groupe 2 contenait 6 poutres renforcées par la méthode EBROG avec une seule rainure. Deux configurations ont été étudiées : EBROG-1Fg-1 et EBROG-1Fg-2, utilisant des fibres de lin et des dimensions de rainure de 10 mm de largeur et 5 mm de profondeur pour la première, et 8 mm de largeur et 10 mm de profondeur pour la seconde. Les rainures étaient continues sur toute la longueur (Full) pour ces poutres. Le Groupe 3 comprenait 12 poutres renforcées par la méthode EBROG avec des rainures situées uniquement aux extrémités (End). Deux configurations de dimensions de rainure ont été explorées : 10 mm de largeur et 5 mm de profondeur (EBROG-1Eg-1 et EBROG-2Eg-1) ainsi que 8 mm de largeur et 10 mm de profondeur (EBROG-1Eg-2 et EBROG-2Eg-2). Pour chaque configuration, des poutres avec une seule rainure et deux rainures ont été testées.

Tableau 6 : configuration des éprouvettes.

Groupe	Étiquette	Méthode	Matériaux de renforcement	Largeur (mm)	Profondeur (mm)	Position	N ^{br}
CB	-	-	-	-	-	-	-
1	F-EBR	EBR	Lin	-	-	-	-
	DP-EBR	EBR	Palmier Dattier	-	-	-	-
	G-EBR	EBR	Verre	-	-	-	-
2	EBROG-1Fg-1	EBROG	Lin	10	5	Full	1
	EBROG-1Fg-2	EBROG	Lin	8	10	Full	1
3	EBROG-1Eg-1	EBROG	Lin	10	5	End	1
	EBROG-2Eg-1	EBROG	Lin	10	5	End	2
	EBROG-1Fg-2	EBROG	Lin	8	10	End	1
	EBROG-2Fg-2	EBROG	Lin	8	10	End	2

III.4. Caractéristique des matériaux

III.4.1. Béton

Le béton est fabriqué selon un mélange approprié avec 228, 423, 736 et 792 kg/m³ d'eau, ciment, sable de dune et sable de carrière, respectivement. Les éprouvettes de béton ont été retirées du moule un jour seulement après le coulage et durcies à une température de 20 °C pendant 28 jours. Les valeurs moyennes de résistance à la compression cylindrique du béton à 28 jours ont été évaluées à partir d'essais de compression uniaxiale selon les normes ASTM [41]. La valeur moyenne de la résistance à la compression cylindrique standard était de 50 MPa.



Figure 37 : préparation des matériaux pour les éprouvettes.



Figure 38 : Réalisations des éprouvettes en béton.

III.4.2. Résine Epoxy

Le MEDAPOXY REP est un liant polymère réactif constitué de deux composants, une base en polymère réactif et un durcisseur qui polymérisent à température ambiante. C'est un mastic époxy de réparation structurale et de scellement à base de résine époxy sans solvant.

Le MEDAPOXY REP est fourni sous forme de kit pré dosé en 2 composants :

- Élément A : Résine
- Élément B : Durcisseur

Caractéristique de l'époxy

- Bonne adhérence sur tout support : béton, mortier, pierre, briques, amiante-ciment, métaux
- Densité : $1,4 \pm 0,05$
- Rc 28 : >60 MPa
- Adhérence sur béton : >3 MPa
- Durcissement complet07 j à 20°C



Figure 38 : résine MEDAPOXY REP

III.4.3. Fibre de lin

Les propriétés des fibres de lin sont regroupées dans le tableau 2.

Tableau 7 : Propriétés des fibres de lin [42]

Fibres naturelles	Densité (g/cm ³)	Résistance ultime à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Allongement (%)
Lin	1,5	500 - 1500	28 - 80	1,8 - 3,2



Figure 40 : fibre de lin.

III.4.4. Fibre de verre

Les propriétés des fibres de verre sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 8 : Propriétés des fibres de verre [43].

Fibres naturelles	Densité (g/cm ³)	Résistance ultime à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Allongement (%)
Lin	1,5	590	21	3,8



Figure 41 : Fibre de verre.

III.5. Fixation des fibres sur des surfaces en béton à l'aide des méthodes EBR et EBROG

Après durcissement des éprouvettes, le processus de préparation de surface de la face de traction des poutres a été effectué pour installer des composite FRP à l'aide de la méthode EBR. Pour la préparation de la surface, une meuleuse d'angle munie d'un disque à lamelles abrasives permettra d'éliminer par ponçage la laitance superficielle ainsi que les particules non adhérentes présentes sur le béton. Cette opération aura pour effet de rendre la surface rugueuse en ouvrant la texture du matériau. Après ce traitement préparatoire, un état de surface adéquat et propice à l'adhérence sera obtenu, apte à recevoir l'installation des renforts en composites de PRF. Après avoir rendu rugueuse la surface du béton par les traitements de préparation adéquats, les éprouvettes ont été soigneusement débarrassées de toute contamination résiduelle et dépoussiérées de manière approfondie à l'aide d'un système d'aspiration à air comprimé. Cette étape de nettoyage minutieux permet d'obtenir une surface exempte de toute salissure ou particule susceptible de nuire à l'adhérence du composite de renfort. Une fois les surfaces propres et sèches, la résine époxyde a été préparée selon les recommandations du fabricant. Celle-ci a ensuite été soigneusement appliquée en une couche uniforme sur les zones à renforcer des poutres à l'aide d'une truelle. Sans attendre, les fibres de renfort en composites ont été déposées et imprégnées dans la résine à l'état frais, en prenant soin de bien les positionner selon la configuration de renforcement en soffite. Un rouleau de contre-pression a permis d'assurer l'imprégnation complète des fibres et l'évacuation des potentielles bulles d'air emprisonnées. Après une période de durcissement adéquate, les renforts stratifiés se sont parfaitement liés au béton, prêts à assurer leur fonction de renforcement structural

Dans la méthode EBR, le détachement de la feuille de renforcement se produit généralement dans une fine couche de substrat en béton riche en mortier. Dans les éprouvettes préparées selon la méthode EBROG, trois configurations de rainures (**Fig. 6, Fig. 7**). Ces dimensions de rainure ont été sélectionnées sur la base des résultats d'études antérieures sur la méthode EBROG (**paragraphe**). La présence de ces rainures se traduit par une force de liaison plus élevée, en raison du transfert des contraintes de liaison vers des couches de béton plus profondes à l'interface de la feuille de FRP et de la surface du béton [44] [45].

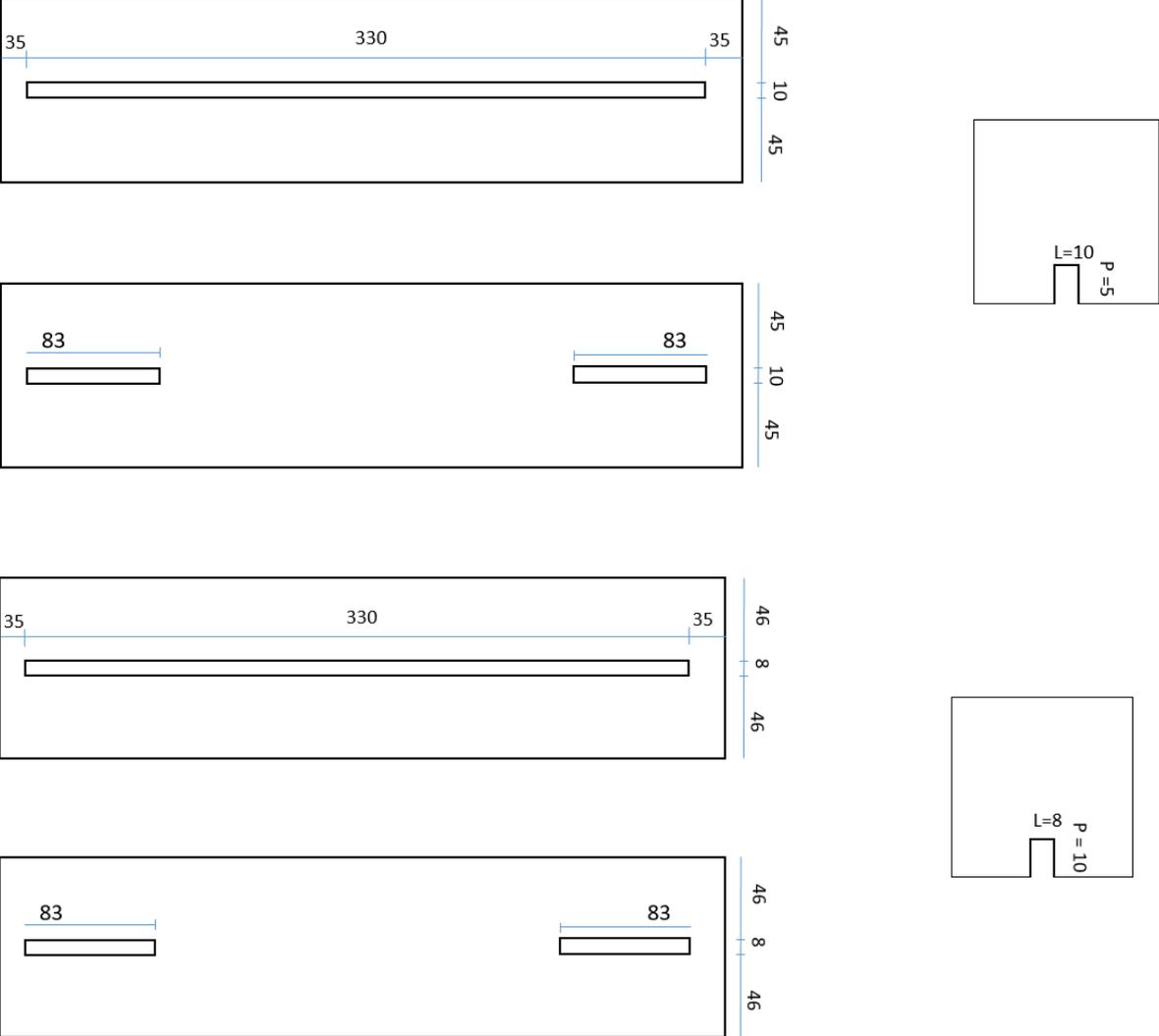


Figure 39 : Renforcement EBROG avec 1 rainure.

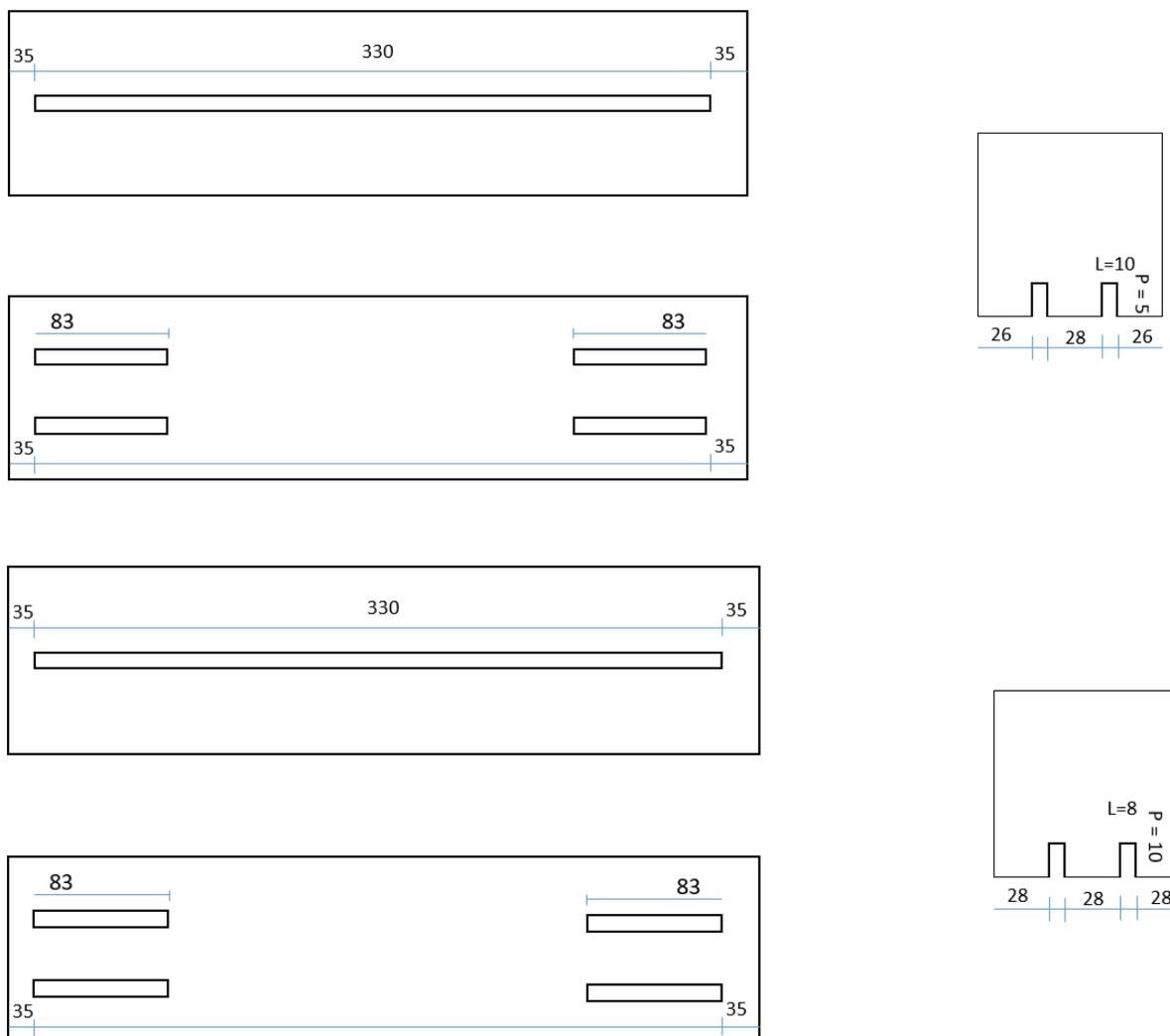


Figure 43 : Renforcement EBROG avec 2 rainures.

Les rainures préalablement créées ont fait l'objet d'un soigneux nettoyage par jet d'air comprimé afin d'éliminer toute poussière ou contamination résiduelle présente. Une fois parfaitement dépoussiérées, ces rainures ont été entièrement remplies de résine époxyde à l'aide d'une truelle, veillant à une répartition uniforme sans laisser de vides. Dans un second temps, les fibres de renfort en matériaux composites ont été mises en place dans les rainures fraîchement garnies de résine époxyde. Un rouleau de contre-pression a permis d'imprégner complètement ces fibres dans la résine encore à l'état pâteux, assurant ainsi une saturation totale du renfort. **Les figures 8-12** montrent la préparation des échantillons à l'aide des méthodes EBR et EBROG avant l'installation des fibres.



Figure 44 : Marquage des poutres pour la réalisation des rainures.



Figure 45 : Préparation des rainures.



Figure 46 : Rainures préparées.

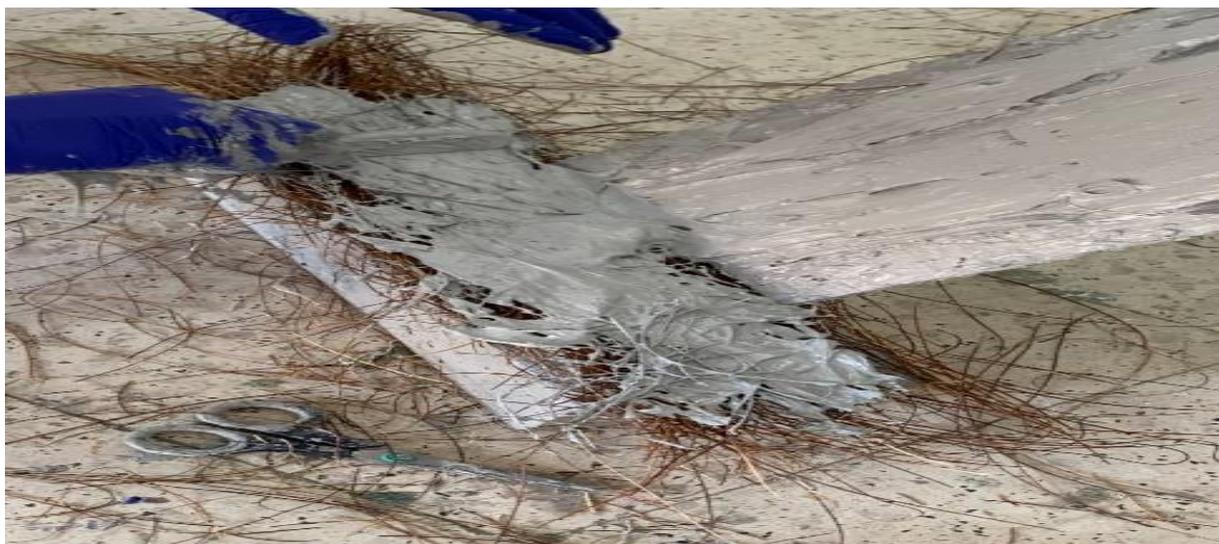


Figure 47 : Application de fibres de palmier dattier.



Figure 48 : Application de fibres lin.

III.6. Procédure de test

La configuration de l'essai de flexion à trois points est illustrée à la **Fig. 13**. Un actionneur hydraulique d'une capacité de 400 kN a été utilisé pour appliquer la charge sur les échantillons testés. L'actionneur était monté sur un cadre de chargement en acier rigide conçu pour résister à la flexion et à la déflexion pendant les tests. Les poutres en béton étaient placées sur deux rouleaux en acier espacés de 200 mm pour fournir des conditions de support simples. Les rouleaux avaient un diamètre de 25 mm et étaient suffisamment longs pour éviter l'écrasement localisé du béton. Un troisième rouleau en acier de dimensions identiques était attaché à

Chapitre 3 : Programme Expérimentale

l'actionneur pour l'application d'une charge concentrée au milieu de la portée des poutres testées.

La déflexion verticale était mesurée à l'aide d'un LVDT avec une répétabilité de 0,01 mm. Le LVDT avait une plage de mesure de 50 mm et était solidement fixé sous la poutre au milieu de la portée à l'aide d'un support magnétique. Pour mesurer la charge appliquée, une cellule de charge de 400 kN était attachée entre l'actionneur et le rouleau supérieur. Le LVDT et la cellule de charge étaient connectés à un système d'acquisition de données pour enregistrer les signaux. Pendant les tests, la charge verticale et la déflexion au milieu de la portée étaient enregistrées. Les données acquises étaient traitées pour générer les courbes charge-déflexion pour chaque spécimen de poutre. Avant les tests, tous les instruments étaient calibrés selon les spécifications du fabricant pour garantir la précision des données mesurées.



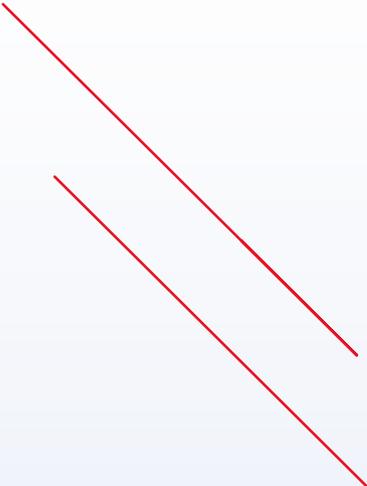
Figure 40 : Configuration expérimentale pour la mesure de déformation.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons méticuleusement exploré et mis en œuvre un programme expérimental pour évaluer l'efficacité des fibres naturelles comparées aux fibres synthétiques dans le renforcement du béton. En utilisant des fibres de lin et de palmier dattier, cette recherche vise à fournir une alternative durable aux fibres de verre habituellement utilisées, s'inscrivant ainsi dans une démarche de génie civil respectueuse de l'environnement.

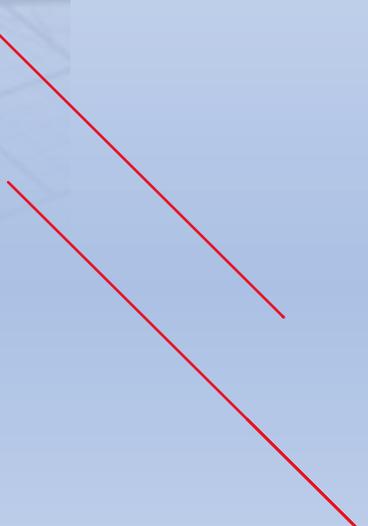
Nous avons structuré notre expérimentation autour de l'analyse de plusieurs paramètres cruciaux, tels que les types de fibres, les méthodes de renforcement (EBR et EBROG), ainsi que les dimensions et positions des rainures. Ces variables ont été choisies pour comprendre leur influence sur la performance des poutres en béton, notamment en termes de résistance à la flexion et de comportement à la rupture.

Les données expérimentales émergentes et les analyses comparatives détaillées seront présentées et discutées en profondeur dans le chapitre suivant "Résultats et discussions". Cela permettra d'évaluer quantitativement les performances réelles des différentes configurations et de tirer des conclusions sur l'efficacité des fibres naturelles pour le renforcement structural durable.



IV. Chapitre 4 :

Résultats Et Discussions



IV.1. Introduction

Ce chapitre se consacre à l'exploration détaillée des performances structurales de poutres en béton renforcées par différentes configurations de composites à fibres de lin. Nous examinerons les réponses en termes de charge et de déflexion, mettant en lumière l'efficacité mécanique offerte par le composite FFRP, PDFRP, et GFRP. L'accent sera mis sur la capacité des matériaux à supporter les efforts de flexion, ainsi que sur l'analyse de leur rupture, fournissant ainsi un aperçu sur le potentiel des différentes techniques de renforcement.

IV.2. Évaluation Comparative de la capacité des Composites FFRP, PDFRP et GFRP

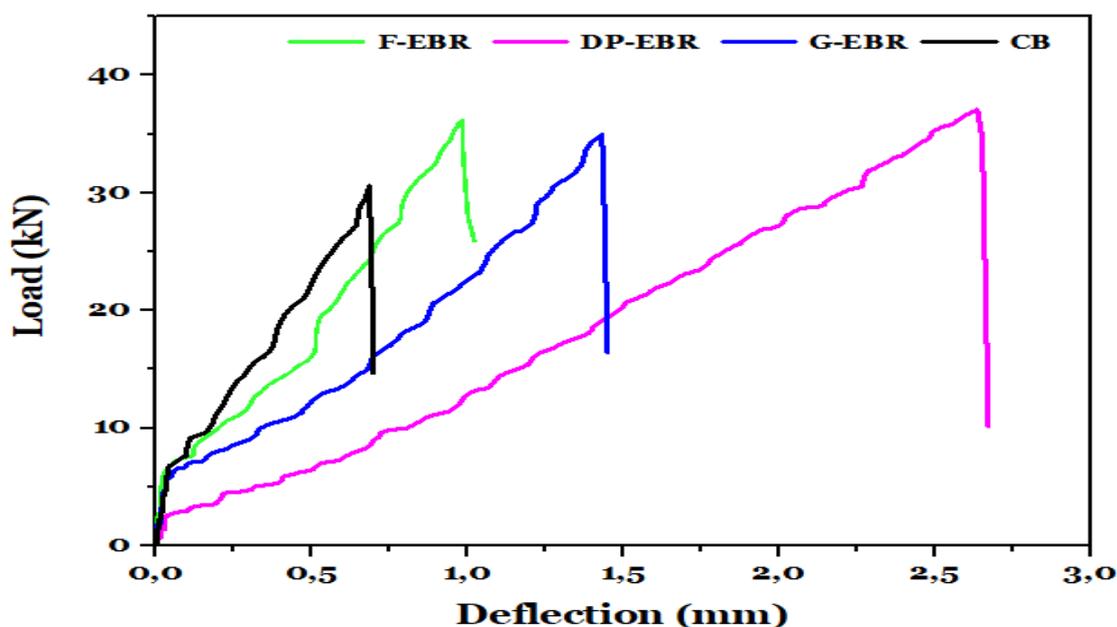


Figure 41 : Courbes charge-déflexion pour les poutres CB et renforcées par F-EFR, DP-EFR, et G-EFR.

Les réponses charge-déflexion, illustrées à la Fig. 3-1, caractérisent le comportement structural des poutres témoins (CB) et des poutres renforcées par des composites FFRP, PDFRP, GFRP selon la technique ERB. Les courbes révèlent une phase initiale où les éprouvettes présentent un comportement élastique, soulignant leur aptitude à reprendre les efforts de manière réversible, sans dégradation notable. Cela précède leur rupture brusque à la charge ultime, soit par écrasement du béton comprimé, soit par rupture des composites de renfort, comportement typique des matériaux composites à fibres qui n'offrent pas de grande ductilité.

La capacité de charge ultime des poutres BC, F-FRP, PD-FRP et G-FRP était respectivement de 30.57 kN, 36.17 kN, 37.08 kN et 34.95kN. De plus, la déflexion observée à mi-travée a atteint 0.68mm, 0.98 mm, 2.64 mm et 1.43mm respectivement. On peut indiquer que le renforcement utilisant les composites PD-FRP a montré une capacité de charge supérieure de 21% et a augmenté le déplacement à la charge ultime de 289%, par rapport à CB, tandis que F-FRP et G-FRP ont présenté des augmentations de 18% et 14% et ils ont entraîné des augmentations de 44% et 111% respectivement par rapport à CB.

Sur la base de ces données, nous pouvons observer que les renforts en F-FRP ont surpassé les G-FRP de 4% en termes de résistance ultime, tandis que les renforts en PD-FRP ont surpassé les G-FRP de 7% dans les mêmes aspects. Cela suggère que les renforts en PD-FRP et F-FRP présentent des performances légèrement supérieures à celles des renforts en G-FRP dans cette étude spécifique. En effet, les investigations expérimentales réalisées par C. Chen et al. [46] ont mis en évidence que l'augmentation du nombre de couches de renfort en FFRP engendrait des gains de résistance et de capacité similaires à ceux obtenus avec les CFRP. Ces résultats corroborent donc les observations de la présente étude, renforçant la validité des avantages démontrés par FFRP.

IV.3. Evaluation de l'effet des dimensions des rainures

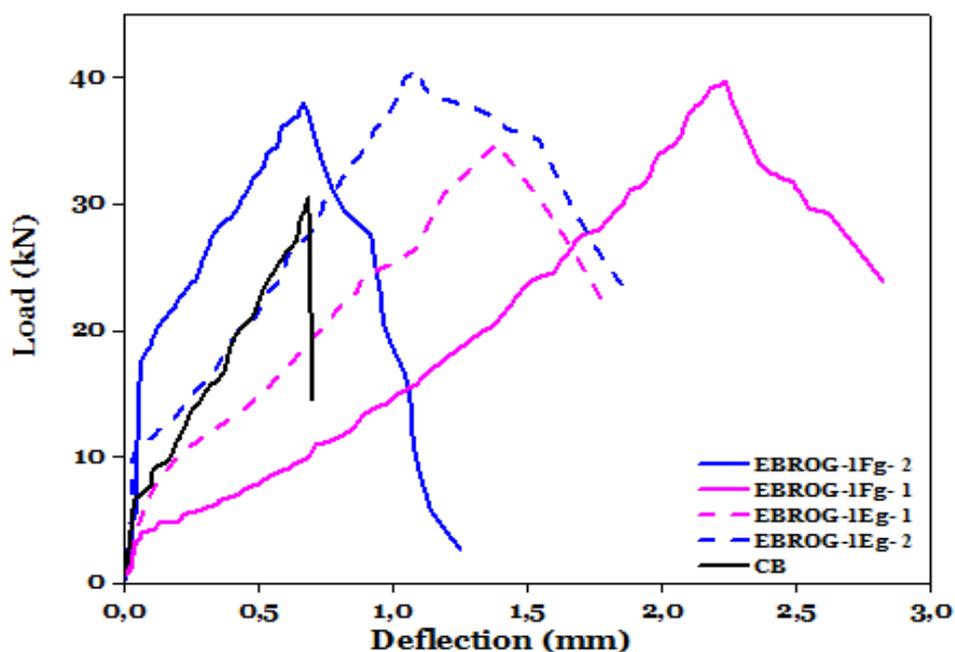


Figure 42 : Courbes charge-déflexion des configurations EBROG-Fg et EBROG-1Eg.

La Fig.3-2 illustre les courbes charge-déformation des poutres renforcées par la technique EBROG en composites FFRP, mettant en évidence des similitudes notables malgré les variations dimensionnelles des rainures réalisées sur leur longueur. Une phase initiale de comportement élastique linéaire est observée. Cependant, cette phase est systématiquement suivie d'une rupture abrupte à la charge maximale, avec des ductilités post-pic différentes.

Les résultats des tests montrent que les poutres renforcées du groupe 2, EBROG-1Fg-1 et EBROG-1Fg-2, exhibent une remarquable capacité de charge ultime, atteignant respectivement 40,72 kN et 41,03 kN. Ces valeurs représentent une augmentation de près de 33% et 34% par rapport à la charge ultime de CB, ainsi qu'une amélioration significative de 12,56% et 13,41% par rapport à la méthode de renforcement conventionnelle EBR. De plus, en ce qui concerne la déflexion à mi-portée, une différence notable est observée.

EBROG-1Fg-1 affiche une déflexion de 2,23 mm, soit environ 3 fois supérieure à celle d'EBROG-1Fg-2, mesurée à 0,67 mm, et 2 fois supérieure à celle d'EBR. Ces observations mettent en évidence que l'utilisation des méthodes EBROG en configurations 1Fg-1 et 1Fg-2 produit des résultats similaires en termes de capacité de charge ultime, cependant, la configuration 1Fg-1 se distingue par une flexibilité remarquable. En outre, l'analyse post-pic révèle que EBROG-1Fg-1 présente une décroissance de la capacité de charge relativement progressive, suggérant une réserve de ductilité en déplacement, tandis qu'EBROG-1Fg-2 présente une chute abrupte de la capacité portante, indiquant une ductilité post-pic limitée. Ces résultats renforcent l'idée selon laquelle l'utilisation de la méthode EBROG améliore considérablement la capacité de charge de flexion de la structure. Les études de J. Sabzi et al.[47] ont montré que l'utilisation de la méthode EBROG entraîne une absorption d'énergie significativement plus importante par rapport à méthode EBR, ainsi que l'utilisation de la méthode EBROG dans le renforcement des poutres en béton a hautes résistances entraîne de meilleures performances par rapport à la méthode EBR environ 13%. S. Zolfaghari et al. [48] ont indiqué la supériorité de la technique EBROG sur la méthode EBR avec une augmentation de 14,7 à 73,5 % de la charge maximale. De plus, parmi les différentes rainures, la rainure de 10 × 5 mm (largeur × profondeur) a été considérée comme la rainure optimale en fournissant la charge maximale pour configuration 1Fg-1.

Les résultats expérimentaux obtenus pour les spécimens du groupe 3, renforcés selon les configurations EBROG-1Eg-2 intégrant des rainures uniquement aux extrémités, ont mis en évidence des gains appréciables en termes de performance structurale. Une charge ultime de 40,70 kN a été enregistrée, représentant des augmentations substantielles d'environ 3% et 7%

par rapport aux configurations EBROG-1Fg-1 et EBROG-1Fg-2 intégrant un rainurage continu. Cette valeur correspond également à une hausse remarquable de 34% comparativement à CB. Un bénéfice similaire a été constaté concernant la rigidité moyenne, les poutres renforcées par EBROG-1Eg-1 et EBROG-1Eg-2 affichant une rigidité environ 1,8 fois supérieure à celle de CB.

Cependant, il convient de noter que l'amélioration de la résistance ultime observée pour EBROG-1Eg-2 s'est accompagnée d'une tendance inverse en termes de ductilité en déplacement pour la variante EBROG-1Eg-1. Une diminution de 61% de la déflexion maximale a été relevée par rapport à EBROG-1Fg-1, bien que cette valeur reste supérieure à celles obtenues pour CB et les poutres renforcées conventionnellement. En revanche, la capacité portante ultime d'EBROG-1Eg-1 s'est avérée inférieure d'environ 3% (34,82 kN) à celle du renforcement EBR.

Les divergences de comportement constatées entre les différentes variantes analysées soulignent l'importance cruciale des dimensions et de la géométrie des rainures. Parmi les configurations évaluées, le spécimen EBROG-1Eg-2, intégrant des rainures de 8 mm de largeur et 10 mm de profondeur aux extrémités, s'est démarqué par ses performances supérieures. Cette configuration particulière a été identifiée comme offrant la géométrie de rainurage optimale dans le cadre de cette étude spécifique. Ces résultats mettent en évidence l'influence significative des paramètres géométriques sur la réponse structurelle globale et soulignent la nécessité d'une sélection judicieuse des dimensions des rainures pour maximiser l'efficacité des techniques de renforcement basées sur l'ancrage mécanique.

IV.4. Evaluation du nombre de rainure

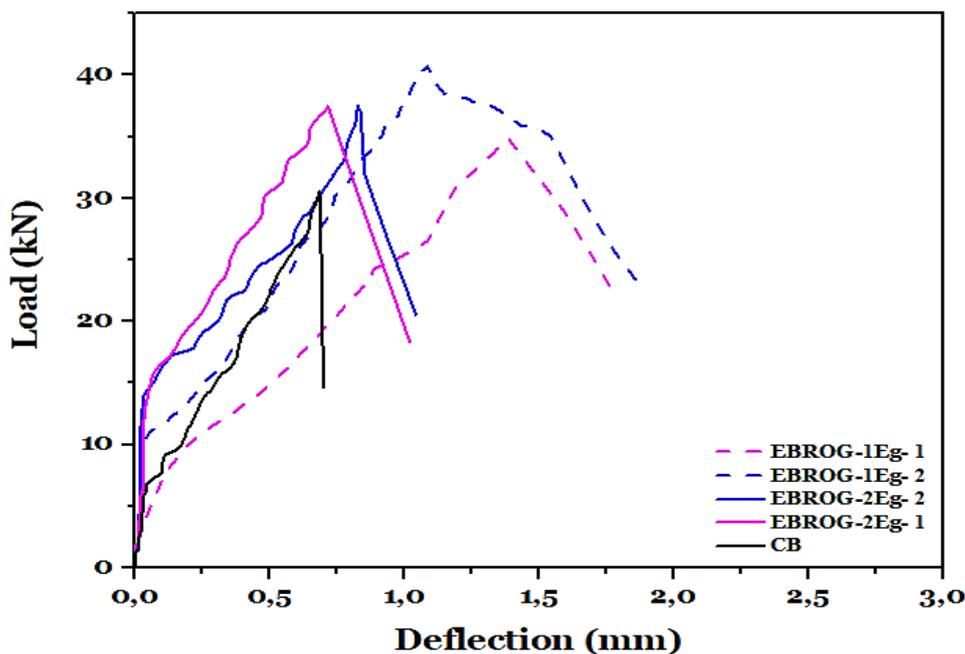


Figure 43 : Courbes charge-déflexion des configurations EBROG-1Eg et EBROG-2Eg.

L'analyse des courbes charge-déflexion pour les poutres renforcées par FFRP dans la configuration EBROG-Eg, illustrées à la **Fig.3-6** révèle des comportements contrastés. Les systèmes EBROG-2Eg-1 et EBROG-2Eg-2 ont démontré des capacités de charge maximales similaires, s'établissant respectivement à 37,44 kN et 37,49 kN. Cependant, l'ajout d'une rainure supplémentaire pour la variante EBROG-2Eg-1 a entraîné une augmentation notable de 23% par rapport aux poutres CB, et de 8% comparativement à EBROG-1Eg-1. Cette amélioration de la capacité portante s'est accompagnée d'une diminution de la rigidité, comme en témoigne une flèche au milieu de 0,72 mm, qui est restée comparable à celle des poutres CB.

Il est important de souligner que les gains observés pour EBROG-2Eg-1 ont été contrebalancés par un comportement inverse de la variante EBROG-2Eg-2. Cette dernière a présenté une capacité portante ultime inférieure d'environ 8% à celle du renforcement EBROG-1Eg-2, bien que restant supérieure d'environ 23% aux valeurs des poutres CB. Parallèlement, une diminution de 32% de la déflexion maximale a été relevée par rapport à EBROG-1Eg-2, tout en restant supérieure aux valeurs des poutres CB et des renforts conventionnels.

Selon les observations d'A. Saljoughian et al. [49], une augmentation du nombre de rainures entraînait une diminution d'environ 8% de la capacité de charge ultime sous compression axiale cyclique. Selon l'étude menée par A. Codina et al. [50], l'augmentation du nombre de rainures n'a pas engendré d'amélioration significative des performances observées. Des conclusions qui

s'alignent avec nos propres résultats expérimentaux mettant en évidence cet impact défavorable d'un accroissement excessif de la rugosité de surface induite par les rainures.

IV.5. Modes de défaillance



Figure 44 : Mécanismes de défaillance des échantillons du groupe 1.

L'analyse comparative des modes de défaillance entre différents composites FRP met en évidence des similitudes dans les mécanismes de rupture, ainsi que des divergences notables en termes de contrôle de la fissuration, comme l'illustre la **Fig. 3-4**.

Pour les échantillons renforcés par les fibres de lin (F-EBR), de palmier dattier (PD-EBR) et de verre (G-EBR), aucun décollement de la couche de renfort FRP n'a été observé, témoignant d'une adhérence satisfaisante au substrat en béton. Cependant, les schémas de fissuration diffèrent selon le type de fibres utilisé.

Les spécimens G-EBR et PD-EBR ont développé une unique fissure verticale rectiligne au droit de la section centrale, plus large que celle de F-EBR, caractéristique d'une rupture par flexion conventionnelle. En revanche, pour le renfort F-EBR à base de fibres de lin, bien qu'une fissure principale soit apparente au centre, le composite F-FRP ne semble pas avoir subi de rupture totale. Cette observation sur la poutre F-EBR peut être attribuée à la longueur des fibres qui est nettement supérieure à celle des fibres de DPF et GF. Cette caractéristique morphologique laisse supposer que le renfort en fibres de lin a permis de mieux contrôler l'ouverture et la propagation de la fissure centrale comparativement aux autres renforts fibrés, sans toutefois empêcher totalement sa formation.



Figure 45 : Mécanismes de défaillance des échantillons du groupe 2 et 3.

Les différentes poutres analysées dans la **fig. 3-5** présentent des similitudes dans les mécanismes de rupture, aucun décollement de la couche de renfort FRP n'a été observé. Cependant, les modes de fissuration variés, reflétant les propriétés intrinsèques du matériau béton ainsi que l'influence des configurations dans la distribution des charges appliquées.

Les poutres renforcées dans la configuration ERBOG-Fg expose des fissures irrégulières et sinueuses avec des branches se propageant dans plusieurs directions, témoigne d'une variation dans leur force d'adhérence au béton. Les zones où la fissure change de direction peuvent correspondre aux points où les fibres ont empêché la propagation linéaire de la fissure en absorbant et redistribuant les contraintes. En revanche, Les poutres renforcées dans la configuration ERBOG-Eg avec 1 rainure montre des fissures centrales avec une branche oblique prononcée suggère que les fibres ont initialement résisté à la propagation de la fissure. La déviation de la fissure vers le haut indique que les fibres possèdent une force d'ancrage significative, modifiant le chemin naturel de la fissure et exhibant une bonne adhérence dans la matrice du béton. L'asymétrie peut indiquer des zones où les fibres ont mieux résisté à la traction, démontrant leur influence sur la direction de la propagation des fissures

Les poutres de la variante "ERBOG-Eg" avec 2 rainures ont développé une unique fissure verticale rectiligne au droit de la section centrale, plus large que celles des autres systèmes. Cette fissure rectiligne indique une répartition relativement uniforme des contraintes le long de la section centrale jusqu'au moment de la rupture. La largeur plus importante de la fissure par

rapport aux autres systèmes testés pourrait suggérer que la capacité de charge a été atteinte de manière plus abrupte, ce qui a entraîné une ouverture de fissure plus importante avant l'échec final.

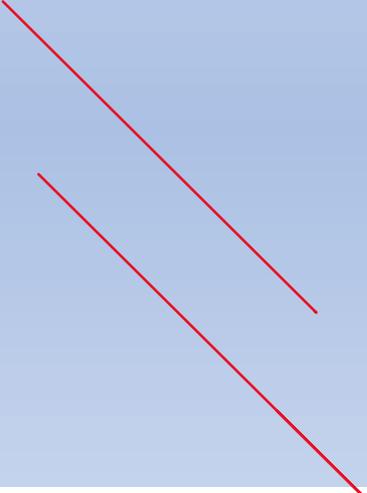
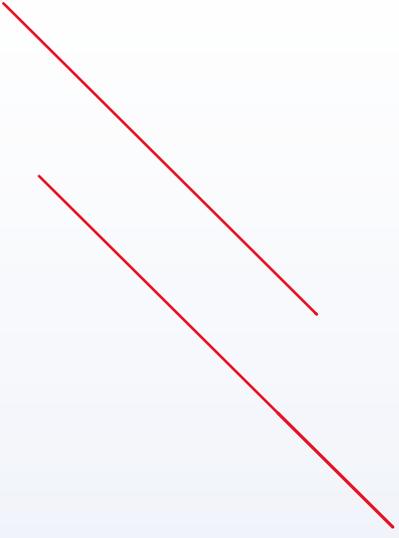
IV.6. Conclusion

Les résultats expérimentaux détaillés dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence les performances mécaniques accrues offertes par les différentes configurations de renforcement en composites FRP à base de fibres végétales pour les poutres en béton armé. L'analyse approfondie des courbes charge-déflexion a révélé que les renforts FFRP, PDFRP et GFRP ont amélioré substantiellement la résistance à la flexion et la rigidité des poutres. Nous avons observé que les renforts PD-FRP et FFRP offrent une capacité de charge nettement supérieure, surpassant les renforts en G-FRP de 6% et 4% respectivement.

Parmi les différentes configurations évaluées, la méthode EBROG avec d'une rainure aux extrémités de 8 mm de largeur x 10 mm de profondeur (EBROG-1Eg-2) s'est démarquée comme offrant les meilleures performances globales, combinant une capacité de charge ultime accrue de 34% et une rigidité moyenne environ 1,8 fois supérieure à celle des poutres témoins. Cependant, les configurations avec un rainurage continu (EBROG-1Fg) ont démontré une ductilité en déplacement nettement supérieure, bien que présentant une légère diminution de la capacité de charge par rapport à EBROG-1Eg-2.

L'étude approfondie des modes de rupture a mis en évidence le rôle crucial joué par les propriétés intrinsèques des fibres végétales dans le contrôle de la fissuration et la distribution des contraintes. Les renforts FFRP à base de fibres de lin ont permis de mieux contrôler l'ouverture et la propagation des fissures principales, tandis que les configurations EBROG avec des rainures aux extrémités ont démontré une capacité accrue à contenir les ouvertures de fissures par rapport aux autres systèmes testés.

Les résultats obtenus soulignent le potentiel prometteur des renforts en composites FRP à fibres végétales pour le renforcement des structures en béton armé, offrant non seulement des améliorations significatives des performances mécaniques, mais également des avantages environnementaux et économiques grâce à leur nature durable et renouvelable. Cependant, une optimisation judicieuse des paramètres géométriques, tels que les dimensions et le positionnement des rainures, demeure essentielle pour exploiter pleinement les bénéfices de ces techniques de renforcement innovantes.



Conclusion Générale Et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

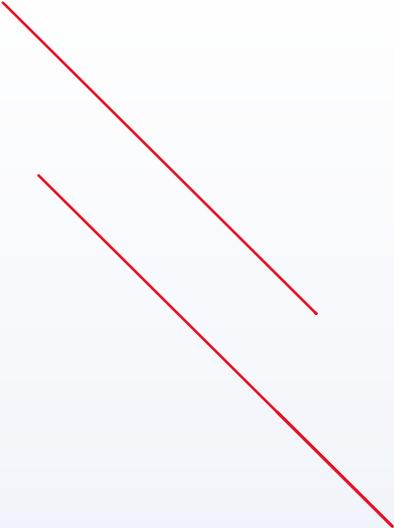
Cette recherche a exploré en profondeur l'utilisation de matériaux composites pour le renforcement des poutres en béton, soulignant l'efficacité et les avantages environnementaux des composites par rapport aux méthodes traditionnelles. Les résultats expérimentaux ont démontré que les matériaux composites, particulièrement ceux à base de fibres naturelles, augmentent significativement la résistance à la flexion des poutres tout en présentant une alternative durable aux renforcements conventionnels.

Les applications pratiques de ces résultats sont vastes, permettant des améliorations dans la conception et la réhabilitation des structures en béton armé. Ces matériaux offrent une solution viable pour prolonger la durée de vie des infrastructures existantes et pour la construction de nouvelles structures plus résistantes et écologiques.

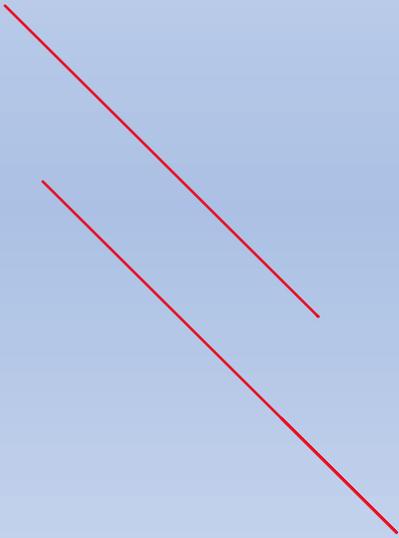
Cependant, l'étude reconnaît certaines limitations, notamment la variabilité des propriétés des matériaux composites qui peut affecter leur performance. Il est recommandé de poursuivre les recherches pour standardiser ces matériaux et optimiser leurs processus de fabrication et d'application.

En perspective, il serait pertinent d'étendre cette recherche aux impacts à long terme des matériaux composites sur les structures en béton dans diverses conditions environnementales. De plus, l'intégration de modélisations plus avancées et de simulations numériques pourrait préciser davantage la compréhension des interactions entre les composites et le béton.

En conclusion, cette recherche a ouvert la voie à des pratiques de construction plus durables et innovantes, encourageant l'adoption de matériaux composites dans le génie civil. Les efforts continus dans ce domaine sont cruciaux pour répondre aux défis environnementaux et structurels actuels.



Références Bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] « I. Miroloubov et coll., «Problèmes de résistance des matériaux», Editions de Moscou. »
 - [2] « L. Aleinik & J. Durler, «Résistance des matériaux», Ed. Spes, Dunod. »
 - [3] « Neville, A.M., «Properties of Concrete», 5th Edition, Pearson Education Limited, 2011. »
 - [4] « ASTM C78/C78M, «Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading),» ASTM International. »
 - [5] « ASTM C293/C293M, «Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading),» ASTM International. »
 - [6] César DÍAZ GÓMEZ, « Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures », in *La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne*, Département des Constructions architecturales I de l'École technique supérieure d'Architecture de Barcelone, Université polytechnique de Catalogne, Espagne.
 - [7] Dr. OUZAA KHEIRA, « RÉHABILITATION DES STRUCTURES ». Université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF U.S.T.O. Faculté d'Architecture et de Génie Civil, 2015.
 - [8] LEBON.B, « Réhabilitation et développement urbain, Cahiers techniques du bâtiment », *Moniteur*, p. 63-64, 1982.
 - [9] C. JEAN, « Renforcer ou réparer une structure: Pourquoi et comment ». Annales N° 411, Tome 1, 1983.
 - [10] « Bazant, Z.P., and Cedolin, L., «Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories,» World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010. »
 - [11] « ACI 318, «Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,» American Concrete Institute. »
 - [12] « Elfgren, L., «Fracture Mechanics of Concrete Structures: From Theory to Applications,» Chapman & Hall, 1989. »
 - [13] « Vecchio, F. J., & Bucci, F. (1999). Analysis of repaired reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 125(6), 644-652. »
 - [14] « CI 440.2R-17 (2017). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute. »
 - [15] « Concrete Society Technical Report No. 55 (2004). External concrete repairs: Material, design and workmanship. Concrete Society. »
 - [16] « Taerwe, L., & Matthys, S. (2013). *Fib Bulletin 66: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. International Federation for Structural Concrete (fib). »
 - [17] « Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., & Lam, L. (2002). *FRP-strengthened RC structures*. John Wiley & Sons. »
 - [18] ABDELHAK BOUSSELHAM, « COMPORTEMENT DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MATÉRIAUX COMPOSITES AVANCÉS ». MONTRÉAL, 11 novembre 2005.
 - [19] T. Gharib, « Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites: application aux murs en pierres calcaires ».
 - [20] J. R. Correia, « Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites », in *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*, M. C. Gonçalves et F. Margarido, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 501-556. doi: 10.1007/978-3-319-08236-3_11.
-

Références Bibliographiques

- [21] *Pultrusions créatives. Le nouveau manuel amélioré de conception de Pultex Pultrusion ; Creative Pultrusions Inc. : Alum Bank, PA, États-Unis, 2004.*
- [22] P. K. Mallick, *Composites renforcés de fibres: Matériaux, fabrication et conception, troisième édition.*
- [23] T. Keller, *USE OF FIBRE REINFORCED POLYMERS IN BRIDGE CONSTRUCTION.* 2003. Consulté le: 3 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/View/703504>
- [24] Y. H. Mugahed Amran, R. Alyousef, R. S. M. Rashid, H. Alabduljabbar, et C.-C. Hung, « Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review », *Structures*, vol. 16, p. 208-238, nov. 2018, doi: 10.1016/j.istruc.2018.09.008.
- [25] H. N. Dhakal, Z. Y. Zhang, et M. O. W. Richardson, « Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites », *Composites Science and Technology*, vol. 67, n° 7, p. 1674-1683, juin 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.06.019.
- [26] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, et M. Sain, « Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites », *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 299, n° 1, p. 9-26, 2014, doi: 10.1002/mame.201300008.
- [27] S. Vigneshwaran *et al.*, « Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 124109, déc. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124109.
- [28] M. R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Senthamaraiannan, S. Senthil, et S. Pradeep, « Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, p. 566-581, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.101.
- [29] M. Mbacke, « Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des composites tressés 3D : Application à la conception de réservoirs GNV », déc. 2013.
- [30] A. Ismael, « Modélisation du comportement mécanique et de la perméabilité des renforts tissés », *THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON*, sept. 2017.
- [31] ACI Committee 440, *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.* American Concrete Institute, 2017. doi: 10.14359/51700867.
- [32] CNR-DT 200 R1, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures.* National Research Council of Italy, 2013.
- [33] D. Mostofinejad et E. Mahmoudabadi, « Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams », *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, n° 6, p. 804-811, déc. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000117.
- [34] A. Codina, C. Barris, Y. Jahani, M. Baena, et L. Torres, « Experimental and theoretical study on the flexural behaviour of RC beams strengthened with externally bonded reinforcement on grooves CFRP laminates », *Engineering Structures*, vol. 299, p. 117091, janv. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117091.
- [35] N. Moshiri *et al.*, « Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method », *Composites Part B: Engineering*, vol. 201, p. 108359, nov. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108359.
- [36] D. Mostofinejad et K. Khozaei, « Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams », *Construction and Building Materials*, vol. 93, p. 110-120, sept. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.062.
- [37] J. Sabzi, M. R. Esfahani, T. Ozbakkaloglu, et B. Farahi, « Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods », *Engineering Structures*, vol. 205, p. 110072, févr. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110072.
-

Références Bibliographiques

- [38] A. Hosseini et D. Mostofinejad, « Effect of groove characteristics on CFRP-to-concrete bond behavior of EBROG joints: Experimental study using particle image velocimetry (PIV) », *Construction and Building Materials*, vol. 49, p. 364-373, déc. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.036.
- [39] A. Moghaddas et D. Mostofinejad, « Empirical FRP-Concrete Bond Strength Model for Externally Bonded Reinforcement on Grooves », *Journal of Composites for Construction*, vol. 23, n° 2, p. 04018080, avr. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000924.
- [40] S. Zolfaghari, D. Mostofinejad, N. Fantuzzi, R. Luciano, et F. Fabbrocino, « Experimental evaluation of FRP-concrete bond using externally-bonded reinforcement on grooves (EBROG) method », *Composite Structures*, vol. 310, p. 116693, avr. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116693.
- [41] ASTM C39/C39M-04a, « Société américaine des tests et des matériaux (ASTM). Méthode d'essai standard pour la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques en béton. ASTM C39/C39M-04a. Conshohocken Ouest (PA) », 2005.
- [42] B. Deepanraj, S. Thirumalvalavan, S. Selvarasu, N. Senthilkumar, et F. Shaik, « Investigation and optimization of wear properties of flax fiber reinforced Delrin polymer composite », *Materials Today: Proceedings*, mars 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.173.
- [43] S. Ding, B. Zou, Y. Zhuang, X. Wang, L. Li, et J. Liu, « Hybrid layout and additive manufacturing of continuous carbon/glass fibers reinforced composites, and its effect on mechanical properties », *Composite Structures*, vol. 319, p. 117133, sept. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117133.
- [44] D. Mostofinejad et A. Moghaddas, « Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams », *Construction and Building Materials*, vol. 54, p. 605-614, mars 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.002.
- [45] D. Mostofinejad et A. Akhlaghi, « Experimental Investigation of the Efficacy of EBROG Method in Seismic Rehabilitation of Deficient Reinforced Concrete Beam–Column Joints Using CFRP Sheets », *Journal of Composites for Construction*, vol. 21, n° 4, p. 04016116, août 2017, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000781.
- [46] C. Chen *et al.*, « Eco-friendly and mechanically reliable alternative to synthetic FRP in externally bonded strengthening of RC beams: Natural FRP », *Composite Structures*, vol. 241, p. 112081, juin 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112081.
- [47] J. Sabzi, M. R. Esfahani, T. Ozbakkaloglu, et B. Farahi, « Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods », *Engineering Structures*, vol. 205, p. 110072, févr. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110072.
- [48] S. Zolfaghari, D. Mostofinejad, N. Fantuzzi, F. Fabbrocino, et R. Luciano, « Fracture prevention and repair via FRP-to-concrete joint using externally-bonded reinforcement on grooves (EBROG) technique », *Procedia Structural Integrity*, vol. 47, p. 398-407, janv. 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.07.085.
- [49] A. Saljoughian et D. Mostofinejad, « Grooving methods in square RC columns strengthened with longitudinal CFRP under cyclic axial compression », *Engineering Structures*, vol. 174, p. 724-735, nov. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.007.
- [50] A. Codina, C. Barris, Y. Jahani, M. Baena, et L. Torres, « Experimental and theoretical study on the flexural behaviour of RC beams strengthened with externally bonded reinforcement on grooves CFRP laminates », *Engineering Structures*, vol. 299, p. 117091, janv. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117091.
-