

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

En vue de l'obtention du diplôme de master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Thème

Etude expérimentale du renforcement interne en flexion, avec un composite de jute, de poutres en béton de granulats recyclés.

Présenté par :

M^r YAHI Salim

M^r SAIDANI Nouredine

Devant le jury composé de :

M^{me} BOUZEBOUDJA F.

MCA

UMMTO

Président

M^{me} ALI AHMED C.

MCA

UMMTO

Encadrant

M^{me} AIT TALEB S.

MCA

UMMTO

Examineur

Promotion : 2023/ 2024

Soutenu le 02/07/2024

Remerciements

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

Nos remerciements vont, en premier lieu, à notre promotrice **Dr ALI AHMED C**, qui a su nous aider à réaliser ce travail de recherche à but environnemental, nous la remercions pour son soutien précieux et son engagement pour la réalisation de cette recherche. Sa contribution a été d'une grande importance, nous sommes très reconnaissants pour tout ce qu'elle a fait pour nous.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, **Dr BOUZEBODJA F** et **Dr AIT TALEB S**, pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre recherche, en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous les enseignants qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir, ainsi que tout le personnel des laboratoires de matériaux et de RDM de l'Université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou. Nous tenons à remercier particulièrement **Dr IGUETOULENE. F**, **M^{me} MEDJBAR. F** et **Mr BOUHERRAOUA.R**, auprès desquels nous avons trouvé un accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont nous avons besoin durant les investigations expérimentales.

Nous remercions, enfin, toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci 

Dédicaces

C'est avec un immense plaisir, une grande satisfaction et un profond sentiment de générosité, que nous dédions ce modeste travail à tous ceux qui occupent une place spéciale dans nos cœurs.

Nous dédions ce travail de mémoire de fin d'études à nos chers parents, ainsi qu'à nos frères et sœurs, en témoignage de notre profonde gratitude pour leur soutien, leur amour et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours académique, leur présence a été une source d'inspiration inestimable pour nous, et cette réussite leur est dédiée.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers nos précieux camarades on leur dédiant ce travail pour leur assistance constante et précieuse ainsi que pour les encouragements inestimables qu'ils nous ont apportés tout au long de notre travail.

Liste des figures**Liste des tableaux**

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I synthèses bibliographiques

I.1. Introduction.....	4
I.2 Les granulats recyclés	4
I.2.1. Types de granulats recyclés	5
I.2.2 Sources des granulats recyclés.....	6
I.2.3 Avantages et inconvénients de l'utilisation des granulats recyclés dans le béton.....	8
I.3. Les granulats valorisés dans les bétons suivant les normes en vigueur	9
I.4 Rappel sur les matériaux composites	9
I.4.1. Types de matériaux composites	10
I.4.2 Types de fibres	11
I.4.3. Matrices.....	16
I.4.4. Les polymères renforcés de fibres (PRF).....	16
I.4.5. Propriétés mécaniques des matériaux composites	17
I.5. Les différentes techniques de renforcement des poutres	18
I.5.1 Renforcement par fibres textiles naturelles.....	18
I.5.2 Renforcement par polymères renforcés de fibres (PRF).....	19
I.5.3. Renforcement par matériaux composites naturels	19
I.5.4 Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites.....	20
I.5.5 Renforcement par plats partiellement ou entièrement insérés (NSM).....	20
I.6. Revue de quelques travaux sur l'influence des granulats recyclés sur la résistance à la flexion du béton.....	21
I.7. Conclusion	22

Chapitre II Etude expérimentale

II.1. Introduction	24
II.2. Matériaux utilisés.....	24
II.2.1 .Le béton	24
II.2.2 .Le renfort	29
II.2.2.1 .Les fibres de jute	29
II.1.2.2 .La résine	30

II.2.3. La Pouzzolane.....	32
II.2.4. Le superplastifiant	32
II.3. Pprocédure expérimentale	33
II.3.1. Conception des poutres.....	34
II.3.1.1. Préparations du ferrailage.....	34
II.3.1.2. Mise en place du renfort	35
II.3.2. Préparations du béton	36
II.3.3. Préparation des éprouvettes	37
II.3.3.1. Préparation des moules	37
II.3.3.2. Préparation du béton	38
II.3.3.3. Coulage des éprouvettes	39
II.4. Principe de l'essai de flexion.....	41
II.5. Conclusion	43

Chapitre III Résultats et discussion

III.1. Introduction	44
III.2. Résultats de l'essai de flexion	44
III.2.1. Effet de la largeur de la bande de jute	45
III.2.2. Effet du nombre de tours de la bande de jute	48
III.2.3 Effet du nombre de plis du PRFJ	52
III.3. Discussion des résultats.....	56
III.4. Conclusion	59
Conclusion Générale	60
Références bibliographiques	62

Liste des figures

FIGURE I. 1: GRANULAT RECYCLE.	4
FIGURE I. 2: COMPOSITION DES GRANULATS RECYCLES [17].....	5
FIGURE I. 3: DECHETS DE CONSTRUCTION ET DE DEMOLITION.....	7
FIGURE I. 4: MATERIAU COMPOSITE.	10
FIGURE I. 5: TISSU EN FIBRES DE VERRE.	11
FIGURE I. 6: TISSU DE FIBRES DE CARBONE.	12
FIGURE I. 7: TISSU DE FIBRES D'ARAMIDE.....	13
FIGURE I. 8: TISSU DE FIBRES DE JUTE.	15
FIGURE I. 9 : RENFORCEMENT DE FIBRES TEXTILES NATURELLES. [45].....	19
FIGURE I. 10 : RENFORCEMENT AU CISAILLEMENT DES POUTRES BETON ARME PAR MATERIAUX COMPOSITES.	20
FIGURE I. 11: RENFORCEMENT PAR PLATS PARTIELLEMENT ET ENTIEREMENT INSERES [36].	21
FIGURE II. 1 FIGURE II.1 : CIMENT UTILISE.	25
FIGURE II. 2: GRAVIERS UTILISES : 3/8 RECYCLE (A), 8/15 RECYCLE (B) ET 8/15 NATUREL (C). 26	
FIGURE II. 3: SABLE (0/3).	27
FIGURE II. 4: PROCESSUS DE LAVAGE ET SECHAGE DU SABLE.....	28
FIGURE II. 5: EAU DE GACHAGE.....	29
FIGURE II. 6: TISSU DE FIBRES DE JUTE.....	29
FIGURE II. 7: RESINE (MEDAPOXY STR).	31
FIGURE II. 8: POUZZOLANE.....	32
FIGURE II. 9: SUPERPLASTIFIANT 33	
FIGURE II. 10: FERRAILLAGE DES POUTRES.	35
FIGURE II. 11: RENFORTS A BASE DE LA FIBRE DE JUTE.	36
FIGURE II. 12: MOULES PRISMATIQUES.	37
FIGURE II. 13: MALAXAGE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DU BETON.	38
FIGURE II. 14: CONFECTION DU BETON.....	38
FIGURE II. 15: COULAGE DU BETON DANS LES MOULES.	39
FIGURE II. 16: VIBRATION DU BETON.	40
FIGURE II. 17: SECHAGE ET DESIGNATION DES EPROUVETTES.	40
FIGURE II. 18: CONSERVATION DES EPROUVETTES.	41
FIGURE II. 19: ESSAI DE FLEXION.	42

FIGURE III. 1 : COURBES FORCE-DEPLACEMENT DES POUTRES SELON LA LARGEUR DE LA BANDE.	45
FIGURE III. 2: RESISTANCES DES POUTRES SELON LA LARGEUR DE LA BANDE.	46
FIGURE III. 3: DEPLACEMENTS A LA RUPTURE DES POUTRES SELON LA LARGEUR DE LA BANDE.	47
FIGURE III. 4:GAINS DE RESISTANCE ET DE DEPLACEMENTS SELON LA LARGEUR DE LA BANDE PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS NATURELS.	47
FIGURE III. 5.: GAINS EN DEPLACEMENT SELON LA LARGEUR DE LA BANDE PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS RECYCLES.	48
FIGURE III. 6: COURBES FORCE-DEPLACEMENT DES POUTRES SELON NOMBRE DE TOURS DE LA BANDE.....	49
FIGURE III. 7: RESISTANCES DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE TOURS DE LA BANDE.	50
FIGURE III. 8:DEPLACEMENTS DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE TOURS DE LA BANDE.	51
FIGURE III. 9: GAINS EN RESISTANCES ET DEPLACEMENTS DES POUTRES SELON LE NOMBRE DETOURS DE LA BANDE, PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS NATURELS.	51
FIGURE III. 10: GAINS EN RESISTANCES ET DEPLACEMENTS DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE TOURS DE LA BANDE, PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS RECYCLES.....	52
FIGURE III. 11: COURBES FORCE-DEPLACEMENT DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE PLIS.....	53
FIGURE III. 12: RESISTANCES DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE PLIS DU PRFJ.	53
FIGURE III. 13: DEPLACEMENT A LA RUPTURE DES POUTRES SELON LE NOMBRE DE PLIS DU PRFJ.	54
FIGURE III. 14: GAINS DE RESISTANCE SELON LE NOMBRE DE PLIS PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS NATURELS.	55
FIGURE III. 15: GAINS DE RESISTANCE SELON LE NOMBRE DE PLIS PAR RAPPORT AU BETON A BASE DE GRANULATS RECYCLES.....	55
FIGURE III. 16: CORRELATIONS LINEAIRES ENTRE LES PARAMETRES DU RENFORT ET AVEC CHACUNE DES GRANDEURS MECANIQUES MESUREES.	57
FIGURE III. 17: POUTRES RENFORCEES ENDOMMAGEES.....	58

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de verre. [42].....	12
Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone. [43]	13
Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques de fibre d'aramide [42]	14
Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de jute. [44].....	16
Tableau I.5 : avantages et inconvénients des matériaux composites [14], [15].	18
Tableau II.1 : Fiche technique du ciment CEM [45].....	26
Tableau II.2 : Caractéristiques des fibres de jute.	30
Tableau II.3 : Caractéristiques de la résine Medapoxy STR.	31
Tableau II.4 : Récapitulatif des variantes & étudiées.....	34
Tableau II.5 : composition pour 1m ³ de béton	36
Tableau II.6 : composition du béton a base de granulats recyclée pour un prisme	37
Tableau III.1 : Résistances et déplacements des poutres selon la largeur de la bande.....	45
Tableau III.2 : Résistances et déplacements selon le nombre de tours des bandes de jute.	49
Tableau III.3 : Présente les valeurs des forces et des déplacements selon le nombre de plis.	52



Introduction générale

Introduction générale

L'industrie de la construction et des infrastructures consomme abondamment les ressources naturelles et génère des volumes considérables de déchets. Avec la demande croissante pour les grands projets d'aménagement, il devient nécessaire d'augmenter l'extraction de granulats provenant des carrières. Face à ces défis environnementaux et aux réglementations strictes concernant l'ouverture de nouvelles carrières, il est crucial de donner la priorité à la recherche de solutions de recyclage pour minimiser l'impact écologique de l'industrie de la construction.

Le recyclage des matériaux de construction est en effet une solution très prometteuse. Non seulement cela contribue à répondre au déficit de production, mais cela réduit également la pression sur les ressources naturelles en réutilisant des matériaux déjà extraits. De plus, cela permet de réduire la quantité de déchets envoyés dans les sites d'enfouissement, ce qui est bénéfique pour l'environnement.

Les déchets de démolition, représentent une source importante de matériaux recyclables. En les récupérant et en les recyclant, on peut créer un cycle de vie plus durable pour les matériaux de construction, réduisant ainsi l'empreinte environnementale de l'industrie de la construction. De plus, cela peut même créer des opportunités économiques en stimulant le marché des matériaux recyclés et en encourageant l'innovation dans les technologies de recyclage.

Ainsi, pour préserver l'environnement, les chercheurs se sont efforcés de développer des ressources alternatives en recyclant les matériaux tels que les déchets de construction, industriels et automobiles, y compris le caoutchouc des pneus usés [1 – 6].

L'une des solutions de recyclage, consiste en l'utilisation croissante des granulats de béton recyclés, bien que limitée dans la production totale, montre une tendance à la hausse. Intégrer ces granulats recyclés dans le béton permet de préserver les ressources naturelles en évitant d'utiliser des granulats provenant de cours d'eau et de carrières. Le recyclage, du fait qu'il génère un nouveau secteur économique, suscite un intérêt croissant surtout que chaque année, 17 millions de tonnes de déchets de béton sont produits.

Les recherches concernant les granulats recyclés demeurent relativement récentes, ce qui n'a pas empêché certains pays d'adopter des normes pour la fabrication de granulats recyclés.

L'utilisation de granulats recyclés en remplissage de plateformes routières est déjà bien répandue : 80 % des bétons de démolition sont valorisés dans la route.

Par ailleurs, de nombreuses recherches ont montré que le béton recyclé peut être utilisé comme béton structurel : il peut servir à la confection d'éléments de structure qui devraient avoir une certaine capacité portante.

La norme NF EN 206/CN autorise déjà l'incorporation de 20 à 30 % de gravillons recyclés pour certains environnements. On vise l'incorporation de 10 à 30 % de granulats recyclés (y compris le sable) dans de nombreux bétons.

Cependant, par rapport aux agrégats naturels, la qualité des granulats recyclés est généralement inférieure. En effet, les granulats de béton recyclés sont souvent plus poreux que leurs homologues naturels [5], [7].

Ainsi, les bétons utilisant ces granulats recyclés tendent à présenter une porosité accrue par rapport à ceux fabriqués avec des granulats naturels [8], [9], [10]. La porosité du béton influe directement sur sa durabilité, car les pores peuvent servir de voie d'intrusion pour divers agents agressifs [11]. Par conséquent, les bétons contenant des granulats de béton recyclés doivent être rigoureusement testés pour garantir qu'ils conservent des propriétés mécaniques et une durabilité acceptable malgré leur porosité élevée. Cette caractéristique peut potentiellement affecter négativement les performances par rapport aux bétons fabriqués avec des granulats naturels [12].

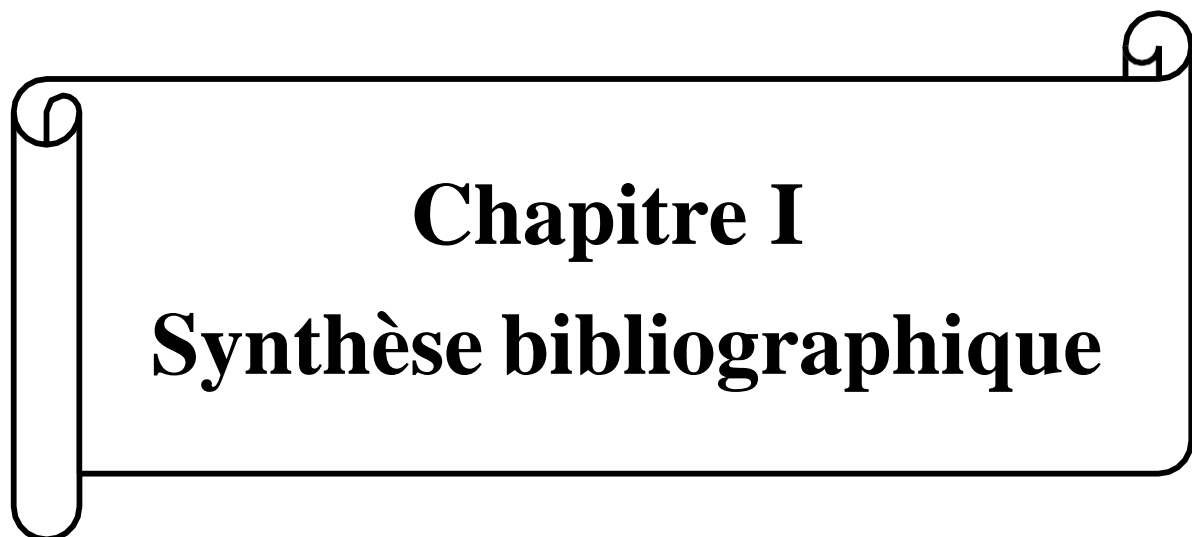
Il devient ainsi crucial de pouvoir maîtriser la porosité de ces bétons pour assurer leur qualité et leur résistance dans divers environnements d'utilisation.

Dans plusieurs études, il a été rapporté que jusqu'à 30% de substitution des granulats naturels par des recyclés n'a pas sensiblement détérioré les performances mécaniques et de durabilité du béton résultant. Cependant, en améliorant les techniques de préparation de la composition du béton, presque toutes les propriétés du béton avec des granulats recyclés peuvent être sensiblement améliorées et dans certains cas, les résultats des propriétés sont comparables à ceux des propriétés conventionnelles.

L'amélioration du béton recyclé s'avère alors nécessaire si on cherche la possibilité de son utilisation comme béton de structure. C'est dans cette optique que la présente étude est réalisée en proposant le renforcement du béton recyclé avec un matériau composite à base des fibres de jute. La fiabilité de ce type de renforcement a été confirmée lorsqu'il a été appliqué a été appliqué par collage externe sur des spécimens cylindriques en béton [13]. Le renforcement de poutres en béton recyclé se fait en enroulant une bande d'un tissu de jute bidirectionnel en spirale autour du ferrailage des poutres. Les paramètres étudiés qui sont la largeur de la bande, le nombre de tours qu'elle fait et le nombre de plis de la bande sont variés afin d'étudier leurs effets sur le rendement mécanique des poutres, le but étant d'approcher les performances du béton à granulats naturels.

Pour ce faire, nous avons procédé à l'élaboration des trois chapitres qui composent ce mémoire. Après une introduction générale à la présente recherche, une synthèse bibliographique relative aux granulats recyclés et aux matériaux composites est donnée.

Le deuxième chapitre est consacré à la campagne expérimentale conduite où sont donnés tous les détails de l'expérience. Les résultats obtenus font l'objet du troisième chapitre, ils y sont donnés, analysés et discutés. Le mémoire se termine par une conclusion générale et quelques suggestions pour les travaux futurs.



Chapitre I
Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Les nouveaux matériaux, outre les matériaux conventionnels, devraient être développés et utilisés pour le renforcement structurel. C'est le cas des fibres naturelles qui ont montré de bonnes performances mécaniques, ce qui devrait inciter les scientifiques à approfondir leurs recherches et proposer de nouvelles technologies pour les utiliser aussi efficacement et économiquement possible pour la mise à niveau structurelle.

Par ailleurs, le recyclage des granulats de béton fait l'objet, depuis peu, de nombreuses recherches pour étudier la possibilité de les intégrer dans un béton de structure. Cependant, la qualité des granulats recyclés est médiocre. En effet, les granulats de béton recyclés sont plus poreux que les granulats naturels. Les bétons produits en utilisant ce type de composant présentent une plus grande porosité que ceux fabriqués avec des granulats naturels.

Dans notre recherche nous nous intéressons principalement à l'amélioration et le renforcement interne par flexion, de poutres en béton à base de granulats recyclés en utilisant un polymère renforcé de fibres (PRF) à base de fibres végétales de jute. Outre son intérêt économique, l'emploi du jute a également un intérêt écologique, car sa fabrication, contrairement aux fibres synthétiques, ne nécessite pas une grande quantité d'énergie et donc moins de CO₂ est émis dans l'atmosphère.

I.2. Les granulats recyclés

Les granulats recyclés (Fig.I.1) sont des matériaux inertes obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction, tels que les débris de béton, de maçonnerie, et d'enrobés hydrocarbonés [14], [15].



Figure I.1: granulat recyclé.

Les granulats recyclés sont constitués de granulats enrobés d'un mortier primaire (Fig.I.2) ; ces éléments sont soit liés ou séparés. L'existence de ce mortier primaire est à l'origine de la différence de comportement entre les granulats recyclés et les granulats naturels. L'ampleur dans les changements de comportement est généralement néfaste pour le béton à l'état frais et/ou à l'état durci ; elle dépend de la quantité de mortier primaire dans le granulat recyclé [16].

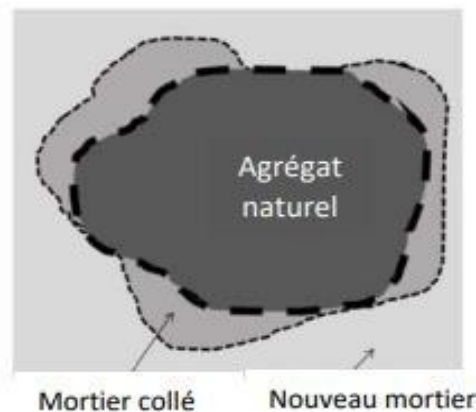


Figure I. 2: Composition des granulats recyclés [17].

I.2.1. Types de granulats recyclés

Les trois types de granulats recyclés sont définis en fonction des caractéristiques conformes aux normes CR (conformité réglementaire), CR Bou CR C, et CR respectivement. Ces classifications sont établies pour déterminer les propriétés et les utilisations appropriées des granulats recyclés dans la fabrication de bétons [18], [19].

- **Type 1 :** Toutes les caractéristiques sont conformes aux normes CR

Les granulats recyclés de Type 1 doivent respecter toutes les normes de conformité réglementaire (CR). Cela signifie que ces granulats répondent à toutes les exigences de qualité et de sécurité pour être utilisés dans la fabrication de bétons. Ils sont donc conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545, ainsi qu'aux dispositions du complément national de la norme NF EN 206/CN.

- **Type 2 :** Toutes les caractéristiques sont conformes aux normes CR Bou CR C

Les granulats recyclés de Type 2 doivent respecter les normes CR Bou CR C. Cela signifie que ces granulats répondent aux normes CR pour les propriétés physiques et mécaniques, ainsi qu'aux normes Bou et CR C pour les caractéristiques spécifiques telles que la granulométrie et la composition chimique. Ces granulats sont également conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545, ainsi qu'aux dispositions du complément national de la norme NF EN 206/CN.

- **Type 3 :** Toutes les caractéristiques sont conformes aux normes CR

Les granulats recyclés de Type 3 doivent respecter les normes CR. Cela signifie que ces granulats répondent aux normes CR pour les propriétés physiques et mécaniques, mais peuvent ne pas répondre aux normes Bou et CR C pour les caractéristiques spécifiques telles que la granulométrie et la composition chimique. Ces granulats sont également conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545, ainsi qu'aux dispositions du complément national de la norme NF EN 206/CN.

I.2.2. Sources des granulats recyclés

Les matériaux issus des déchets de construction tels que ceux provenant des activités de construction, de réhabilitation, de démolition et de déconstruction, sont collectés, recyclés et réutilisés pour produire des granulats utilisés dans la fabrication de béton et de mortier. Ils sont de deux types :

- Granulats recyclés issus de déchets de démolition :

La majeure partie des déchets de démolition (Fig.I.3) proviennent principalement de béton et de briques. Ainsi, il est crucial de souligner que la production de granulats recyclés nécessite une méthode de tri et de sélection rigoureuse des déchets issus de la démolition, afin de les recycler efficacement. Plusieurs catégories de déchets de démolition sont à distinguer suivant leur nature [20] : Les bétons armés ne contenant ni enduit ni plâtre ; les déchets de briques, tuiles, graves, pierres, blocs rocheux, etc. ; les déchets mélanges contenant de faibles quantités de plâtre, bois, plastique, etc. ; les matériaux de basse qualité contenant plus de 10 % de bois, plâtre, et plastique ; autres matériaux ne faisant pas partie des quatre catégories citées plus haut.



Figure I.3: Déchets de construction et de démolition

- Les granulats provenant des déchets de production de l'industrie du béton :

Ils peuvent être issus de deux sources distinctes :

- Les rejets de béton collectés tout au long de sa production qui proviennent principalement de la maintenance des usines de production et du transfert du béton frais, ainsi que des mélanges de béton non utilisés. En général, la quantité de ces déchets représente entre 0,2 % et 1 % du volume total de béton produit dans tous les secteurs de la construction [17], [21].
- Les produits de construction non conformes en termes de qualité ou de forme, tels que les pièces cassées ou inutilisables après des tests de résistance à la rupture, par exemple. Cette catégorie de déchets représente une quantité variant de 0,2 % à 3 %, selon les secteurs et les normes de sélection imposées [21].

Ces pourcentages dépendent des pratiques spécifiques et des exigences réglementaires propres à chaque secteur de l'industrie du béton [22].

On considère que les morceaux et débris de béton durcis et propres sont des déchets inertes parce qu'ils ne sont pas mélangés avec d'autres types de déchets tels que les emballages. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et n'entraînent aucune réaction physique ou chimique. Ces déchets sont souvent récupérés gratuitement par des entreprises du bâtiment et des travaux publics pour les utiliser comme remblais, pour la réalisation de travaux d'aménagement, de restauration, ou même dans la construction.

I.2.3. Avantages et inconvénients de l'utilisation des granulats recyclés dans le béton

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton, présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

a) Avantages

- Propriétés similaires au béton traditionnel
- Les granulats recyclés permettent de produire du béton avec des propriétés et des performances similaires au béton fabriqué avec des granulats naturels, à condition de bien maîtriser les procédés de production [14], [15].
- Possibilité d'utiliser des pourcentages élevés.
- Il est possible d'utiliser jusqu'à 50% de gravillons recyclés et 30% de sables recyclés dans le béton, au-delà des limites actuelles des normes. Des évolutions des normes sont en cours pour faciliter l'usage à grande échelle des granulats recyclés.
- Versatilité des applications.
- Les granulats recyclés sont très polyvalents et peuvent être utilisés dans de nombreuses applications comme les remblais, les bordures, les chaussées, les constructions routières, le paysagisme, les protections de berges, les écrans antibruit, les couches de forme ou de drainage, et la fabrication de béton [14], [15].
- Durabilité et fiabilité : Lorsqu'ils sont bien produits, les granulats recyclés offrent une durabilité et une fiabilité équivalentes aux granulats naturels, avec une résistance et une durabilité similaire [14], [15].

b) Inconvénients

- Difficultés de maîtrise des caractéristiques : La composition des bétons doit intégrer les caractéristiques des bétons d'origine et limiter sévèrement le taux de sulfates pour l'ensemble des granulats de la formule du béton.
- Présence de deux générations de pâte de ciment : La présence de deux générations de pâte de ciment peut poser des difficultés, notamment en termes de mûrissement interne du béton.
- Absorption d'eau plus importante : Les granulats recyclés absorbent plus d'eau que les granulats naturels, ce qui peut affecter la consistance et l'ouvrabilité du béton frais.

- Résistance à la fragmentation et au polissage : Les granulats recyclés peuvent avoir des résistances à la fragmentation et au polissage différentes de celles des granulats naturels, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques du béton.
- Gélivité : Les granulats recyclés peuvent présenter une gélivité plus importante que les granulats naturels, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques du béton.
- Forme et granularité : Les granulats recyclés peuvent avoir des formes et des granularités différentes de celles des granulats naturels, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques du béton.

I.3. Les granulats valorisés dans les bétons suivant les normes en vigueur

Les granulats recyclés, bien qu'ils ne soient pas régis par des normes spécifiques, doivent respecter les recommandations générales de la norme NF EN 12 620 pour les granulats de béton. Ils doivent également se conformer aux stipulations spécifiques de la norme NF EN 206-1/CN, s'ils sont destinés à être utilisés comme granulats de béton.

Les réglementations concernant l'utilisation des granulats recyclés dans le béton évoluent rapidement. En effet, la version 2004 de la norme EN 206-1 ne contient aucune clause spécifique sur l'utilisation des granulats recyclés, mais depuis 2012, des dispositions spécifiques ont été introduites pour les gravillons, graviers et sables recyclés.

La norme EN 206-1 a été mise à jour en novembre 2014 pour inclure des recommandations sur l'utilisation des gravillons et graviers recyclés, bien que les codifications et les taux de substitution autorisés diffèrent de ceux de la version EN 206-1/CN. Toutefois, aucune recommandation spécifique sur l'utilisation des sables recyclés n'a été proposée dans cette mise à jour. Ceci souligne l'importance de se tenir au courant des normes actuelles lors de l'utilisation de granulats recyclés dans le béton.

I.4. Rappel sur les matériaux composites

Les matériaux composites (Fig.I.4), sont des matériaux constitués d'une matrice et d'un renfort. La matrice est un matériau qui permet de lier les renforts entre eux, tandis que le renfort est un matériau qui renforce la matrice. En général, un matériau composite est défini comme étant une association d'au moins deux matériaux compatibles qui a présente des performances mécaniques meilleures que celles des matériaux le formant pris séparément.

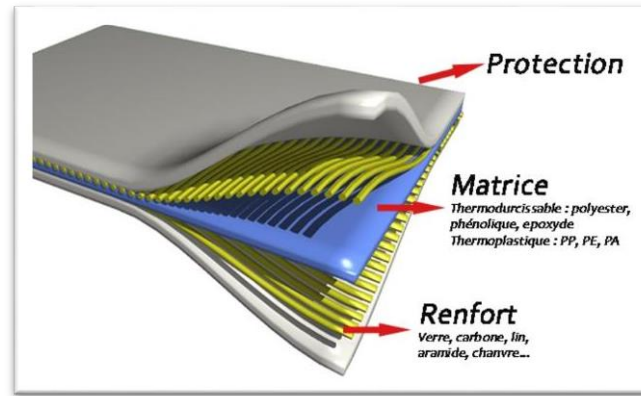


Figure I.4: Matériau composite.

Les matériaux composites existent depuis longtemps, avec des exemples tels que les cases fabriquées en torchis avec de la boue et de la paille. Les matériaux composites modernes sont souvent renforcés en fibres et maintenus par des matrices polymères, ce qui permet de les utiliser dans des applications techniques dans les domaines de l'aéronautique, du transport, du nautisme, des sports et loisirs, et du mobilier.

I.4.1. Types de matériaux composites

Généralement, les composites sont employés sous forme de corps bidimensionnels, plaques ou coques, et selon leur comportement mécanique et leur usage, ils peuvent être classés comme suit :

- Composites à fibres courtes : les fibres sont dispersées aléatoirement dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est isotrope.
- Composites à fibre longues : les fibres sont disposées de façon ordonnée et orientée dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est globalement anisotrope.

Ces matériaux sont normalement assemblés pour constituer des macro-matériaux composites, qui sont essentiellement de deux types :

- Stratifiés : obtenus par empilement de couches en composite orientées de façon différente. Chaque couche peut être constituée de fibres imprégnées de résine. L'orientation spécifique des fibres dans chaque couche est choisie pour obtenir les propriétés mécaniques désirées du matériau composite dans différentes directions.
- Sandwich : panneaux utilisés pour des usages en flexion ; généralement le comportement macroscopique est isotrope dans le plan.

I.4.2. Types de fibres

a) Fibres de verre

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de verre fondu extrudé en fines fibres. Ces fibres peuvent être tissées (Fig.I.5), tricotées ou utilisées sous forme de mat pour différentes applications. Ce sont des filaments de verre utilisés pour le renforcement de nombreux produits de polymère, donnant lieu à des composites à base de plastique léger renforcé appelé GRP, populairement connu sous le nom de "fibre de verre" [15].

Les fibres de verre sont très utilisées dans plusieurs domaines en raison de leur coût, moins élevé par rapport à celui du carbone (environ 1/10 du prix du carbone) [23]. Elles sont utilisées pour les applications où des matériaux légers et résistants sont nécessaires [15].



Figure I.5: Tissu en fibres de verre.

Les fibres offrent une bonne résistance à la traction, une résistance à la compression modérée et une bonne résistance à la flexion. Elles sont généralement résistantes à la plupart des produits chimiques, ce qui les rend utiles dans des environnements où une résistance chimique est nécessaire. Elles présentent de bonnes propriétés d'isolation thermique et électrique, ce qui les rend appropriées pour des applications telles que les isolants électriques et thermiques. Les différentes caractéristiques des fibres de verre sont résumées dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de verre. [42]

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

b) Fibres de carbone

Les fibres de carbone (Fig.I.6) sont utilisées dans les matériaux composites à matrice polymère et à matrice métallique. Elles sont également **beaucoup plus rigides et** se distinguent par leur résistance élevée à la traction et leur résistance remarquable à la fatigue. Elles présentent une faible relaxation et résistent bien à l'humidité. Elles sont également dotées d'un potentiel de conductivité électrique. Elles se démarquent par : leur résistance, leur ténacité et leur légèreté.



Figure I.6: Tissu de fibres de carbone.

On distingue plusieurs types de fibres de carbone, selon le taux de carbone qu'elles contiennent : des fibres à haute résistance « HR », des fibres à haut module, « HM », des fibres à très haut module « THM » et des fibres intermédiaires [24]

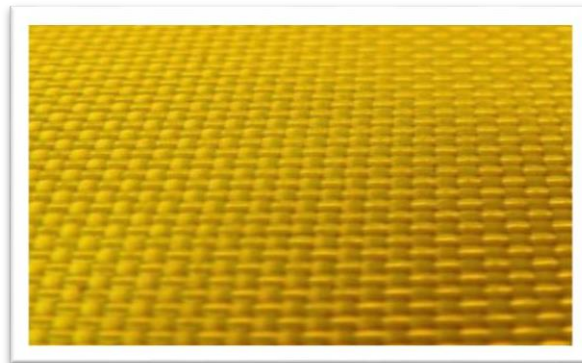
Les différentes caractéristiques des fibres de carbone sont résumées dans le tableau I.2..

Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone.[43]

Filament	Carbone HR	Carbone HM
Densité	1.78	1.8
Résistance à la traction (MPa)	3500	2200
Module de traction (MPa)	20000 0	400000
Allongement à la rupture (%)	1	0.5
Température à la fusion (°C)	2500	2500

c) Fibres d'aramide

Les fibres d'aramide (Fig.I.7), également connues sous le nom de kevlar, elles sont utilisées dans les matériaux composites à matrice polymère et à matrice métallique. Elles sont légères, résistantes à la traction et à la rupture, et offrent une excellente résistance à l'abrasion.

**Figure I.7:** Tissu de fibres d'Aramide.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques des fibres de verre.

Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques de fibre d'aramide [42]

Caractéristiques	Aramide 29	Aramide 49
Masse volumique (Kg/cm³)	1440	1450
Module de Young (GPa)	60	120
Résistance à la rupture (MPa)	3000	3000
Allongement à la rupture(%)	3.6	1.9

d) Fibres de jute

Le développement des composites à base de fibres végétales ne fait que commencer. Un grand nombre de divers fibres naturelles, comme le jute [25], [26], [27], [28], [29], le coco, la banane et le sisal, etc., sont utilisées comme polymères renforcés de fibres (PRF). Ces composites sont particulièrement intéressants car ils ont une résistance élevée aux chocs en plus d'avoir des propriétés de traction et de flexion modérées par rapport aux autres fibres lignocellulosiques. Il convient donc d'encourager l'utilisation de fibres naturelles.

Les fibres (Fig.I.8) de jute sont utilisées dans les matériaux composites à matrice cimentaire. Les matériaux composites fabriqués avec des fibres de jute ont de bonnes propriétés mécaniques et sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant à la fois légèreté et résistance.

Les fibres de jute sont également utilisées dans la fabrication de matériaux isolants, où elles offrent une bonne isolation thermique et sont particulièrement adaptées aux applications nécessitant une faible densité et une résistance thermique élevée.



Figure I.8: Tissu de fibres de jute.

Le projet Jute vise à développer l'utilisation de la fibre en matériaux composites. La fibre de jute est une fibre végétale extraite par rouissage de la plante tropicale du même nom. Elle est utilisée comme renfort dans des matériaux composites à matrice cimentaire, notamment en remplacement partiel des granulats minéraux ou en fibres pour renforcement. Les fibres de jute ont été utilisées pour renforcer des mortiers de ciment en remplacement partiel du sable, avec des taux de substitution variant de 0,5% à 2% par rapport à un mortier de référence sans fibres.

Les matériaux composites à base de fibres de jute sont également utilisés dans des domaines tels que la construction et la réhabilitation des bâtiments, où ils peuvent renforcer des éléments en béton de granulats recyclés. Ces matériaux composites peuvent offrir des avantages tels que la résistance et la légèreté, ce qui les rend particulièrement adaptés pour des applications techniques.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques des fibres de jute.

Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques de la fibre de jute. [44]

Caractéristique	Fibre de Jute
Densité (g/cm³)	1.3
Allongement a la rupture (%)	1.5-1.8
Resistance a la traction (MPa)	393-773
Module de Young (GPa)	26.5

I.4.3. Matrices

Les matrices utilisées dans les composites, telles que le polyester, le vinylester et l'époxy, sont essentielles pour plusieurs raisons clés dans la performance globale du matériau composite.

Les matrices sont des matériaux isotropes, ce qui signifie qu'elles se comportent de manière uniforme dans toutes les directions. Elles jouent un rôle crucial en liant les fibres entre elles et en transférant les efforts mécaniques aux fibres.

Elles aident à distribuer ces forces à travers la structure composite, améliorant ainsi sa résistance et sa durabilité.

En plus de leur fonction structurelle, les matrices protègent les fibres de plusieurs façons. Elles les isolent de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques, ce qui est crucial pour maintenir les propriétés mécaniques des fibres sur le long terme.

Les matrices thermoplastiques et thermodurcissables utilisées dans les composites sont choisies en fonction de leurs propriétés mécaniques, de leur résistance aux agressions environnementales, et de leur capacité à maintenir l'intégrité structurelle des fibres.

I.4.4. Les polymères renforcés de fibres (PRF)

Un PRF est un matériau composite dans lequel des fibres sont imprégnées d'une matrice le plus souvent résineuse. Les PRF offrent aux concepteurs une excellente combinaison de propriétés non disponibles avec d'autres matériaux et présentent une solution potentielle à la crise des infrastructures civiles.

Ils constituent donc des matériaux appropriés pour la rénovation structurelle. Les matériaux composites PRF offrent également une alternative attrayante à toute autre technique de rénovation dans le domaine de la réparation et du renforcement d'éléments en béton [30], [31], [32], [33], [34].

Les avantages du FRP sont nombreux, tels qu'un rapport résistance/poids élevé, une résistance à la traction spécifique élevée, une bonne résistance à la fatigue, des caractéristiques de facilité d'installation et de résistance à la corrosion, une facilité de réparation, une résistance élevée dans la direction requise, etc. Ces quelques propriétés rendent les PRF idéaux pour les applications de renforcement.

I.4.5. Propriétés mécaniques des matériaux composites

Les matériaux composites présentent une excellente rigidité ainsi qu'une bonne absorption des chocs. Ils sont connus pour leur légèreté, leur résistance et leur durabilité. Les matériaux composites offrent des propriétés spécifiques alliant légèreté et solidité d'une part, et rapidité et flexibilité de conception, d'autre part.

Ils résistent également aux variations de température et à la corrosion. Ils peuvent être conçus comme matériaux écoresponsables, recyclables et biodégradables, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement et à la réduction des déchets. L'ensemble de leurs avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.5 : avantages et inconvénients des matériaux composites [14], [15].

Avantages	Inconvénients
<p>1. Légèreté : Les matériaux composites sont généralement plus légers que les matériaux traditionnels tels que l'acier ou le béton, ce qui les rend particulièrement adaptés pour les applications où la réduction du poids est un facteur important</p> <p>2. Rigidité : Les matériaux composites offrent une grande rigidité et une résistance élevée à la flexion, ce qui les rend idéaux pour les applications structurelles.</p> <p>3. Résistance à la corrosion : Les matériaux composites sont généralement résistants à la corrosion, ce qui les rend adaptés pour les applications en milieu agressif.</p>	<p>1. Coût : Les matériaux composites peuvent être plus coûteux que les matériaux traditionnels en raison de leur processus de fabrication complexe.</p> <p>2. Sensibilité aux températures élevées : Les matériaux composites peuvent être sensibles aux températures élevées, ce qui peut entraîner une réduction de leur résistance mécanique.</p> <p>3. Difficulté de recyclage : Les matériaux composites peuvent être difficiles à recycler en raison de leur composition complexe.</p>

I.5. Les différentes techniques de renforcement des poutres

Les techniques de renforcement des poutres en béton peuvent être classées en plusieurs catégories, notamment le renforcement par fibres textiles naturelles, le renforcement par polymères renforcés de fibres (PRF), et le renforcement par matériaux composites naturels (fibres de lin, jute, etc.).

I.5.1. Renforcement par fibres textiles naturelles

Cette technique consiste à utiliser des fibres végétales telles que le chanvre, le lin, ou le jute pour renforcer les poutres en béton (Fig.I.9). Les fibres végétales sont imprégnées de résine bio ou de résine époxy, puis noyées dans un mortier pour former un matériau composite. Les fibres végétales offrent des avantages tels que la légèreté, la flexibilité, et la biodégradabilité,

mais leur durabilité et leur résistance à la déformation peuvent être plus faibles que celles des fibres synthétiques.

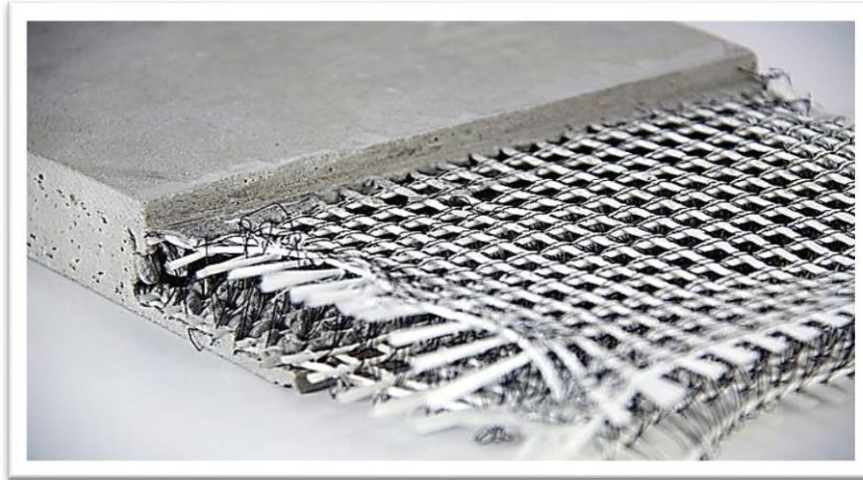


Figure I.9 : Renforcement de fibres textiles naturelles. [45]

I.5.2. Renforcement par polymères renforcés de fibres (PRF)

Cette technique consiste à utiliser des fibres végétales, telles que le jute, pour renforcer des polymères tels que le polyéthylène ou le polyester. Les fibres végétales sont imprégnées dans le polymère et formées en tissus ou en plaques, qui sont ensuite utilisées pour renforcer les poutres en béton. Les PRF offrent des avantages tels que la légèreté, la haute résistance, et l'absence de corrosion, mais leur coût et leur résistance à la déformation peuvent être plus faibles que celles des fibres de carbone.

I.5.3. Renforcement par matériaux composites naturels

Cette technique consiste à utiliser des fibres végétales, telles que le jute, pour renforcer des matériaux composites tels que le béton armé ou le béton recyclé. Les fibres végétales sont imprégnées dans un mortier ou un béton, puis noyées dans un matériau composite pour former un composé. Les fibres végétales offrent des avantages tels que la disponibilité, la facilité de fabrication et de mise en œuvre, et la biodégradabilité, mais leur durabilité et leur résistance à la déformation peuvent être plus faibles que celles des fibres synthétiques.

Les matériaux composites naturels, tels que le jute, sont devenus de plus en plus populaires en raison de leurs avantages écologiques et économiques par rapport aux fibres synthétiques traditionnelles.

I.5.4 Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites

Le renforcement au cisaillement (Fig.I.10), des poutres en béton armé par des matériaux composites consiste à utiliser des barres ou bandes de renforcement en PRF (polymères renforcés de fibres) insérées dans des entailles remplies de résine époxy. Ce procédé vise à améliorer la capacité de charge et la résistance au cisaillement des poutres en béton armé en les renforçant avec des matériaux composites modernes.



Figure I.10 : Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites. [35]

I.5.5 Renforcement par plats partiellement ou entièrement insérés (NSM)

La technique de renforcement par plats partiellement ou entièrement insérés (NSM) illustrée par la figure I.11, est une méthode de renforcement des poutres en béton armé qui consiste à insérer des plats ou des joncs de polymères renforcés en fibres de carbone (CFRP) dans des engravures réalisées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues et remplies de résines époxydiques pour fixation [35], [36]. Cette technique offre plusieurs avantages, tels qu'une amélioration de la résistance et de la ductilité des poutres en béton armé, une augmentation de la rigidité et de la résistance ultime, et une diminution de la flèche et de la ductilité [36].

Des études ont été menées pour étudier l'effet de la longueur ancrée sur le comportement des poutres en béton armé renforcées par des renforts en matériaux composites selon cette

technique de NSM. Les résultats ont montré que l'utilisation de joncs (JL) et de plats (PL) lisses de carbone, associés à différents types de béton, permet d'améliorer la résistance et la ductilité des poutres en béton armé [35].

La technique NSM a été largement utilisée pour renforcer les éléments structuraux en béton armé en flexion à l'aide de polymère renforcé en fibre de carbone (CFRP) plat / jonc. Cependant, la recherche expérimentale, analytique et numérique est de plus en plus justifiée pour comprendre l'effet de plusieurs paramètres de renforcement sur la performance en flexion des éléments en béton armé [36].

En somme, la technique de renforcement par plats partiellement ou entièrement insérés (NSM) est une méthode efficace pour améliorer la résistance et la ductilité des poutres en béton armé, offrant plusieurs avantages en termes de rigidité, de résistance ultime, et de diminution de la flèche et de la ductilité.



Figure I.11: Renforcement par plats partiellement et entièrement insérés [36].

I.6. Revue de quelques travaux sur l'influence des granulats recyclés sur la résistance à la flexion du béton

L'ajout de granulats issus de béton recyclé dans le béton entraîne une diminution de la résistance à la flexion. Cependant, plusieurs études ont rapporté que cette diminution de la résistance à la flexion n'est pas aussi significative que celle observée pour la résistance à la compression. La variation de la résistance à la flexion entre le béton conventionnel et celui contenant des granulats recyclés, a été négligeable dans certaines études, tandis qu'elle était inférieure à 30% dans d'autres. Ces variations dépendent de facteurs tels que le pourcentage de

substitution des granulats, l'origine et la qualité des agrégats recyclés, le rapport eau/ciment, ainsi que la résistance visée du béton.

La résistance à la flexion à 7 et 28 jours du béton de référence et celle du béton de granulats recyclés sont quasiment identiques [37]. La résistance augmentait avec le temps de durcissement comme dans le béton de référence.

Des écarts de 7.5 à 13.8% de la résistance à la flexion due au remplacement de 100% des granulats naturels par les granulats recyclés à divers âges sont constatés [38]. Dans une autre étude, une réduction de 5 à 21% de la résistance à la flexion à 28 jours pour le même taux de substitution a été constatée [39]. D'autres chercheurs ont observé une réduction de 4 à 15% de la résistance à la flexion de 1 et 28 jours des compositions de bétons de 20 et 25 MPa [40].

Une résistance à la flexion plus élevée pour le béton de granulats recyclés de taille plus petite que pour ceux de taille plus grande est observée [41]. Cette résistance était, dans certains cas, plus élevée que celle du béton de référence.

Enfin, une résistance à la flexion identique à 28 jours pour le béton de référence et différents bétons de granulats recyclés [16]. Cependant, la résistance à la flexion de bétons de GBR obtenu à partir de bétons de 3 et 28 jours était de 11.5% inférieur en comparaison à celle du béton de référence. D'autre part, la réduction de résistance en flexion dans le béton avec du ciment Portland blanc était de 29.9, 20.9 et 31.3% pour 1, 3 et 28 jours de cure, respectivement.

I.7. Conclusion

Les nouveaux matériaux, outre les matériaux conventionnels, devraient être développés et utilisés pour le renforcement structurel, et ces matériaux se sont montrés prometteurs et ont de bonnes propriétés et le renforcement de l'amélioration structurelle tel que rapporté par la littérature.

Sur le plan technique, ces matériaux composites améliorent la résistance et la flexibilité des éléments tout en réduisant l'impact environnemental. Sur le plan économique, ils constituent une alternative moins coûteuse aux renforcements traditionnels en acier. Sur le plan sociétal, ils favorisent l'économie circulaire et le confort des bâtiments.

Le développement des composites à base de fibres végétales ne fait que commencer. Un grand nombre de fibres naturelles, comme le jute, le coco, la banane, le sisal, etc., font partie

des composites renforcés de fibres qui sont particulièrement intéressants vu leurs performances avérées. La recherche et l'innovation dans ce domaine permettront de lever les obstacles actuels et de favoriser une adoption plus large de cette technologie.

Il convient donc d'encourager l'utilisation de fibres naturelles dans le domaine de la construction. C'est ce qui fait l'objet de cette étude qui vise à améliorer, par le renforcement avec des fibres de jute, les performances de bétons recyclés pour qu'ils puissent rivaliser avec les bétons structurels.



Chapitre II
Etude expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les différents matériels et méthodes utilisés dans notre expérimentation.

La procédure expérimentale est décrite de façon détaillée, en allant de l'étape de préparation des matériaux jusqu'à l'étape ultime qui consiste en la réalisation de tests de flexion.

Le protocole expérimental y est également donné tout en décrivant les étapes de l'élaboration des spécimens en béton. Le travail étant réalisé au sein du laboratoire de matériaux de la faculté du génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

L'étude expérimentale porte sur une série de 21 éprouvettes prismatiques de dimensions 10x10x40 cm³, ayant un volume de 0,004 m³.

Les éprouvettes sont divisées en trois groupes : un ensemble de 03 prismes fabriqués avec des granulats conventionnels (naturels). Un autre groupe de 03 éprouvettes est réalisé avec un mélange de graviers recyclés (75% de 8/15 et 100% de 3/8) et de graviers naturels (25% de 8/15). Le dernier groupe renferme le reste des prismes qui sont fabriqués à base des granulats recyclés et naturels dans les mêmes proportions.

Les prismes de ce dernier groupe sont tous renforcés à l'aide de bandes spirales de tissu de jute. Les paramètres étudiés étant la largeur, le nombre de tours et le nombre de plis de la bande de jute. Toutes les éprouvettes sont soumises après durcissement du béton à des tests de flexion 3 points.

II.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont essentiellement le béton et le jute qui est introduit sous forme de tissu et de PRF.

II.2.1 Le béton

Le béton est un matériau composite confectionné en mélangeant différents constituants qui sont le sable, les graviers, le ciment, l'eau et certains adjuvants.

❖ Le ciment

Le ciment utilisé est un type de ciment Portland, de classe CEM II 42,5 N ES (Fig.II.1), conforme à la norme NF EN 197-1.



Figure II.1 : Ciment utilisé.

Il est couramment utilisé dans la construction puisqu'il convient pour la fabrication des mortiers et tous travaux de béton armé en raison de ses propriétés remarquables telles que :

- Sa résistance élevée à la compression : Ce ciment offre, en effet, une résistance minimale à la compression de 42,5 MPa après 28 jours de durcissement, ce qui le rend adapté à la réalisation de structures porteuses.
- Sa prise et son durcissement rapides : Il présente une prise et un durcissement rapides, permettant une mise en œuvre efficace et un décoffrage précoce des éléments en béton. Il est utilisé dans travaux nécessitant une résistance initiale élevée
- Sa bonne durabilité : Il assure une résistance élevée aux intempéries et aux agressions chimiques, garantissant la longévité des ouvrages construits.
- Son adaptabilité : Sa polyvalence le rend approprié pour une large gamme d'applications de construction, des fondations et aux dallages. Il est également utilisé pour les sols industriels, charpentes, maçonneries, stabilisation des sols, béton armé ou préfabriqué, béton en élévation, travaux routiers, etc.

La composition chimique du ciment ainsi que se caractéristiques physico-mécaniques sont données dans le tableau II.1 qui constitue la fiche technique du ciment fournie par le fabricant.

Tableau II.1 : Fiche technique du ciment CEM [46]

Analyse chimique ciment :				Caractéristiques physico-mécaniques :			
Analyse Chimique %	MIN	MAX	Norme NA 442	Essais physico-mécanique	MIN	MAX	Norme NA 442
SiO ₂	16,00	21,00	-	SS Blaine Cm ² /g	2960	4200	-
AL ₂ O ₃	4,50	5,20	-	Consistance %	25,5	26,8	-
Fe ₂ O ₃	2,70	3,50	-	Début de prise (mn)	80	160	≥ 60 mn
CaO	58,00	64,00	-	Résistance à la compression 02 jours (N/mm ²)	10	19,5	≥ 10.0
MgO	0,80	1,20	-	Résistance à la compression 28 jours (N/mm ²)	42,5	52,5	≥ 42.5
K ₂ O	0,20	0,45	-	Expansion à chaud sur pale (mm)	0	10	≤ 10 mm
Na ₂ O	0,25	0,50	-	Les constituants de Ciment en % *			
SO ₃	1,20	3,50	-	CLINKER	80 - 95		
PF	5,00	10,00	-	CALCAIRE	06 - 20		
Chlorures	0,02	0,10	≤ 0,1	POZZOLANE	00 - 05		
RI	2,00	6,00	-	GYPSE	00 - 05		
CaO libre	0,20	1,50	-	* Ces valeurs font référence au noyau du ciment à l'exclusion du sulfate de calcium (gypse) et de tout autre additifs.			

❖ Les graviers

Deux classes de graviers sont utilisées dans la confection des différents bétons élaborés. Il s'agit des graviers de classes 3/8 et 8/15.

Le granulat 3/8 (Fig.II.2.a) utilisé est un granulat recyclé issu du concassage de déchets de construction, pendant que pour le granulat 8/15, une partie est issu du recyclage (Fig.II.2.b) et l'autre est d'origine naturelle (Fig.II.2.c) qui provient directement de l'extraction de roches massives, généralement calcaires ou granitiques. Ce matériau est obtenu directement d'une carrière, sans mélange ni ajout d'eau, tel que sorti du crible.

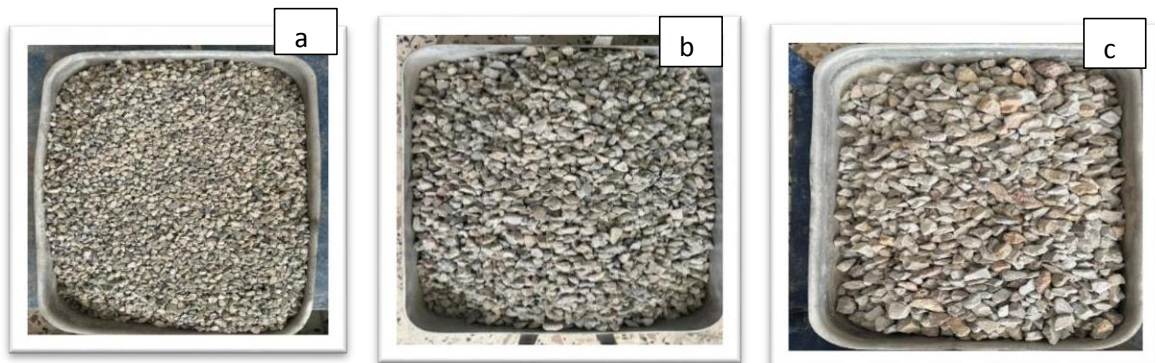


Figure II. 2: graviers utilisés : 3/8 recyclé (a), 8/15 recyclé (b) et 8/15 naturel (c).

Les graviers 3/8 et 8/15 recyclés sont des granulats obtenus à partir de matériaux recyclés, avec une granulométrie comprise entre 3 et 8mm de diamètre pour la classe 3/8 et entre 8 et 15 mm pour la classe 8/15. Ce type de graviers est issu du processus de recyclage du béton, permettant de réutiliser des matériaux de démolition pour la fabrication de nouveaux granulats. Le gravier 8/15 recyclé présente des caractéristiques spécifiques en termes de composition et de taille, contribuant ainsi à une approche plus durable et respectueuse de l'environnement dans la construction.

Les graviers sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- Bonne résistance à la compression: Les granulats de gravier contribuent significativement à la résistance mécanique du béton en supportant les charges et en répartissant les efforts.
- Bonne stabilité dimensionnelle: Ils assurent une stabilité dimensionnelle au béton, limitant les déformations et le retrait.
- Durabilité: Leur résistance à l'usure et aux intempéries garantit la longévité des structures en béton.
- Performance du béton: Le choix de la taille et du type de gravier (recyclé ou naturel) influence la texture, la porosité, la résistance et la durabilité du béton final.

❖ Le sable

Le sable, de classe 0/3 (Fig.II.3), est un matériau granulaire naturel constitué de fines particules minérales, généralement issues de roches siliceuses ou calcaires. La mention 0/3, fait référence à la granulométrie du sable, indiquant que sa taille de grains est comprise entre 0 et 0,3 mm.



Figure II.3 : Sable (0/3).

Ce type de sable est couramment utilisé dans la fabrication du béton en raison de ses propriétés, qui sont :

- Bonne aptitude au malaxage : Sa finesse permet une bonne dispersion des grains dans le mélange de béton, favorisant une bonne cohésion et une maniabilité optimale.
- Bonne résistance à la compression : Il contribue à la résistance mécanique du béton en comblant les vides entre les granulats plus grossiers et en renforçant la matrice cimentaire.
- Bonne durabilité : Sa résistance à l'usure et aux agents agressifs assure la longévité des structures en béton.
- Densité élevée : Il permet d'obtenir un béton dense et compact, limitant la porosité et améliorant l'imperméabilité.

Le sable utilisé a été lavé et séché dans une étuve pendant 24h à une température de 105 °C (Fig.II.4) afin d'éliminer les impuretés et les fines particules argileuses. La figure ci-dessous montre le processus de lavage du sable



Figure II. 4: Processus de lavage et séchage du sable

❖ L'eau

L'eau utilisée pour cette étude (Fig.II.5) est une eau propre et potable, exempte d'impuretés nocives. Elle est essentielle pour l'hydratation du ciment et la formation du béton. L'eau participe à la réaction chimique entre le ciment et les autres granulats, permettant la formation des liaisons qui confèrent au béton sa résistance et sa structure.



Figure II.5 : Eau de gâchage

II.2.2 Le renfort

Le renfort utilisé dans notre recherche est un renfort à base de fibres naturelles de jute. Il est utilisé sous forme d'un tissu bidirectionnel découpé en bandes qui sont placées autour du ferrailage en spirales et d'un PRF qui est obtenu par le collage de bandes de tissu de jute formant plusieurs plis. Le PRF est posé de la même façon autour du ferrailage.

II.2.2.1 Les fibres de jute

Les fibres de jute (Fig.II.6) sont des fibres végétales naturelles qui ont une bonne résistance à la traction et une bonne ductilité.



Figure II.6 : tissu de fibres de jute.

Le tissu en fibre de jute est utilisé dans le béton pour le renforcer en flexion et en cisaillement, et pour améliorer sa ductilité et sa résistance à la fissuration. Cela démontre la polyvalence et l'efficacité du tissu en fibres de jute dans diverses applications. Dans le cadre de notre étude, le tissu en fibre de jute est utilisé pour renforcer les poutres en béton de granulats recyclés. Le tissu est intégré au mélange de béton avant qu'il ne durcisse, formant une matrice composite qui améliore la résistance à la traction et à la flexion du béton. Les différentes caractéristiques de la fibre de jute sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Caractéristiques des fibres de jute.

Propriété	Valeur	Unité
Densité	1,3 - 1,5	g/cm ³
Diamètre moyen des fibres	5 – 30	µm
Longueur moyenne des fibres	1 – 4	mm
Résistance à la traction	300 – 800	MPa
Module d'élasticité	10 – 25	GPa
Élongation à la rupture	3 – 7	%
Absorption d'eau	20 – 30	%
Biodégradabilité	Rapide	-
Comportement au feu	Inflammable	-
Résistance aux produits chimiques	Modérée	-
Coût	Faible	-

II.1.2.2 La résine

Le polymère utilisé dans cette expérience est une résine époxy (Medapoxy STR) fournie par GRANITEX. Le Medapoxy STR est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports. Elle présente plusieurs avantages comme une très bonne tenue aux produits chimiques, une très bonne adhérence sur supports béton et acier et une bonne mouillabilité du support et de la fibre.

Le Medapoxy STR est constitué de deux composants qui sont la résine organique (A) et le durcisseur (B) (Fig. II.7). Ces deux composants sont malaxés dans les proportions de 2/3 de résine et 1/3 de durcisseur, tel que préconisé par le fabricant.



Figure II.7: Résine (MEDAPOXY STR).

La résine est mélangée à l'aide d'un agitateur électrique jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène exempt de bulles d'air. Elle est mélangée par petites quantités pour éviter son gaspillage vu qu'elle a tendance à durcir rapidement.

Les différentes caractéristiques du Medapoxy STR fournies par Granitex sont consignées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques de la résine Medapoxy STR.

Caractéristique	Valeur
Densité (ISO758)	1,1 ± 0,05
Viscosité (NF T76-102)	11000 MPa S à 25 ° C
• DPU (NFP18 810)	1h 15mn à 20 °C et 65% HR
• Temps de durcissement à 20 °C et 65% HR	Hors poisse.....6h
	Dur.....16 h
RC (NA 427)	>70 MPa
Rf (NA 234)	>25 MPa
Adhérence sur béton (NFP18 858)	>3 MPa
Durée de mise en service	10 j 20°C

II.2.3 La Pouzzolane

La pouzzolane est une poudre issue des roches volcaniques naturelles finement broyées. Elle est composée principalement de silice, d'alumine et d'oxydes métalliques et présente des propriétés cimentaires lorsqu'elle est mélangée au ciment d'où son utilisation comme additif dans le béton. Elle est utilisée pour :

- Améliorer l'ouvrabilité du béton : La pouzzolane favorise une meilleure dispersion des grains de ciment et une meilleure fluidité du mélange, facilitant la mise en œuvre.
- Augmenter la résistance à la compression : Elle contribue à la résistance mécanique du béton en réagissant avec la chaux libérée par le ciment, créant des composés cimentaires supplémentaires.
- -Réduire la fissuration du béton : Sa capacité à absorber l'eau et à limiter le retrait du béton diminue le risque de formation de fissures.

Dans notre étude, la pouzzolane utilisée (Fig. II.8) est produite par Sika. Elle est introduite dans une proportion de 5% du poids du ciment, le but étant d'augmenter la compacité du béton vu que les grains de granulats recyclés sont souvent entourés d'une pâte de ciment durcie qui est poreuse.



Figure II. 8 : Pouzzolane.

II.2.4 Le superplastifiant

Les superplastifiants sont des additifs utilisés dans le béton pour améliorer sa fluidité et sa maniabilité sans affecter le rapport eau-ciment. Les superplastifiants sont des agents dispersants qui agissent en réduisant la friction entre les particules de ciment et de granulats, permettant ainsi une meilleure dispersion des grains et une meilleure fluidité du mélange.

Les superplastifiants sont employés dans divers domaines de construction car ils permettent :

- L'obtention d'un béton plus fluide et plus facile à mettre en œuvre dans les coffrages complexes et les armatures denses.
- La réalisation de bétons à haute résistance et à faible porosité, essentiels pour les structures critiques et les environnements agressifs.
- L'obtention d'éléments en béton préfabriqué de haute qualité avec une surface lisse et une finition homogène.

Le superplastifiant utilisé dans cette expérience (Fig.II.9) est produit par Sika.



Figure II. 9: superplastifiant

II-3-Procédure expérimentale

Cette étude a nécessité la confection de 21 éprouvettes prismatiques en béton. Elles ont des dimensions de 10x10x40 cm³, ce qui donne un volume de 0.004 m³.

Ces éprouvettes sont réparties en trois groupes distincts :

- **Groupe 1** : comprend 3 prismes sans renfort, fabriqués avec des granulats naturels, qui sert de témoin positif.
- **Groupe 2** : Trois prismes sans renfort, fabriqués avec les granulats recyclés, qui sert de témoin négatif.
- **Groupe 3** : composé des prismes renforcés avec le tissu ou le PRF de jute. Plusieurs variantes sont testées en faisant varier la largeur de la bande de jute, le nombre de spires et le nombre de plis de celle-ci. Les éprouvettes prismatiques sont réparties comme suit :
 - Trois prismes renforcés avec une bande de tissu de jute d'une largeur de 3 cm à 4 spires.

- Trois prismes renforcés avec une bande de tissu de jute d'une largeur de 4 cm à 4 spires.
- Trois prismes renforcés avec une bande de tissu de jute d'une largeur de 4 cm à 3 spires.
- Trois prismes renforcés avec une bande de PRF de jute d'une largeur de 4 cm à 4 spires en 2 plis.
- Trois prismes renforcés avec une bande de PRF de jute d'une largeur de 4 cm à 4 spires en 3 plis.

Dans le cas des éprouvettes renforcées, la bande de jute est enroulée en spirale autour d'un ferrailage composé de 4 barres issues d'un treillis soudé. Il est introduit pour servir de support au renfort. Il est à noter que le même ferrailage est utilisé pour les témoins positifs et négatifs afin de mettre en évidence l'apport du renfort seul.

Le tableau II-4 renferme les nomenclatures de toutes les variantes testées.

Tableau II.4 : Récapitulatif des variantes étudiées.

Nomenclature	Désignation
BGN	Béton de granulats naturels, sans renfort
BGR	Béton de granulats recyclé, sans renfort
BR34	Béton de granulats recyclés renforcé avec une bande de 3cm à 4 spires
BR43	Béton de granulats recyclés renforcé avec une bande de 4cm à 3 spires
BR44	Béton de granulats recyclés renforcé avec une bande de 4cm à 4 spires
BR44P2	Béton de granulats recyclés renforcé avec une bande de 4cm à 4 spires, à 2 plis
BR44P3	Béton de granulats recyclés renforcé avec une bande de 4cm à 4 spires, à 3 plis

II-3-1-Conception des poutres

Les poutres sont élaborées sur plusieurs étapes, allant de la préparation du ferrailage au coulage du béton, en passant par la préparation du renfort.

II-3-1-1- Préparation du ferrailage

Le ferrailage (Fig.II.10) est formé de 4 barres longitudinales découpées à partir d'un treillis soudé. Elles ont 4 mm de diamètre et sont maintenues par deux cadres de même diamètre aux extrémités.



Figure II. 10 : Ferrailage des poutres.

Les barres formant le ferrailage de ces poutres ont une longueur de 37 cm et les cadres ont 7 cm de côté.

II.3.1.2 Mise en place du renfort

Notre étude se concentre sur le renforcement interne des poutres en béton par l'incorporation de tissus de jute. L'objectif est de renforcer spécifiquement les zones soumises à des efforts de flexion au sein des poutres. A cet effet, un tissu bidirectionnel de jute est découpé en bandes de différentes longueurs et de différentes largeurs. Les bandes sont ensuite enroulées en spirale autour du ferrailage en faisant varier le nombre de tours. La bande est maintenue par la résine Medapoxy STR aux points de concours avec les barres d'acier. Afin de permettre à la bande de développer sa pleine résistance, et d'éviter son arrachement, on la maintient aux extrémités en la bouclant avec des bandes du même tissu.

Pour les PRF de jute, le même procédé est utilisé après avoir superposé les plis en enduisant les bandes de résine epoxy.

Les renforts obtenus (Fig.II.11) sont laissés au séchage, pendant une dizaine de jours, temps requis pour la maturation de la résine, et ce dans les conditions de laboratoire.

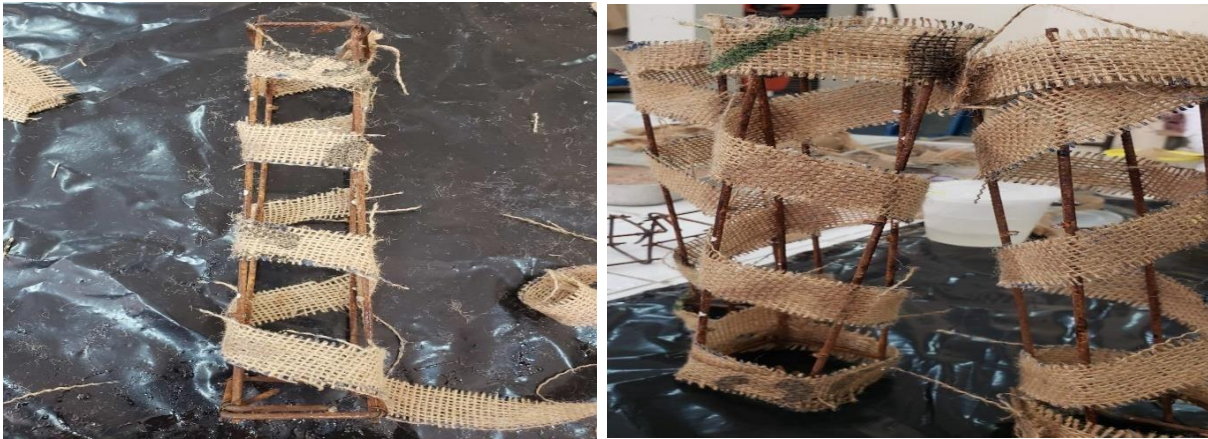


Figure II. 11 : Renforts à base de la fibre de jute.

Les renforts ainsi élaborés, seront par la suite, intégrés directement dans le béton lors du processus de coulage. Cette méthode permet d'insérer le renfort de manière homogène et optimale au cœur de la structure en béton. L'ajout de ces tissus de jute au sein même du béton vise à améliorer la résistance en flexion du composite béton-jute. Cela devrait permettre d'augmenter la capacité portante des poutres renforcées et de retarder l'apparition de fissures sous charge.

II.3. Préparation du béton :

Les poutres sont réalisées à partir de trois gâchées. Les fractions massiques des constituants du béton sont obtenues à partir de la méthode de Dreux-Gorisse. Elles sont données pour un volume unitaire de 1m^3 de béton dans le tableau suivant.

Tableau II.5 : Composition pour 1m^3 de béton.

Composant	Masse (kg)
Ciment	350
Sable	824.4
Gravier 3/8	240
Gravier 8/15	784.4
Eau	200

Cette formulation est utilisée pour déterminer les quantités des différents constituants du béton du corps d'étude qui est le prisme de 0.004 m^3 de volume. Il est à noter que pour le béton à base de granulats recyclés, la pouzzolane est introduite dans une proportion de 5% du poids du ciment et le superplastifiant dans une proportion de 0.5% du même poids. Le tableau II-5, résume les fractions massiques pour un prisme. Il est à noter que les quantités sont majorées de 10%, comme mesure de sécurité.

Tableau II.6 : Composition du béton à base de granulats recyclée pour un prisme

Composant	Masse (kg)
Ciment	1.47
Sable	3.47
Gravier 3/8	1.01
Gravier 8/15 (recyclé)	2.47
Gravier 8/15 (naturel)	0.83

II.3.2 Préparation des éprouvettes

II.3.2.1 Préparation des moules

Des moules métalliques en forme prismatique (Fig.II.12) d'une hauteur de 10 cm, largeur de 10 cm et longueur de 40 cm, sont nettoyés pour éliminer tout résidu de vieux bétons. Ils sont ensuite huilés afin de faciliter le décoffrage et avoir des surfaces régulières.



Figure II. 1 : Moules prismatiques.

II.3.2.2 Préparation du béton

Les différents constituants du béton sont tout d'abord pesés tout en respectant les quantités nécessaires. Les composants secs sont introduits en premier dans un malaxeur à axe vertical (Fig.II.13), ils sont mélangés pendant quelques minutes.



Figure II. 13 : Malaxage des différents composants du béton.

Une fois le mélange sec homogène, l'eau de gâchage contenant le superplastifiant est ajoutée progressivement par petites quantités jusqu'à obtenir une texture homogène et fluide, en mélangeant le tout pendant quelques minutes, comme indiqué sur la figure (Fig.II.14).



Figure II. 2: Confection du béton.

II.3.2.3 Coulage des éprouvettes

Le béton préparé est versé au fond du moule en quantité suffisante pour créer une couche uniforme d'environ 1,5 cm d'épaisseur, qui servira de couche d'enrobage et sert à protéger le renfort et à améliorer l'adhérence entre lui et le béton.

Le renfort est soigneusement positionné dans le moule, en veillant à ce qu'il soit parfaitement centré et respectueux des espacements requis par rapport aux parois (Fig.II.15). Un renfort correctement positionné, assure une répartition optimale des charges et une précision des tests ultérieurs.



Figure II. 3: Coulage du béton dans les moules.

Les moules sont ensuite posés sur une table vibrante pour subir une vibration pendant 20 secondes (Fig.II.16). Ceci a pour objectif d'éliminer les bulles d'air piégées dans le béton frais et d'obtenir un béton dense et compact, améliorant ainsi sa résistance et la fiabilité des tests.



Figure II. 16 : Vibration du béton.

Les éprouvettes sont laissées au séchage pendant 24h (Fig.II.17) et sont décoffrées juste après puis référencées (Fig.II.17).



Figure II. 17: Séchage et désignation des éprouvettes.

Les éprouvettes obtenues sont conservées dans des bacs remplis d'eau (Fig.II.18), pour y subir une cure d'hydratation, à 20°C selon l'norme NF2001 et ce jusqu'à maturation du béton au 28^{ème} jour d'âge.



Figure II. 18 : Conservation des éprouvettes.

II.3.3. Principe de l'essai de flexion

Après un processus de maturation et de stockage de 28 jours dans des conditions de laboratoire, toutes les poutres fabriquées sont retirées des bacs d'eau pour subir des tests de flexion à 3 points. Il est également connu sous le nom d'essai de flexion simple, c'est une technique expérimentale couramment utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux, en particulier leur résistance à la flexion et leur module de flexion. Il est particulièrement adapté aux matériaux rigides tels que les métaux, les plastiques et le béton.

Les essais de flexion à 3 points (Fig.II.19) sont effectués sur les échantillons prismatiques à l'aide d'une machine de flexion universelle IBERTEST, d'une capacité maximale de charge de 200 KN avec une vitesse de chargement de 0,2 kN/s. Le dispositif de chargement comprend deux supports positionnés perpendiculairement à l'éprouvette et une poutre de flexion qui applique la charge au centre de l'éprouvette. Une charge progressive est appliquée jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne sa rupture.

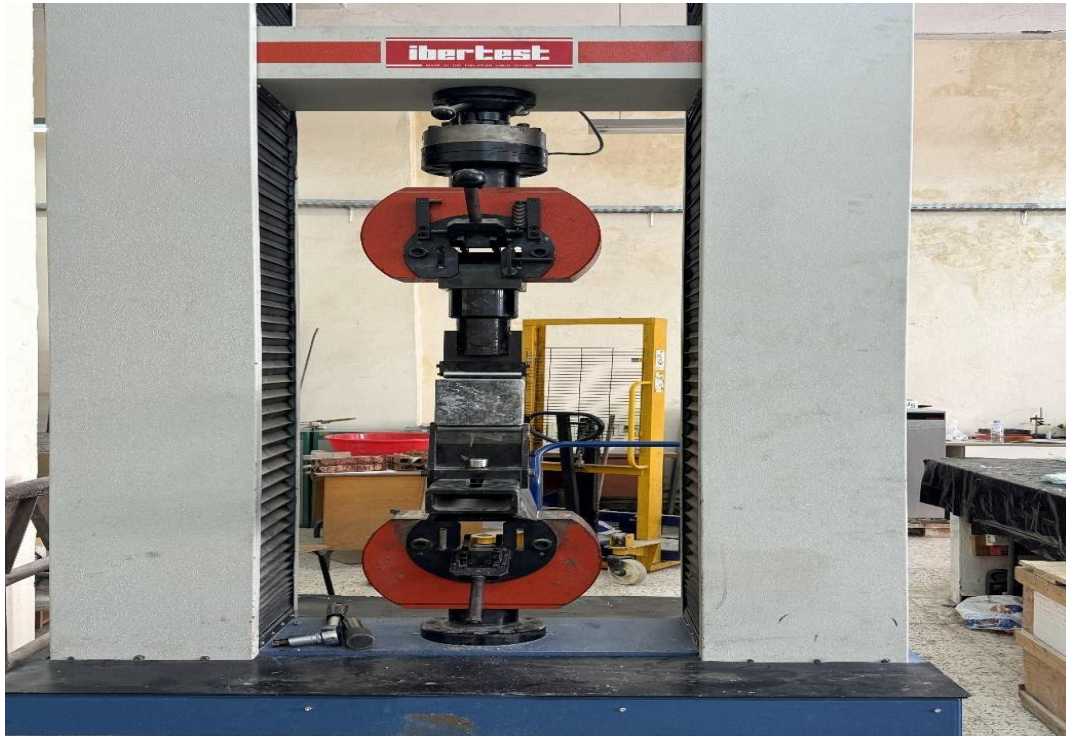


Figure II. 19: Essai de flexion.

La machine de flexion enregistre les valeurs de la contrainte et celles du déplacement vertical au centre de l'échantillon au moment de la rupture.

Les résultats obtenus sont analysés et présentés sous forme de courbes force-déplacement, qui constituent un outil d'analyse essentiel pour caractériser le comportement mécanique des spécimens soumis à des essais de flexion, fournissant des informations clés sur leurs propriétés de résistance et de déformation.

Les courbes force-déplacement offrent une représentation détaillée de la réponse des spécimens soumis à la charge de flexion. Elles montrent l'évolution de la force appliquée en fonction du déplacement vertical mesuré au centre de l'échantillon, depuis le début du chargement jusqu'à la rupture finale. Ces graphes permettent de visualiser et d'interpréter le comportement mécanique des échantillons testés.

L'analyse de ces courbes fournit des informations précieuses sur les propriétés mécaniques des spécimens, telles que leur résistance maximale, leur ductilité et leur mode de rupture. Ces données permettent de comparer les performances des différents échantillons testés et d'évaluer l'influence des paramètres du renfort étudié, sur le comportement en flexion du matériau composite.

II.3. Conclusion

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale adoptée pour la fabrication des corps d'étude et l'essai de flexion de poutres en béton renforcées par des fibres de jute. Le protocole expérimental a été exposé sur différentes étapes allant de la description détaillée des matériaux utilisés : béton, fibres de jute et matrice résineuse jusqu'à la confection des éprouvettes en passant par la confection du renfort.

La procédure de l'essai de flexion qui permet l'évaluation des performances en flexion des poutres renforcées avec des fibres de jute, y est également décrite.



Chapitre III
Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre expérience menée sur l'ensemble des poutres, qu'elles soient renforcées ou non. Il est important de noter que, pour le matériau en jute, nous avons réalisé plusieurs variantes en modifiant la longueur, le nombre de tours de la bande, et le nombre de couches du PRFJ. L'objectif étant de déterminer la configuration optimale du renforcement interne du béton incluant des granulats recyclés, que nous proposons dans le cadre de cette étude, dans le but d'approcher au moins les performances du béton à base de granulats naturels.

Les poutres sont soumises à des tests de flexion jusqu'à leur rupture. Tout en surveillant attentivement leurs modes de fissuration. Les résultats relatifs à leur résistance en flexion, leur déformabilité et leur mode de rupture, qui est attentivement contrôlé, sont présentés.

Les courbes force-déplacement sont tracées afin d'illustrer le comportement des éprouvettes testées. Les apports du renforcement sont également quantifiés et représentés graphiquement. Des corrélations entre les facteurs étudiés et les réponses des poutres sont également mise en évidence. Enfin, les résultats obtenus sont discutés afin de mieux comprendre le comportement des poutres renforcées en flexion.

III.2. Résultats de l'essai de flexion

Les résultats de l'essai de flexion sur les poutres renforcées avec des bandes de tissu de jute sont présentés sous forme de tableaux ,et d'histogrammes, permettant ainsi de visualiser clairement l'impact du renforcement sur les performances mécaniques des poutres. Pour évaluer l'efficacité du renforcement par des bandes de tissu de jute sur la résistance du béton, les données des spécimens renforcés pour toutes les variantes étudiées sont comparées à celles des témoins négatif (spécimens non renforcés, à base de granulats recyclés) et positif (spécimens non renforcés, à base de granulats naturels). Cette analyse comparative permet de quantifier et de qualifier l'apport du renforcement par les fibres de jute sur les propriétés mécaniques des poutres en béton, notamment en termes de résistance en flexion et de déformabilité.

III.2.1. Effet de la largeur de la bande de jute

Deux largeurs différentes de bandes de tissu en jute ont été étudiées pour déterminer la variante offrant la meilleure réponse. Les bandes de jute ont été conçues avec des largeurs de 3 cm et 4 cm. Les résultats des tests ont été comparés entre les poutres renforcées avec ces deux largeurs et les poutres non renforcées. Les données obtenues sont résumées dans le tableau III-1.

Taleau III.1 : Résistances et déplacements des poutres selon la largeur de la bande.

Type de renforcement	BGN	BGR	BR34	BR44
Force max (kN)	22.02	19.59	20.68	23.58
Déplacement à la rupture (mm)	2.72	2.07	2.65	3.39

Les charges maximales pour les différentes largeurs de la bande de jute à base de granulats recyclés sont de 23,58 kN et 20,68 kN pour les largeurs 4cm et 3cm respectivement, ce qui est supérieur à la charge maximale du béton témoin à base de granulats recyclés qui a une résistance de 19,59 kN. La résistance obtenue pour les éprouvettes à 4 cm de largeur de bande, dépasse celle du béton témoin à base de granulats naturels qui présente une résistance de 22,02 kN, ce qui n'est pas le cas des éprouvettes avec 3 cm de largeur de bande.

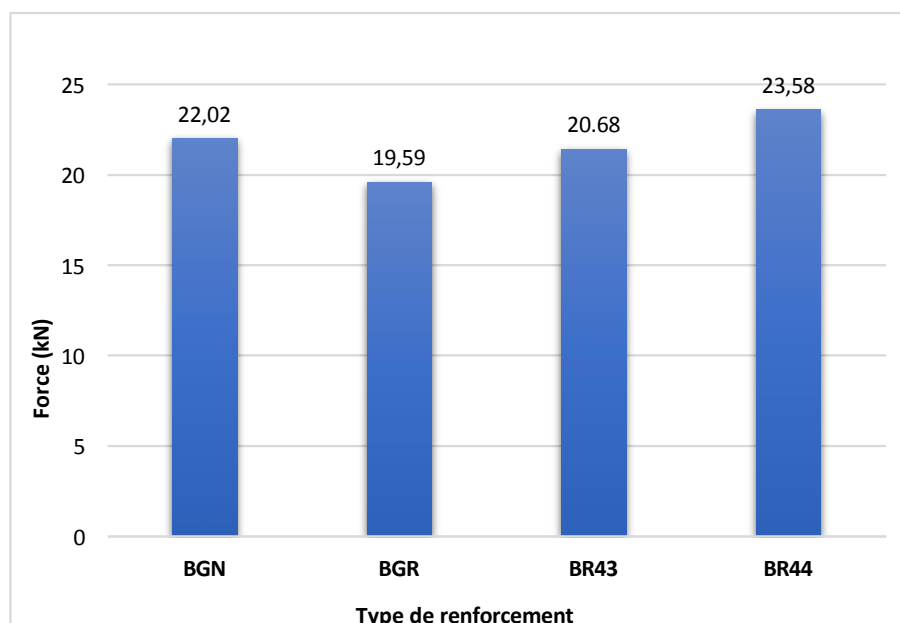


Figure III.1 : Résistances des poutres selon la largeur de la bande.

L'analyse du déplacement des poutres révèle une tendance similaire à celle observée pour la capacité portante. Les poutres renforcées avec une bande de tissu de jute de 3 cm de largeur présentent un déplacement de 2,65 mm alors que les poutres renforcées avec une bande de 4 cm ont un déplacement 3,39 mm (Fig.III.2).

Comparées aux poutres témoins, les poutres renforcées avec du tissu de jute présentent un déplacement supérieur à celui du témoin à base de granulats recyclé qui a une valeur de 2,07 mm, tandis que les poutres témoins à base de granulats recyclés présente un déplacement de 2,72 mm quasiment identique à celui des poutres à 3 cm, mais inférieur à celui des poutres à 4 cm de largeur de bande.

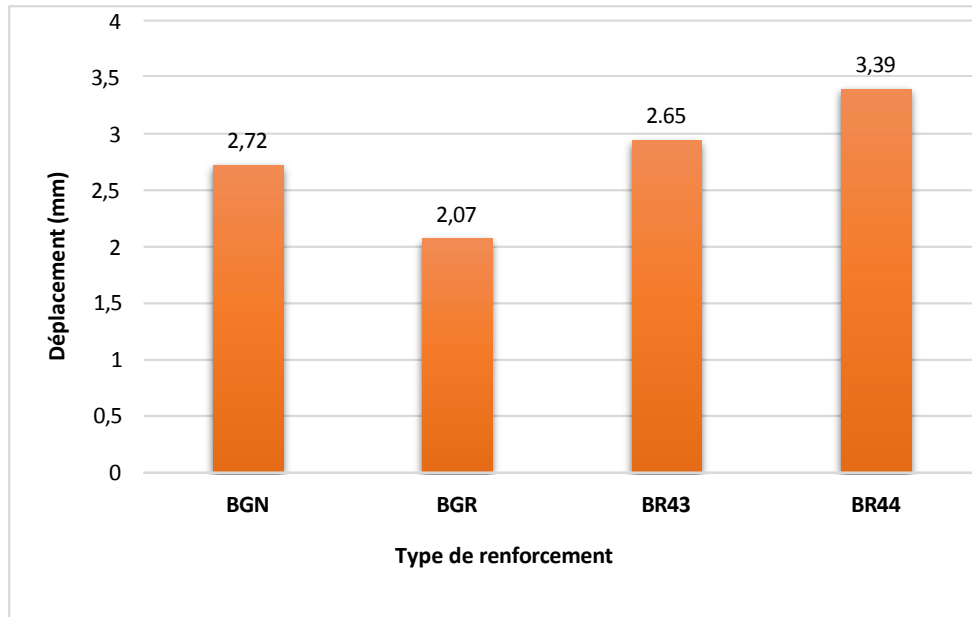


Figure III. 2 : déplacements à la rupture des poutres selon la largeur de la bande.

Afin d'évaluer et de mettre en évidence les apports du renforcement en termes de résistance et de ductilité, les histogrammes de la figure III.3 et III.4 ont été tracés.

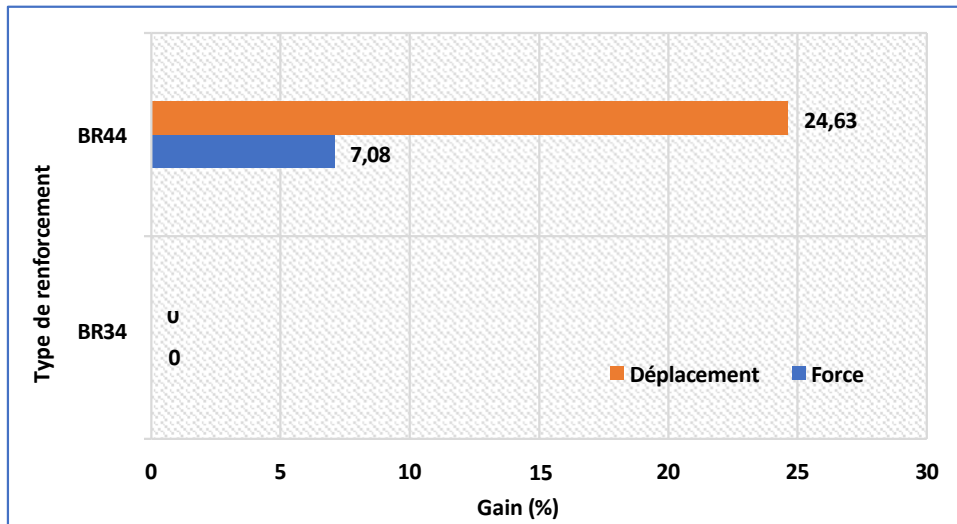


Figure III.3 : Gains de résistance et de déplacements selon la largeur de la bande par rapport au béton à base de granulats naturels.

Un apport de 7,08% en termes de résistance est obtenu pour les poutres renforcées avec des bandes de 4 cm de largeur par rapport aux témoins à base de granulats naturels, tandis que l'apport en déformabilité est estimé à 24.63%.

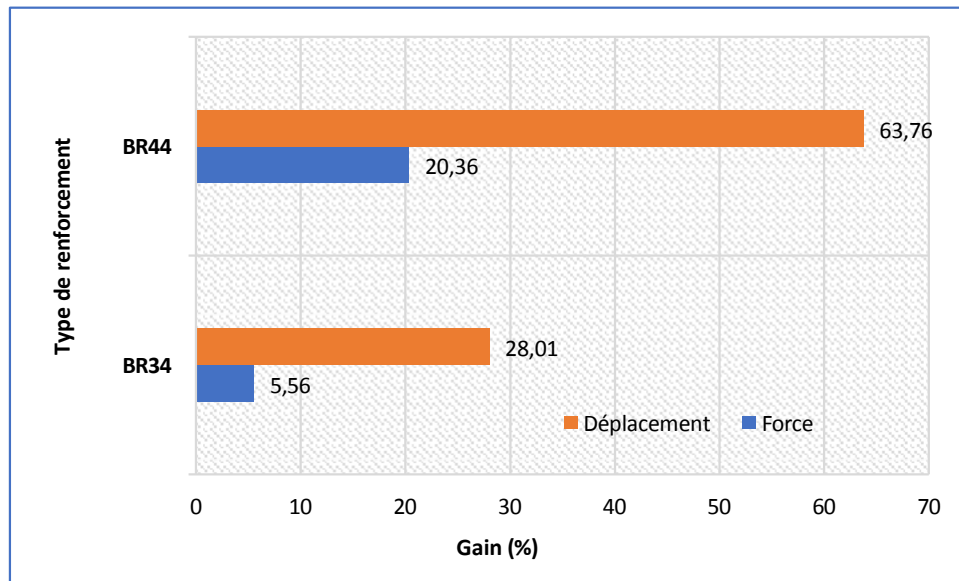


Figure III.4 : Gains en déplacement selon la largeur de la bande par rapport au béton à base de granulats recyclés.

La figure ci-dessus montre que, par rapport aux témoins à base de granulats recyclés, des gains de résistance de 5,56% et 20,36% sont obtenus pour les poutres renforcées avec des bandes de 3 et 4 cm respectivement. Par ailleurs, des gains de déformabilité de 28,01% et 63,76% sont enregistrés pour les mêmes poutres renforcées dans le même ordre.

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

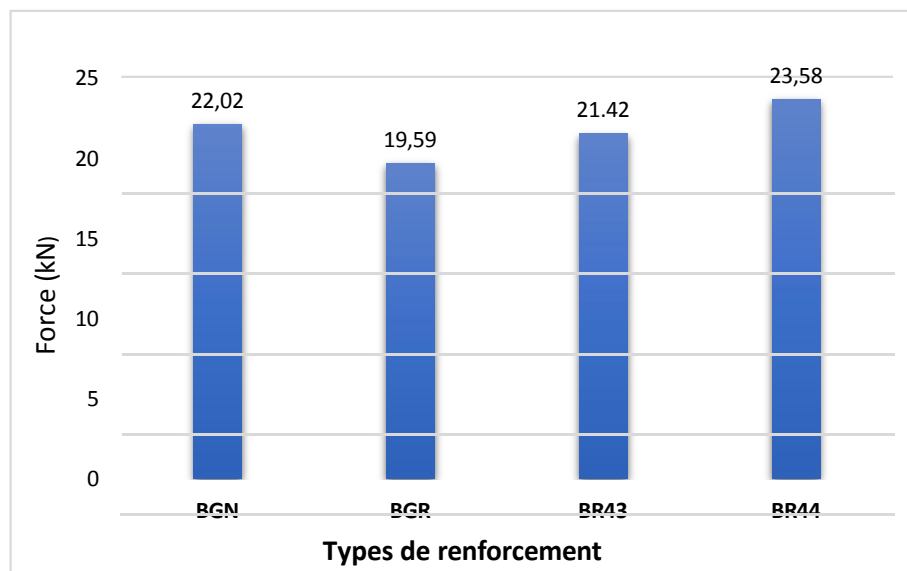
L'étude a également porté sur l'influence du nombre de tours de la bande de jute sur la performance des poutres renforcées. Deux valeurs du nombre de tours de la bande de jute sont testées, à savoir 3 tours et 4 tours. Elles sont comparées aux éprouvettes témoins.

Les résultats des essais, présentés dans le tableau III-2, indiquent que le nombre de tours de la bande de jute a un impact sur le comportement des poutres renforcées. En comparaison avec les poutres non renforcées, les poutres renforcées des bandes faisant 3 tours et celles faisant 4 tours, ont présenté une amélioration en termes de résistance et de déformabilité.

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

Type de renforcement	BGN	BGR	BR43	BR44
Force max (KN)	22.02	19.59	21.42	23.58
Déplacement a la rupture (mm)	2.72	2.07	2.94	3.39

Les résultats obtenus concernant la variable nombre de tours de la bande, ont permis de tracer les histogrammes de la figure III. 5.

**Figure III.5:** Résistances des poutres selon le nombre de tours de la bande.

Il ressort de ce diagramme que la résistance des poutres à 4 tours de jute qui est de 23,58 kN dépasse celle des poutres témoins qu'elles soient à base de granulats recyclés ou naturels. On obtient, ainsi pour les poutres renforcées avec 4 tours, un gain de résistance (Fig.III.7 8) par rapport au béton à base de granulats naturels, d'une valeur de 7,08 %. Il est à noter que les gains de résistance, par rapport au béton à base de granulats recyclés illustrés sur la même figure, sont de 9,34 % et 20,36 % pour les poutres renforcées avec 3 tours et 4 tours de jute respectivement (Fig.III.8).

La figure III.6 , permet une comparaison des déplacements des éprouvettes étudiées précédemment précédentes. Il ressort que les déplacements des poutres renforcées avec 3 et 4 tours de jute sont respectivement de 2,94 mm et 3,39 mm, contre des déplacements de 2,72 mm et 2,07 mm pour les témoins positif et négatif respectivement.

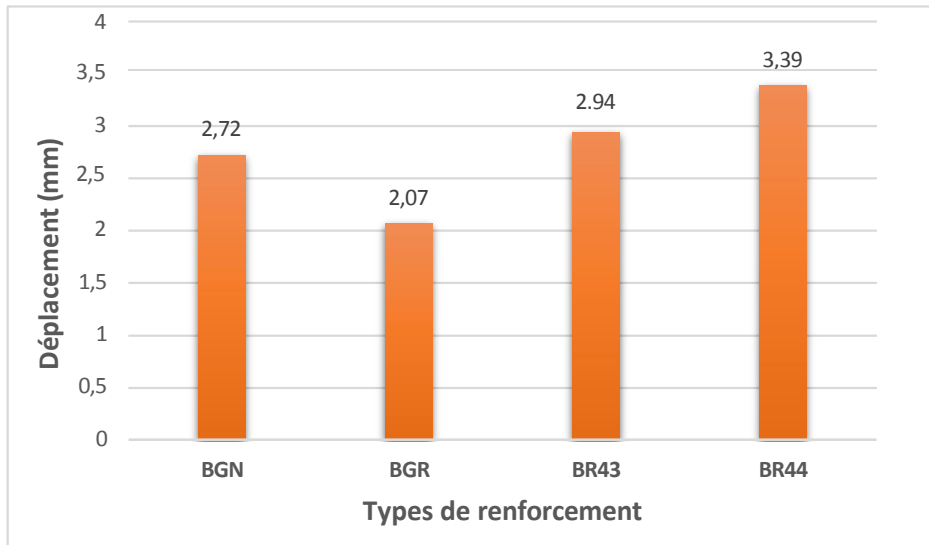


Figure III. 6 : déplacements des poutres selon le nombre de tours de la bande.

Les déplacements obtenus ont engendré des gains de 8,08% et 24,63% et ce par rapport aux poutres témoins à base de granulats naturels, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

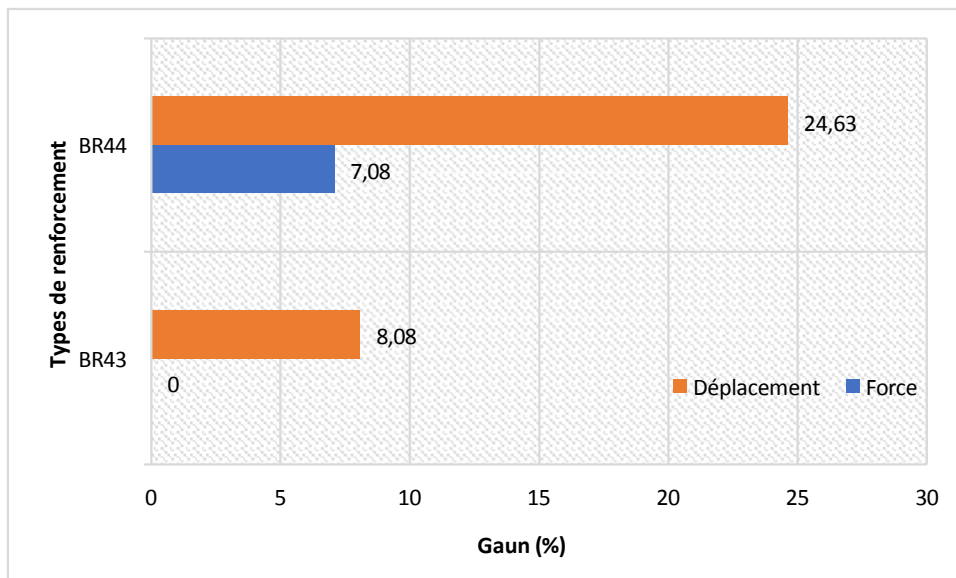


Figure III. 7 : Gains en résistances et déplacements des poutres selon le nombre de tours de la bande, par rapport au béton à base de granulats naturels.

Par ailleurs, la figure III. 8 montre que les poutres renforcées avec 3 tours de tissu de jute présentent un gain de ductilité de 42,02 %, tandis que les poutres renforcées avec 4 tours de tissu de jute présentent un gain de ductilité de 63,76 % et ce par rapport aux poutres non renforcées à base de granulats recyclés.

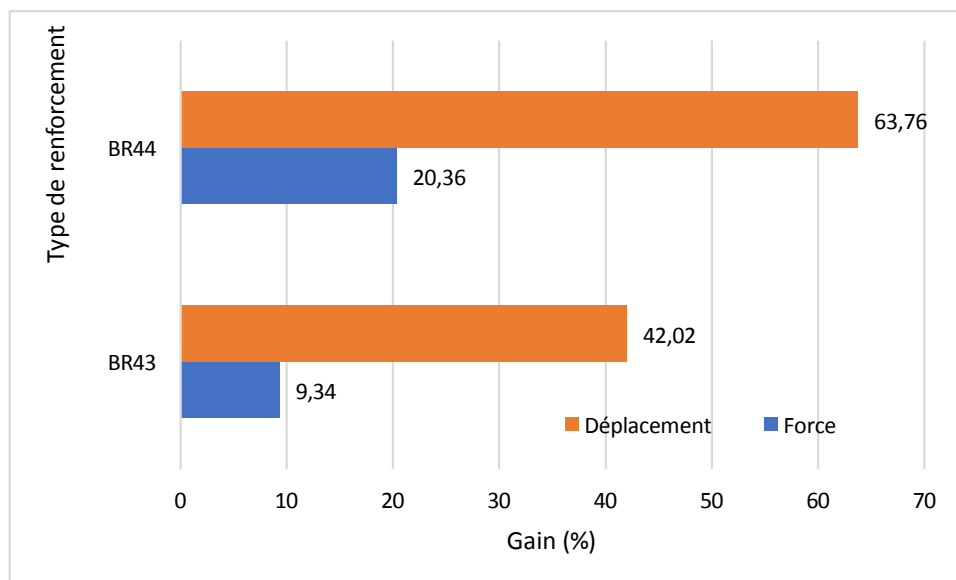


Figure III. 8 : Gains en résistances et déplacements des poutres selon le nombre de tours de la bande, par rapport au béton à base de granulats recyclés.

III.2.3 Effet du nombre de plis du PRFJ

Des poutres renforcées avec des bandes de tissu de jute à 1, 2 et 3 plis ont été testées en flexion. L'effet du nombre de plis sur la force et le déplacement des poutres a été analysé. Le tableau III.3, présente les valeurs des forces et des déplacements selon le nombre de plis.

Le tableau III.3 : Forces et des déplacements selon le nombre de plis.

Type de renforcement	BGN	BGR	BR44P1	Br44P2	BR44P3
Force max (KN)	22.02	19.59	23.58	23.94	24.93
Déplacement à la rupture (mm)	2.72	2.07	3.39	3.5	3.64

L'histogramme de la figure III- 9 permet de comparer les performances des poutres renforcées à celles des poutres témoins en termes de résistance à la flexion.

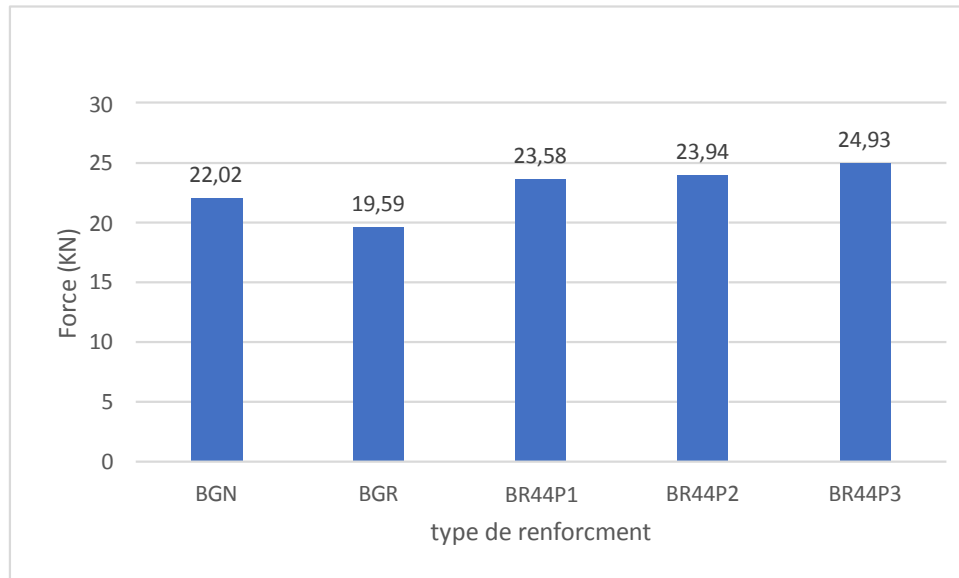


Figure III. 9: Résistances des poutres selon le nombre de plis du PRFJ.

Les poutres renforcées avec du tissu de jute présentent une capacité portante significativement plus élevée que les poutres témoins. Comparées aux poutres non renforcées

à base de granulats recyclés et de granulats naturels qui ont des résistances de 19,59 kN et 22,02 kN respectivement, les poutres renforcées avec 1, 2 et 3 plis de jute ont respectivement des capacités portantes de 23,58 kN, 23,94 kN et 24,93 kN.

En outre, les poutres renforcées avec du tissu de jute présentent une déformabilité améliorée par rapport aux poutres témoins. Les poutres renforcées avec 1, 2 et 3 plis de jute se déforment respectivement de 3,39 mm, 3,50 mm et 3,64 mm, contre 2,07 mm et 2,72 mm pour les témoins négatif et positif respectivement, comme indiqué sur la figure III.10 3.

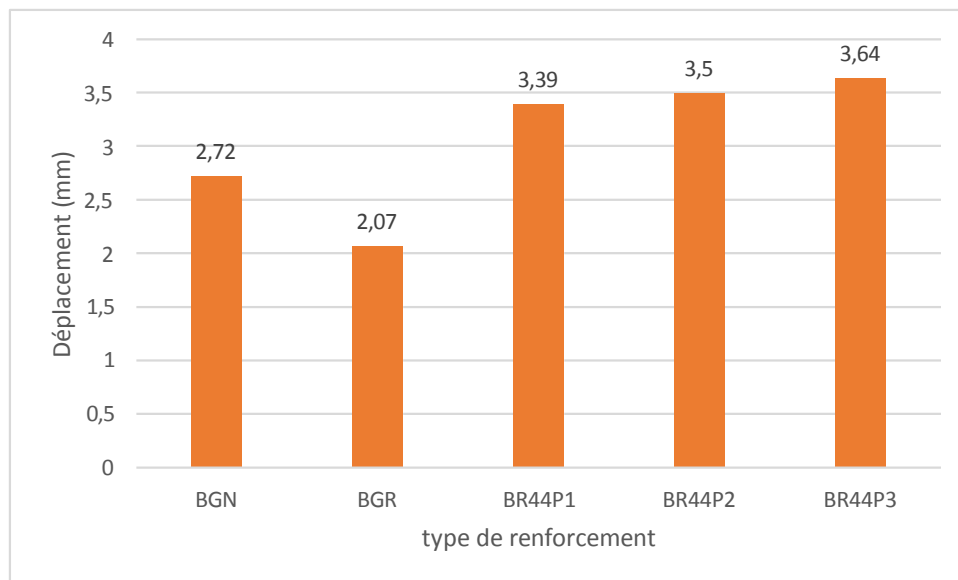


Figure III. 10 : déplacement à la rupture des poutres selon le nombre de plis du PRFJ.

L'histogramme de la figure III.11 illustre clairement l'amélioration de la résistance des poutres renforcées avec du tissu de jute, comparées aux poutres témoins. On observe une augmentation de la résistance à la rupture pour tous les cas de renforcement. On enregistre, ainsi, des gains de 7,08 %, 8,71 % et 13,21 % pour 1,2 et 3 plis de tissu de jute respectivement par rapport aux poutres formant le témoin positif. Il en est de même pour les gains en déformabilité, puisqu'on obtient des gains de 24,63%, 28,67% et 33,82% respectivement pour les mêmes poutres renforcées.

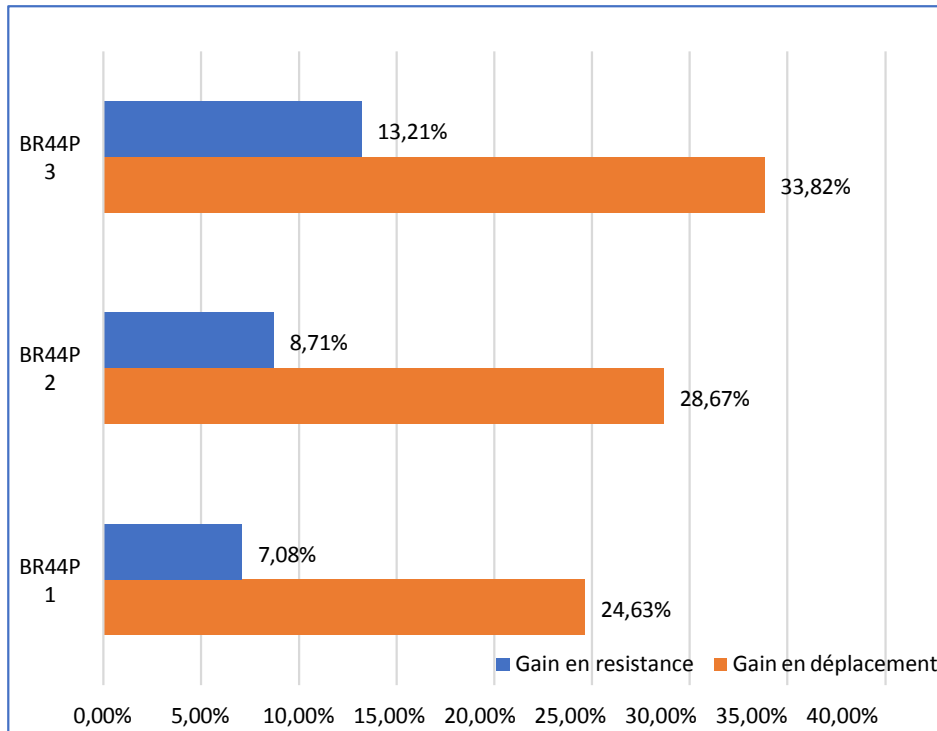


Figure III. 11 : Gains de résistance selon le nombre de plis par rapport au béton à base de granulats naturels.

Les gains sont également quantifiés par rapport au béton de granulats recyclés. On obtient les valeurs de 20,36%, 22,2% et 27,26% respectivement pour les poutres renforcées avec 1, 2 et 3 plis de jute (Fig.III.12). Par ailleurs, les gains de 63,76%, 69,08% et 75,84% sont obtenus respectivement pour les mêmes poutres en déformabilité.

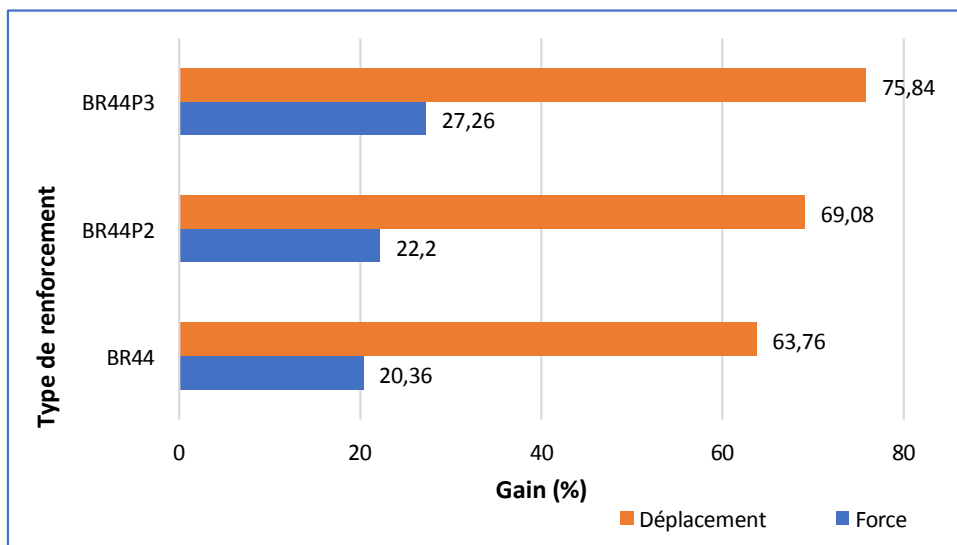


Figure III.12 : Gains de résistance selon le nombre de plis par rapport au béton à base de granulats recyclés.

III.3. Discussion des résultats

Les résultats obtenus dans cette recherche, démontrent que le renforcement des poutres à base de granulats recyclés avec des bandes de tissu de jute, améliore la résistance à la flexion ainsi que leur capacité à se déformer avant de rompre, ce qui est un atout crucial pour la sécurité des structures.

Cette amélioration du comportement des poutres renforcées par rapport aux poutres non renforcées à base de granulats recyclés peut être attribuée à la présence du renfort en jute. Ceci peut être confirmé en examinant les modes de rupture et les différentes régressions linéaires (Fig.III.13) calculées entre la capacité portante des poutres et leurs déplacements à la rupture avec les paramètres du renfort qui sont sa largeur, son nombre de tours ainsi que le nombre de plis de celui-ci. Les régressions calculées montrent une bonne corrélation positive entre la force et chacun des paramètres du renfort, à savoir la largeur, le nombre de tours et le nombre de plis. Il en est de même pour le déplacement.

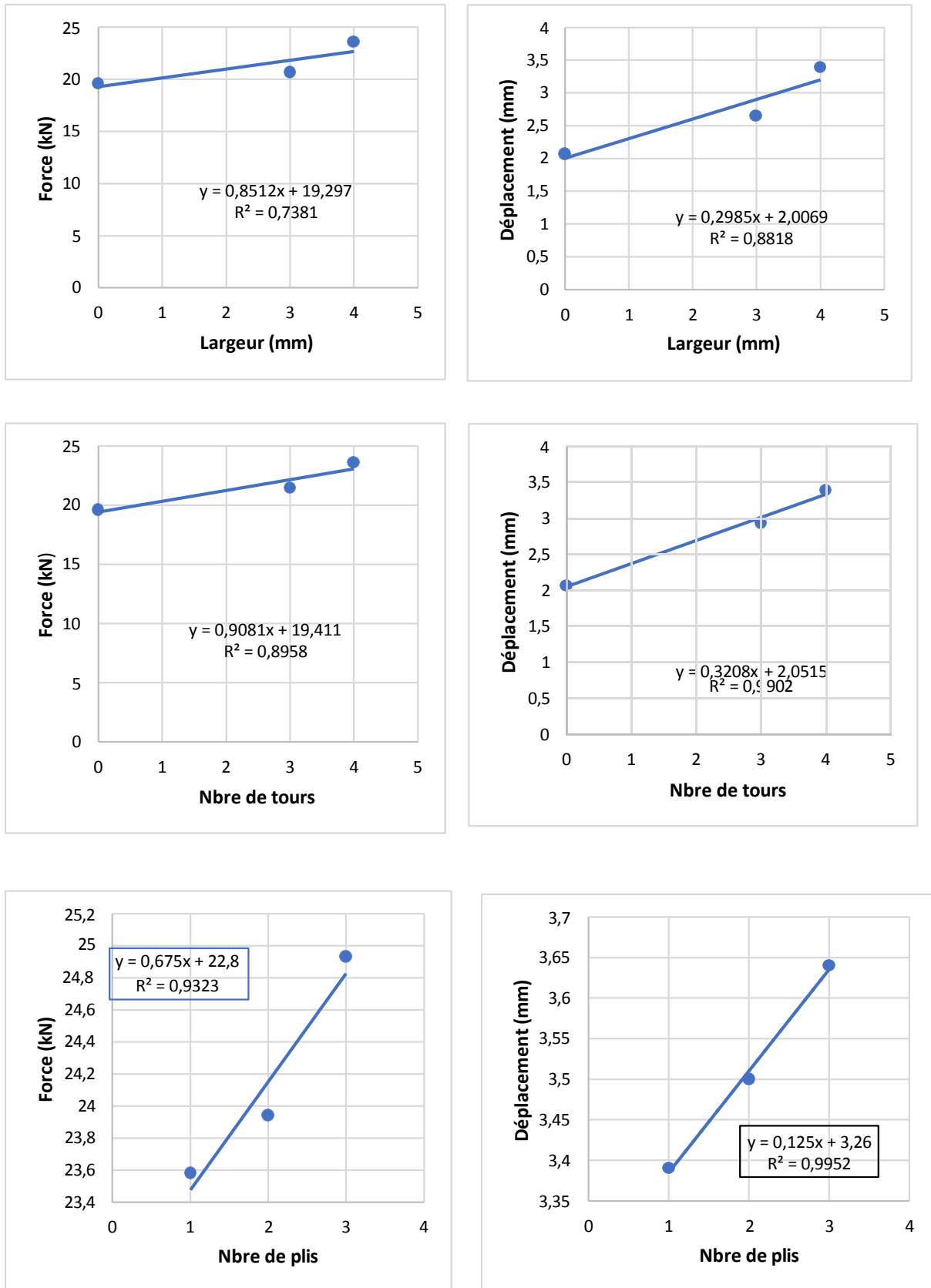


Figure III. 13 : Corrélations linéaires entre les paramètres du renfort et avec chacune des grandeurs mécaniques mesurées.

Par ailleurs, l'examen du mode de rupture des poutres renforcées révèle que les bandes de jute ont été effectivement sollicitées dans toutes les configurations de renforcement, comme en témoigne leur rupture clairement visible sur la figure ci-dessous, ceci prouve qu'elles ont effectivement participé à la reprise de l'effort jusqu'à leur rupture.

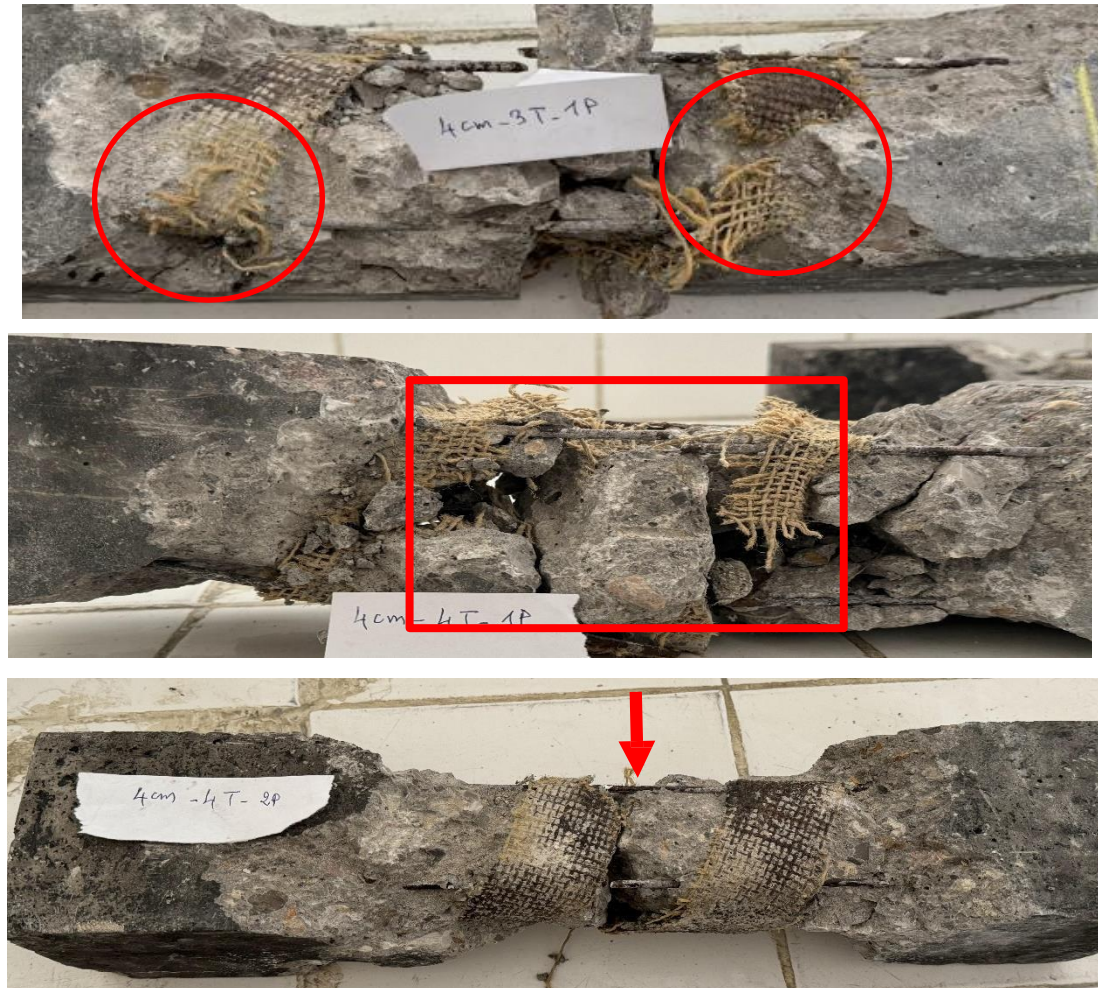


Figure III. 14 : Poutres renforcées endommagées.

Ces résultats confirment, donc, que le renforcement des poutres avec des bandes de tissu de jute a un effet positif sur leur comportement mécanique. L'augmentation notée en termes de résistance et de déformabilité, en comparaison aux poutres non renforcées et qui sont à base de granulats naturels, laisse penser à la possibilité d'utiliser un béton à base de granulats recyclés ainsi renforcé comme béton structurel, ce qui constitue une alternative au béton conventionnel.

En effet, le béton recyclé renforcé approche le comportement du béton à granulats recyclés lorsque le renforcement n'est pas très dense, pendant que les performances mécaniques du béton recyclé renforcé dépassent complètement celles du béton à granulats naturels lorsque le renforcement est assez important.

III.4. Conclusion

Le renforcement des poutres en béton, à base de granulats recyclés, avec des bandes, en spirale, de tissu de jute s'avère être une technique prometteuse pour améliorer leurs propriétés mécaniques, notamment leur résistance à la flexion et leur ductilité. Ce renforcement offre des avantages considérables en termes de performances grâce aux mécanismes de confinement du noyau de béton et d'activation des propriétés du PRFJ. La prise en compte de la densité de renforcement est un élément crucial pour optimiser les performances des poutres renforcées.



Conclusion générale

De nos jours, la protection de l'environnement est l'une des principales préoccupations de l'homme. Il a commencé récemment à chercher des matériaux "amis de l'environnement" comme une alternative à l'utilisation des matériaux conventionnels. L'objectif étant double, il s'agit de limiter la pollution engendrée par l'industrie de ces matériaux comme c'est le cas du ciment et de préserver les ressources naturelles.

C'est dans une démarche de développement durable, que s'inscrit cette recherche puisqu'elle porte sur l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Elle a pour objet l'étude du renforcement interne de poutres en béton armé de dimensions 10cm x10cm x40cm à l'aide de bandes d'un tissu bidirectionnel de jute et des PRFJ (polymères renforcés de fibres de jute) disposés en spirale autour de l'armature.

Les paramètres étudiés dans cette recherche sont la largeur de la bande de jute, le nombre de tours qu'elle fait autour de l'armature et le nombre de plis des PRFJ.

Le principal objectif de cette étude est d'analyser et d'évaluer l'impact des variables testées sur la résistance à la flexion des poutres et leur déformabilité. Les tests de flexion à trois points sont réalisés sur les 21 éprouvettes testées, qui représentent cinq variantes de renforcement avec le jute, ainsi que les deux groupes de témoins positif et négatif non renforcés.

Les résultats expérimentaux ont démontré que l'utilisation de composites à base de fibres de jute pour renforcer les poutres en béton offre une solution économique, qui permet d'améliorer la résistance et la déformabilité des poutres, tout en étant facile à mettre en œuvre, respectueuse de l'environnement et de la santé humaine.

En effet, une augmentation de la résistance ultime ainsi que de la déformabilité a été observée pour quasiment toutes les variantes de renforcement, notamment celle du renforcement avec le PRFJ.

Des apports de résistance, par rapport aux poutres de béton recyclé, atteignant 20.36% en résistance 63,76% en déformabilité sont obtenus pour les poutres renforcées avec une bande de 4 cm de largeur. Par rapport aux poutres en béton ordinaire, les gains en résistance et en déformabilité, atteignent 7.08% et 24.63% pour les mêmes poutres.

Pour la variable nombre de plis, les gains sont également quantifiés par rapport au béton de granulats recyclés. On obtient les valeurs de 20,36%, 22,2% et 27,26% respectivement pour les poutres renforcées avec 1, 2 et 3 plis de jute. Par ailleurs, les gains de 63,76%, 69,08% et 75,84% sont obtenus en déplacement et respectivement pour les mêmes poutres.

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette recherche dénotent l'intérêt de l'utilisation du jute dans le renforcement des poutres en béton notamment sous forme de PRF et l'intérêt environnemental certain par l'utilisation des granulats recyclés. Ceci ouvre plusieurs perspectives à ce travail, telles que tester le renforcement avec des bandes de matériaux différents comme le verre, étudier l'effet de la maille du renfort sur les performances des éléments et tester l'effet du renforcement sur les performances d'un béton à base de 100% de granulats de recyclage.



Références bibliographiques

- [1] Almeida, N., Branco, F., de Brito, J., and Santos, J. R. 2007. High-performance concrete with recycled stone slurry. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 210-220.
- [2] Silva, R.V., de Brito, J., and Saikia, N. 2013. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23–31.
- [3] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., and Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742.
- [4] Chen, H. J., Yen, T., and Chen, K. H. 2003. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and concrete research*, 33(1), 125-132.
- [5] Debieb, F., and Kenai, S. 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction Building Materials*, 22(5), 886–893.
- [6] Malhotra, V. M. 1978. Use of recycled concrete as a new aggregate. In *Symposium on Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*, CANMET, Report N. 76– 8 (39 p). Ottawa.
- [7] Poon, CS., Shui, ZH., and Lam, L. 2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction Building Materials*, 18(6), 461– 468.
- [8] Gómez-Soberón, J. M. 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and concrete research*, 32(8), 1301-1311.
- [9] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., and De Juan, M. S. 2013. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065
- [10] Gonzalez, A., and Etxeberria, M. 2014. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227-235.
- [11] Breyse, D., and Gérard, B. 1997. Modeling of permeability in cement-based materials: Part 1. Uncracked medium. *Cement and Concrete Research*, 27 (5), 761–775

- [12] **Tavakoli, M., and Soroushian, P.** 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 182-190.
- [13] **Ali Ahmed C, Si Salem A, Ait Taleb S, Ait Tahar K,** 2022. Experimental behavior and reliability of predamaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression. *World Journal of Engineering*. 21(3).
- [14] **Mallick, P. K.** (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.
- [15] **Chawla, K.** (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media.
- [16] **Katz, A.,** (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 703–711. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi:10.1016/S0008-8846(02)01033-5).
- [17] **Fernanda de Andrade Salgado, Flavio de Andrade Silva,** (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering* 52 (2022) 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>
- [18] **Valobat. (n.d.).** Le recyclage des matériaux inertes. <https://www.valobat.fr/le-recyclage-des-materiaux-inertes/>
- [19] **Bruxelles Environnement.** (2010). Fiche 4.1 : Utilisation de granulats issus du recyclage. https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF_BATEX_Fiche4.1._Granulats_FR.pdf
- [20] **Cimpelli C. et Lefort M,** (1996). Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclé UNICEM. Île de France. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [21] **Abbas A. Carcassès M. Olivier J.P,** (2009). The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52/1.

- [22] **Boudina T**,(2022). Etude de l'influence de la granulométrie et de la nature des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons par la méthode des plans d'expériences. Thèse de doctorat.université de biskra, 194p.
- [23] **Ali Ahmed C**, 2016. Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation Thèse de doctorat. Université de Tizi Ouzou. 130p.
- [24] **Chatain,M**, (2001),”Matériaux composites: présentation générale”, AM 5000,Techniques de l'Ingénieur, traité plastiques et composites, Vol.AM 6.
- [25] **Milanese**, Andressa Cecilia, Cioffi, Maria Odila Hilario, Voorwald, Herman Jacobus Cornelis (2011). “Mechanical behavior of natural fiber composites.” *Procedia Engineering*, 10, 2022-2027.
- [26] **Gassan, Jochen, Bledzki, Andrzej K.** (1999). “Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibers.” *Composites Science and Technology*, 59, 1303-1309.
- [27] **Summerscales, John, Dissanayake, Nilmini, Virk, Amandeep, Hall, Wayne** (2010). “A review of bast fibers and their composites. Part 2: Composites.” *Composites Part A*, 41, 1336-1344.
- [28] **Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Arora, S.** (2004). “Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?” *Composites Part A*, 35, 371-376.
- [29] **Munikenche Gowda, T., Naidu, A.C.B., Chhaya, Rajput** (1999). “Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites.” *Composites Part A*, 30, 277-284.
- [30] **Ceroni F.** “Experimental analysis...” (text becomes illegible)
- [31] **Dong, Jiangfeng, Wang, Qingyuan, Guan, Zhongwei** (2013). “Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets.” *Composites Part B*, 44, 604-612.
- [32] **Lau, Kin-tak, Zhou, Li-min** (2001). “Mechanical performance of composite-strengthened concrete structures.” *Composites Part B*, 32, 21-31.

- [33] **Al-Amery, Riyadh, Al-Mahaidi, Riadh.** 2006. "Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps." *Composites Structures*, 75, 457-464.
- [34] **Sheikh, Shamim A.** (2002). "Performance of concrete structures retrofitted with fiber reinforced polymers." *Engineering Structures*, 24, 869-879.
- [35] **El-Hacha, R., & Rizkalla, S. H.** (2004). Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Structural Journal*, 101(5), 717-726.
- [36] **Barros, J. A., Dias, S. J., & Lima, J. L.** (2007). Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 203-217.
- [37] **Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z.** (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research*, 14(2), 248-255. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000032>
- [38] **Yang, K. H., Song, Y. C., & Achour, H. M.** (2011). Mechanical properties of concrete incorporating shredded waste tire rubber. *Scientific Research and Essays*, 6(29), 7959-7970.
- [39] **Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R.** (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506.
- [40] **Singh, S. K., & Sharma, P. C.** (2007). Studies on strength and related properties of concrete incorporating recycled coarse aggregates. *Indian Concrete Journal*, 81(7), 27-34.
- [41] **Tavakoli, M., & Soroushian, P.** (1996). Strengths of recycled aggregate concrete. *Concrete International*, 18(4), 35-40.
- [42] **J.M. Berthelot.** « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN : 2-7430-0771-0. Pp 72.
- [43] **Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh** « Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton ». Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp. 264, 2010, 978-613-1-55146-8.

[44] **Hubert, M., & Courard, L.** (2022). Influence of recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 314, 125651.

[45] **John Doe, Jane Doe et al .**(2024). "The Strength of Fiberglass: A New Approach to Reinforced Concrete" par., le *Journal of Concrete Research*.

[46] : <https://www.lafarge.dz>

Résumé

Le recyclage des matériaux de construction offre une solution doublement avantageuse en répondant aux besoins de production tout en réduisant les impacts environnementaux de l'industrie de la construction. C'est une approche à encourager et à développer davantage dans les politiques et les pratiques de construction. Les granulats recyclés sont, cependant, de qualité moindre que les granulats naturels puisqu'ils sont plus poreux du fait qu'ils soient entourés d'une pâte de ciment durcie.

Dans cette étude, un renforcement de poutres en béton à base de granulats recyclés est proposé, elle est menée dans le but d'améliorer le comportement de poutres en béton de granulats recyclés pour qu'il approche celui de poutre en béton conventionnel.

Les poutres sont renforcées avec des bandes en spirales d'un tissu bidirectionnel de jute. Les variables étudiées sont la largeur de la bande, son nombre de spires ainsi que son nombre de plis lorsqu'elle est introduite sous forme de polymère renforcé de fibres (PRF).

Les résultats de cette étude expérimentale dénotent l'intérêt de l'utilisation des fibres de jute dans le renforcement des poutres en béton de granulats recyclé, notamment sous forme de PRF, puisqu'elles améliorent les performances mécaniques de ces poutres. Le béton ainsi renforcé dépasse pour certaines variantes de renforcement les performances du béton de granulats naturels, ce qui laisse entrevoir la possibilité de son utilisation comme béton de structure.

Mots clés : granulats recyclés, renforcement interne, poutres en béton, résistance, PRF de jute.

Abstract

Recycling construction materials provides a doubly advantageous solution by meeting production needs while reducing the environmental impacts of the construction industry. It's an approach to be encouraged and further developed in construction policies and practices. However, recycled aggregates are of lower quality than natural aggregates because they are more porous due to being surrounded by hardened cement paste.

In this study, reinforcement of concrete beams using recycled aggregates is proposed with the aim of improving the behavior of recycled aggregate concrete beams to approach that of conventional concrete beams. The beams are reinforced with spiral strips of bidirectional jute fabric. The variables studied include the width of the strip, the number of spirals, and the number of plies when introduced in the form of Fiber Reinforced Polymers (FRP).

The results of this experimental study demonstrate the benefits of using jute fibers in reinforcing recycled aggregate concrete beams, especially in the form of FRP, as they enhance the mechanical performance of these beams. The reinforced concrete exceeds the performance of natural aggregate concrete in certain reinforcement variants, suggesting its potential use as structural concrete.

Keywords: recycled aggregates, internal reinforcement, concrete beams, strength, jute FRP.