REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil

Laboratoire de L2 MSGC de la faculté du génie de la construction

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master académique

Filière : Génie civil

Spécialité : Structures

Thème

Traitement des granulats recyclés inclus dans des poutres en béton renforcées avec matériaux composites

Présenté par :

M^elle^ HEROUI Sonia

Devant le jury composé de :

Mr BENYAHI K.	Maitre de conférences A à l'UMMTO	Président.
Mme HADDAD K.	Maitre de conférences B à l'UMMTO	Examinatrice.
Mme ALI AHMED C.	Maitre de conférences A à l'UMMTO	Promotrice.

Promotion: 2024/2025 Soutenu le 19/06/2025

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement ***Dr ALI AHMED C ;*** *ma promotrice pour sa bienveillance, sa rigueur scientifique et son accompagnement constant tout au long de cette étude. Son engagement et sa confiance ont été pour moi une source de motivation précieuse.*

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs observations enrichissantes, qui témoignent de leur intérêt pour ma recherche.

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil pour les connaissances et les valeurs transmises tout au long de ma formation. Je remercie aussi tout le personnel des laboratoires de Matériaux et de RDM de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou ***; Dr IGUETOULENE. F, Mr BOUHERRAOUA.R*** *et particulièrement* ***Mme MEDJBAR. F*** *pour leur accueil, leur assistance et leur accompagnement lors de mes expérimentations.*

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur aide, leur soutien moral ou simplement leur présence ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents ainsi qu'à mon frère, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs sacrifices, sans lesquels rien de tout cela n'aurait été possible.

Je dédie ce travail aussi à mes camarades pour l'entraide, les moments partagés et le travail en équipe. Ce travail est aussi le reflet de nos efforts communs.

À ceux qui ont su être là dans les moments de stress, de fatigue ou de découragement. Vos mots, vos sourires, votre écoute et votre affection m'ont aidé à garder le cap. Ce mémoire est aussi le vôtre.

Enfin ce travail est dédié à la mémoire de mes grands-parents, qui nous ont quittés, mais dont l'amour et les valeurs continuent de m'accompagner chaque jour. Votre absence est douloureuse, mais votre présence reste vive dans mon cœur.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets de construction à travers l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication du béton. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les performances mécaniques de ces matériaux alternatifs afin de les rendre comparables, voire supérieurs, à celles des bétons à base de granulats naturels.

Pour cela, différentes méthodes de traitement ont été appliquées aux granulats recyclés, notamment l'ajout de coulis à base de ciment, de pouzzolane et de fumée de silice. Parallèlement, des renforcements interne et externe des éprouvettes de béton ont été réalisés à l'aide de bandes de jute, un matériau naturel, économique et respectueux de l'environnement.

Des essais mécaniques, en particulier des tests de flexion et d'abrasion, ont permis de constater une amélioration notable des propriétés des bétons recyclés traités et renforcés. Ces résultats montrent que cette approche, alliant traitement des granulats et renforcement par fibres naturelles, peut constituer une solution efficace et durable pour promouvoir le recyclage dans le domaine de la construction, tout en visant à dépasser les performances du béton traditionnel.

Mots clés : béton, granulats recyclés, traitement, PRF de jute, résistance.

Abstract

This project is part of a sustainable approach to valorize construction waste using recycled aggregates in concrete production. The main objective of this study is to improve the mechanical performance of these alternative materials, making them comparable to, or even better than, concrete made with natural aggregates.

To achieve this, various treatment methods were applied to the recycled aggregates, including the use of cement grout, as well as mixtures with pozzolan and silica fume. In parallel, internal and external reinforcements of the concrete specimens were carried out using jute strips, a natural, economical, and environmentally friendly material.

Mechanical tests, particularly flexural and abrasion tests, revealed a significant improvement in the properties of the treated and reinforced recycled aggregate concretes. These results demonstrate that combining aggregate treatment with natural fiber reinforcement can be an effective and sustainable solution to promote recycling in the construction sector, while aiming to exceed the performance of conventional concrete.

Keywords: concrete, recycled aggregates, treatment, jute FRP, strength.

Sommaire

Liste des figures 8

Liste des tableaux 10

Chapitre I : Synthèse bibliographique 15

I.1 Introduction 16

I.2 Le béton 16

I.2.1 Constituants du béton 17

I.2.2 Fabrication du béton 17

I.2.3 Propriétés du béton 17

I.2.4 Utilisations du béton 18

I.2.5 Entretien et réparation du béton 18

I.2.6 Nouvelles tendances dans l'utilisation du béton 18

I.3 Les granulats de béton recyclés 19

I.3.1 Source des granulats de béton recyclés 19

I.3.2 Types de granulats recyclés 21

I.3.3 Caractéristiques physiques des granulats recyclés 22

I.3.4 Caractéristiques mécaniques des granulats de béton recyclés 23

I.3.5 Avantages et inconvénients des granulats de béton recyclés 23

I.3.6 Application des granulats recyclés 25

I.4 Traitement des granulats recyclés 26

I.5 Renforcement des poutres en béton 26

I.5.1 Méthodes de renforcement 27

I.5.2 Renforcement des poutres en béton avec des PRF 28

I.6 Rappel sur les matériaux composites 29

I.6.1 Définition et composition 29

I.6.2 Classification des matériaux composites 30

I.6.3 Types de Matériaux Composites 32

I.6.4 Types de fibres 33

I.7 Brève revue des travaux existants 36

I.8 Conclusion 37

Chapitre II : Procédure expérimentale 39

II.1 Introduction 40

II.2 Matériaux utilisés 40

II.2.1 Le béton 40
II.2.2 Matériau composite 44
II.2.3 Pouzzolane 47
II.2.4 Fumée de silice 48
II.2.5 Superplastifiant 48
II.3 Traitement des granulats recyclés 49
II.3.1 Préparation des Coulis 49
II.3.2 Application du traitement sur les granulats 50
II.4 Démarche expérimentale 51
II.4.1 Corps d'étude 51
II.4.2 Préparation du ferraillage 52
II.4.3 Mise en place du renfort 52
II.4.4 Coulage des éprouvettes 53
II.4.5 Préparation des moules 54
II.4.6 Coulage des éprouvettes 54
II.5 Traitement mécanique des granulats recyclés 57
II.5.1 Principe de l'essai 57
II.5.2 Application aux granulats recyclés 58
II.5.3 Essai d'absorption des granulats 60
II.5.4 Corps d'étude 61
II.6 Procédure de l'essai de flexion 61
II.7 Conclusion 63
Chapitre III : Résultats et discussion 64
III.1 Introduction 65
III.2 Effet du traitement 65
III.2.1 Résistance à la flexion 65
III.2.2 Déformabilité 68
III.2.3 Discussion des résultats 69
III.3 Effet du renforcement 70
III.3.1 Résistance à la flexion 71
III.3.2 Déformabilité 72
III.3.3 Discussion des résultats 73
III.4 Effet du traitement mécanique des GBR 74

III.4.1 Résultats du test d'absorption 74
III.4.2 Résultats de l'essai de flexion 76
III.4.3 Discussion des résultats 77
III.5 Conclusion 78
Conclusion générale 80

Liste des figures

Figure I.1 : Granulats recyclés. 19
Figure I.2: Déchets de démolition. 20
Figure I.3: Renforcement des poutres avec des plaques d'acier. 27
Figure I.4: Renforcement d'une poutre par contrainte additionnelle. 28
Figure I.5 : Renforcement des poutres avec FRP. 29
Figure I.6: Matériau composite. 29
Figure I.7: Composites à fibres courtes. 30
Figure I.8: Composite à fibres longues. 31
Figure I.9: Structure stratifiée. 31
Figure I.10: Structure sandwich. 32
Figure I.11: Fibres de carbone. 34
Figure I.12: Fibres de verre. 35
Figure I.13 : Fibres de jute. 36
Figure II.1: Ciment utilisé. 40
Figure II.2: Granulats utilisés. 42
Figure II.3: Sable utilisé. 43
Figure II.4: Tissu fibre de jute utilisé. 45
Figure II.5 : Résine medapoxy str utilisée et son durcisseur. 46
Figure II.6: Pouzzolane utilisée. 48
Figure II.7: Fumée de silice. 48
Figure II.8: Superplastifiant utilisé. 49
Figure II.9 : Immersion des granulats dans les coulis. 51
Figure II.10 : Les granulats traités séchés. 51
Figure II.11: Structure en acier utilisée. 52
Figure II.12 : Renfort en jute utilisé. 53
Figure II.13: Moule prismatique utilisé. 54
Figure II.14 : Renfort installé dans l'éprouvette lors du coulage. 55
Figure II.15 : Schéma récapitulatif des variantes étudiées**.** 56
Figure II.16: Machine Los Angeles**.** 57
Figure II.17 : Granulats recyclés à la sortie de la machine Los Angeles. 59
Figure II.18 : Tamisage des granulats recyclés traités. 59
Figure II.19 : Granulats obtenus après tamisage. 59
Figure II.20: Immersion des granulats recyclés et traités dans l'eau. 60
Figure II.21 : Machine de flexion SEIDNER. 62
Figure III.1: Confrontation des courbes force-déplacement des variantes testées. 66
Figure III.2: Résistance des poutres en fonction des traitements. 67
Figure III.3: Gains de résistance selon les traitements. 67
Figure III.4: Déplacement au pic des poutres selon le traitement. 68
L'histogramme de la figure III.5, présente l'augmentation de la flèche (déplacement) des bétons de granulats traités par rapport au béton témoin de granulats naturels. Le traitement avec ciment+pouzzolane entraîne une augmentation de la flèche de 19.37 % tandis que celui en ciment provoque une hausse de 32.88 %. 68

Figure III.5: Gains de déplacement selon les types de traitement. 69
Figure III.7: Résistance des poutres selon le type de renforcement. 71
Figure III.8: Pourcentages des gains de résistance selon le type de renforcement. 72
Figure III.9 :Déplacement des poutres selon le renforcement. 72
Figure III.10: Pourcentages des gains en déplacement selon le renforcement. 73
Figure III.11: Rupture du renfort interne (a) et externe (b) en jute. 74
Figure III.12 : Graphe des pertes d'absorption selon le type de variante. 75
Figure III.13: Courbes force-déplacement des poutres à base de granulats recyclés traités mécaniquement. 76
Figure III.14:Charge ultime en flexion. 77

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques du ciment utilisé. 41
Tableau 2: Caractéristiques des fibres de jute [57] 45
Tableau 3: Caractéristiques de la résine Medapoxy str. 47
Tableau 4: Composition et quantités des coulis pour le traitement des granulats recyclés. 50
Tableau 5 : Composition du béton pour 1m³. 53
Tableau 6:Références des variantes étudiées. 55
Tableau 7:Résultats de l'essai d'absorption. 75

Introduction générale

Le secteur du génie civil se trouve actuellement face à des défis majeurs qui nécessitent une remise en question profonde des pratiques traditionnelles de construction. Alors que le béton reste le matériau le plus utilisé dans la construction, avec une proportion avoisinant les 75% des matériaux employés dans les ouvrages de génie civil, son impact environnemental considérable tant en termes d'extraction des matières premières que de production de déchets de démolition, impose la recherche de solutions alternatives plus durables. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire qui explore deux axes complémentaires de recherche, l'utilisation optimisée des granulats de béton recyclés et le renforcement par fibres naturelles de jute, comme étant des pistes prometteuses pour une construction plus respectueuse de l'environnement.

C'est, donc, dans le but de protéger l'environnement que les chercheurs ont travaillé au développement de ressources alternatives en recyclant divers matériaux, notamment les déchets issus de la construction, de l'industrie et de l'automobile, y compris le caoutchouc provenant des pneus usagés. [1] [2] [3] [4] [5] [6] .

Les granulats recyclés constituent une réponse concrète au problème croissant des déchets de construction, puisqu'ils permettent de valoriser les matériaux issus de la démolition des bâtiments. Selon les études récentes, près de 30% des déchets solides produits dans les zones urbaines proviennent des activités de construction et de démolition. La valorisation de ces déchets sous forme de granulats recyclés, présente non seulement un avantage environnemental évident, en réduisant l'extraction de granulats naturels, mais aussi un potentiel économique intéressant pour les acteurs de la construction. [7]

Les recherches menées dans le cadre de programmes européens ont établi que l'incorporation de granulats de béton recyclés pouvait réduire jusqu'à 60% l'impact environnemental lié à la production du béton. [8]

Cependant les granulats recyclés (GR) doivent être réutilisés rapidement pour éviter leur stockage ou leur mise en décharge. Ils sont principalement employés en sous-couche routière, où leurs propriétés restent acceptables. Leur utilisation dans le béton est encadrée par la norme NF EN 206/CN, car ils présentent une porosité et une absorption d'eau élevées, qui sont dues à l'ancien mortier adhérent [9] [10] [11].

Parallèlement, les fibres naturelles comme le jute présentent un intérêt croissant comme matériau de renforcement. Les études ont montré que ces fibres offrent d'excellentes propriétés mécaniques tout étant biodégradables et économiques [12].

Ce mémoire de fin d'études se concentre sur l'étude du comportement de poutres en béton de granulats recyclés et renforcées par des fibres naturelles de jute. L'objectif principal est d'analyser la performance de ces poutres sous des charges de flexion, en évaluant leur résistance mécanique et leur capacité de déformation (ductilité). Pour ce faire, des essais expérimentaux de flexion seront réalisés en laboratoire. Ce travail est conduit dans le but de répondre à la question de savoir si la combinaison du traitement des granulats recyclés avec le renforcement des poutres, pouvait améliorer les performances mécaniques du béton produit, de sorte que ces granulats recyclés puissent être utilisés dans des bétons de structure. Il s'inscrit dans une démarche de développement durable, en valorisant des matériaux alternatifs respectueux de l'environnement pour le secteur du bâtiment et tout en étant en conformité avec le concept d'économie circulaire.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique qui succède à une introduction générale de la recherche. Il rassemble des informations essentielles sur les textiles, les matériaux composites et les techniques de renforcement des poutres. Il offre un aperçu des connaissances existantes dans ces domaines. Le deuxième chapitre concerne la procédure expérimentale qui y est détaillée. Il décrit en profondeur le processus de l'élaboration des échantillons d'essai, en mettant en avant les matériaux utilisés. De plus, il expose la méthodologie expérimentale, y compris la procédure d'essai de flexion. Le troisième et dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats obtenus et à leur interprétation. Une conclusion générale qui rappelle les apports obtenus, termine ce mémoire.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Les spécialistes du génie civil ont, depuis toujours, cherché à concilier les concepts de résistance et d'économie dans le calcul des structures. Toutefois, ils commencent à prendre conscience de l'importance de tenir compte de la santé de l'environnement qui a un impact direct sur la santé humaine.

C'est ainsi qu'ils se sont penchés sur la recherche d'alternatives écologiques à l'utilisation des procédés et matériaux conventionnels, tout en garantissant la durabilité et la pérennité des structures.

Les recherches ne cessent, en effet, de se multiplier dans ce sens en investiguant de nouvelles pratiques telles que l'utilisation des fibres naturelles ou encore le recyclage des granulats de béton. En plus de leur intérêt environnemental, les fibres naturelles sont peu couteuses, alors que l'obtention des granulats recyclés qui sont peu polluants, mobilise moins d'énergie par rapport à celle que nécessite l'élaboration des granulats naturels.

Néanmoins, les granulats recyclés présentent une insuffisance au vue de leur porosité qui dépasse celle des granulats naturels. Pour pallier ce problème, deux procédés sont possibles ; améliorer les performances de la structure en béton recyclé en la renforçant afin d'augmenter sa capacité portante ou bien atténuer la porosité de ces granulats en leur appliquant divers traitements.

Le présent travail, a pour but l'étude de poutres en béton, à base de granulats recyclés traités, renforcées avec un polymère associé à des fibres naturelles de jute.

I.2 Le béton

Aujourd'hui, le béton est le matériau industriel le plus utilisé à l'échelle mondiale. Il est coulé à l'état fluide, puis durcit progressivement, ce qui permet de réaliser une grande variété d'ouvrages techniques. Il se distingue par sa solidité, sa durabilité et sa longévité remarquables.

Ses propriétés dépendent largement de la composition choisie ; du type de granulats, de ciment, d'adjuvants, de la méthode de mise en œuvre ou encore du traitement de surface. Cette diversité de combinaisons permet d'obtenir des bétons aux caractéristiques très variées en termes de

résistance mécanique, isolation thermique ou acoustique, résistance au feu, durabilité, etc. Le béton offre aussi une grande liberté de formes, de couleurs et de textures. Selon les besoins, les bétons peuvent être fabriqués avec différents types de granulats soit d'origine alluvionnaire, issus de roches massives, ou encore recyclés et artificiels [13].

I.2.1 Constituants du béton

Le béton est un matériau constitué de granulats et d'une pâte réalisée à partir de ciment, d'eau et parfois d'adjuvants. Les granulats, qui forment la structure de base du béton, lui confèrent sa compacité, renforcent sa résistance mécanique et réduisent les changements de volume (retrait) lors du durcissement. La pâte de ciment est responsable des réactions chimiques qui se produisent lors de l'hydratation, permettant au béton de durcir pour former une masse solide. Tout au long de sa durée de vie, le béton subit des transformations physicochimiques et structurales, ce qui lui permet d'évoluer et de s'adapter aux conditions environnementales [14].

I.2.2 Fabrication du béton

La fabrication du béton est un processus rigoureux qui comprend plusieurs étapes. Les ingrédients sont d'abord dosés et mélangés dans un malaxeur pour obtenir une consistance homogène. Ensuite, le béton est transporté sur le chantier, où il est coulé dans des coffrages (moules) qui lui donnent sa forme finale pendant qu'il durcit.

Selon la complexité de la structure, différentes techniques de coulage peuvent être utilisées. Par exemple, le béton peut être pompé à travers des tuyaux pour atteindre des zones difficiles d'accès ou être précontraint pour augmenter sa résistance aux charges.

I.2.3 Propriétés du béton

Le béton est apprécié pour ses propriétés mécaniques et physiques, qui en font un matériau de choix pour la construction. Sa résistance à la compression est particulièrement élevée, ce qui lui permet de supporter des charges importantes sans se déformer. De plus, sa résistance à la flexion le rend adapté aux structures soumises à des forces latérales, comme les ponts ou les bâtiments.

D'autres propriétés, comme la porosité et la perméabilité, jouent également un rôle crucial dans les performances du béton. La porosité dépend du rapport eau/ciment et peut être ajustée selon les besoins. Une perméabilité maîtrisée permet d'éviter l'infiltration d'eau, qui pourrait endommager la structure à long terme.

Enfin, le béton offre des possibilités esthétiques variées, grâce à des finitions lisses, texturées ou colorées, ce qui en fait un matériau polyvalent.

I.2.4 Utilisations du béton

Le béton est largement utilisé dans la construction de bâtiments, de ponts, de routes, de barrages et de murs de soutènement. Sa robustesse et sa durabilité font de lui, un matériau idéal pour les structures soumises à des charges lourdes ou à des contraintes mécaniques importantes.

Cependant, le béton présente aussi des inconvénients. Son poids élevé rend sa manipulation difficile, ce qui peut augmenter les coûts de construction. De plus, sa production est énergivore et génère des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique.

I.2.5 Entretien et réparation du béton

Pour préserver la durabilité et la résistance du béton, un entretien régulier est essentiel. Cela inclut le nettoyage, l'imperméabilisation et la réparation des fissures. Ces mesures permettent de prévenir les dommages causés par l'eau, le gel ou le sel, qui peuvent fragiliser la structure.

En cas de dommages importants, des réparations plus approfondies peuvent être nécessaires, comme le rebouchage de zones endommagées ou le renforcement des armatures. Il est crucial d'intervenir rapidement pour éviter une détérioration accrue.

I.2.6 Nouvelles tendances dans l'utilisation du béton

Le béton évolue constamment, avec l'émergence de nouvelles techniques et matériaux. Par exemple, le béton de chanvre, composé de chanvre et de chaux, offre une excellente isolation thermique et acoustique, tout en étant écologique. Le béton translucide, quant à lui, intègre des particules de verre pour créer des effets de lumière, souvent utilisés dans les façades de bâtiments.

Les avancées technologiques ont également donné naissance à des bétons innovants, comme le béton autoplaçant, qui ne nécessite pas de vibration lors du coulage, ou le béton fibré, renforcé par des fibres pour améliorer sa résistance et sa durabilité.

I.3 Les granulats de béton recyclés

Les granulats de béton recyclés (GBR) diffèrent des granulats naturels car ils sont composés de deux matériaux de natures différentes : le gravillon naturel du béton de première génération et le mortier qui adhère à ces graviers, tel que représenté sur la figure I.1, Cette composition d'éléments cause la dégradation de leurs caractéristiques, à savoir l'augmentation de l'absorption d'eau, la diminution de la densité apparente et de la densité spécifique (densité des grains), la diminution de la résistance à l'abrasion (essai MD) et à la fragmentation (essai LA), etc. [15], [16].

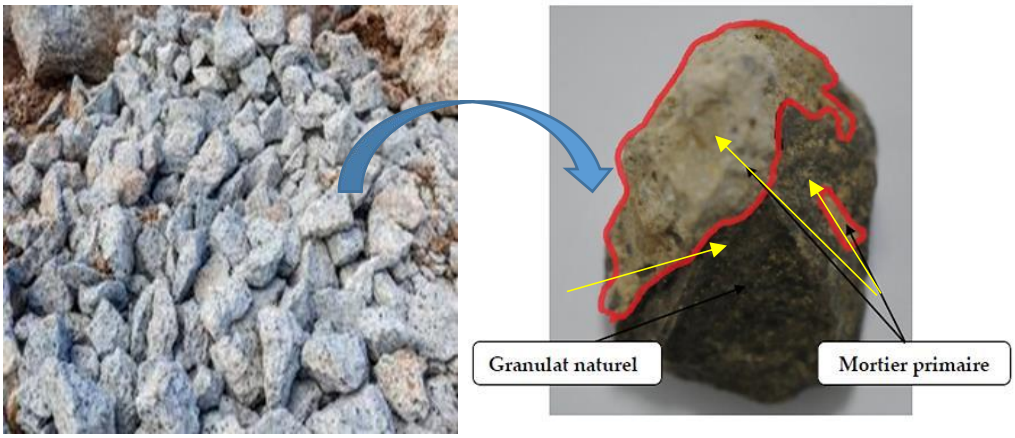

Figure I.1 : Granulats recyclés.

I.3.1 Source des granulats de béton recyclés

Les granulats de béton recyclés (GBR) proviennent principalement du traitement des déchets issus de la déconstruction d'ouvrages en béton (Figure I.2). Ces déchets, une fois concassés, triés et éventuellement lavés, donnent naissance à des granulats réutilisables dans la fabrication de nouveaux bétons [17].

Figure I.2: Déchets de démolition.

I.3.1.1 Chantiers de démolition

Les structures en béton démolies, comme les bâtiments, ponts ou dalles, représentent la principale source des GBR. Après un processus de concassage, les éléments en béton sont transformés en granulats de différentes tailles, tels que le sable 0/4 mm, ainsi que les gravillons 4/10 mm et 10/20 mm.

Les matériaux récupérés lors de la démolition de structures variées, tels que le béton, la brique et autres matériaux inertes, sont traités pour produire des granulats recyclés. Ces granulats peuvent contenir des proportions variables de béton provenant de la démolition ainsi que des matériaux minéraux non triés [18].

I.3.1.2 Déchets de production

Les résidus de béton frais non utilisés sur les chantiers ou dans les centrales à béton peuvent être récupérés, lavés et transformés en granulats recyclés. Ce processus permet de valoriser les excédents de production et de réduire les déchets.

I.3.1.3 Matériaux de construction divers

En plus du béton, d'autres matériaux inorganiques provenant de la construction, tels que les mortiers, les éléments de maçonnerie, les pierres naturelles, les matériaux bitumineux et les éléments en argile cuite, peuvent également être recyclés pour produire des granulats [19].

La qualité des granulats de béton recyclés (GBR) dépend largement des matériaux d'origine et des méthodes de traitement utilisées. Il est donc essentiel de les analyser soigneusement afin de garantir leur adéquation avec l'usage prévu, qu'il s'agisse de structures porteuses ou non porteuses.

I.3.2 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.

➢ Type 1

Les granulats de type 1 doivent satisfaire l'ensemble des exigences des normes de conformité réglementaire (CR). En d'autres termes, ces granulats respectent toutes les spécifications de qualité et de sécurité nécessaires pour être utilisés dans la production de béton. Ils sont donc conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545, ainsi qu'aux exigences du complément national de la norme NF EN 206/CN [20] [21] [22].

➢ Type 2

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

➢**Type 3**

Les granulats recyclés de Type 3 doivent respecter les normes CR. Cela signifie qu'ils répondent aux exigences des normes CR pour les propriétés physiques et mécaniques, mais peuvent ne pas être conformes aux normes Bou et CR C pour des caractéristiques spécifiques comme 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 exigences du complément national de la norme NF EN 206/CN [23].

I.3.3 Caractéristiques physiques des granulats recyclés

I.3.3.1 Masse volumique

La masse volumique des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels du fait de la présence de mortier qui adhère aux granulats originaux, mortier qui a une porosité plus importante [24] [25] [26]avance le chiffre d'une masse volumique de 7 à 9 % de moins. La masse volumique des gravillons recyclés varie de 2240 à 2420 kg/m3 pour la fraction 4/8 mm à 2330 à 2490 kg/m3 pour la fraction 16/32 mm [27] [28].

I.3.3.2 Absorption d'eau

Du fait de la présence de mortiers et donc d'une porosité plus importante l'absorption d'eau des granulats recyclés est aussi fonction d'autres paramètres :

- La teneur en pâte de ciment autour des granulats naturels du béton parent. Plus celle-ci est importante et plus l'adsorption sera forte [29] [30].
- La taille des granulats : plus la granulométrie est faible plus l'adsorption d'eau sera forte.
- La porosité intrinsèque des granulats en fonction de leur nature pétrographique, bien que pour des granulats recyclés, ce critère ne paraît pas prioritaire compte tenu de la quantité de pâte de ciment « initiale » adhérente aux granulats naturels.

I.3.4 Caractéristiques mécaniques des granulats de béton recyclés

- **Résistance à la fragmentation** (Essai Los Angeles)

L'essai Los Angeles permet de mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et frottements. Les GBR présentent généralement des coefficients Los Angeles plus élevés que les GN, indiquant une résistance moindre à la fragmentation. Selon la norme EN 1097-2, cet essai est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation des granulats [31] [32].

- **Résistance à l'usure** (Essai Micro-Deval)

L'essai Micro-Deval évalue la résistance des granulats à l'usure par frottement. Les GBR, en raison de leur porosité et de la présence de pâte de ciment, peuvent présenter une résistance à l'usure inférieure à celle des GN. Une étude indique que les granulats recyclés ont une porosité plus élevée, ce qui peut affecter leur résistance à l'usure [33] [34].

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression des bétons fabriqués avec des GBR est généralement inférieure à celle des bétons à base de GN. Cependant, avec une formulation appropriée et des traitements spécifiques, il est possible d'obtenir des résistances satisfaisantes pour certaines applications. Une étude expérimentale a montré que l'utilisation de GBR peut influencer la résistance à la compression du béton [35].

I.3.5 Avantages et inconvénients des granulats de béton recyclés

Les granulats de béton recyclés présentent de nombreux avantages, tant sur le plan environnemental qu'économique et sociétal.

- Préservation des ressources naturelles ; L'utilisation de GBR réduit la dépendance à l'extraction de granulats naturels, contribuant ainsi à la préservation des ressources minérales et à la protection des écosystèmes.

- Réduction des émissions de CO_2 ; Les centres de recyclage étant souvent situés à proximité des chantiers, les distances de transport sont réduites, entraînant une diminution des émissions de gaz à effet de serre.
- Valorisation des déchets de construction ; Le recyclage du béton permet de réutiliser les déchets issus de la démolition, réduisant ainsi la quantité de matériaux envoyés en décharge et prolongeant la durée de vie des sites d'enfouissement.
- Réduction des coûts de construction ; Les GBR, souvent disponibles localement, permettent de diminuer les coûts liés à l'achat et au transport des granulats naturels, offrant une alternative économique pour les projets de construction.
- Optimisation de l'espace de stockage ; En valorisant les déchets de construction, l'utilisation de GBR réduit la nécessité de créer de nouvelles décharges, entraînant ainsi des économies supplémentaires.
- Création d'emplois dans le secteur du recyclage ; Le développement de la filière de recyclage du béton génère des opportunités d'emploi dans les domaines du tri, du concassage et de la production de nouveaux matériaux.

L'utilisation de granulats de béton recyclés (GBR) présente des avantages environnementaux et économiques indéniables. Cependant, elle comporte également des inconvénients techniques et durables qu'il est essentiel de considérer pour garantir la performance et la longévité des structures en béton.

- Variabilité de la qualité des granulats recyclés ; Les GBR proviennent de sources diverses, ce qui entraîne une hétérogénéité en termes de composition et de propriétés mécaniques. Cette variabilité peut affecter la résistance, la durabilité et la performance globale du béton.
- Absorption d'eau élevée ; En raison de leur porosité accrue, les GBR ont une capacité d'absorption d'eau plus importante que les granulats naturels. Cela peut entraîner des modifications dans le rapport eau/ciment, affectant la maniabilité et la résistance du béton.
- Présence de contaminants ; Les granulats recyclés peuvent contenir des impuretés telles que des métaux, du bois, du plâtre ou des plastiques, susceptibles de compromettre la qualité du béton et de provoquer des réactions indésirables, comme des gonflements ou des fissurations.

- Augmentation de la perméabilité ; La structure plus poreuse des bétons recyclés les rend plus perméables que les bétons traditionnels, ce qui peut favoriser la pénétration de substances nocives et accélérer les processus de dégradation.
- Sensibilité accrue à la carbonatation ; Les bétons contenant des GBR se carbonatent plus rapidement que les bétons traditionnels, ce qui peut réduire la protection des armatures en acier contre la corrosion.
- Réactions alcali-granulat (RAG) ; Les GBR peuvent contenir des granulats réactifs susceptibles de provoquer des réactions chimiques avec les alcalis du ciment, entraînant des gonflements et des fissurations dans le béton.
- Disponibilité limitée et logistique complexe ; La production de GBR dépend de la disponibilité des déchets de construction et de démolition, qui peut varier selon les régions. De plus, l'absence d'infrastructures de recyclage adéquates peut limiter leur utilisation à grande échelle.

I.3.6 Application des granulats recyclés

Les granulats recyclés peuvent être utilisés dans diverses applications [36] :

- Dans la réalisation d'ouvrages tels que les trottoirs, les caniveaux ou les bordures.
- Les morceaux de béton concassés de grande taille sont efficaces pour la stabilisation des sols et la prévention de l'érosion.
- Les gravettes issues du béton recyclé peuvent aussi être intégrées comme granulats grossiers dans la fabrication de nouveaux bétons.
- Le béton recyclé produit également divers sous-produits qui trouvent des applications variées, notamment comme matériau d'amélioration des sols ou encore agent de remplissage dans les enrobés bitumineux.

En somme, les GBR représentent une alternative écologique en construction. En valorisant les déchets issus de la démolition, ils contribuent à la réduction de l'impact environnemental. Malgré certaines contraintes techniques, les avancées dans les méthodes de traitement permettent aujourd'hui une utilisation de plus en plus fiable et performante.

I.4 Traitement des granulats recyclés

Afin d'améliorer la performance des granulats recyclés et retirer le mortier résiduel, plusieurs types de traitements peuvent être appliqués :

- **Traitements mécaniques :** Ils consistent à détacher le mortier en usant les granulats par des procédés tels que l'abrasion (essai Micro-Deval), la fragmentation (essai Los Angeles), le sablage, le jet d'eau à haute pression, ou encore le concassage sélectif. Ces méthodes permettent de diminuer la quantité de mortier résiduel sans altérer excessivement les granulats.
- **Traitements thermiques :** Ils reposent sur le chauffage des granulats afin de provoquer des différences de dilatation entre le mortier et les granulats, ce qui facilite leur séparation. Le chauffage peut être réalisé à chaud ou à froid, selon les contraintes techniques et énergétiques du procédé.
- **Traitements chimiques :** Ce type de traitement utilise des acides pour dissoudre partiellement le mortier. Les acides couramment employés sont l'acide chlorhydrique, l'acide salicylique et l'acide sulfurique. Bien que très efficaces, ces procédés nécessitent une gestion rigoureuse pour éviter les effets secondaires environnementaux et techniques.
- **Traitements physiques :** Des méthodes non destructives comme l'exposition aux micro-ondes, les ultrasons ou les impulsions électriques permettent également de fragiliser le lien entre le mortier et le granulat naturel. Ces technologies innovantes cherchent à optimiser l'efficacité sans recours massif à l'eau ou aux produits chimiques.

I.5 Renforcement des poutres en béton

Le renforcement des poutres en béton est une pratique essentielle pour améliorer leur capacité portante, prolonger leur durée de vie et corriger d'éventuelles défaillances structurelles. Face aux sollicitations importantes qu'elles subissent, notamment en flexion, différentes méthodes ont été développées pour optimiser leur performance. Ces techniques varient en fonction des besoins

spécifiques de chaque structure, du type de dégradation observée et des matériaux utilisés pour le renforcement.

I.5.1 Méthodes de renforcement

Il existe diverses méthodes de renforcement de renforcement des poutres en béton, parmi lesquelles, le renforcement par plaques d'acier (Figure I.3), qui est une solution éprouvée qui s'applique par boulonnage ou collage de plaques métalliques. Particulièrement adaptée aux renforcements lourds, cette méthode augmente considérablement la rigidité et la capacité portante des poutres. Les plaques sont généralement positionnées en face inférieure pour résister aux moments de flexion ou sur les côtés pour améliorer la résistance au cisaillement. Bien que fiable, cette technique nécessite des protections contre la corrosion pour assurer sa durabilité.

Figure I.3: Renforcement des poutres avec des plaques d'acier.

La technique du béton projeté est une autre technique de renforcement qui consiste à appliquer une couche supplémentaire de béton, souvent fibré, sur la poutre existante. Cette méthode est particulièrement indiquée pour la réhabilitation de poutres fortement endommagées ou lorsqu'une augmentation importante de section est requise.

Les poutres peuvent également être renforcées avec une précontrainte additionnelle (Figure I.4), qui est une technique sophistiquée qui implique l'installation de câbles ou barres de précontrainte externes, mis en tension et ancrés aux extrémités de la poutre. Cette approche est particulièrement efficace pour réduire la fissuration existante, corriger les flèches excessives et augmenter la capacité portante sans ajouter de poids significatif à la structure.

Figure I.4: Renforcement d'une poutre par contrainte additionnelle.

L'augmentation de section en béton armé est un procédé qui est également utilisé pour le renforcement des poutres en béton. C'est la méthode la plus radicale, consistant à couler une nouvelle enveloppe de béton armé autour de la poutre existante. Cette solution, bien qu'augmentant l'encombrement de l'élément, offre une durabilité exceptionnelle et permet des gains de résistance très importants. Elle est particulièrement adaptée aux réhabilitations complètes de poutres ou aux adaptations structurales majeures, nécessitant souvent la mise en place d'étaiements temporaires pendant les travaux.

Actuellement, c'est le renforcement des poutres en béton avec des matériaux composites de type Polymère Renforcé de Fibres (PRF), qui connait un grand essor. Ces matériaux innovants confèrent aux structures renforcées des performances accrues.

I.5.2 Renforcement des poutres en béton avec des PRF

Le renforcement par matériaux composites (PRF), est une méthode moderne qui consiste à coller des feuilles ou bandes en fibres de carbone, verre ou aramide sur les zones tendues des poutres. Les composites en fibres de carbone (CFRP) sont particulièrement prisés pour leur excellente résistance mécanique et leur légèreté, tandis que les fibres de verre (GFRP) offrent une alternative plus économique. Cette technique (Figure I.5) non intrusive préserve l'esthétique de la structure tout en améliorant significativement sa capacité portante, notamment en flexion et en cisaillement.

Figure I.5 : Renforcement des poutres avec FRP.

I.6 Rappel sur les matériaux composites

I.6.1 Définition et composition

Les matériaux composites (Figure I.6) sont des matériaux hybrides constitués de deux phases principales :

- Une phase de renfort constituée de fibres (verre, carbone, aramide ou basalte...), qui apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées. [37]
- Une matrice polymère (le plus souvent une résine époxy, polyester ou vinylester) assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des charges entre les fibres.

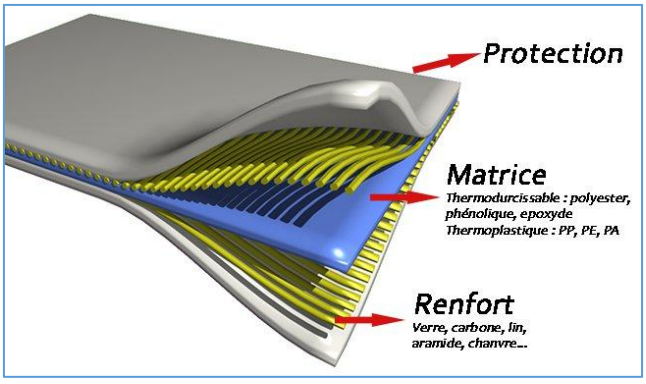

Figure I.6: Matériau composite.

Les constituants du composite doivent être compatibles. Le matériau résultant possède des caractéristiques meilleures que celles des composants pris séparément.

I.6.2 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites se distinguent principalement par leur structure interne et leur mode d'assemblage. Ces caractéristiques déterminent leurs propriétés mécaniques et leurs domaines d'application privilégiés.

- **Composites à fibres courtes :** présentent une structure où les fibres sont réparties de manière aléatoire dans une matrice isotrope (Figure I.7). Cette disposition confère au matériau un comportement mécanique identique dans toutes les directions, ce qu'on appelle l'isotropie. Ces composites sont particulièrement adaptés pour des pièces aux formes complexes fabriquées par moulage.

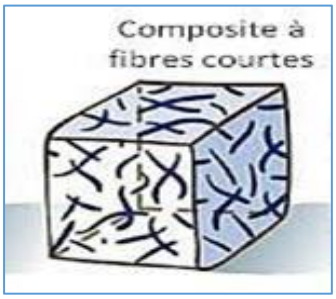

Figure I.7: Composites à fibres courtes.

- **Composites à fibres longues :** se caractérisent par une orientation organisée des fibres dans la matrice (Figure I.8). Contrairement aux composites à fibres courtes, ils montrent un comportement anisotrope, c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques varient selon la direction considérée. Cette particularité permet d'optimiser la résistance dans des directions spécifiques, ce qui en fait des matériaux de choix pour des applications structurales exigeantes.

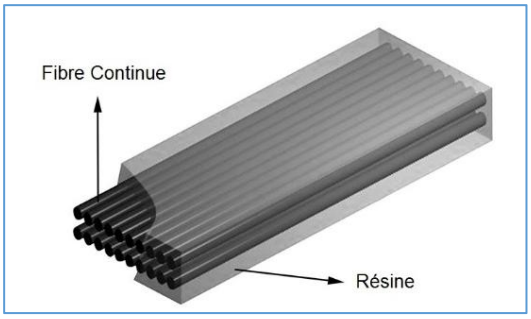

Figure I.8: Composite à fibres longues.

- **Structures stratifiées** : résultent de l'assemblage de plusieurs couches de composites dont les fibres sont orientées différemment (Figure I.9). Chaque couche, constituée de fibres imprégnées de résine, est disposée selon un angle précis pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées dans différentes directions. Cette technique permet de créer des matériaux sur mesure pour des applications aéronautiques ou spatiales.

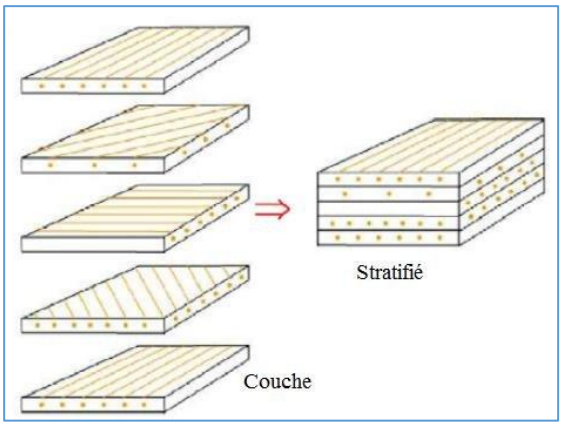

Figure I.9: Structure stratifiée.

- **Structures sandwich** : combinent plusieurs matériaux en trois couches : deux peaux extérieures rigides encadrant une âme légère (Figure I.10). Bien que présentant généralement un comportement isotrope dans leur plan, ces structures excellent particulièrement en flexion. Leur légèreté et leur rigidité en font des solutions idéales pour les panneaux de plancher ou les éléments de carrosserie nécessitant à la fois résistance et faible poids.

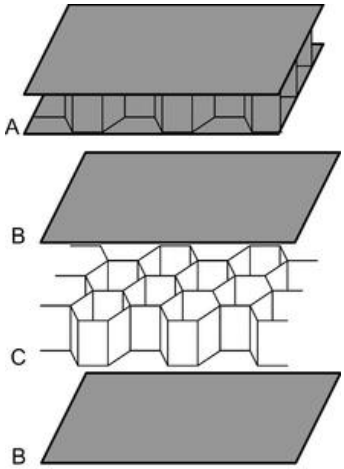

Figure I.10: Structure sandwich.

I.6.3 Types de Matériaux Composites

I.6.3.1 Composites Polymères Renforcés de Fibres (PRF)

Les PRF associent une résine polymère (époxy, polyester ou vinylester) à différents types de fibres synthétiques. Ils constituent la solution la plus utilisée pour le renforcement des structures. Leur principal avantage réside dans leur rapport résistance/poids exceptionnel. Les CFRP (fibres de carbone) offrent des performances mécaniques remarquables pour le renforcement des ponts et bâtiments. Les GFRP (fibres de verre), plus économiques, excellent en milieu corrosif. Quant aux AFRP (fibres d'aramide), leur ductilité les rend idéaux pour les zones sismiques.

I.6.3.2 Composites à Fibres naturelles

Cette famille innovante intègre des fibres végétales comme le jute, le lin ou le chanvre. Les composites à base de fibres de jute présentent un intérêt particulier en génie civil. Bien que moins résistants que ceux à base de fibres synthétiques, ils offrent une alternative écologique et économique pour certaines applications. Leur bonne résistance mécanique associée à leur faible coût en font des candidats intéressants pour des éléments non porteurs. On les utilise notamment dans les panneaux d'isolation acoustique, les cloisons intérieures et certains revêtements. Leur bilan environnemental avantageux ouvre des perspectives prometteuses pour une construction plus durable.

I.6.3.3 Composites Textiles Béton

Ces matériaux révolutionnaires combinent des armatures textiles en fibres minérales ou synthétiques avec une matrice cimentaire ultrafine. Leur particularité réside dans leur finesse et leur légèreté. Permettant de réaliser des éléments structurels de seulement 2 à 3 cm d'épaisseur, ils offrent des possibilités architecturales inédites. Leurs applications principales concernent les façades innovantes et les éléments préfabriqués complexes. Leur mise en œuvre plus aisée que le béton armé traditionnel réduit considérablement les coûts logistiques sur chantier.

I.6.3.4 Composites Bois-Polymère

Les composites bois-polymère représentent une solution hybride particulièrement adaptée aux aménagements extérieurs. On les retrouve principalement dans les terrasses, les revêtements de façade et les mobiliers urbains. Leur principal atout réside dans leur résistance exceptionnelle aux intempéries. Contrairement au bois massif, ces matériaux ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne subissent pas les déformations dues aux variations hygrométriques. Leur durée de vie prolongée et leur stabilité dimensionnelle en font des alternatives de plus en plus prisées par les architectes et urbanistes.

I.6.3.5 Composites Géopolymères

Les composites géopolymères constituent une innovation majeure pour l'avenir du génie civil. Basés sur une matrice minérale alternative au ciment Portland traditionnel, ils présentent une durabilité exceptionnelle. Leur résistance aux environnements agressifs (sels de déneigement, eaux marines) dépasse largement celle des matériaux conventionnels. Actuellement en plein développement, ces composites pourraient révolutionner les techniques de réparation des infrastructures. Leur formulation permet d'adapter précisément leurs propriétés mécaniques aux besoins spécifiques de chaque projet, tout en réduisant l'empreinte environnementale des travaux de réhabilitation.

I.6.4 Types de fibres

Différents types de fibres sont utilisées dans les matériaux composites, comme les fibres de carbone et de verre qui sont les plus utilisées, ou les fibres d'aramide et d'autres fibres comme les fibres naturelles de lin, sisal, coco, jute, etc.

- **Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone (Figure I.11) sont des matériaux composites ultralégers (1,5-1,8 g/cm³) et extrêmement performants, constitués d'atomes de carbone organisés en structure cristalline, offrant un module d'élasticité exceptionnel variant de 200 à 800 GPa [38] et une résistance à la traction pouvant atteindre 7 000 MPa [39]. Classées en quatre catégories qui sont les fibres à haute résistance (HR), à haut module (HM), à très haut module (THM) et intermédiaires, selon leur microstructure et leur teneur en carbone [40]. Elles présentent une résistance remarquable à la fatigue et à la corrosion, ce qui en fait des solutions idéales pour le renforcement des structures (notamment par collage de lamelles CFRP), la réparation des ouvrages endommagés et la fabrication d'éléments préfabriqués légers en génie civil, combinant ainsi performance mécanique supérieure et durabilité accrue.

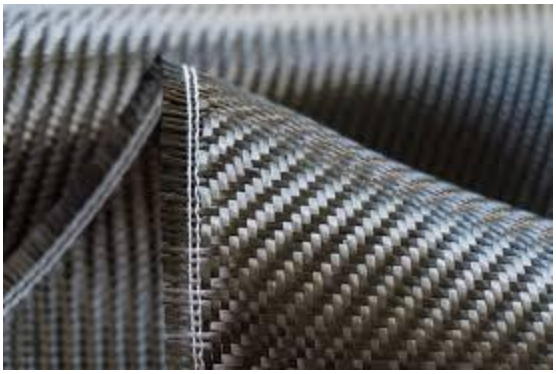

Figure I.11: Fibres de carbone.

- **Fibres de verre**

Les fibres de verre (Figure I.14) sont des renforts minéraux obtenus à partir de silice fondue, offrant des propriétés mécaniques intéressantes pour le génie civil. Leur module d'élasticité se situe entre 70 et 85 GPa, avec un allongement à la rupture variant de 2% à 5% [41]. Ces fibres présentent une excellente résistance à la corrosion et une transparence électromagnétique

remarquable, ce qui les rend particulièrement adaptées aux environnements marins et aux zones sensibles aux interférences [42] . Leur mise en œuvre est facilitée par leur souplesse et leur capacité à épouser des formes complexes. Les principales applications en génie civil incluent les armatures résistantes à la corrosion, les éléments architecturaux légers et les conduites hydrauliques, selon les spécifications des normes EN 14649 [43] et ASTM D7205 [44] . Leur sensibilité aux milieux fortement alcalins (pH > 13) constitue cependant une limitation pour certaines applications structurelles [45].

Figure I.12: Fibres de verre.

- **Les fibres de jute**

Les fibres de jute (Figure I.15), issues de la plante tropicale du même nom, représentent une solution écologique prometteuse pour le développement de matériaux composites innovants. Ces fibres naturelles sont principalement utilisées comme renfort dans des matrices cimentaires, où elles peuvent remplacer partiellement les granulats minéraux (à des taux variant entre 0,5% et 2%). Leurs propriétés mécaniques intéressantes, combinant légèreté et résistance modérée, les rendent particulièrement adaptées au renforcement de mortiers et de bétons de granulats recyclés.

Dans le domaine de la construction, les composites à base de jute trouvent des applications variées, notamment pour la réhabilitation des bâtiments et la fabrication d'éléments isolants. Leur faible densité et leurs bonnes performances thermiques en font des candidates idéales pour des applications nécessitant à la fois isolation et légèreté.

Ces composites biosourcés offrent ainsi une solution technique et écologique pour certaines applications du génie civil, bien que leurs performances mécaniques restent inférieures à celles des fibres synthétiques. Leur développement s'inscrit dans une démarche de construction plus durable, combinant l'utilisation de matériaux naturels et recyclés.

Figure I.13 : Fibres de jute.

I.7 Brève revue des travaux existants

Les travaux de Poon et *al*., révèlent que ce mortier agit comme une éponge, augmentant la porosité de 25-40% [46] , tandis que l'étude microstructurale de Xiao montre des zones de transition interfaciales (ITZ) fragiles, expliquant les 15-30% de perte de résistance [47].

Face à ces limitations, les polymères renforcés de fibres (PRF) jouent les sauveurs. L'expérience menée par l'équipe de Dilbas est éloquente : des poutres avec 100% de GBR, renforcées par CFRP, ont surpassé de 10% leurs homologues en béton traditionnel, Le secret ? Une combinaison à trois niveaux :

- Les fibres de carbone (module de 230 GPa) redonnent de la "rigueur" à la structure
- La résine époxy comble les micro-défauts du béton recyclé
- L'orientation des fibres permet un renforcement "sur mesure" [48].

Curieusement, 85% des études (meta-analyse) de Omary, testent les poutres en conditions idéales [49]. Or, le monitoring du pont de Barcelone (étude de cas) révèle que :

- Les cycles gel-dégel amplifient de 40% la dégradation des ITZ
- L'humidité chronique réduit l'adhésion PRF-béton de 35%
- Les sels de déverglaçage créent des microfissures invisibles [50].

Les laboratoires pionniers explorent désormais :

- Des bio-résines à base de lignine pour matrices (MIT) [51]
- Des GBR "sur mesure" par traitement laser (ETH Zurich) [52]
- L'intelligence artificielle pour prédire les défaillances (EPFL). [53]

L'étude de Ali Ahmed a proposé une technique innovante de réhabilitation des colonnes en béton endommagées par confinement partiel à l'aide de bandes hélicoïdales continues en GFRP. Les essais expérimentaux et les simulations numériques ont montré une amélioration significative de la résistance à la compression et de la ductilité des cylindres confinés [54].

Le travail de Merzouki et Tehari explore le renforcement de poutres en béton armé à l'aide de bandes hélicoïdales en fibres de jute et de PRFJ, en faisant varier la largeur des bandes, le nombre de tours et le nombre de plis. Les résultats expérimentaux montrent une amélioration significative de la résistance et de la déformabilité des poutres renforcées, avec des gains allant jusqu'à 43,09 % en résistance et 40,17 % en déplacement [55].

L'étude de Yahi et Saidani porte sur le renforcement de poutres en béton à base de granulats recyclés à l'aide de bandes hélicoïdales en fibres de jute (PRFJ). Les résultats expérimentaux ont démontré que ce type de renforcement améliore nettement les performances mécaniques des poutres, avec des gains allant jusqu'à 27,26 % en résistance et 75,84 % en déformabilité par rapport au béton recyclé non renforcé [23].

I.8 Conclusion

L'utilisation de granulats recyclés et de fibres naturelles comme le jute offre une solution plus écologique pour le béton. Bien que les granulats recyclés soient parfois moins performants que

les granulats naturels, des traitements adaptés permettent d'en améliorer la qualité, les rendant plus compatibles avec les exigences du béton. De son côté, le jute représente une alternative durable et économique aux fibres synthétiques.

En combinant le traitement des granulats recyclés avec l'ajout de fibres naturelles, on peut produire un béton plus respectueux de l'environnement, tout en conservant de bonnes performances mécaniques. Cette approche contribue à réduire les déchets de construction, à économiser les ressources naturelles et à encourager une pratique plus durable dans le domaine du génie civil.

Chapitre II : Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer l'influence des granulats recyclés traités et du renforcement à base de fibres de jute sur le comportement mécanique de poutrelles en béton. Un programme expérimental basé sur la confection de plusieurs éprouvettes a été mis en place. Les variables étudiées sont la nature du matériau de traitement ainsi que le type de renfort (interne/externe). Après 28 jours de durcissement, les éprouvettes ont été soumises à des essais de flexion à trois points. Cette approche permettra non seulement d'analyser la résistance mécanique des différents spécimens, mais aussi d'évaluer l'efficacité du traitement appliqué aux granulats recyclés ainsi que l'apport du renforcement en jute dans l'amélioration des performances des bétons recyclés.

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Le béton

Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de ciment, d'eau, de sable, de gravier et d'adjuvants si nécessaires.

- **Ciment**

Le ciment utilisé (Fig. II .1), est un type de ciment Portland, de classe CEM II 42,5 N ES (Fig. 2.1), conforme à la norme NF EN 197-1 [56].

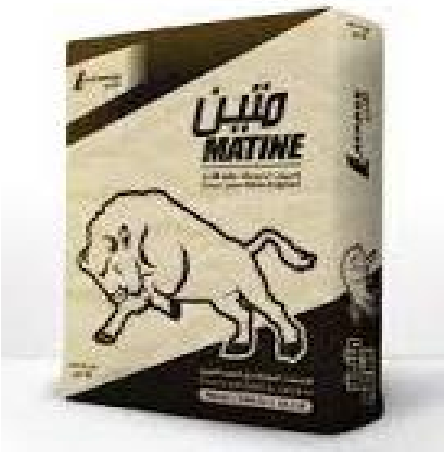

Figure II.1: Ciment utilisé.

Le ciment est un liant hydraulique couramment utilisé dans le domaine de la construction, notamment pour la fabrication des mortiers et la réalisation de bétons armés. Il est apprécié pour ses propriétés remarquables, qui en font un matériau indispensable, à savoir :

- Haute résistance :
  - Classe réelle supérieure à 45 MPa.
  - Résistance à la compression de 20 MPa après seulement 2 jours, permettant un décoffrage rapide.
- Bonne maniabilité :
  - Faible demande en eau.
  - Compatible avec tous types d'adjuvants.
- Faible chaleur d'hydratation.

Tableau 1: Caractéristiques du ciment utilisé.

Analyse chimique ciment :

Analyse Chimique %	MIN	MAX	Norme NA 442
SiO_2	16,00	21,00	-
AL_2O_3	4,50	5,20	-
Fe_2O_3	2,70	3,50	-
CaO	58,00	64,00	-
MgO	0,80	1,20	-
K_2O	0,20	0,45	-
Na_2O	0,25	0,50	-
SO_3	1,20	3,50	-
PF	5,00	10,00	-
Chlorures	0,02	0,10	≤ 0,1
RI	2,00	6,00	-
CaO libre	0,20	1,50	-

Caractéristiques physico-mécaniques :

Essais physico-mécanique	MIN	MAX	Norme NA 442
SS Blaine Cm^2/g	2960	4200	-
Consistance %	25,5	26,8	-
Début de prise (mn)	80	160	≥ 60 mn
Résistance à la compression 02 jours (N/mm^2)	10	19,5	≥10.0
Résistance à la compression 28 jours (N/mm^2)	42,5	52,5	≥ 42.5
Expansion à chaud sur pâle (mm)	0	10	≤ 10 mm

Les constituants de Ciment en % •	
CLINKER	80 - 95
CALCAIRE	06 - 20
POUZZOLANE	00 - 05
GYPSE	00 - 05

• Ces valeurs font référence au noyau du ciment à l'exclusion du sulfate de calcium (gypse) et de tout autre additifs.

- **Granulats**

  Cette étude a employé deux types de granulats calibrés(Fig. II.2) : des granulats recyclés (3/8 et 8/15 mm) issus du concassage d'éprouvettes de béton en laboratoire, et des granulats naturels (3/8 et 8/15 mm) provenant de carrière. Les granulats recyclés ont subi un traitement pour optimiser leurs performances, tandis que les granulats naturels ont servi pour la confection du béton de référence.

Figure II.2: Granulats utilisés.

L'incorporation des granulats dans le béton, présente plusieurs avantages tels que :

- Les granulats contribuent fortement à la résistance du béton, notamment à la compression.
- Ils limitent la déformation et le retrait du béton lors du durcissement.
- En occupant un grand volume, ils réduisent la quantité de ciment nécessaire, ce qui rend le béton plus économique.
- Des granulats bien choisis rendent le béton plus résistant aux agressions chimiques, au gel/dégel et à l'usure.

- En utilisant une granulométrie bien adaptée, les granulats permettent d'obtenir un béton dense et bien compacté, avec peu de vides.
- En fonction de leur forme et de leur taille, les granulats influencent la maniabilité et la facilité de mise en œuvre du béton.

- **Sable**

Il s'agit d'un matériau granulaire naturel composé de fines particules minérales, principalement issues de roches siliceuses ou calcaires. Celui utilisé dans cette étude(Fig. II.3) est de classe 0/3, cette désignation fait référence à sa granulométrie, indiquant que la taille des grains varie entre 0 et 3 mm.

Figure II.3: Sable utilisé.

Le sable a été lavé puis séché dans une étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C, afin d'en éliminer les impuretés ainsi que les fines particules argileuses**.** Son incorporation dans le béton, présente plusieurs avantages qui sont :

- Il comble les espaces entre les granulats grossiers (gravillons), ce qui améliore la compacité du béton.
- Il rend le béton plus facile à malaxer, couler et mettre en place, en assurant une bonne cohésion du mélange.
- Il permet une distribution uniforme des constituants dans le béton, ce qui améliore sa résistance et sa durabilité.

- Il augmente la surface de contact entre le ciment et les granulats, favorisant une meilleure adhérence et une meilleure résistance mécanique.
- Grâce à sa granulométrie fine et régulière, il contribue à la stabilité et à la consistance du béton frais.
- Il réduit la quantité de ciment nécessaire, ce qui rend le béton plus économique sans compromettre ses performances.

- **Eau**

L'eau utilisée pour la préparation du béton est l'eau potable du robinet**,** conformément aux normes de qualité. Ce type d'eau est couramment utilisé dans les travaux de laboratoire. Elle joue un rôle important et présente plusieurs avantages. En effet,

- Elle déclenche la réaction chimique d'hydratation avec le ciment, indispensable au durcissement et à la prise du béton.
- Elle rend le béton malléable et facile à mettre en œuvre, facilitant le malaxage, le transport, le coulage et le compactage.
- Une quantité d'eau bien dosée permet d'obtenir un mélange uniforme, sans ségrégation ni défauts.
- Une hydratation complète et progressive assure le développement optimal de la résistance à la compression et d'autres propriétés mécaniques.
- Dans certains cas, l'eau contribue à réguler la température du mélange lors du malaxage, surtout par temps chaud.

II.2.2 Matériau composite

Le matériau composite utilisé dans cette étude, est un matériau biosourcé associant des bandes d'un tissu bidirectionnel de fibres de jute (renfort naturel) à une résine époxy (matrice). Les bandes sont enroulées, selon une trajectoire hélicoïdale, autour d'un squelette d'armatures, créant ainsi un système de renforcement innovant.

II.2.2.1 Les fibres de jute

Ce sont des fibres végétales naturelles (Fig. II.4), offrant une bonne résistance mécanique et une ductilité intéressante, idéales pour le renforcement des matériaux cimentaires.

Figure II.4: Tissu fibre de jute utilisé.

Dans cette étude, les bandes de jute sont utilisées comme renfort interne, appliqué sur une structure métallique servant de support pour leur mise en œuvre. Ces bandes de jute, positionnées avant coulage du béton, agissent comme un renfort complémentaire pour améliorer la résistance en flexion des poutres en béton. Le but est d'évaluer leur aptitude à améliorer les performances mécaniques du béton recyclé tout en offrant une alternative écologique aux renforts synthétiques.

Tableau 2: Caractéristiques des fibres de jute *[57]*

Caractéristique	**Valeur**
Densité (g/cm3)	1.3
Allongement a la rupture (%)	1.5-1.8
Résistance à la traction (MPa)	393-773
Module de Young (GPa)	26.5

II.2.2.2 Résine

Le polymère utilisé dans cette expérience est une résine époxy de type Medapoxy STR, fournie par la société GRANITEX (Fig. II.5). Il s'agit d'une résine spécialement conçue pour la stratification sur différents supports, offrant plusieurs avantages notables qui sont :

- Une excellente résistance aux produits chimiques,
- Une très bonne adhérence sur des supports en béton et en acier,
- Une bonne mouillabilité des surfaces ainsi que des fibres utilisées.

Le Medapoxy STR est un système bi-composant, composé de :

- Composant A : la résine organique.
- Composant B : le durcisseur.

Figure II.5 : Résine medapoxy str utilisée et son durcisseur.

Ces deux composants sont mélangés selon un rapport de 2/3 de résine pour 1/3 de durcisseur, conformément aux recommandations du fabricant.

Le mélange est réalisé à l'aide d'un agitateur électrique jusqu'à obtention d'un produit homogène et sans bulles d'air. Il est préparé en petites quantités afin d'éviter tout gaspillage, la résine ayant une prise rapide après le mélange.

Tableau 3: Caractéristiques de la résine Medapoxy str.

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

II.2.3 Pouzzolane

La pouzzolane (Fig. II.6) est un matériau naturel d'origine volcanique, riche en silice et en alumine, possédant des propriétés pouzzolaniques (capacité à réagir avec la chaux en présence d'eau pour former des hydrates). Elle améliore la durabilité et les propriétés mécaniques à long terme. Son incorporation réduit la perméabilité du béton et augmente sa résistance aux attaques sulfuriques et à la corrosion des armatures. Particulièrement adaptée pour les bétons durables et les constructions en milieu agressif, elle permet également de réduire l'empreinte environnementale des bétons en diminuant la quantité de ciment nécessaire.

Figure II.6: Pouzzolane utilisée.

II.2.4 Fumée de silice

La fumée de silice (Fig. II.7) est un ajout minéral ultrafin issu de la production de silicium, composé principalement de silice amorphe. Utilisée comme adjuvant dans les bétons, elle améliore significativement les propriétés mécaniques et la durabilité, grâce à son effet pouzzolanique et son pouvoir de remplissage des vides. Son incorporation permet d'augmenter la résistance, de réduire la perméabilité et d'améliorer la cohésion du béton, tout en renforçant sa résistance aux agents chimiques agressifs.

Figure II.7: Fumée de silice.

II.2.5 Superplastifiant

Les superplastifiants sont des adjuvants haute performance pour béton, généralement à base de polycarboxylates ou de naphtalènes sulfonés, qui permettent de réduire significativement la quantité d'eau de gâchage (jusqu'à 30%) tout en améliorant la maniabilité du béton frais. Ces

produits agissent en dispersant les particules de ciment grâce à leur action électrostatique, ce qui fluidifie le mélange sans compromettre sa résistance finale. Ils permettent, principalement, d'augmenter les résistances mécaniques (par réduction du rapport E/C), d'améliorer la compacité et de la durabilité du béton, et de faciliter sa mise en œuvre.

Figure II.8: Superplastifiant utilisé.

II.3 Traitement des granulats recyclés

Les granulats recyclés de classes 3/8 et 8/15 utilisés dans le cadre de cette étude, ont fait l'objet d'un traitement par immersion dans différents coulis cimentaires. L'objectif du traitement est de réduire la porosité des granulats recyclés afin de compenser leurs faiblesses mécaniques et d'améliorer l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire.

II.3.1 Préparation des Coulis

Trois types de coulis ont été préparés. Chaque coulis a été obtenu en mélangeant les matériaux cimentaires avec de l'eau. Une quantité de superplastifiant a été ajoutée dans tous les mélanges pour en assurer une bonne homogénéité et de meilleures performances.

L'un des coulis préparés est à base de ciment, l'autre à base du mélange ciment et pouzzolane tandis que le 3ème est à base du mélange ciment et fumée de silice. Les compositions des coulis préparés sont données dans le tableau II.4.

Tableau 4: Composition et quantités des coulis pour le traitement des granulats recyclés.

Type de traitement	Diamètre des granulats recyclés (mm)	Matériaux				
		Ciment (g)	Fumée de silice (g)	Pouzzolane (g)	Eau (g)	Super plastifiant (g)
Traitement ciment +SP	3/8	400			390	4
	8/15	1000			975	10
Traitement ciment +fumée de silice+SP	3/8	320	80		390	4
	8/15	1000	200		975	10
Traitement ciment +pouzzolane+SP	3/8	320		80	390	4
	8/15	1000		200	975	10

II.3.2 Application du traitement sur les granulats

Les granulats recyclés ont subi un protocole rigoureux avant leur utilisation dans les différents mélanges de béton. Ils ont d'abord été lavés pour éliminer toutes impuretés, puis séchés à l'étuve à 105°C pendant 24h afin d'éliminer toute l'eau qu'ils contiennent.

Les quantités de granulats nécessaires ont été pesées puis immergées chacune dans l'un des trois coulis (Fig. II.9) préalablement préparés, pendant 24h. Le but étant d'assurer une pénétration optimale de ces coulis dans les pores de la pâte cimentaire durcie entourant les grains.

Figure II.9 : Immersion des granulats dans les coulis.

Les granulats ont été, par la suite, retirés des coulis pour qu'ils subissent, à nouveau, un séchage dans les mêmes conditions que précédemment afin d'éliminer l'eau qu'ils contiennent, ce qui stabilise davantage la couche de traitement.

Figure II.10 : Les granulats traités séchés.

II.4 Démarche expérimentale

Les spécimens en béton confectionnés sont des poutrelles prismatiques. Ils ont été réalisés à partir de 06 gâchées différentes.

II.4.1 Corps d'étude

Cette étude évalue l'influence du traitement des granulats recyclés et du renforcement sur le comportement mécanique du béton recyclé en comparaison avec le béton de granulats conventionnels. Le programme expérimental comprend dix-huit éprouvettes. Pour chacune des 3 variantes étudiées, 3 répétitions sont considérées. Les éprouvettes sont réparties en deux groupes ;

le 1er groupe comporte 06 éprouvettes témoins, 03 d'entre elles sont non renforcées et confectionnées avec du béton de granulats naturels (témoin positif), tant dis que les 03 autres sont renforcées avec des bandes hélicoïdales de PRFJ et sont à base de granulats recyclés non traités (témoin négatif). Le 2ème groupe, compte douze éprouvettes renforcées et confectionnées avec du béton à base de granulats recyclés traités. La fabrication des poutres suit un processus précis, comprenant la préparation du ferraillage, la mise en place du renfort et le coulage du béton.

II.4.2 Préparation du ferraillage

L'armature utilisée pour toutes les éprouvettes renforcées est identique à celle des témoins, elle est constituée de 4 barres (Ø4 mm) (Fig. II.11) qui sert de support au PRFJ, ceci permet d'isoler l'effet du composite. Les barres longitudinales sont maintenues par deux cadres du même diamètre disposés aux extrémités.

Figure II.11: Structure en acier utilisée.

II.4.3 Mise en place du renfort

L'étude porte sur le renforcement interne des poutres en béton par incorporation de tissus de jute, visant spécifiquement l'amélioration de la résistance en flexion. Le procédé consiste à découper le tissu en bandes de 4 cm de en 3 plis, puis à les enrouler en spirale autour du ferraillage principal. Les bandes sont fixées, aux points de concours avec l'armature métallique, à l'aide de résine

Medapoxy STR, tout en étant consolidées aux extrémités par un repli des fibres pour prévenir tout risque d'arrachement (Fig. II.12). Dans le cas des PRF, les bandes sont préalablement imprégnées de résine époxy avant superposition et enroulement. Après fabrication, les renforts subissent une période de séchage de dix jours dans des conditions de laboratoire pour assurer la polymérisation complète de la résine. Ces éléments sont ensuite intégrés directement dans la masse béton lors du coulage, permettant une distribution homogène du renfort au cœur de la structure. Cette configuration de renforcement, assure une répartition homogène des efforts et permet de quantifier précisément l'apport du jute, avec comme avantages principaux le maintien stable des fibres durant le coulage et la possibilité d'évaluer spécifiquement l'amélioration mécanique apportée par le système composite.

Figure II.12 : Renfort en jute utilisé.

II.4.4 Coulage des éprouvettes

Les éprouvettes prismatiques de 0.003 m^3 de volume sont confectionnées en utilisant la formulation donnée dans le tableau **5**. Elle est établie, pour 1m^3 en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse.

Tableau 5 : Composition du béton pour 1m^3.

Composant	Masse (Kg)
Ciment	350
Sable	824.4

Gravier 3/8	240
Gravier 8/15	784.4
Eau	200

La même composition a été adoptée pour le béton de granulats recyclés, en substituant 75% des granulats de classes 3/8 et 8/15 naturels, par leurs homologues recyclés.

II.4.5 Préparation des moules

Les moules prismatiques (Fig. II.13) ont d'abord été nettoyés, pour éliminer les résidus d'anciens bétons. Ils ont été par la suite huilés, afin de faciliter le décoffrage du béton.

Figure II.13: Moule prismatique utilisé.

II.4.6 Coulage des éprouvettes

Les quantités de composants nécessaires aux différentes gâchées étant préparées, nous avons procédé à leur malaxage jusqu'à obtention d'une texture homogène. Pour chacune des variantes étudiées, une gâchée est réalisée.

Le béton préparé est versé dans chacun des moules prismatiques, en quantité suffisante afin de former une couche uniforme d'enrobage, d'environ 1,5 cm d'épaisseur. Par la suite, le renfort est soigneusement positionné dans le moule, en s'assurant qu'il soit parfaitement centré et respecte

les espacements nécessaires par rapport aux parois du moule (Fig. II.14). Un placement adéquat du renfort permet d'assurer une répartition optimale des charges et garantit une précision maximale lors des tests qui seront effectués ultérieurement.

Figure II.14 : Renfort installé dans l'éprouvette lors du coulage.

Les moules sont ensuite installés sur une table vibrante, où ils subissent une vibration pendant 20 secondes. Cette procédure permet de libérer les bulles d'air emprisonnées dans le béton frais, assurant ainsi une densification et une compaction optimales du béton. Cela contribue à renforcer sa résistance. Les éprouvettes sont étiquetées et mises à sécher pendant une durée de 24 heures, puis décoffrées immédiatement.

Les éprouvettes obtenues sont conservées référencées avant d'être immergées dans des bacs remplis d'eau, pour y subir une cure d'hydratation, à 20 °C selon la norme NF EN 12390-2 [58], et ce jusqu'à maturation du béton au 28^{e} jour d'âge.

La nomenclature des différentes poutres confectionnées est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6:Références des variantes étudiées.

Référence	Désignation
BGN	Prisme de granulats naturels sans renforcement

BRR	Prisme renforcé, confectionné de granulats recyclés non traités
BRRC	Prisme renforcé, confectionné de granulats recyclés traités au coulis ciment
BRRPZ	Prisme renforcé, confectionné de granulats recyclés traités au coulis de ciment + pouzzolane
BRRFS	Prisme renforcé, confectionné de granulats recyclés traités au coulis de ciment + fumée de silice
BR_2RC	Prisme doublement renforcé (int-ext), confectionné de granulats recyclés traités au coulis de ciment

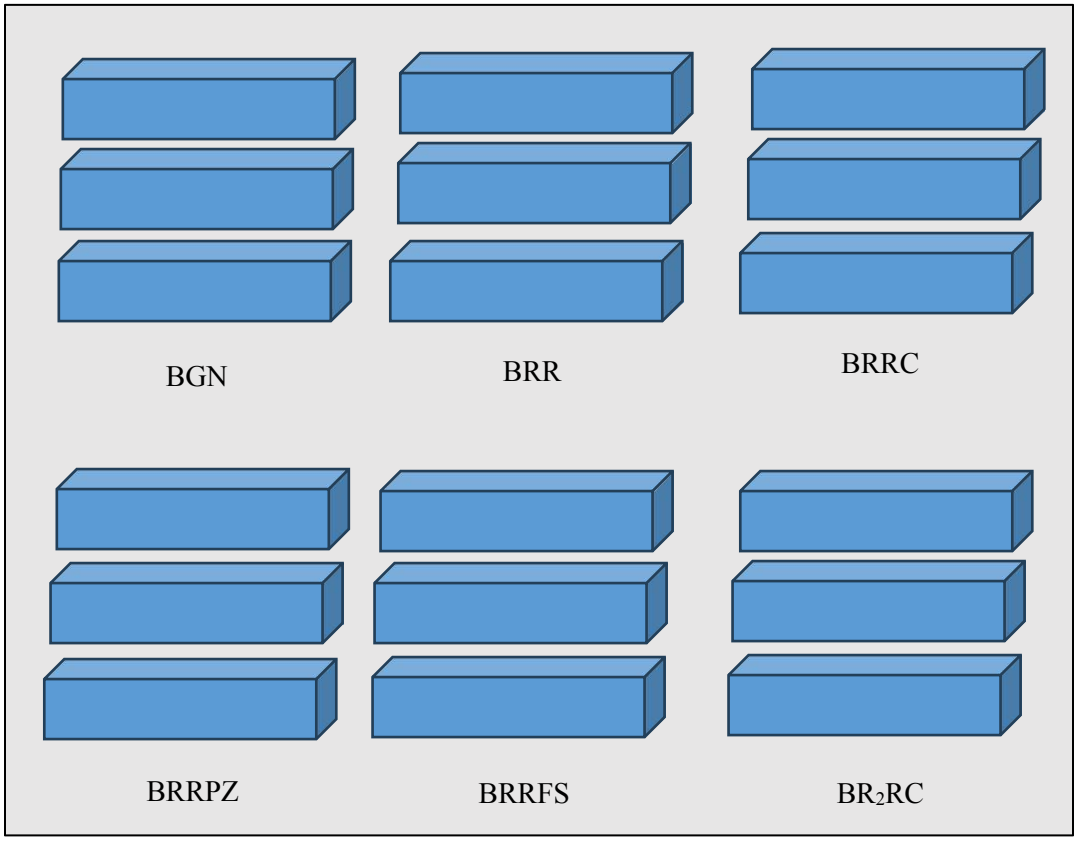

Figure II.15 : Schéma récapitulatif des variantes étudiées**.**

II.5 Traitement mécanique des granulats recyclés

Dans une deuxième expérience, les granulats recyclés ont été soumis à l'essai Los Angeles qui est une méthode normalisée en génie civil, permettant d'évaluer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement. Il est essentiel pour déterminer la durabilité des matériaux destinés aux couches de chaussées et aux bétons hydrauliques.

L'essai est réalisé dans le but d'éliminer la pâte de ciment durcie, qui pose le problème de la porosité, des granulats recyclés.

II.5.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à placer un échantillon de granulats dans un tambour en acier (Fig. II.16), de dimensions normalisées, contenant des boulets en acier sphériques. Le tambour est mis en rotation à une vitesse de 30 à 33 tours par minute. Après un nombre déterminé de rotations (généralement 500, ou 1000 pour certaines granulométries), l'échantillon est retiré et tamisé pour mesurer la quantité de matériau réduit en particules fines (inférieures à 1,6 mm).

Figure II.16: Machine Los Angeles**.**

L'essai Los Angeles est encadré par plusieurs normes comme :

- **EN 1097-2** : norme européenne décrivant les méthodes pour déterminer la résistance à la fragmentation des granulats [59].
- **NF P 18-573** : ancienne norme française spécifique à cet essai [60].

II.5.2 Application aux granulats recyclés

Dans le cadre de notre étude visant à améliorer la qualité des granulats recyclés destinés à la fabrication d'un nouveau béton, nous avons mis en œuvre l'essai Los Angeles pour réduire la quantité de pâte de ciment résiduelle adhérente à leur surface. Nous avons sélectionné deux fractions granulaires, à savoir 3/8 mm et 8/15 mm. Pour chaque fraction, quatre variantes expérimentales ont été testées, chacune utilisant un échantillon de 5 kg de granulats. Les paramètres de l'essai ont été modifiés en variant le nombre de boulets en acier et la durée de rotation du tambour. Les configurations testées sont les suivantes : 7 boulets pendant 7 minutes, 7 boulets pendant 10 minutes, et 5 boulets pendant 10 minutes. Après chaque essai, les granulats ont été tamisés (Fig. II.17) pour éliminer les particules fines, lavés pour retirer les résidus de pâte de ciment, puis séchés au four à 105°C pendant 24 heures. Enfin, les granulats traités selon ces quatre variantes ont été utilisés pour la fabrication de 8 éprouvettes de bétons de granulats recyclés dont 2 éprouvettes témoins, permettant ainsi d'évaluer l'impact des différentes conditions de traitement sur les propriétés du béton obtenu.

Il convient de noter que, selon les normes, l'essai Los Angeles appliqué aux granulats naturels se réalise pendant 15 minutes avec 11 boulets. Toutefois, étant donné la nature plus fragile des granulats recyclés, nous avons adapté les conditions de l'essai en réduisant à la fois le nombre de boulets et le temps de rotation afin d'éviter leur détérioration excessive.

Figure II.17 : Granulats recyclés à la sortie de la machine Los Angeles.

Figure II.18 : Tamisage des granulats recyclés traités.

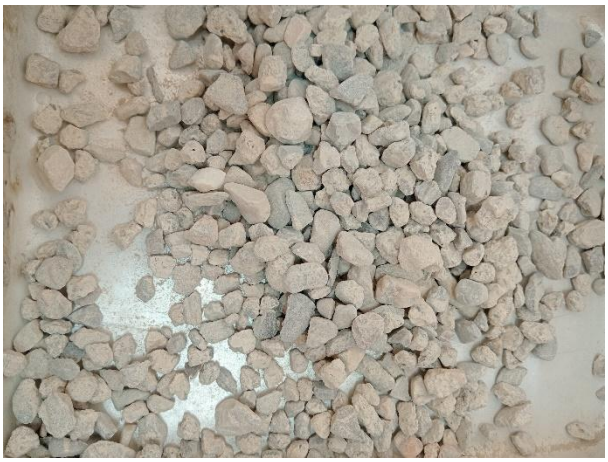

Figure II.19 : Granulats obtenus après tamisage.

II.5.3 Essai d'absorption des granulats

L'absorption d'eau des granulats devrait être mesurée après leur trempage dans l'eau pendant au moins 24 heures, selon la norme EN 1097-6/A1 : 2014. Cependant, La cinétique d'absorption d'eau des RCA est très rapide, de nombreux auteurs sont d'accord avec le fait que dans les 10 premières minutes, les granulats recyclés peuvent atteindre 80-90% de leur capacité d'absorption d'eau à 24 heures. Pour cette raison, l'absorption d'eau à 10 minutes est une valeur très utile lors de la conception, car elle peut être utilisée pour calculer l'eau supplémentaire nécessaire pour maintenir l'ouvrabilité ou définir le temps total de pré-trempage [61].

Comme les granulats de béton recyclé conservent une partie de la pâte de ciment adhérente en surface, ils présentent une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les granulats naturels. Pour quantifier cette absorption, un essai a été réalisé en immergeant dans de l'eau, pendant 24 heures, un échantillon de 200 g de granulats recyclés (Fig. II.20).

L'essai a été également conduit sur des échantillons de même poids, composés de granulats recyclés ayant été soumis à l'essai de Los Angeles pour en éliminer un maximum de la pâte de ciment résiduelle qu'ils renferment. Une fois ce traitement effectué, le même test d'absorption a été appliqué aux granulats traités afin de comparer les résultats entre les différentes variantes.

Les tests d'absorption ont porté sur les deux classes granulaires 3/8 et 8/15.

Figure II.20: Immersion des granulats recyclés et traités dans l'eau.

Après 24 heures d'immersion dans l'eau, les granulats ont été égouttés puis pesés à nouveau, afin de déduire leur coefficient d'absorption.

II.5.4 Corps d'étude

Pour évaluer l'effet du traitement des granulats recyclés sur les propriétés du béton, nous avons utilisé la même formulation que celle des éprouvettes précédentes, sans inclure de renforts. Cette approche nous a permis d'isoler l'impact du traitement mécanique des granulats sur les caractéristiques du béton, en particulier en ce qui concerne la réduction de la pâte de ciment résiduelle et son influence sur la performance globale du matériau.

Les spécimens d'étude, sont des poutres de dimensions 7cm x 7 cm x 28 cm. Après le coulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 28 jours, délais requis pour la réalisation ultérieure des essais de flexion.

II.6 Procédure de l'essai de flexion

Suite à une période de maturation et de conservation de 28 jours en conditions de laboratoire, toutes les poutres produites sont retirées des bacs d'eau pour être soumises à des essais de flexion à trois points. Appelé également essai de flexion simple, il s'agit d'une méthode expérimentale fréquemment employée pour établir les caractéristiques mécaniques des matériaux, notamment leur capacité de 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 tests de flexion à trois points sont réalisés sur les échantillons prismatiques grâce à une machine de flexion universelle SEIDNER (Fig. II.21), pouvant supporter une charge maximale de 200 kN, avec un pas de chargement de 0,2 kN/s. L'appareil de chargement inclut deux éléments de support placés à angle droit par rapport à l'éprouvette et une poutre de flexion qui impose la charge au milieu de l'éprouvette. Une charge progressive est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Figure II.21 : Machine de flexion SEIDNER.

La machine de flexion consigne les valeurs de tension et celles du déplacement vertical au centre de l'échantillon lors de sa rupture.

Les résultats obtenus sont examinés et visualisés à l'aide de courbes force-déplacement, qui servent d'outil d'analyse crucial pour décrire le comportement mécanique des spécimens soumis à des tests de flexion, fournissant des données essentielles sur leurs caractéristiques de résistance et de déformation.

Il est à noter que les essais de flexion des éprouvettes incluant les granulats traités par abrasion, sont conduits avec la machine de flexion « IBERTEST » d'une capacité de 200kN, avec un pas de 0.5kN/s

Les graphiques force-déplacement fournissent une illustration précise de la réaction des échantillons exposés à la charge de flexion. Ces données illustrent la variation de la force exercée en fonction du déplacement vertical observé au centre de l'échantillon, depuis le commencement du chargement jusqu'à l'effondrement final. Ces graphiques offrent la possibilité de représenter et d'analyser le comportement mécanique des échantillons testés.

L'examen de ces graphes offre des données essentielles concernant les caractéristiques mécaniques des échantillons, comme leur résistance supérieure, leur ductilité et leur mode de fracture. Ces informations facilitent la mise en parallèle des performances de divers échantillons examinés et l'appréciation de l'impact du renfort ainsi que du traitement des granulats recyclés sur le comportement des poutrelles en flexion.

II.7 Conclusion

Ce chapitre expose la méthodologie expérimentale adoptée pour la fabrication des corps d'étude et la réalisation des essais de flexion sur des poutres en béton renforcées de PRF à base de fibres de jute. Le protocole expérimental détaille plusieurs étapes, à commencer par la présentation des matériaux utilisés, tels que le béton, les fibres de jute, la matrice résineuse, et les granulats recyclés, ces derniers ayant été préalablement traités pour optimiser leur résistance et favoriser leur recyclage. Il inclut également la fabrication des éprouvettes et la préparation du renfort. Enfin, la procédure de l'essai de flexion, permettant d'évaluer les performances des poutres en béton de granulats recyclés et traités, renforcées par les fibres de jute, est soigneusement décrite.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais de flexion réalisés sur les poutres en béton, confectionnées dans le cadre de cette étude. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité des traitements appliqués aux granulats recyclés et l'impact du renforcement par des bandes de PRF de jute sur les performances mécaniques des poutres.

Les granulats recyclés utilisés ont subi des traitements spécifiques visant à améliorer leurs propriétés, telles que la réduction de la porosité et l'amélioration de l'adhérence à la matrice cimentaire. Ces traitements ont pour but de compenser les inconvénients inhérents aux granulats recyclés, notamment leur absorption d'eau élevée par rapport aux granulats naturels.

Les résultats des essais de flexion sont présentés sous forme de courbes et d'histogrammes, permettant une visualisation claire de l'impact des paramètres étudiés sur les performances mécaniques des poutres. Une analyse comparative est effectuée, entre les spécimens renforcés qui sont à base de granulats recyclés traités et les deux témoins ; Le témoin négatif correspond aux poutres renforcées et qui sont à base de granulats recyclés non traités, alors que le témoin positif correspond aux poutres de granulats naturels. Le but étant de quantifier et qualifier l'apport des paramètres étudiés sur les propriétés mécaniques des poutres en béton, notamment en termes de résistance en flexion et de déformabilité.

III.2 Effet du traitement

Trois coulis ont été testés sur les granulats recyclés, à savoir un coulis de ciment, un autre composé de ciment et de pouzzolane et un dernier de ciment additionné de fumée de silice.

III.2.1 Résistance à la flexion

Les traitements consistent à immerger les granulats dans les coulis. L'objectif est d'améliorer la qualité des granulats recyclés avant leur incorporation dans le béton recyclé et renforcé avec le PRF de jute. Les courbes décrivant le comportement des éprouvettes renforcées et confectionnées

avec les granulats traités sont données ci-après. Elles sont confrontées, pour chaque traitement, aux courbes des poutres 'témoins'.

L'ensemble des courbes correspondant aux différentes variantes étudiées, est confronté avec les courbes des témoins 'positif ' et ' négatif ' dans la figure ci-dessous.

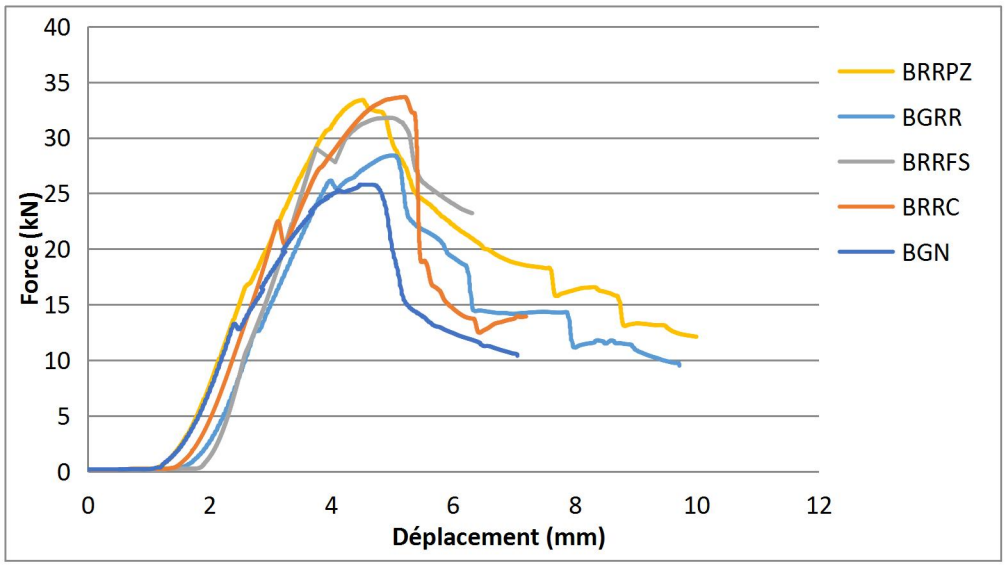

Figure III.1: Confrontation des courbes force-déplacement des variantes testées.

La courbe BGN, représentant le béton à base de granulats naturels, présente un comportement globalement satisfaisant avec une montée progressive de la force jusqu'au pic, suivie d'une chute marquée traduisant une perte rapide de capacité portante. En comparaison, les formulations traitées, à savoir la fumée de silice+ ciment, la pouzzolane + ciment et le ciment seul, présentent des performances supérieures, avec une résistance maximale plus élevée et un comportement post-pic plus stable. Le dépassement clair de la courbe de granulats naturels par l'ensemble de ces formulations pourrait suggérer une efficacité des traitements appliqués.

L'histogramme (Fig. III.2) met en évidence l'amélioration de la résistance en flexion des poutres en béton de granulats recyclés traités, par rapport aux poutres témoins. Il en ressort que les résistances de toutes les variantes traitées sont supérieures à celle des éprouvettes à base de granulats recyclés, non traités et dépassent même celle du béton de granulats naturels.

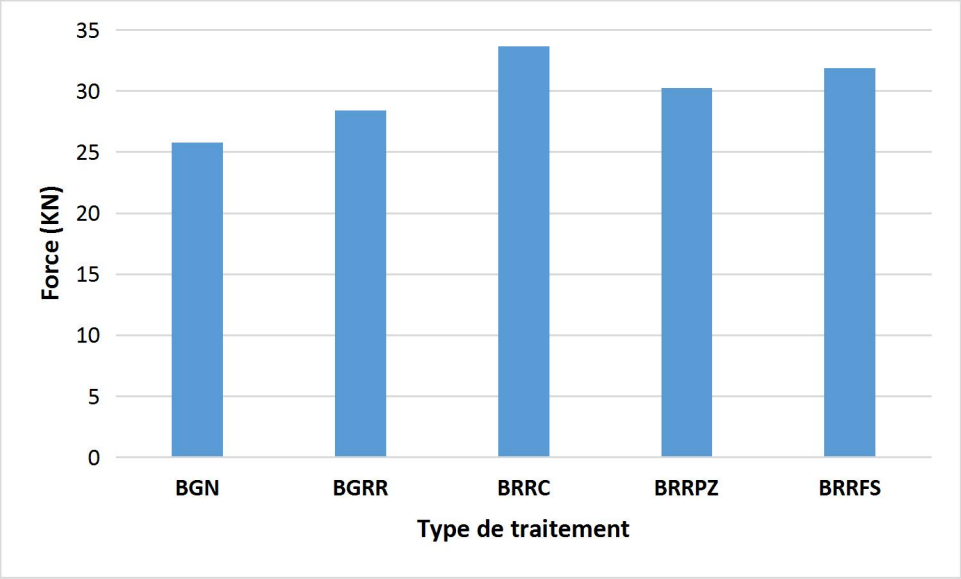

Figure III.2: Résistance des poutres en fonction des traitements.

Les apports de ces variantes par rapport au témoin en béton de granulats naturels sont quantifiés. Les gains ainsi obtenus, sont représentés sur la figure III.3.

On enregistre des gains de résistance entre 23.74% et 30.56% pour les traitements avec coulis de ciment additionné de fumée de silice, ciment additionné de pouzzolane et ciment seul, respectivement.

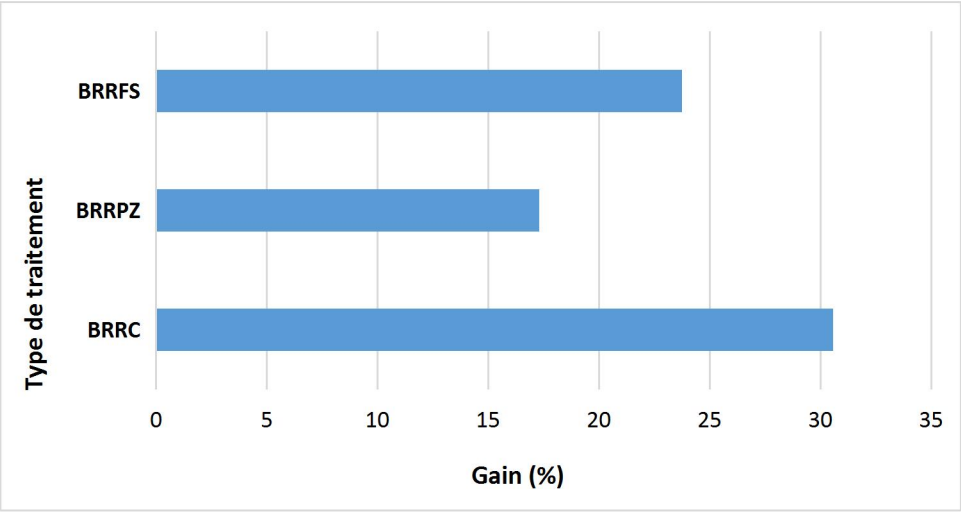

Figure III.3: Gains de résistance selon les traitements.

III.2.2 Déformabilité

L'histogramme (fig. III.4) présente l'évolution de la flèche (en mm) selon le type de traitement par rapport aux bétons témoins.

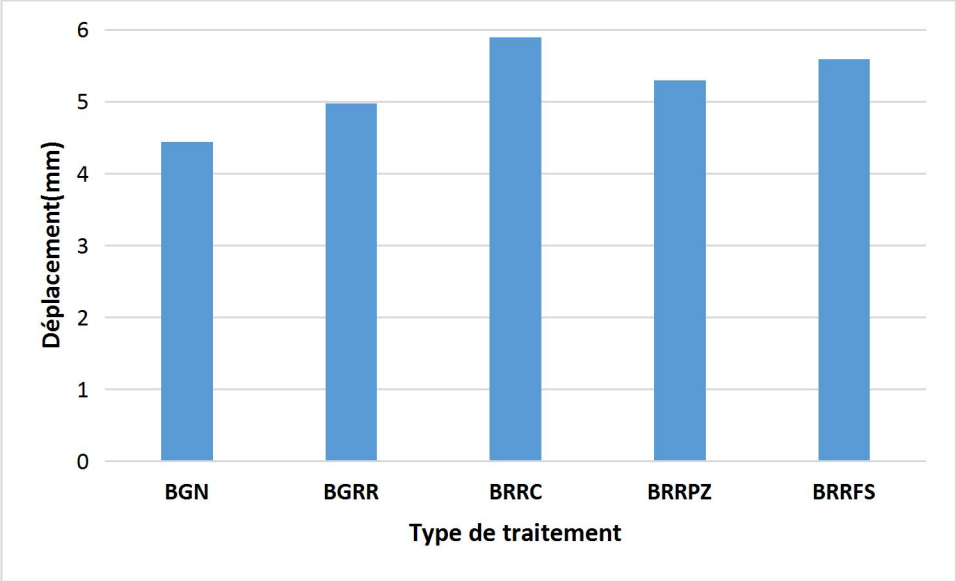

Figure III.4: Déplacement au pic des poutres selon le traitement.

L'histogramme de la figure III.5, présente l'augmentation de la flèche (déplacement) des bétons de granulats traités par rapport au béton témoin de granulats naturels. Le traitement avec ciment+pouzzolane entraîne une augmentation de la flèche de 19.37 % tandis que celui en ciment provoque une hausse de 32.88 %.

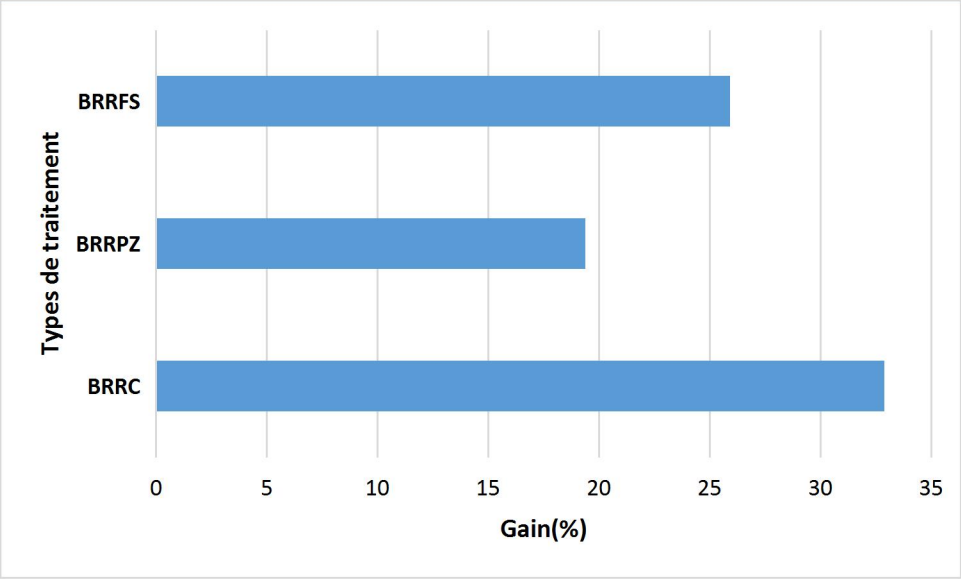

Figure III.5: Gains de déplacement selon les types de traitement.

III.2.3 Discussion des résultats

Le traitement par un coulis de ciment s'est avéré plus efficace que les traitements mixtes ciment-fumée et surtout ciment-pouzzolane puisqu'on enregistre des gains de résistance de 30.56% pour le ciment, contre et 17.3% pour le ciment combiné avec la pouzzolane. La finesse du ciment a permis son absorption capillaire par les granulats recyclés et son hydratation à l'intérieur des micros pores a permis le colmatage de ces derniers.

Le même constat est réalisé pour la déformation pour laquelle un gain de 32.88 % est obtenu pour le traitement au ciment et un gain de 19.37% est obtenu pour le traitement ciment+pouzzolane.

Ces résultats semblent concorder avec ceux de la littérature scientifique, comme les travaux de Bouhafara Hamza qui rapporte que le traitement des granulats recyclés par des coulis de ciment (GRC) et de fumée de silice (GRF) a résulté en une augmentation nette de 43% de la résistance à la compression. Tandis que le traitement mixte avec ciment-fumée de silice, permet un gain de seulement 12% en résistance à la compression. [62]

Aussi, Tam et Tam ont testé deux variantes, l'une utilisant uniquement de la fumée de silice, et l'autre combinant fumée de silice et ciment. La fumée de silice a démontré une efficacité notable, par rapport au mélange, grâce à sa haute surface spécifique, en favorisant une réaction

pouzzolanique et un effet de remplissage. Cela a conduit à une densification significative de la microstructure des granulats recyclés (RCA) [63].

Shaban et *al,* rapportent que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques est considérée comme une technique plus efficace pour améliorer les propriétés du mortier collé. Si le béton est immergé en suspension ou enduit de matériaux pouzzolaniques (revêtement de surface), ces derniers réagissent avec l'hydroxyde de calcium (CH) présent dans le mortier collé pour former un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Ces produits hydratés peuvent modifier la surface du béton armé et les propriétés du mortier collé, améliorant ainsi les caractéristiques d'adhérence du béton armé

L'application d'une boue pouzzolanique sur la surface des granulats recyclés (RCA) permet ainsi de déclencher ces réactions d'hydratation, ce qui modifie et améliore la structure superficielle des granulats [64].

Par ailleurs, la performance limitée des traitements mixtes peut s'explique par la réaction entre la fumée de silice et le ciment et entre le ciment et la pouzzolane, qui génère des particules de taille plus importante, réduisant ainsi leur capacité à pénétrer en profondeur dans les micropores du granulat.

Cela est dû à la réactivité de la fumée de silice et de la pouzzolane en présence du ciment et qui produit des particules beaucoup plus grandes, rendant plus difficile la pénétration des particules du ciment et de la fumée de silice ou de la pouzzolane, à l'intérieur des micro pores. Ainsi, l'imprégnation des granulats recyclés est moins efficace et le béton résultant est moins résistant.

Le fait que les performances du traitement incluant la fumée de silice soient meilleures que celles du traitement à la pouzzolane, peut être attribué à la réactivité plus lente de la pouzzolane en comparaison avec la fumée de silice, due à sa structure plus cristalline et sa surface spécifique plus faible, la fumée de silice possédant des particules plus fines.

III.3 Effet du renforcement

Deux types de renforcement ont été étudiés, le premier type est un renforcement interne avec une bande, en 03 plis, d'un PRF de jute posée en hélice autour d'un squelette d'armatures. Le second type correspond à la combinaison du renforcement interne avec un renforcement externe par collage du tissu de jute à la face inférieure de la poutre.

III.3.1 Résistance à la flexion

L'histogramme (fig. III.7) montre l'effet du type de renforcement sur la force maximale supportée. Le renforcement combiné, offre la meilleure résistance pour des poutres à base de granulats traités au ciment, suivi du renforcement interne pour le même type de granulat. Par ailleurs, les poutres de béton de granulats naturels, présentent la plus faible résistance.

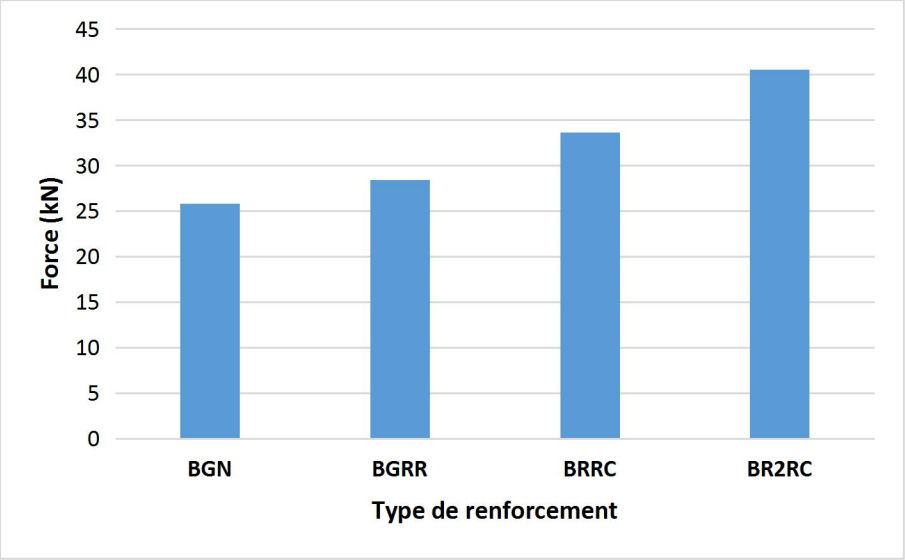

Figure III.7: Résistance des poutres selon le type de renforcement.

Le graphique (fig. III.8) met en évidence le gain de résistance obtenu avec les différents types de renforcement en comparaison avec la résistance du béton de granulats naturels. Il montre que le renforcement combiné interne et externe offre le gain le plus significatif, atteignant 57,21 %**,** suivi du renforcement interne seul avec 30,57 %**.** En revanche, le béton renforcé à l'intérieur et qui est à base de granulats recyclés non traités, apporte un gain léger de 10,2%.

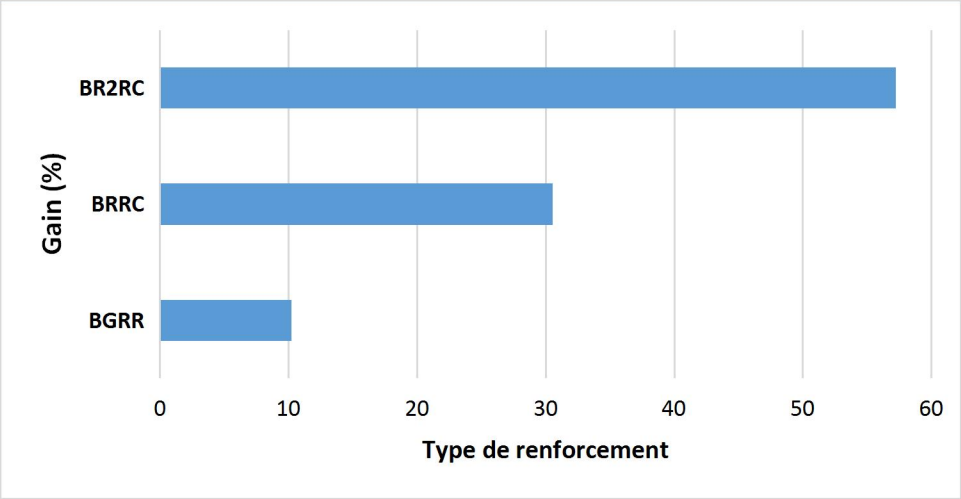

Figure III.8: Pourcentages des gains de résistance selon le type de renforcement.

III.3.2 Déformabilité

L'histogramme (fig. III.9) présente l'évolution de la flèche en fonction des différents types de renforcement.

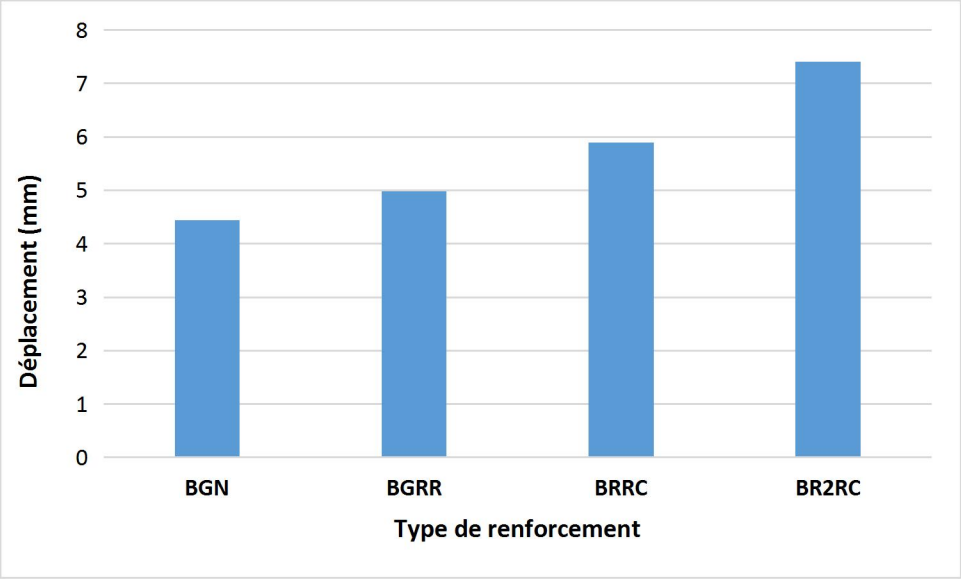

Figure III.9 :Déplacement des poutres selon le renforcement.

Le graphique (fig. III.10) présente le gain en pourcentage sur la flèche obtenue par les différents types de renforcement. Le renforcement combiné interne et externe permet la meilleure augmentation de la flèche, avec un gain de 66,9 %, suivi par le renforcement interne

avec 32.88 %, tant dis que le béton renforcé à l'intérieur et qui est à base de granulats recyclés non traités, affiche un gain de 12,6%.

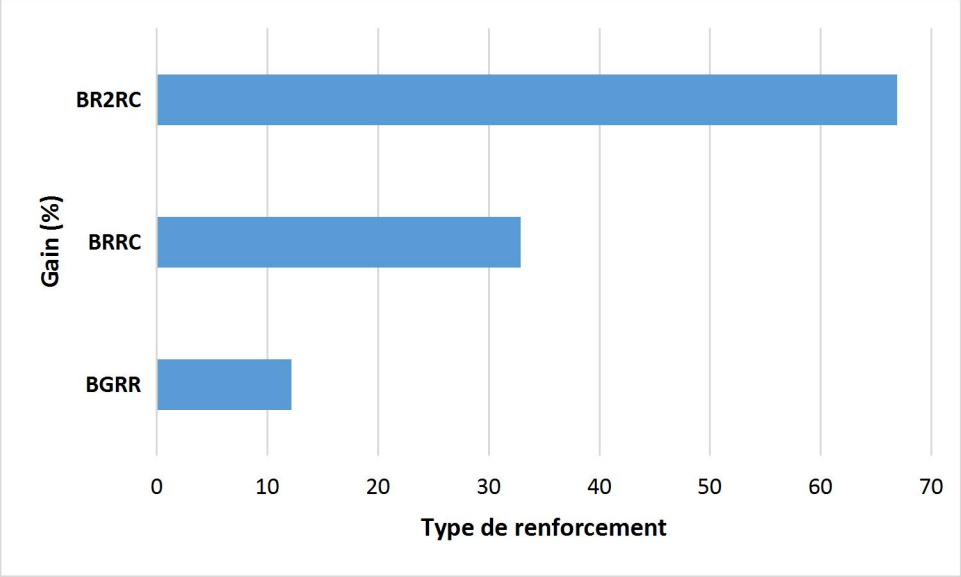

Figure III.10: Pourcentages des gains en déplacement selon le renforcement.

III.3.3 Discussion des résultats

Les résultats obtenus dans la 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.

Les résultats expérimentaux ont clairement montré que les poutres renforcées avec des bandes hélicoïdales de jute, en plus d'être fabriquées avec des granulats traités, ont présenté une performance en flexion encore supérieure, dépassant même celles du béton de granulats naturels. L'effet combiné entre traitement et renforcement interne avec fibres de jute s'avère être favorable et prometteur.

Les résultats obtenus concordent avec ceux de l'étude réalisée par Merzouki et Tehari qui ont testé cette technique de renforcement sur béton de granulats naturels [55] . Ainsi que ceux de l'étude réalisée par Yahi et Saidani sur des poutres de béton recyclé [23]. Ces études ont, en effet,

révélé une amélioration du comportement des poutres renforcées avec du tissu de jute, quelle que soit la configuration en termes de nombre de tours de la bande et de sa largeur.

Par ailleurs, les poutres ayant bénéficié d'un double renforcement, à la fois interne et externe avec des bandes de jute, en combinaison avec les granulats traités, ont affiché la meilleure résistance à la flexion parmi toutes les variantes. Le renforcement externe a permis aux poutres de mieux supporter les charges, en contribuant à limiter l'ouverture des fissures et à retarder la rupture.

En plus, nous avons constaté que le renfort de jute a bien été mis à contribution dans toutes les poutres renforcées. Ceci apparait clairement sur la figure ci-dessous, où elles les bandes de jute sont rompues, signe de leur implication dans la reprise des efforts jusqu'à leur rupture. Il en est de même pour la plaque externe.

Figure III.11: Rupture du renfort interne (a) et externe (b) en jute.

III.4 Effet du traitement mécanique des GBR

III.4.1 Résultats du test d'absorption

Le test d'absorption réalisé sur les granulats recyclés, a permis de déterminer la quantité d'eau absorbée par différence de masse la masse de l'échantillon saturé en eau et celle de l'échantillon sec. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7:Résultats de l'essai d'absorption.

	Non traités		7 Boulets 7 Minutes		7 Boulets 10 Minutes		5 Boulets 10 Minutes	
Classe	**Masse** (g)	**Abs** (%)	**Masse** (g)	**Abs** (%)	**Masse** (g)	**Abs** (%)	**Masse** (g)	**Abs** (%)
3/8	221,5	10,75	213,6	8.6	205,9	7.4	219.7	9.85
8/15	212,4	6,2	206,2	5.15	205,7	4.9	208.9	4.45

Les taux de perte de l'absorption des granulats traités par rapport aux granulats non traités sont évalués et représentés dans la figure ci-dessous.

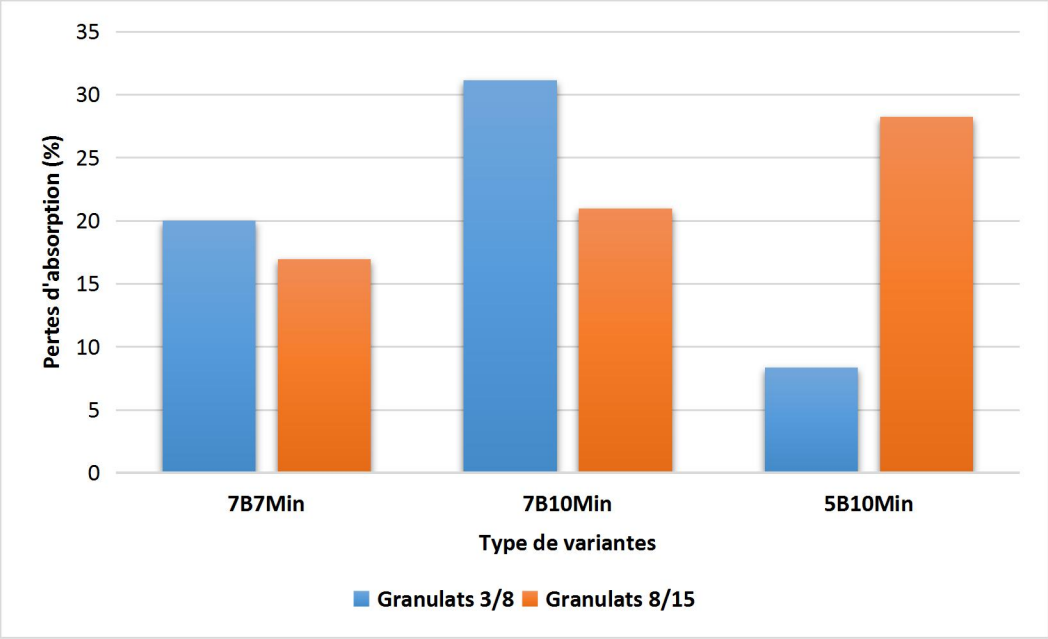

Figure III.12 : Graphe des pertes d'absorption selon le type de variante.

Le tableau et le graphe présentés démontrent l'efficacité de l'essai mécanique d'abrasion Los Angeles dans le traitement des granulats recyclés. En effet, cette méthode a permis d'éliminer un certain pourcentage du mortier adhérent présent à la surface des granulats, ce qui se traduit par une amélioration significative de leurs propriétés physiques. Comparativement aux granulats

recyclés non traités, ceux ayant subi ce traitement ont montré une réduction notable de l'absorption d'eau. Plus précisément, pour la fraction granulométrique 3/8, l'absorption d'eau a été réduite à 31,16 % avec la variante 7 boulets – 10 minutes, tandis que pour la fraction 8/15, elle a atteint 28,225 % avec la variante 5 boulets – 10 minutes. Ces résultats confirment l'efficacité du traitement par abrasion dans l'amélioration de la qualité des granulats recyclés en réduisant la porosité due au mortier résiduel.

III.4.2 Résultats de l'essai de flexion

Les éprouvettes confectionnées en utilisant les granulats recyclés et traités mécaniquement à l'aide de la machine de Los Angeles ont été soumises à des essais de flexion comme décrit précédemment. Les résultats obtenus pour les trois variantes de traitement, sont confrontés à ceux obtenus sur des éprouvettes, témoins, fabriquées à partir de granulats recyclés non traités.

Le but étant d'évaluer l'effet du traitement mécanique sur les performances des poutres.

Les résultats de ces essais sont donnés dans la figure III.13.

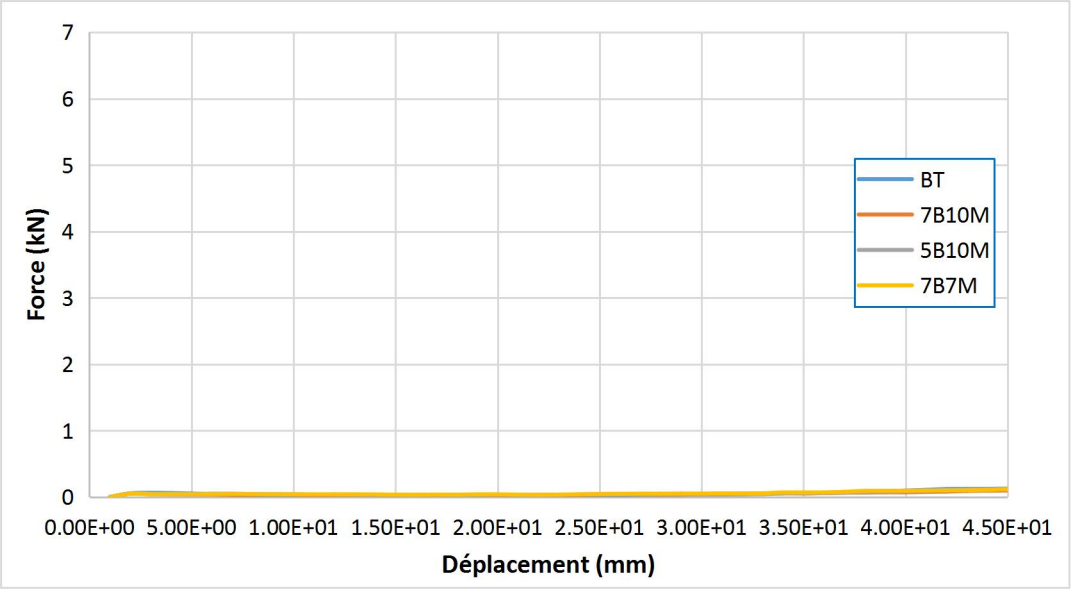

Figure III.13: Courbes force-déplacement des poutres à base de granulats recyclés traités mécaniquement.

Il ressort de la lecture de ces courbes, qu'elles présentent toutes la même allure, qui décrit bien le mode de rupture fragile. Elles sont caractérisées par une branche linéaire ascendante jusqu'à la rupture. Les poutres à base de granulats soumis à la rotation avec 7 boulets pendant une durée de 10 minutes, sont celles qui donnent la meilleure résistance avec un gain de 14,34%.

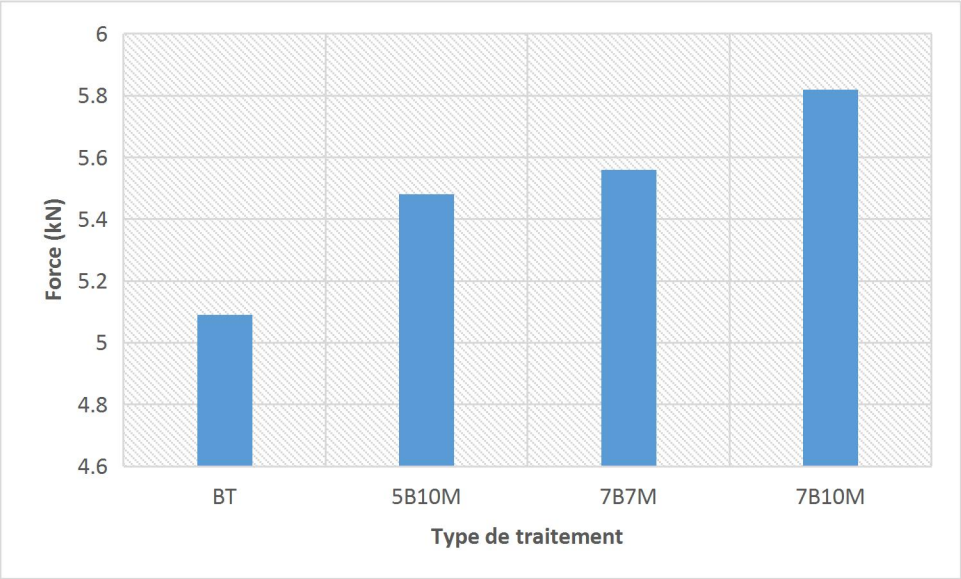

Figure III.14:Charge ultime en flexion.

La figure ci-dessous illustre les écarts entre toutes les variantes de traitement et celle du béton témoin. On enregistre, par ailleurs, des gains de capacité ultime de 9,23% et 7,66%, respectivement, pour les poutres de granulats recyclés traités avec 7 boulets pendant 7 minutes et celles de granulats recyclés ayant subi une rotation avec 5 boulets pendant 10 minutes.

III.4.3 Discussion des résultats

Le traitement mécanique par abrasion selon l'essai Los Angeles a montré des résultats satisfaisants. Le mortier adhérent peut être éliminé du granulat recyclé par cette action [65]. Une réduction de l'absorption d'eau de l'ordre de 30% est observée pour les deux classes granulaires 3/8 et 8/15. Cette diminution de la porosité a favorisé une meilleure compacité des granulats et une amélioration de la résistance mécanique qui atteint 14.34 % pour les granulats ayant été soumis à l'essai Los Angeles avec 7 boulets pendant 10 minutes. Le mortier adhérent au RCA est éliminé par frottement contre les billes de fer placées à chaque extrémité du tambour [66].

III.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'impact du traitement des granulats recyclés ainsi que des différentes techniques de renforcement sur le comportement en flexion des poutres en béton de granulats recyclés. Les résultats expérimentaux ont démontré que le traitement des granulats, notamment par l'ajout de liants hydrauliques tels que le ciment, la fumée de silice et la pouzzolane, améliore significativement les performances en flexion des poutres. De plus, l'essai d'abrasion de Los Angeles s'est montré efficace pour éliminer les particules faibles, permettant ainsi de réduire l'absorption d'eau des granulats recyclés.

Par ailleurs, le renforcement interne par fibres de jute a été mis en œuvre sur l'ensemble des poutres testées, et certaines d'entre elles ont également été renforcées en surface par des bandes de jute. Les résultats ont montré qu'un renforcement combiné, interne et externe, permettait d'atteindre les meilleures performances mécaniques, en particulier lorsqu'il est associé à des granulats traités. Ainsi, l'effet combiné du traitement des granulats recyclés et du renforcement par fibres naturelles s'est révélé particulièrement efficace, offrant à la fois une amélioration de la résistance en flexion et une augmentation de la ductilité des poutres. Ces conclusions ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement de bétons plus écologiques, durables et performants intégrant des matériaux recyclés et des renforcements à base de fibres naturelles.

Au final, on peut dire que les traitements chimiques et mécaniques sont complémentaires et l'association de ces deux approches apparaît comme une solution prometteuse pour valoriser les granulats recyclés et produire des bétons durables à haute performance mécanique.

Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal a été de valoriser les granulats recyclés dans une perspective de protection de l'environnement et de développement durable. Pour cela, plusieurs traitements ont été appliqués aux granulats recyclés de diamètre 3/8 et 8/15 par leur immersion dans des coulis de ciment, de ciment mélangé à de la pouzzolane et à de la fumée de silice, suivi d'un séchage à l'étuve. Ces granulats traités ont été utilisés pour la fabrication d'éprouvettes prismatiques de béton. Certaines éprouvettes ont été renforcées à l'aide de bandes hélicoïdales de jute en 3 plis, de 4cm de largeur. Trois éprouvettes ont subi, en plus de ce renforcement, un renforcement externe avec une plaque du même composite.

Par ailleurs, pour réduire la pâte de ciment résiduelle adhérant aux granulats recyclés, l'essai d'abrasion Los Angeles a été réalisé avec différentes configurations obtenues en variant le nombre de boulets et la durée de l'essai. Trois tests ont été effectués sur les fractions 3/8 mm et 8/15 mm des granulats recyclés, à savoir un test avec 5 boulets pendant 5 minutes, un test pour 7 boulets pendant 7 minutes, et un test avec 7 boulets pendant 10 minutes. Granulats résultant de ces essais ont été utilisés pour confectionner des poutres de dimensions 7cm x 7 cm x 28 cm, destinées aux tests de flexion afin d'en évaluer les performances mécaniques.

Les résultats de cette étude ont révélé des améliorations notables de la résistance, par rapport au béton de granulats naturels. En effet, une augmentation de 30.56 % a été observée avec le traitement au coulis de ciment seul.

Des tendances similaires ont été observées pour la déformation. Le traitement au ciment seul a permis un gain allant de 19,37 % à 32,88 %.

Concernant le renforcement par bandes de jute, les résultats ont mis en évidence que la combinaison d'un renforcement interne et externe a offert le gain de résistance le plus élevé, avec une amélioration de 57,21 %.

En termes de déformabilité, le renforcement combiné interne et externe s'est distingué par le gain le plus important sur la flèche.

Les granulats recyclés traités par abrasion ont présenté une réduction notable de l'absorption d'eau par rapport aux granulats non traités. Pour la fraction 3/8, une diminution de 31,16 % a été obtenue avec la variante 7 boulets – 10 minutes, tandis que pour la fraction 8/15, la réduction a atteint 28,225 % avec la variante 5 boulets – 10 minutes.

Les poutres élaborées à partir des granulats recyclés traités par abrasion ont présenté des gains allant de 7,66 % à 14,34 %.

Ces résultats obtenus démontrent l'efficacité des différentes méthodes d'amélioration appliquées. Le traitement des granulats recyclés, que ce soit par abrasion ou par imprégnation au coulis de ciment, a permis d'optimiser leurs propriétés, en particulier en réduisant leur porosité et en améliorant la résistance mécanique du béton. Par ailleurs, l'utilisation du renforcement interne par bandes de jute s'est révélée également performante, notamment lorsque le renforcement est combiné au renforcement externe, offrant ainsi des gains significatifs en termes de résistance atteignant la valeur de 56.21% et de déformabilité avec 66.9%. Ces approches complémentaires montrent l'intérêt de stratégies durables pour valoriser les granulats recyclés dans le béton.

En perspective, il serait intéressant d'optimiser les paramètres des traitements utilisés, comme la durée ou le nombre de boulets pour l'abrasion, ou le dosage du coulis de ciment, afin d'obtenir de meilleurs résultats avec un coût réduit. Il serait aussi utile d'évaluer la durabilité de ces solutions dans le temps, en les exposant à des conditions réelles comme les cycles gel/dégel ou l'humidité. Par ailleurs, tester ces méthodes à plus grande échelle sur des éléments structurels permettrait de confirmer leur efficacité en situation réelle. Enfin, explorer d'autres types de fibres naturelles pour le renforcement pourrait offrir de nouvelles alternatives intéressantes pour la construction durable.

[1] N. Almeida, F. Branco et J. R. Santos, «High-performance concrete with recycled stone slurry.,» *Cement and Concrete Research,* pp. 210-220, 2007.

[2] R. V. Silva , J. Brito et N. Saikia, «Influence of curing conditions on the durabilityrelated performance of concrete made with selected plastic waste aggregates,» *Cement and Concrete Composites,* vol. 35, n° %11, pp. 23-31, 2013.

[3] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari et M. Barra, «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,» *Cement and Concrete Research,* pp. 735-742, 2007.

[4] H. J. Chen, T. Yen et K. H. Chen, «Use of building rubbles as recycled aggregates,» *Cement and concrete research,* pp. 125-132, 2003.

[5] F. Debieb et . S. Kenai, «The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete.,» *Construction Building Materials,* pp. 886-893, 2008.

[6] V. M. Malhotra, «Use of recycled concrete as a new aggregate. In Symposium on Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry,» Ottawa, 1978.

[7] V. W. Y. Tam, C. M. Tam et S. X. Zeng, «Towards adoption of prefabrication in construction,» *Building and Environment,* vol. 42, n° %110, p. 3642–3654, 2007.

[8] N. Pacheco, J. De Brito et M. Lamperti Tornaghi, «Use of recycled aggregates in concrete: Opportunities for upscaling in Europe,» Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg, 2023.

[9] J. M. Gómez-Soberón, «Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study,» *Cement and concrete research,* pp. 1301-1311, 2002.

[10] C. Thomas, J. Setién, P. Alaejos et M. S. De Juan, «Durability of recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Materials,* pp. 1054-1065, 2013.

[11] A. Gonzalez et M. Etxeberria, «Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Material,* pp. 227-235, 2014.

[12] R. Kumar, Composites Part B, 2020.

[13] K. HADDAD , «Thése de doctorat''Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages'',» 2018.

[14] K. HADDAD, «Thése de doctorat ''Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages'',» 2018.

[15] Gutiérrez, Marta Sanchez de Juan et Maria del Pilar Alaejos, Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. M-108, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2012.

[16] M. Lalesev, V. Radonjanin et S. Marinkovic, Recycled concrete as aggregate for structural concrete production., 2010.

[17] Union sociale pour l'habitat, «Retour d'expérience : les granulats recyclés pour le béton,» 2020. [En ligne].

[18] H. Suisse, «Bétons avec granulats recyclés,»

[19] UNPG, «Union Nationale des Producteurs de Granulats,».

[20] AFNOR, «NF EN 12620+A1 – Granulats pour béton,» AFNOR, Paris, 2010.

[21] AFNOR, «NF P 18-545 – Granulats recyclés – Spécifications et méthodes d'essai,» AFNOR, Paris, 2017.

[22] AFNOR, «NF EN 206/CN – Béton – Spécification, performances, production et conformité – Complément national français,» AFNOR, paris, 2016.

[23] S. Yahi et N. Saidani, Etude expérimentale du renforcement interne en flexion, avec un composite de jute, de poutres en béton de granulats recyclés., 2024.

[24] J. De Brito et F. Alves, «Concrete with recycled aggregates: The Portuguese experimental research,» *Materials and Structures,* p. 35–51, 2010.

[25] X. H. Dao, Multi-recyclage du béton hydraulique, 2012.

[26] M. Pepe, «Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates,» *Cement and Concrete Research,* p. 203–212, 2014.

[27] T. C. Hansen, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, London: Chapman & Hall, 1992.

[28] M. Sánchez de Juan et P. Alaejos Gutiérrez, «Influence of recycled aggregate quality on concrete properties,» chez *Proceedings of the International RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures*, Barcelona, Spain, 2004.

[29] A. Djerbi Tegguer, «Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach,» *Construction and Building Materials,* p. 112–116, 2012.

[30] z. Zhao, S. Remond, D. Damidot et W. Xu, «Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates,» *Journal of Sustainable Cement-Based Materials,* p. 186–203, 2013.

[31] «Essai Los Angeles,»

[32] «Caractérisation des granulats de béton recyclé,»

[33] «Granulat,»

[34] Projet National RECYBETON, «Propriétés physiques des bétons recyclés en fonction de la température».

[35] Matar, Pierre, El Dalati et A. R. Rouba, «Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés. Étude expérimentale,» 2012.

[36] A. DAHMANI, S. BENAISSA et A. HOUDA, «L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication du béton ordinaire,» 2024.

[37] J. M. Berthelot, comportement mécanique et analyse des structures., 2005.

[38] 4. ACI Committe, «Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,» 2017.

[39] I. Organisation internationale de normalisation, «ISO 10618:2019 - Fibre de carbone — Détermination des propriétés en traction des fils imprégnés de résine,» 2019. [

[40] L. Hollaway, «Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications,» Woodhead Publishing, 2010.

[41] I. Organisation internationale de normalisation, «ISO 10406-1:2015 - Renforcement en polymère renforcé de fibres (PRF) du béton — Méthodes d'essai — Partie 1 : Barres et treillis en PRF,» 2015.

[42] C. Comité Européen de Normalisation, «EN 14649:2005 - Produits préfabriqués en béton — Méthode d'essai pour la conservation de la résistance des fibres de verre dans le ciment et le béton (SIC TEST),» 2005.

[43] Comité Européen de Normalisation,CEN, «EN 14649:2005 - Produits préfabriqués en béton — Méthode d'essai pour la conservation de la résistance des fibres de verre dans le ciment et le béton (SIC TEST),» 2005.

[44] International, ASTM, «ASTM D7205/D7205M-06 - Méthode d'essai standard pour les propriétés en traction des barres composites à matrice polymère renforcée de fibres,» 2006.

[45] L. Hollaway, «Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications,» Woodhead Publishing, 2018.

[46] C. Poon, S. Kou et L. Lam, «Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone and transport properties of concrete,» 2020.

[47] J. Xiao, «Experimental study of interfacial transition zones between geopolymer binder and recycled aggregate,» 2021.

[48] H. Dilbas, M. Şimşek et Ö. Çakır, «Strengthening of recycled aggregate concrete beams using carbon fiber reinforced polymer composites,» 2023.

[49] S. Omary, «Meta-analysis of the mechanical properties of recycled aggregate concrete beams under ideal conditions,» 2023.

[50] «Monitoring of the Barcelona bridge: Effects of freeze-thaw cycles and deicing salts on recycled aggregate concrete,» 2022.

[51] M. News, «MIT develops new plant-based 3D printing material that's "tough as bone and hard as aluminum",» 2023.

[52] E. Zurich, «Applied Laser Plasma Science (ALPS) research program,» 2025.

[53] EPFL, «Artificial intelligence for predicting failures in recycled aggregate concrete structures,» 2025.

[54] C. Ali Ahmed, Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques – expérimentation et modélisation, 2016.

[55] Merzouki et Tehari, Renforcement, avec matériaux composites,de poutres en béton, 2023.

[56] A. F. d. N. (AFNOR), «NF EN 197-1 : Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants,» AFNOR, Paris, France.

[57] M. Hubert et L. Courard, «Influence of recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete: A review,» *Influence of recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete: A review,* p. 125651, 2022.

[58] AFNOR, «NF EN 12390-2 : Essais pour béton durci – Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance,» Association Française de Normalisation, Paris, France, 2019.

[59] AFNOR, «Pour NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation,» AFNOR, Paris, France, 2020.

[60] AFNOR, «Granulats – Essai Los Angeles,» AFNOR, Paris, France, 1990.

[61] L. Berredjem, Contribution à l'étude des propriétés des mortiers et bétons à base de granulats recyclés et leurs durabilités, 2018.

[62] B. Hamza, Etude de l'effet du traitement des granulats recyclés au ciment et à la fumée de silice sur la performance des bétons à base de granulats recyclés., 2022.

[63] V. W. Tam et C. M. and Tam, diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete:TSMAs and TSMAsc, 2008.

[64] M. W. Shaban , «Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate,» *J of adv concr*

technol, pp. 151-167, 2019.

[65] T. Yonezawa, Y. Kamyama et K. Yanagibashi, «A study on a technology for producing high quality recycled coarse aggregate.,» 2001.

[66] K. Yoda, M. Harada et F. Sakuramoto, Field application and advantage of concrete recycled in-situ recycling systems, 2003.