الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algerienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure

Par : CHORFI Ouissame

Sujet

Etude de l'influence de la méthode de malaxage sur les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats recyclés.

Présenté et soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

Dr. BOURSAS Farid	Grade MCA	Président
Dr. HAMIDANE H'mida	Grade MCB	Rapporteur
Dr. AYEB Belkhir	Grade MAA	Examinateur 1

Promotion : 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم
١٤٣٨

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu le Tout-Puissant pour m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Au DOCTEUR HAMIDANE Hamida, mon directeur de mémoire, les mots me manquent pour vous exprimer ma gratitude.

Toutes ces années que j'ai passées à votre côté m'ont permis d'acquérir un esprit critique mieux orienté, une analyse plus claire, une vision de la vie différente de celle que j'avais il y a quelques années.

Du fond du cœur, je vous dis : Merci.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont pris de leur temps précieux pour porter un regard critique sur mon travail et suggérer de nouvelles pistes de réflexion

Monsieur le Professeur BOURSAS Farid, professeur au département de Génie Civil,

Monsieur le Professeur AYEB Belkheir, professeur au département de Génie Civil,

Merci à vous d'avoir accepté de faire partie de ce jury de mémoire.

Pour finir, je tiens à remercier profondément ma famille pour son soutien sans faille au cours de ces années. Sans vous, je n’aurais peut-être pas réussi à mener à bien ce projet. Je vous aime de tout mon cœur.

Dédicace :

Au terme de ce parcours académique, il m'est difficile d'exprimer toute ma gratitude envers celles et ceux qui m'ont soutenue, accompagnée et encouragée, et qui ont contribué, de près ou de loin, à ce que j'atteigne cette étape précieuse de ma vie.

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma reconnaissance, à mes parents bien-aimés -mes piliers, mes repères - pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices innombrables. À vous, toute ma gratitude éternelle.

À mes chers frères, Ali, Riyad et Aboudi, qui ont toujours été présents à mes côtés, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence rassurante et votre aide indéfectible.

À ma sœur adorée, Hajar, ma confidente et mon soutien au quotidien, merci pour ta tendresse et ta présence réconfortante dans ma vie.

Mes pensées vont aussi à mes précieuses amies, Chérine et Ghania, dont l'amitié sincère, la présence fidèle dans les moments de joie comme dans les épreuves, ont fait de vous bien plus que des amies : des sœurs de cœur.

Je tiens également à remercier chaleureusement mes camarades de parcours, en particulier Hasna, Sara et Aya, pour les moments de partage, de soutien et de complicité qui ont enrichi cette aventure universitaire.

À ma chère tante, qui a été pour moi comme une seconde mère, et à la famille de ma mère, dont les prières et l'affection m'ont toujours accompagnée, je vous adresse mes remerciements les plus sincères.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont laissé une empreinte lumineuse sur mon chemin, et à tous ceux et celles qui ont contribué à rendre cette réussite possible.

Chourfi Ouissame

Liste d'abréviations

Symbole / Abréviation	Définition
%	Pourcentage
AFNOR	Association Française de Normalisation
C&DW	*Construction and Demolition Waste* (Déchets de Construction et Démolition)
CSH	Silicate de Calcium Hydraté
E/C	Rapport Eau / Ciment
EN	Norme Européenne
ES	Équivalent de sable
GN	Granulats Naturels
GR	Granulats Recyclés
GR 20%	Granulats Recyclés avec 20 % de substitution
GR 30%	Granulats Recyclés avec 30 % de substitution
GR 40%	Granulats Recyclés avec 40 % de substitution
MD	Malaxage Double
MDM-P1	Malaxage Double Modifié – Procédé 1
MDM-P2	Malaxage Double Modifié – Procédé 2
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MN	Malaxage Normal
MPa	Mégapascal (Unité de Résistance)
NF EN 206+A2/CN	Norme Française relative au béton prêt à l'emploi
RCA	*Recycled Concrete Aggregates* (Granulats de Béton Recyclé)
TRC	Granulats Recyclés prétraités au Ciment
ZTI	Zone de Transition Interfaciale
mm	Millimètre

Liste des tableaux

Titres des Tableau	Page
Tableau 1.1 : Classification des gravillons recyclés.	**09**
Tableau 2.1 : Propriétés physiques du sable utilisé	**15**
Tableau 2.2 : Analyse granulométrique du sable	**15**
Tableau 2.3 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés	**16**
Tableau 2.4 : Analyse granulométrique des graviers naturels (8/15)	**17**
Tableau 2.5 : Analyse granulométrique des graviers naturels (15/25)	**17**
Tableau 2.6 : Propriétés physiques et mécaniques des graviers recyclés utilisés	**18**
Tableau 2.7 : Analyse granulométrique des graviers recyclés (8/15)	**19**
Tableau 2.8 : Analyse granulométrique des graviers recyclés (15/25)	**19**
Tableau 2 .9 : Composition des différents mélanges de béton	**22**
Tableau 2.10 : Désignation des différentes formules de béton, proportions des granulats et type de malaxage utilisé pour chaque mélange	**22**
Tableau 2.11 : Relation entre le rapport E/C et l'affaissement des différentes formulations	**31**

Liste des figures

Figure	Page
Figure 1.1 : Béton à base de matériaux recyclés	**7**
Figure 1.2 : Forme des granulats recyclés	**9**
Figure 2.1 : Apparence d'un sac de ciment d'ElmaLabiod	**14**
Figure 2.2 : Courbe granulométrique du sable utilisé	**16**
Figure 2.3 : Courbes granulométriques des graviers naturels (8/15) et (15/25) utilisés	**18**
Figure 2.4 : Courbes granulométriques des graviers recyclés (8/15) et (15/25) utilisés	**20**
Figure 2.5 : Malaxeur à béton utilisé	**23**
Figure 2.6 : Moule cubique	**24**
Figure 2.7 : Moule prismatique	**24**
Figure 2.8 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion pendant une minute	**25**
Figure 2.9 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion dans un mélange de ciment et d'eau pendant 5 minute	**27**
Figure 2.10 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion pendant une nuit complète	**29**
Figure 2.11 : Table vibrante	**30**
Figure 2.12 : Coulage et préparation des éprouvettes	**30**
Figure 2.13 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams	**31**
Figure 2.14 : Machine d'essai de compression	**32**
Figure 2.15 : Machine d'essai de flexion à 4 points	**33**
Figure 3.1: Comparaison de l'affaissement entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés.	**36**
Figure 3.2 : Comparaison de la résistance à la compression entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés.	**37**
Figure 3.3 : Comparaison de la résistance à la traction par flexion entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés	**38**
Figure 3.4 : Évolution de l'affaissement du béton selon le taux de granulats recyclés	**40**
Figure 3.5: Évolution de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés.	**41**

Figure 3.6 : Évolution de la résistance à la traction par flexion avec augmentation des granulats recyclés	**43**
Figure 3.7: Influence de la méthode de malaxage sur l'ouvrabilité du béton, évaluée à travers l'essai d'affaissement	**44**
Figure 3.8: Influence de la méthode de malaxage sur la résistance à la compression du béton	**45**
Figure 3.9 : Influence de la méthode de malaxage sur la résistance à la traction par flexion du béton.	**46**
Figure 3.10 : Comparaison de l'affaissement entre un béton avec granulat naturel, un béton avec 20 % de granulat recyclé non traité, et un béton avec granulat recyclé traité au ciment	**48**
Figure 3.11 : Comparaison de la résistance à la compression entre un béton à base de granulats naturels, de granulats recyclés non traités (20 %), et de granulats recyclés prétraités au ciment	**49**
Figure 3.12 : Comparaison de la résistance à la traction par flexion entre un béton à base de granulats naturels, de granulats recyclés non traités (20 %), et de granulats recyclés prétraités au ciment	**51**

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre des approches innovantes visant à promouvoir la construction durable à travers la réutilisation de matériaux issus de la démolition, notamment les granulats recyclés. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de trois paramètres essentiels sur les propriétés mécaniques du béton : le taux de substitution des granulats naturels, la méthode de malaxage adoptée, ainsi que le traitement préalable des granulats à l'aide d'un mélange ciment-eau.

Une campagne expérimentale a été menée en laboratoire, au cours de laquelle huit formulations de béton ont été élaborées avec différentes proportions de granulats recyclés. Trois méthodes de malaxage ont été comparées : malaxage normal, double, et double modifié. Certains granulats ont également subi un traitement initial visant à réduire leur absorption d'eau et à renforcer leur adhérence dans la matrice cimentaire.

L'évaluation a porté sur des essais mécaniques normalisés, notamment l'affaissement, la résistance à la compression et la traction par flexion. Les résultats ont montré qu'une augmentation du taux de substitution peut entraîner une dégradation des performances mécaniques, en particulier la résistance à la compression. Toutefois, l'application d'un traitement cimentaire et l'adoption d'un malaxage optimisé ont permis d'atténuer, voire d'inverser cette tendance, avec une nette amélioration des performances dans certains cas.

Cette étude confirme donc la faisabilité d'utiliser des granulats recyclés dans la production d'un béton performant, à condition d'un contrôle rigoureux des étapes de formulation et de traitement, ce qui ouvre la voie à une construction plus respectueuse de l'environnement.

Mots Clés :

Béton , Granulat recyclé , Méthode de malaxage , Prétraitement

Abstract :

This research contributes to innovative approaches aimed at promoting sustainable construction through the reuse of demolition-derived materials, particularly recycled aggregates. The primary objective of the study is to assess the influence of three key factors on the mechanical properties of concrete: the replacement ratio of natural aggregates, the mixing method used, and the pre-treatment of recycled aggregates by immersion in a cement-water mixture.

A comprehensive experimental program was conducted in the laboratory, during which eight concrete mixes were produced using varying proportions of recycled aggregates. Three mixing techniques were evaluated: normal mixing, double mixing, and modified double mixing. In addition, certain aggregates underwent initial treatment to reduce water absorption and enhance their bonding within the cementitious matrix.

Mechanical performance was assessed through standardized tests, including slump, compressive strength, and flexural tensile strength. The results revealed that increasing the replacement ratio tends to negatively impact certain mechanical characteristics, especially compressive strength. However, applying cement-based treatment to the aggregates and using an optimized mixing method helped mitigate this effect and, in some cases, significantly improved concrete performance.

This study confirms the practical feasibility of incorporating recycled aggregates in the production of high-quality concrete, provided that the formulation and treatment processes are carefully controlled. It thus supports the shift toward more environmentally responsible construction practices.

Keywords:

Concrete , Recycled aggregate , Mixing method ,Pretreatment , Cement

الملخص :

تندرج هذه الدراسة ضمن التوجهات الحديثة نحو تطوير حلول بناء مستدامة من خلال إعادة استخدام المواد الناتجة عن هدم المنشآت، وعلى رأسها الركام المعاد تدويره. يهدف هذا البحث إلى تقييم مدى تأثير ثلاثة عوامل أساسية على الخصائص الميكانيكية للخرسانة، وهي :نسبة استبدال الركام الطبيعي، طريقة الخلط المعتمدة، والمعالجة الأولية للركام بواسطة خليط من الإسمنت والماء.

تم تنفيذ برنامج تجريبي شامل داخل المخبر، تم خلاله إعداد ثماني تركيبات خرسانية مختلفة، اعتمدت نسبًا متفاوتة من الركام المعاد تدويره. كما تم اعتماد ثلاث تقنيات للخلط: الخلط العادي، الخلط المزدوج، والخلط المزدوج المعدّل. وخضع جزء من الركام لعملية معالجة مسبقة بغرض تقليل امتصاصه للماء وتعزيز ترابطه داخل العجينة الإسمنتية.

شملت مرحلة التقييم مجموعة من الاختبارات الميكانيكية المعيارية، أهمها :اختبار الهبوط، مقاومة الضغط، ومقاومة الشد بالانحناء .وقد أظهرت النتائج أن ارتفاع نسبة الاستبدال يؤثر سلبًا على بعض الخواص الميكانيكية، خاصة مقاومة الضغط. غير أن اعتماد معالجة إسمنتية للركام، إلى جانب طريقة خلط محسّنة، أسهم بشكل واضح في الحد من هذا التأثير وتحسين أداء الخرسانة في بعض الحالات.

تعكس هذه النتائج الإمكانات الواقعية لاعتماد الركام المعاد تدويره كبديل جزئي في تصنيع خرسانة ذات خصائص مقبولة، شريطة التحكم الجيد في مراحل التحضير والمعالجة، بما يدعم توجهات الاستدامة ويُسهم في تقليل الأثر البيئي لقطاع البناء.

الكلمات المفتاحية:

الإسمنت,لمعالجة المسبقة, طريقة الخلط, الركام المعاد تدويره,الخرسانة

Table des matières

Remerciement

Dédicaces

Liste d'abréviations 5
Liste des tableaux 6
Liste des figures 7
Résumé : 9
Table des matières 12
Introduction Générale 15
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE 3
1. Introduction : 4
1.1 Recyclage des déchets de construction : 4
1.1.1. Recyclage des déchets de chantier : 4
1.1.2. Origine de la production de déchets : 5
1.1.3. Les types des déchets de chantier : 5
1.1.3.1. Déchets inertes : 5
1.1.3.2. Déchets organiques : 6
1.1.3.3. Les déchets dangereux : 6
1.1.4. Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition : 6
1.1.5. Béton à base de matériaux recyclés : 7
1.1.6. Recyclage des granulats de béton : 7
1.1.7. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil : 7
1.1.8. Description d'un granulat recyclé de béton 8
1. 2 Béton à base de granulats recyclés : 9
1.2.1. Types de granulats recyclés : 9
1.2.2 Propriétés et performances : 10
1.2.3 Réglementation et recommandations : 10
1.2.4 Informations complémentaires sur les guides d'utilisation des granulats recyclés : 10
1.3 Les méthodes d'amélioration de la qualité des bétons à base de granulats recyclés : 11
CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPRIMANTALES 14
2.1. Introduction : 14
2.2. Matériaux utilisés : 14

2.2.1. Le ciment : 14
2.2.2. Les granulats : 15
2.2.2.1. Le sable : 15
2.2.2.2 Les granulats naturels : 16
2.2.2.3 Les granulats recyclés : 18
2.2.3. L'eau de gâchage : 20
2.2.4. Le béton : 20
2.2.4.1. Béton à base de granulats naturels : 21
2.2.4.2. Béton à base de granulats recyclés : 21
2.2.4.3. Béton à base de granulats recyclés traités : 21
2.2.5. Composition des bétons : 21
2.2.7. Confection des éprouvettes : 23
2.2.7.1. Méthode de Malaxage normal : 24
2.2.7.2. Méthode de malaxage double : 25
2.2.7.3.Méthode de malaxage double modifié -P1 : 26
2.2.7.4. Méthode de malaxage double modifié -P 2 : 27
2.2.7.5. Traitement des granulats recyclés au ciment : 28
2.3. Méthodes expérimentales 31
2.3.1. Affaissement au cône d'Abrahms 31
2.3.2. Résistance à la compression 32
2.3.3. Résistance à la traction par flexion : 32
CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS 34
3.1. Introduction 35
3.2. Effet des granulats recyclés 35
3.2.1. Affaissement 35
3.2.2. Résistance à la compression 37
3.2.3. Résistance à la traction par flexion 38
3.3. Effet du pourcentage de substitution 39
3.3.1. Affaissement 39
3.3.2. Résistance à la compression 41
3.3.3. Résistance à la traction par flexion 42
3.4. Effet de la méthode de malaxage 44
3.4.1. Affaissement 44
3.4.2. Résistance à la compression 45
3.4.3. Résistance à la traction par flexion 46
3.5. Effet du traitement au ciment 47
3.5.1. Affaissement 47

3.5.2. Résistance à la compression.....49
3.5.3. Résistance à la traction par flexion 50
Conclusion Générale.....52
Réferance :.....55

Introduction Générale

Introduction Générale

Au fil des dernières décennies, le domaine du bâtiment et des travaux publics (BTP) a connu une croissance marquée, engendrant une demande croissante en matériaux naturels et une accumulation significative de déchets solides, en particulier ceux générés par les opérations de démolition, de rénovation et de réhabilitation. Cette situation soulève des enjeux environnementaux majeurs, à une époque où la gestion durable des ressources, la lutte contre le changement climatique et la réduction des volumes de déchets deviennent des objectifs incontournables.

Dans cette perspective, la valorisation des déchets de construction notamment le recyclage des bétons démolis se présente comme une solution pertinente, à la fois sur les plans écologique, économique et technique. Cette démarche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, visant à limiter l'exploitation des ressources naturelles tout en offrant une seconde vie aux matériaux.

L'intégration de granulats recyclés dans la formulation de nouveaux bétons suscite aujourd'hui un intérêt croissant. Néanmoins, cette pratique reste confrontée à certaines limitations, notamment liées à la variabilité des propriétés des granulats, à leur porosité plus élevée ainsi qu'à la présence de pâte de ciment résiduelle, qui peuvent affecter les performances du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Le présent travail expérimental s'attache ainsi à étudier l'impact de plusieurs paramètres clés sur les performances mécaniques du béton recyclé. Parmi ces paramètres figurent le taux de remplacement des granulats naturels, le mode de malaxage adopté (classique, double ou double modifié), ainsi que le traitement préalable appliqué aux granulats recyclés, consistant à les immerger dans un mélange d'eau et de ciment.

À travers des essais normalisés portant sur l'affaissement, la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion, cette étude ambitionne de proposer des approches concrètes visant à optimiser les propriétés des bétons recyclés, tout en contribuant à leur intégration progressive dans les pratiques de construction durable.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux : le premier présente un état de l'art sur les granulats recyclés et leur impact sur les propriétés du béton ; le deuxième détaille la méthodologie expérimentale adoptée, incluant les matériaux, les formulations et les protocoles d'essais ; enfin, le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus et à la discussion des effets des différents paramètres étudiés.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :

Le secteur de la construction est l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et producteurs de déchets solides, notamment à travers les activités de démolition et de rénovation. Face aux enjeux environnementaux croissants et à la nécessité d'une transition vers un développement durable, le recyclage des déchets de construction s'impose comme une alternative stratégique pour limiter l'impact écologique tout en valorisant les matériaux.

Parmi les solutions émergentes, l'utilisation de granulats recyclés issus du concassage de bétons anciens représente une voie prometteuse pour la fabrication de nouveaux bétons.

Cependant, la variabilité des propriétés physiques et mécaniques de ces granulats peut affecter la qualité du béton obtenu. Ainsi, plusieurs méthodes d'amélioration ont été développées afin d'optimiser les performances de ces bétons recyclés.

Dans cette optique, la méthode de malaxage joue un rôle déterminant dans l'obtention d'un béton homogène et performant. Ce chapitre se propose donc de poser le cadre théorique de la recherche en explorant trois axes fondamentaux : le recyclage des déchets de construction, les bétons à base de granulats recyclés, et enfin les techniques d'amélioration de leur qualité, en préparation à l'étude expérimentale de l'effet de la méthode de malaxage sur les propriétés mécaniques de ces bétons.

1.1 Recyclage des déchets de construction :

1.1.1. Recyclage des déchets de chantier :

L'environnement, la protection de la nature et le développement durable jouent un rôle essentiel dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction. Avec l'augmentation constante de la population mondiale une urbanisation accrue se développe et par surcroît les déchets en général augmentent. Le secteur de bâtiment, lié au développement économique et industriel, génère une grande diversité et des quantités importantes de déchets de chantiers qui constituent une part importante des coûts de production des déchets solides dans le monde. Les déchets de construction et de démolition (C&DW) représentent 90 % de ces déchets de chantiers, 65 % de ces déchets proviennent de la démolition, 28 % de la réhabilitation des ouvrages et seulement 7 % de la construction neuve. Une petite partie de ces déchets qu'on y trouve est recyclée, et environ 90 % d'entre eux sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage ou même sont

éliminés en décharges sauvages. Face aux quantités toujours croissantes des déchets, les capacités des décharges s'épuisaient de plus en plus, surtout aux alentours des grandes agglomérations. Réduire le volume des C&DW en les réutilisant est un enjeu majeur [1]. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dits des trois R :

- ✓ Réduire.
- ✓ Réutiliser.
- ✓ Recycler.[2]

1.1.2. Origine de la production de déchets :

La production des déchets est inévitable pour les raisons suivantes :

- ✓ **Biologique :** tout cycle de vie produit des métabolites ;
- ✓ **Chimique** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès qu'on veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième
- ✓ **Technologique** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet
- ✓ **Economique** : les produits ont une durée de vie limitée
- ✓ **Ecologique** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique
- ✓ **Accidentelle** : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchet.[3]

1.1.3. Les types des déchets de chantier :

1.1.3.1. Déchets inertes :

C'est des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas bio dégradable et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants :

-Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres et granulats non pollués et sans mélange, les enrobés bitumeux, sans goudron…[4]

1.1.3.2. Déchets organiques :

Il s'agit de :

-Déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)

- Déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'oeufs, etc.…

-Boues

Ces déchets sont valorisables par réduction à la source (compostage individuel), compostage des déchets collectés pour revente du compost, traitement pour épandage agricole, méthanisation…).[4]

1.1.3.3. Les déchets dangereux :

- Déchets industriels spéciaux : Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses sur une liste fixée en conseil d'état. Exemples : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.…

- Déchets ménagers spéciaux : Ce sont les déchets à risques contenus dans les déchets ménagers tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néons, produits de nettoyage.[4]

1.1.4. Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition :

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets, le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf. Les études et les recherches pour le recyclage et la valorisation des déchets de construction pour leur utilisation une autre fois, d'ou certain pays ont introduit ces nouvelles techniques pour la nouvelle construction comme les USA, le Japon, Hollande, L'Allemagne.[5]

1.1.5. Béton à base de matériaux recyclés :

Le béton à base de matériaux recyclés est une solution écologique de plus en plus adoptée dans le secteur de la construction pour réduire l'empreinte environnementale. Il intègre des déchets industriels ou de déconstruction, comme des granulats recyclés (béton concassé, briques) ou des ajouts cimentaires (cendres volantes, laitier), en remplacement des matériaux traditionnels. Bien que ces bétons présentent des avantages majeurs, tels que la diminution des déchets et la préservation des ressources naturelles, ils peuvent avoir une résistance mécanique légèrement inférieure et nécessitent un traitement rigoureux pour garantir leur durabilité.[6]



Figure 1.1 : Béton à base de matériaux recyclés

1.1.6. Recyclage des granulats de béton :

- **Collecte et tri** : Les déchets inertes de construction et démolition sont collectés sur les chantiers. Ils sont triés pour éliminer les matériaux indésirables (plastiques, bois, métaux, matières organiques).
- **Concassage et criblage :** Les matériaux triés sont broyés puis tamisés pour obtenir des granulats de taille homogène adaptés à leur réutilisation.
- **Stockage :** Les granulats recyclés sont stockés en silos ou en tas dans des sites de production de béton, d'enrobés ou de remblais [7]

1.1.7. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil :

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Le granulat recyclé ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter l'exploitation des gisements naturels mais il peut ralentir ce processus. Par

exemple, la Belgique produit annuellement environ 72 millions de tonnes de granulats tous types confondus.

La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- ✓ Granulats naturels : environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58%), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes
- ✓ Granulats marins : environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5%)
- ✓ Granulats artificiels : environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25%)
- ✓ Sables/graves : environ 11 millions de tonnes par an (+/- 14,75%)
- ✓ Granulats recyclés : 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5%).

Ainsi le recyclage des déchets comme granulats pour les routes ou la construction permet :

- ✓ Une économie de la ressource naturelle
- ✓ Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre
- ✓ Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants
- ✓ La réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO2 du fait que :

- ✓ Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO2 attribuée au transport de granulats.
- ✓ Le béton concassé est susceptible de piéger le CO2 en se carbonatant
- ✓ La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO2 des cimenteries.[8][9]

1.1.8. Description d'un granulat recyclé de béton

Les granulats recyclés de béton sont des matériaux de construction obtenus par le traitement et le concassage de béton de démolition. De couleur grisâtre et de forme angulaire, ces granulats se distinguent par leur surface rugueuse et poreuse, avec des particules de mortier adhérentes. Leur composition comprend principalement des fragments minéraux (70-90%) et de la pâte de ciment résiduelle (10-30%), avec une teneur limitée en impuretés après traitement. Bien qu'ils présentent une absorption d'eau plus élevée (3-8%) et une résistance mécanique légèrement inférieure aux granulats naturels,

leurs propriétés spécifiques - comme une meilleure adhérence avec la nouvelle pâte de ciment - en font une alternative écologique intéressante.[10]

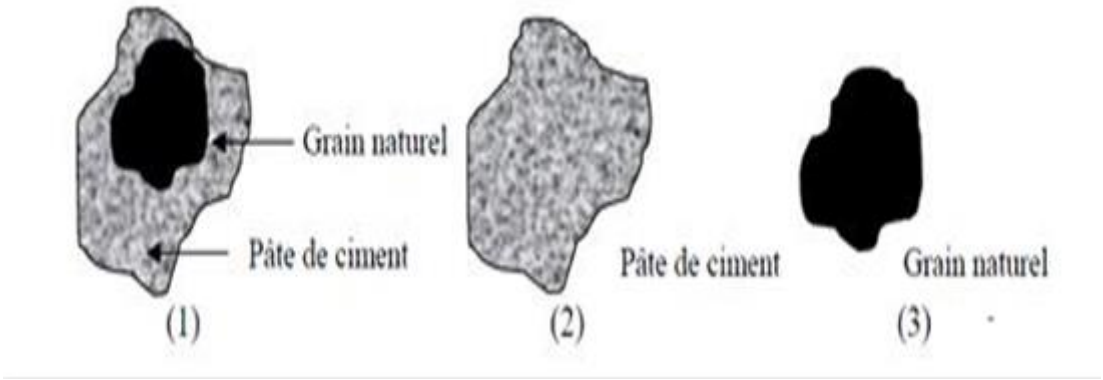


Figure 1 .2 : Forme des granulats recycles

1. 2 Béton à base de granulats recyclés :

Utilisent des granulats issus de la transformation de matériaux inorganiques récupérés, principalement des débris de béton concassé. Ces granulats recyclés peuvent remplacer partiellement ou totalement les granulats naturels dans la formulation du béton tout en respectant les normes en vigueur, notamment la norme NF EN 206+A2/CN (2022) qui encadre leur utilisation en France.[11]

1.2.1. Types de granulats recyclés :

Les granulats recyclés se divisent en deux grandes catégories

Granulats recyclés « purs » : constitués uniquement de matériaux recyclés.

Granulats de prémélange : mélange de granulats naturels et recyclés selon des proportions définies.[11]

Concernant la classification des gravillons recyclés selon leur teneur en béton concassé, la norme distingue généralement trois types, mais il semble que la classification mentionnée soit inversée. Voici la classification correcte :

Tableau 2.1 : Classification des gravillons recyclés.

Type	Teneur minimale en béton concassé	Usage
Type 1	≥ 70%	Usage courant, y compris en structure
Type 2	≥ 90%	Usage renforcé, haute qualité
Type 3	≥ 95%	Usage très spécifique, qualité optimale[12]

Note importante : Les granulats de Type 3 (≥ 95% béton concassé) sont les plus purs et peuvent être utilisés en structure, tandis que les granulats avec une teneur inférieure à 70% ne sont généralement pas autorisés pour des applications structurelles.[13]

1.2.2 Propriétés et performances :

Le béton fabriqué avec des granulats recyclés présente une absorption d'eau plus élevée et une perméabilité accrue, pouvant atteindre jusqu'à deux fois celles du béton traditionnel.

Grâce à l'optimisation du mélange -ajustement de la quantité de pâte, utilisation d'adjuvants spécifiques, et séquence de malaxage adaptée - il est possible d'obtenir des bétons dont les performances mécaniques et la durabilité sont comparables à celles du béton classique, notamment pour des applications telles que les trottoirs, pavages ou ouvrages non porteurs.

L'utilisation de granulats recyclés permet de réduire les coûts de production et l'empreinte environnementale du béton, contribuant ainsi à une construction plus durable.[14]

1.2.3 Réglementation et recommandations :

Les pourcentages maximaux d'incorporation de granulats recyclés dans le béton dépendent des classes d'exposition environnementale et du type de granulat recyclé utilisé, conformément à la norme NF EN 206+A2/CN (2022).

Le programme national Recybéton fournit des recommandations détaillées pour chaque étape de la chaîne de valeur des granulats recyclés, depuis la collecte jusqu'à la formulation du béton, afin de garantir la conformité, la qualité et la performance des bétons recyclés.

En résumé, les bétons à base de granulats recyclés représentent une solution normée, viable et efficace pour réduire l'impact environnemental de la construction, tout en maintenant des performances techniques adaptées aux usages courants, sous réserve d'une formulation rigoureuse et d'un contrôle qualité strict.[15] [16]

1.2.4 Informations complémentaires sur les guides d'utilisation des granulats recyclés :

Le programme Recybéton est la référence nationale en France pour l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Il propose plusieurs guides et documents techniques qui couvrent :

La collecte et le tri des déchets de béton pour assurer une qualité optimale des granulats recyclés.

Les critères de qualité et de classification des granulats recyclés, permettant d'adapter leur usage selon la nature des ouvrages.

Les bonnes pratiques de formulation du béton intégrant des granulats recyclés, incluant des recommandations sur les dosages, l'utilisation d'adjuvants et les méthodes de malaxage.

Les contrôles qualité à chaque étape, de la production des granulats à la fabrication du béton, pour garantir la conformité aux normes.

Les aspects environnementaux et économiques, mettant en avant les bénéfices du recyclage dans la réduction de l'empreinte carbone et des coûts.

Ces guides sont régulièrement mis à jour pour intégrer les avancées techniques et réglementaires, et sont disponibles auprès des organismes professionnels tels que l'Association Française du Béton (AFB) et le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB).[17]

1.3 Les méthodes d'amélioration de la qualité des bétons à base de granulats recyclés :

Afin d'améliorer les performances des granulats de béton recyclés (RCA), deux stratégies principales sont généralement privilégiées dans la littérature scientifique. La première consiste à éliminer la couche superficielle altérée, résultant de la présence de l'ancien mortier de ciment encore adhérent au granulat. Cette couche est souvent poreuse, faiblement compacte, et constitue l'un des principaux facteurs de dégradation des propriétés mécaniques et de durabilité du béton recyclé. La seconde stratégie vise, non pas à éliminer cette zone de transition faible, mais à la renforcer à travers des traitements de surface adaptés.

Dans cette optique, plusieurs chercheurs ont exploré des techniques de traitement chimique des granulats recyclés. Une méthode prometteuse consiste à imprégner ces granulats avec une solution contenant de la fumée de silice, un sous-produit industriel très fin et riche en silice amorphe réactive. Selon les travaux rapportés par [18], ce traitement a permis d'obtenir une amélioration notable de la résistance à la compression du béton recyclé, atteignant jusqu'à 30 % à 7 jours et 15 % à 28 jours, en comparaison avec les échantillons de référence non traités. Cette amélioration est attribuée à la réaction pouzzolanique entre la fumée de silice et l'hydroxyde de calcium présent dans l'ancien mortier, ce qui conduit à la formation supplémentaire de produits cimentaires (CSH) qui densifient la microstructure.

D'autres approches ont également été étudiées, notamment l'utilisation de verre soluble (Na2O. NSiO2), qui agit comme un agent de renforcement de la surface des granulats

recyclés [19]. Ce traitement a permis de réduire significativement l'absorption d'eau ainsi que la valeur de concassage des granulats, deux paramètres clés liés à la durabilité du béton.

Par ailleurs, une méthode plus élaborée consiste à enrober les granulats recyclés dans un coulis cimentaire formulé à base de liants hydrauliques et pouzzolaniques, tels que le ciment Portland, les cendres volantes, la fumée de silice ou encore le laitier de haut fourneau. Cette approche, appliquée en deux étapes, vise à pénétrer et combler les pores de la couche résiduelle de mortier, tout en renforçant la zone de transition interfaciale (ZTI) entre le granulat et la pâte de ciment. Les observations réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) ont mis en évidence une densification significative de cette zone critique, généralement sujette à des faiblesses mécaniques et à la pénétration de fluides [20].

En somme, l'ensemble de ces travaux met en évidence le potentiel réel des traitements de surface pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons recyclés, en agissant directement sur la microstructure des granulats et leur interface avec la matrice cimentaire.

Contrairement aux méthodes de renforcement évoquées précédemment, certains chercheurs ont exploré des approches alternatives visant à éliminer le vieux mortier adhérant à la surface des granulats recyclés. Parmi ces méthodes, on peut citer le pré-trempage des granulats dans des solutions acides telles que le HCI, le H_2SO_4 ou le H_3PO_4 [21], dans le but de faciliter la récupération des granulats d'origine à partir du béton démoli et d'en augmenter le taux de récupération [22].

Par ailleurs, une technique innovante de modification de surface a été développée, visant à renforcer l'effet de décollement du mortier sans altérer les propriétés mécaniques de la matrice au cours du processus de broyage. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un type d'huile combiné à un agent de surface de type silane, appliqué sur les granulats avant le coulage du béton. Les résultats ont montré une amélioration significative de la qualité des granulats récupérés grâce à cette approche.

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPRIMANTALES

2.1. Introduction :

Dans le cadre de la recherche de solutions durables pour le secteur de la construction, l'utilisation de granulats recyclés s'impose comme une alternative à la fois écologique et économique. Ce travail expérimental en laboratoire a pour objectif d'étudier l'effet des méthodes de malaxage sur les propriétés mécaniques du béton contenant des granulats recyclés. Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire de béton, en mettant l'accent sur l'interaction des constituants sous différentes conditions de malaxage, dans le but d'évaluer l'efficacité de ces méthodes pour améliorer les performances mécaniques d'un béton durable.

2.2. Matériaux utilisés :

2.2.1. Le ciment :

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment Portland de type CPJ-CEM II/A, conforme à la norme NA 442-2000. Il est produit par la cimenterie d'ElmaLabiod, située dans la wilaya de Tébessa. Il est obtenu par le mélange de clinker finement broyé avec certains ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse à des fins de régulation de prise. Ce type de ciment est adapté aux différents ouvrages de génie civil.

La résistance caractéristique du ciment après 28 jours de cure à l'eau est de 42,5 MPa, tandis que la surface spécifique du ciment varie entre 2 900 et 3 100 cm²/g.



Figure 2.1 : Apparence d'un sac de ciment d'ElmaLabiod.

2.2.2. Les granulats :

2.2.2.1. Le sable :

Le sable utilisé pour la préparation du béton est un sable naturel de granulométrie (0/5) provenant de la carrière d'Elmalabiod , située dans la wilaya de Tébessa. Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont les suivantes :

Tableau 2.1 : Propriétés physiques du sable utilisé.

Masse volumique apparente($Kg/m3$)		**1434 kg/m³**
Masse volumique spécifique($Kg/m3$)		**2487,51 kg/m³**
Equivalent de sable (%)	**Esv (%)**	**88,02%**
	Esp (%)	**85,62%**
Module de finesse		**3,14**

L'analyse granulométrique du sable a résulté dans la courbe granulométrique suivante :

Tableau 2.2: L'analyse granulométrique du sable

Diamètre	Refus (g)	Refus C (g)	Refus C(%)	Tamisat (%)
6,3	7	7	0,14	99,86
5	9	16	0,32	99,68
4	16	32	0,64	99,36
3,15	39	71	1,42	98,58
2,5	20	91	1,82	98,18
1,6	166	257	5,14	94,86
0,63	1351	1608	32,16	67,84
0,315	2184	3792	75,84	24,16
0,08	1043	4835	96,7	3,3
Fon	165	5000	100	0

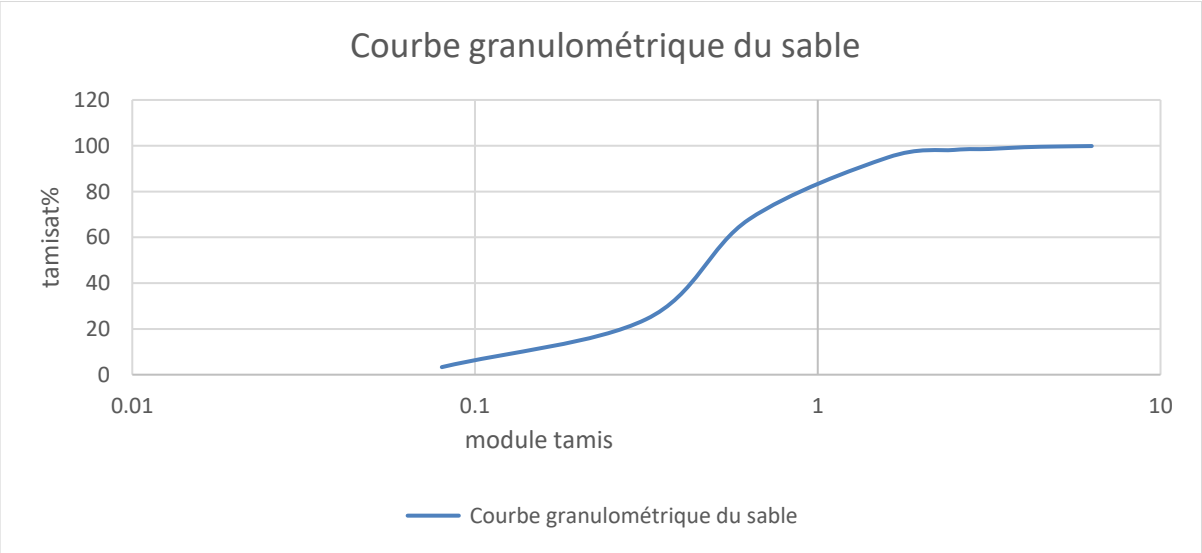


Figure 2.2 : Courbe granulométrique du sable utilisé

2.2.2.2 Les granulats naturels :

Pour la réalisation du béton, deux types de graviers naturels provenant de la carrière d'Elmalabiod ont été utilisés : (8/15) et (15/25). Les propriétés physiques et mécaniques sont compilées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.3: Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés

Classe de graviers	**8/15**	**15/25**
Masse volumique apparente($Kg/m3$)	1322,46	1434,8
Masse volumique spécifique($Kg/m3$)	2651,51	2466,66
Coefficient d'absorption d'eau (%)	2,06	2,03

L'analyse granulométrique des graviers a donné les courbes granulométriques suivantes :

Tableau 2.4: L'analyse granulométrique des graviers naturels (8/15)

diamètre(mm)	refus(g)	refus c (g)	refus c (%)	tamisa (%)
20	9	9	0,18	99,82
16	195	204	4,08	95,92
14	689	893	17,86	82,14
12,5	1401	2294	45,88	54,12
10	1864	4158	83,16	16,84
8	450	4608	92,16	7,84
6,3	334	4942	98,84	1,16
5	27	4969	99,38	0,62
Fon	26	4995	99,9	0,1

Tableau 2.5 : L'analyse granulométrique des graviers naturels (15/25)

diamètre(mm)	Refus (g)	Refus C (g)	Refus C(%)	Tamisa (%)
25	68	68	1,36	98,64
20	1712	1780	35,6	64,4
16	2880	4660	93,2	6,8
14	229	4889	97,78	2,22
12,5	55	4944	98,88	1,12
10	18	4962	99,24	0,76
Fon	38	5000	100	0

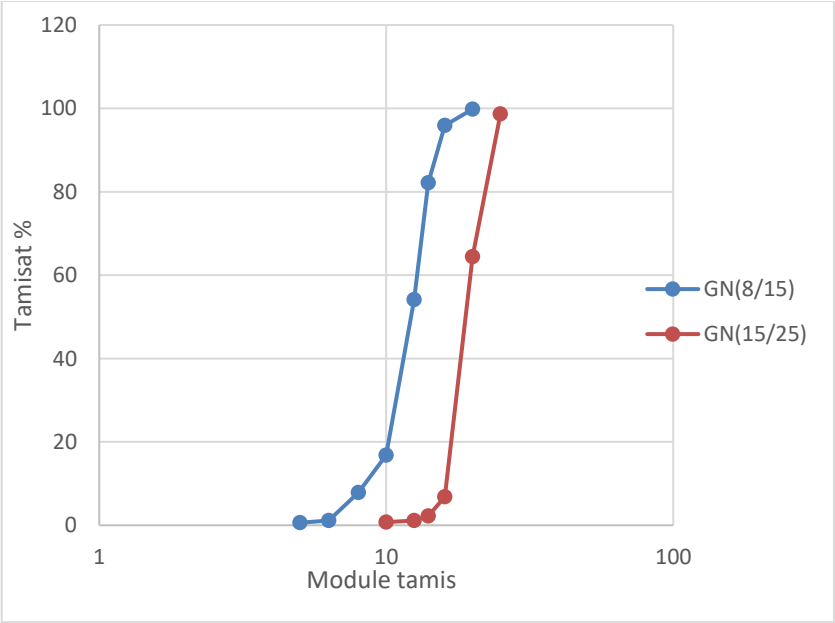


Figure 2.3 : courbes granulométriques des graviers naturels (8/15) et (15/25) utilisés

2.2.2.3 Les granulats recyclés :

Il existe deux classes de graviers (8/15) et (15/25), produits par le concassage de déchets de béton, puis isolés par tamisage. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont les suivantes :

Tableau 2.6 : propriétés physiques et mécaniques des graviers recyclés utilisés

Classe de graviers	8/15	15/25
Masse volumique apparente ($\boldsymbol{Kg/m3}$)	1062,93	1133,6
Masse volumique spécifique ($\boldsymbol{Kg/m3}$)	2500	2038
Coefficient d'absorption d'eau (%)	2,26	2,18

L'analyse granulométrique des graviers recyclés a donné les courbes granulométriques suivantes :

Tableau 2.7 : L'analyse granulométrique des graviers recycles (8/15)

diamètre(mm)	refus(g)	refus c (g)	refus c (%)	tamisa (%)
20	6	6	0,12	99,88
16	152	158	3,16	96,84
14	842	1000	20	80
12,5	1294	2294	45,88	54,12
10	1955	4249	84,98	15,02
8	437	4686	93,72	6,28
6,3	288	4974	99,48	0,52
5	21	4995	99,9	0,1
Fon	5	5000	100	0

Tableau 2.8 : L'analyse granulométrique des graviers recycles (15/25)

diamètre(mm)	refus(g)	refus c (g)	refus c (%)	tamisa (%)
25	64	64	1,28	98,72
20	1345	1409	28,18	71,82
16	2792	4201	84,02	15,98
14	601	4802	96,04	3,96
12,5	153	4955	99,1	0,9
10	25	4980	99,6	0,4
Fon	20	5000	100	0

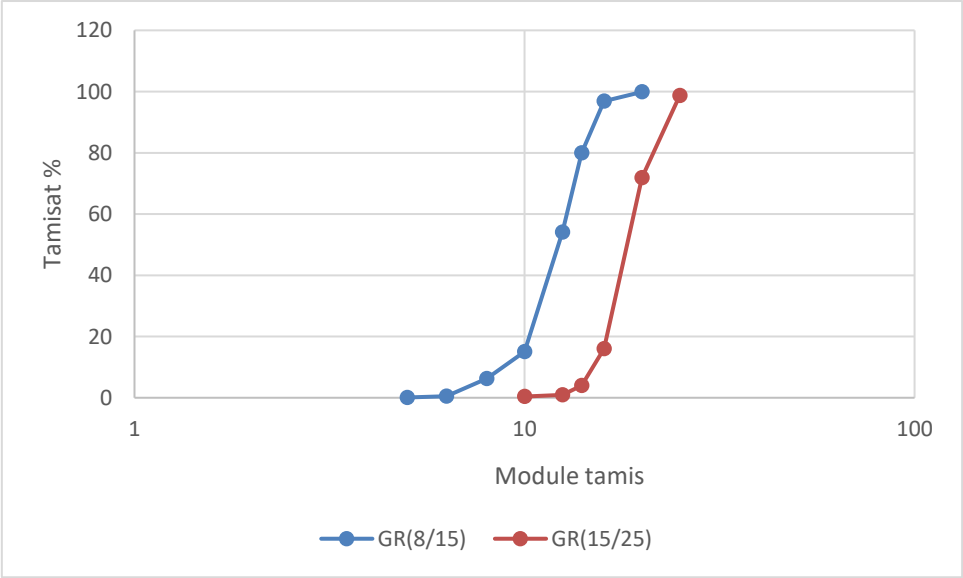


Figure 2.4 : courbes granulométriques des graviers recycles (8/15) et (15/25) utilisés

2.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet du laboratoire des matériaux de construction de l'université Larbi Tébessi de Tébessa. Elle est considérée, en principe, comme exempte d'impuretés. Cependant, la température de l'eau n'a pas été contrôlée lors des opérations de malaxage.

2.2.4. Le béton :

Le béton est un matériau composite dont les propriétés physiques, chimiques et mécaniques varient en fonction des composants utilisés. Il est principalement constitué de granulats (gravier et sable), de ciment et d'eau de gâchage. Des adjuvants sont souvent ajoutés pour améliorer certaines propriétés ou acquérir de nouvelles propriétés afin de s'adapter à des conditions spécifiques.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs compositions ont été préparées en utilisant les composants mentionnés ci-dessus afin d'examiner l'effet des granulats recyclés sur le béton, ainsi que l'influence des différentes méthodes de malaxage sur les performances du béton à base de ce type de granulats.

Quatre catégories de formulations de béton ont été étudiées :

1. Béton à base de granulats naturels à 100 % et mixé par un malaxage normal (MN).

2. Béton contenant des granulats recyclés à des pourcentages de 20 %, 30 % et 40 % et mixé par un malaxage normal (MN).

3. Béton avec 20 % de granulats recyclés et mixé avec différentes méthodes de malaxage : malaxage normal (MN), malaxage double (MD), malaxage double modifié (MDM-P1, MDM-P2).

4. Béton à base de granulats recyclés traités avec du ciment.

2.2.4.1. Béton à base de granulats naturels :

Cette catégorie a été utilisée comme étalon pour la comparaison entre les propriétés des deux autres catégories.

2.2.4.2. Béton à base de granulats recyclés :

Dans cette catégorie, plusieurs mélanges ont été réalisés en fonction du type et du pourcentage de substitution des granulats recyclés :

Béton à base de granulats recyclés pour des pourcentages de substitution de 20 %, 30 % et 40 %.

2.2.4.3. Béton à base de granulats recyclés traités :

Plusieurs mélanges ont été réalisés dans cette catégorie, en fonction du type de granulats recyclés. Le taux de substitution des granulats naturels a été fixé à 20 %. Les mélanges confectionnés sont les suivants :

- béton à base de granulats recyclés avec malaxage double
- béton à base de granulats recyclés avec malaxage double.
- Béton à base de granulats recyclés avec malaxage double modifié -P1
- Béton à base de granulats recyclés avec malaxage double modifié -P2.
- Béton à base de granulats recyclés traités au ciment.

2.2.5. Composition des bétons :

La composition du béton a été calculée à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse. Pour les différents mélanges, un rapport eau/ciment (E/C) identique a été adopté afin d'étudier l'effet des granulats recyclés, traités ou non, sur l'ouvrabilité du béton.

Le tableau (2.5) donne la composition du béton à base de granulats naturels. La composition des différents mélanges réalisés est identique à celle du béton de référence. Le tableau (2.5) donne la désignation et les proportions des différents types de granulats des différents mélanges de béton réalisés.

Tableau 2.9 : Composition des différents mélanges de béton.

Constituant	**Dosage $kg/m3$de béton**
Ciment	350 kg
Eau	208 l
Sable 0/5	706 kg
Gravier 8/15	404 kg
8Gravier 15/25	769 kg

Dans cette étude, huit mélanges ont été préparés en utilisant trois méthodes de malaxage différentes, à savoir : le malaxage ordinaire, le malaxage double et le malaxage double modifié.

Tableau 2.10 : Désignation des différentes formules de béton, proportions des granulats et type de malaxage utilisé pour chaque mélange

Mélange	**Gravier Naturels** GN	**Gravier recyclé** GR	**Méthode de malaxage**
GN	100	0	MN
GR 20%	80	20	MN
GR 30%	70	30	MN
GR 40%	60	40	MN
GRD	80	20	MD
GRMD-P1	80	20	MDM-P1
GRMD-P2	80	20	MDM-P2
TRC	80	20	MN

2.2.7. Confection des éprouvettes :

Dans cette étude, un malaxeur à béton a été utilisé pour mélanger les différents constituants du béton. Ce type d'appareil permet de gagner du temps et d'assurer un mélange plus homogène. La figure 2.5 montre le malaxeur utilisé.



Figure 2.5 : Malaxeur à béton utilisé.

Dans cette étude, des éprouvettes cubiques (10 × 10 × 10 cm) ont été confectionnées pour l'essai de compression et des éprouvettes prismatiques (10 × 10 × 40 cm) pour l'essai de flexion. La confection des éprouvettes a été réalisée conformément à la norme EN 12390-2 (2001). Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau à une température de 21 °C pendant 28 jours.



Figure2.6 : Moule cubique

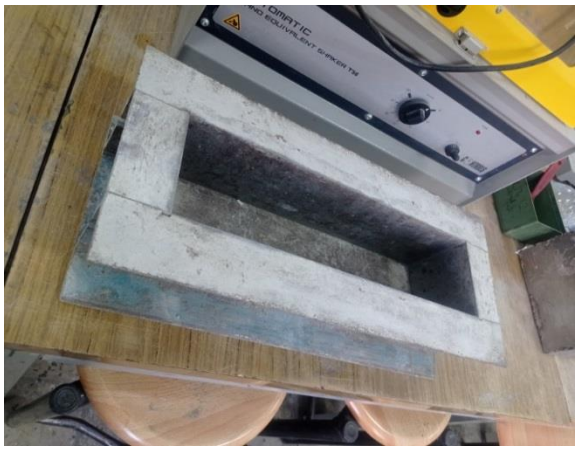


Figure 2.7 : moule prismatique

Dans le cadre de cette étude expérimentale, huit formulations de béton ont été réalisées afin d'analyser l'impact des différentes méthodes de malaxage sur les propriétés mécaniques du béton. Pour chaque formulation, six éprouvettes ont été confectionnées : trois éprouvettes cubiques pour l'essai de compression et trois éprouvettes prismatiques pour l'essai de flexion. Trois procédés de malaxage distincts ont été mis en œuvre et feront l'objet d'une présentation détaillée dans les sections suivantes :

2.2.7.1. Méthode de Malaxage normal :

La méthode de malaxage ordinaire a été appliquée pour la préparation de quatre formulations de béton, en variant les proportions de granulats naturels et recyclés. Le malaxage a été réalisé dans un malaxeur électrique, selon un protocole rigoureux visant à assurer l'homogénéité du mélange.

Dans un premier temps, les granulats ont été introduits progressivement dans la cuve du malaxeur, en respectant un ordre décroissant de granulométrie (des plus gros aux plus fins), afin de favoriser une répartition optimale des particules solides. Un prémélange manuel a ensuite été effectué à l'aide d'une truelle, en insistant particulièrement sur les zones périphériques de la cuve, afin d'éviter toute accumulation de matière non mélangée.

Le ciment a ensuite été ajouté et mixé à sec avec les autres constituants. Puis l'eau est incorporée de manière fractionnée. Le malaxage a été poursuivi jusqu'à obtention d'une pâte homogène, sans grumeaux ni ségrégation apparente.

La consistance du béton frais a été évaluée à l'aide du cône d'Abrahams. Ce dernier a été préalablement humidifié afin de limiter l'adhérence de la pâte cimentaire sur les parois. Le mélange a été introduit en trois couches successives, chacune étant légèrement compactée par piquetage (25 coups par une barre Φ16), puis le cône a été retiré verticalement. Un béton de

consistance ferme a été exigé lors de sa formulation. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.

Les formulations préparées selon cette méthode sont les suivantes :

Mélange 1 : 100 % gravier naturel

Mélange 2 : 80 % gravier naturel + 20 % gravier recyclé

Mélange 3 : 70 % gravier naturel + 30 % gravier recyclé

Mélange 4 : 60 % gravier naturel + 40 % gravier recyclé

2.2.7.2. Méthode de malaxage double :

Dans cette méthode, une approche a été adoptée pour améliorer la répartition des fines dans les granulats recyclés et contribuer à la fermeture des pores qu'ils contiennent.

Dans un premier temps, les granulats recyclés 15/25 ainsi que les granulats recyclés 8/15 ont été introduits dans le malaxeur électrique. Environ 20 % de la quantité totale de ciment a ensuite été ajoutée, suivie d'une petite quantité d'eau, dans le but de faciliter l'enrobage des particules de granulats par le coulis de ciment résultant, et ainsi de réduire l'absorption d'eau ultérieure.

Ce mélange a été effectué manuellement pendant une courte durée, puis laissé au repos pendant une minute sans malaxage, afin de permettre à la pâte cimentaire de bien pénétrer les pores des granulats **(Figure 2.8) .**



Figure 2.8 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion dans un mélange de ciment et d'eau pendant une minute

Après l'écoulement de la minute, les granulats naturels ont été ajoutés dans l'ordre suivant : d'abord le gravier naturel 15/25, ensuite le gravier naturel 8/15, puis le sable. Ces matériaux ont d'abord été mélangés par le malaxeur puis manuellement afin de garantir un décollement optimal des matériaux adhérant aux parois du malaxeur. Ensuite, le malaxage électrique a été repris.

Par la suite, le reste du ciment ainsi que l'eau restante ont été ajoutés progressivement pendant le malaxage, jusqu'à l'obtention d'une consistance homogène et cohérente du béton.

À la fin du malaxage, on est passé directement à l'essai d'affaissement à l'aide du cône d'Abrams. Le dispositif a été préalablement humidifié pour éviter l'adhérence du béton à ses parois, puis rempli en trois couches. Chaque couche a été tassée à l'aide de 25 coups de tige métallique, conformément au protocole de l'essai.

Enfin, le cône a été soulevé verticalement et délicatement, puis Un béton de consistance ferme a été exigé lors de sa formulation. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.

2.2.7.3.Méthode de malaxage double modifié -P1 :

Dans cette méthode, une approche a été adoptée afin d'améliorer la répartition des fines dans les granulats recyclés et de contribuer à la fermeture des pores qu'ils contiennent.

Tout d'abord, les granulats recyclés 15/25 et 8/15 ont été introduits dans le malaxeur électrique. Ensuite, environ 20 % de la quantité totale de ciment ont été ajoutés, suivis d'une petite quantité d'eau, afin de faciliter l'enrobage des particules de granulats par le mélange ciment-eau, ce qui permet de réduire l'absorption d'eau ultérieure.

Ce mélange a été malaxé manuellement pendant une courte durée, puis laissé au repos pendant 5 minutes sans agitation, afin de permettre au mélange cimentaire de pénétrer dans les pores des granulats recyclés **(Figure 2.9).**



Figure 2.9 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion dans un mélange de ciment et d'eau pendant 5 minute

Après ce temps de repos, les granulats naturels ont été ajoutés dans l'ordre suivant : le gravier naturel 15/25 en premier, puis le gravier naturel 8/15, et enfin le sable. Ces matériaux ont d'abord été mélangés manuellement pour garantir le décollage des éléments collés aux parois du malaxeur, puis le malaxage électrique a été relancé.

Ensuite, le reste du ciment et le reste de l'eau ont été ajoutés de manière progressive durant le malaxage, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et cohérent.

Après la fin de l'opération de malaxage, l'essai d'affaissement a été effectué immédiatement à l'aide du cône d'Abrams. Le dispositif a été préalablement humidifié à l'eau afin d'éviter l'adhérence du béton aux parois. Le cône a été rempli en trois couches, chacune étant tassée par 25 coups de tige métallique, conformément au protocole d'essai.

Enfin, le cône a été retiré verticalement avec précaution, puis , puis Un béton de consistance ferme a été exigé lors de sa formulation. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.

2.2.7.4. Méthode de malaxage double modifié -P 2 :

Dans cette méthode, une séquence d'introduction des composants différente a été adoptée afin d'améliorer la répartition des matériaux et d'ajuster les propriétés du béton frais.

Tout d'abord, les granulats recyclés 15/25 et 8/15 ont été introduits dans le malaxeur électrique, accompagnés d'environ 20 % de la quantité totale de ciment. Ensuite, la totalité de

l'eau de gâchage a été ajoutée, et les composants ont été mélangés manuellement afin d'assurer un enrobage optimal des granulats par l'eau et le ciment, ce qui permet de limiter leur absorption d'eau. Le mélange est laissé au repos pendant 5 minutes sans agitation

Par la suite, les granulats naturels ont été incorporés dans l'ordre suivant : gravier naturel 15/25, gravier naturel 8/15, puis le sable. Un malaxage mécanique a alors été effectué afin d'assurer une homogénéisation initiale du mélange.

Dans l'étape suivante, le reste du ciment a été ajouté de manière progressive, tout en poursuivant le malaxage mécanique jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et cohérent en termes de consistance.

Une fois le malaxage terminé, on est passé directement à l'essai d'affaissement à l'aide du cône d'Abrams, préalablement humidifié pour éviter l'adhérence du béton à ses parois. Le moule a été rempli en trois couches, chacune étant compactée par 25 coups de tige métallique, conformément à la norme de l'essai.

Enfin, le cône a été retiré verticalement avec précaution, puis Un béton de consistance ferme a été exigé lors de sa formulation. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.

2.2.7.5. Traitement des granulats recyclés au ciment :

Dans le cadre de cette méthode, deux types de granulats recyclés ont été utilisés : des gravillons recyclés de dimensions 8/15 mm et 15/25 mm Pour améliorer leurs propriétés et réduire leur porosité, un traitement initial au ciment a été effectué. Ainsi, 500 grammes de ciment ont été répartis uniformément sur les granulats recyclés. Ensuite, une quantité d'eau estimée à 2,5 litres a été ajoutée progressivement tout en remuant continuellement afin d'obtenir un enrobage homogène des grains. Le mélange a été laissé au repos pendant 24 heures afin de permettre au ciment de pénétrer et de partiellement obturer les pores.

Après les 24 heures, les granulats ont été remélangés, puis tamisés à l'aide d'un crible afin d'éliminer l'excès d'eau. Ils ont ensuite été introduits dans le malaxeur **(Figure 2.10)**, accompagnés des autres constituants de la formulation : les gravillons naturels (8/15 et 15/25 mm), le sable, le reste du ciment et la quantité d'eau restante.



Figure 2.10 : Prétraitement du granulat recyclé par immersion dans un mélange de ciment et d'eau pendant une nuit complète

Le mélange a d'abord été effectué manuellement, en veillant à racler les parois du malaxeur pour assurer une répartition homogène des composants, puis le malaxage mécanique a été enclenché progressivement tout en versant le reste de l'eau, jusqu'à l'obtention d'un béton homogène et cohérent.

À la fin du malaxage, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams a été réalisé pour évaluer l'ouvrabilité du béton. Le béton frais a été versé dans le cône en trois couches successives, chacune étant soumise à 25 coups de tige métallique. Une fois le cône rempli, celui-ci a été retiré verticalement et l'affaissement a été mesuré, puis Un béton de consistance ferme a été exigé lors de sa formulation. Un affaissement de 3 à 5 cm est alors acceptable.

• Après l'opération de malaxage, quelle que soit la méthode utilisée, des éprouvettes en béton de forme cubique et prismatique ont été préparées en vue de réaliser les essais ultérieurs. Les moules ont été préalablement enduits d'une fine couche d'huile afin de faciliter le démoulage. Le béton a ensuite été coulé en trois couches dans les moules, chacune étant compactée à l'aide d'une table vibrante **(Figure 2.11)** pendant quelques minutes, dans le but d'assurer une bonne homogénéité du mélange et de réduire les vides d'air. Après le coulage, la surface supérieure de chaque éprouvette a été soigneusement nivelée à l'aide d'une règle afin d'obtenir une finition plane et régulière **(Figure 2.12)**. Les éprouvettes ont été laissées au repos pendant 24 heures à température ambiante. Le lendemain, les moules ont été retirés avec précaution, puis chaque éprouvette a été identifiée par l'inscription du nom du mélange

correspondant. Elles ont ensuite été placées dans un bassin d'eau pour une cure humide d'une durée de 28 jours, conformément aux normes techniques en vigueur.



Figure2.11: Table vibrant





Figure 2.12 : Coulage et préparation des éprouvette

2.3. Méthodes expérimentales

Les performances des différents mélanges de béton ont été évaluées dans le cadre d'un programme expérimental qui a permis de mesurer les propriétés suivantes :

2.3.1. Affaissement au cône d'Abrahms

Cet essai permet d'estimer l'ouvrabilité du béton à l'état frais. Il consiste, après coulage, à mesurer la hauteur d'affaissement d'un échantillon versé dans un mou.

Tableau 2.11 : Relation entre le rapport E/C et l'affaissement des différentes formulations

Mélange	GN	80%GN+ 20%GR	70%GN+ 30%GR	60%GN+ 40%GR	80%GN+ 20%GR	80%GN+ 20%GR	80%GN+ 20%GR	TRC
l'affaissement	6	5	5	6	4.5	4.5	6	10
Rapporte E/C	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59

Le métallique tronconique. La norme NF P18-451 (1981) définit quatre niveaux de consistance suivant la hauteur d'affaissement, selon le test du cône d'Abrahms :

- Ferme de 0 à 4 cm d'affaissement,
- Plastique de 5 à 9 cm,
- Très Plastique de 10 à 15 cm,
- Fluide à partir de 16 cm.



Figure 2.13 : Essai d'affaissement au cône d'Abrahms

2.3.2. Résistance à la compression

L'essai est effectué à l'aide d'une machine à compression, conformément à la norme EN 12390-3(2003). La résistance à la compression est déduite de la moyenne des résistances obtenues après écrasement de trois éprouvettes cubiques (10 × 10 × 10 cm) pour chaque mélange. Les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau jusqu'à la réalisation des essais, soit 28 jours après.



Figure 2.14: machine d'essai de compression.

Le tableau ci-dessous présente les résultats expérimentaux de la résistance à la compression obtenus à partir des essais en laboratoire effectués sur des éprouvettes en béton. Ces essais ont été réalisés conformément aux normes en vigueur afin d'évaluer les propriétés mécaniques des formulations étudiées.

2.3.3. Résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction est mesurée selon la méthode de traction par flexion, conformément à la norme EN12390-5(2001). L'essai est effectué à l'aide d'une machine de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvettes prismatiques (10×10×40 cm) par flexion directe, avec trois éprouvettes pour chaque mélange de béton. La résistance à la traction est déterminée à l'aide du calcul de la contrainte ultime dans la zone tendue.



Figure 2.15 : Machine d'essai de flexion à 4 points.

Le tableau ci-dessous présente les résultats expérimentaux de la résistance à la traction obtenus par la méthode de traction par flexion, à partir des essais en laboratoire réalisés sur des éprouvettes en béton. Ces essais ont été effectués conformément aux normes en vigueur, dans le but d'évaluer les propriétés mécaniques des formulations étudiées.

CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de notre étude sur l'effet de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés mécaniques du béton. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence de plusieurs facteurs, notamment le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés, la méthode de malaxage adoptée, ainsi que le prétraitement des granulats par immersion dans un coulis de ciment.

Pour cela, nous avons confectionné plusieurs mélanges de béton qui ont été soumis à des essais normalisés portant sur l'ouvrabilité (l'affaissement), les résistances à la compression et à la traction par flexion. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés afin de mettre en évidence l'effet de chaque facteur étudié sur les performances du béton.

Dans ce chapitre, l'effet des granulats recyclés est étudié en premier. Ensuite, l'effet du pourcentage de substitution en granulats recyclés est examiné. Une fois le pourcentage de substitution optimal déterminé, l'effet de la méthode de malaxage est alors investigué. Enfin, l'efficacité du traitement par imprégnation au ciment est évaluée. Pour chaque paramètre étudié, les résultats du test d'affaissement sont présentés en premier, suivis de ceux relatifs à la résistance à la compression, puis à la résistance à la traction par flexion. Chaque série de résultats est accompagnée d'une analyse et d'une interprétation techniques permettant une meilleure compréhension du comportement des différentes formulations étudiées.

3.2. Effet des granulats recyclés

3.2.1. Affaissement

Dans cette partie, l'essai d'affaissement au cône d'Abrahms a été réalisé afin d'évaluer l'effet du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur l'ouvrabilité du béton. Pour cela, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus pour un béton à base de granulats naturels (GN) et un autre dont une partie des granulats (20%) a été remplacée par des granulats recyclés. La figure (3.1) illustre les valeurs enregistrées lors de cet essai.

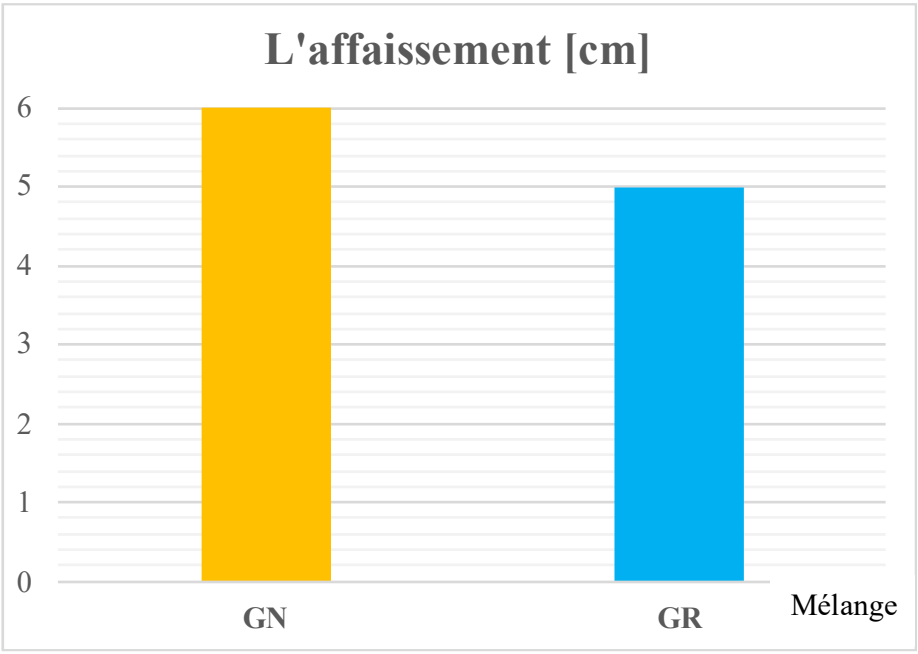


Figure 3.1: Comparaison de l'affaissement entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés.

Les résultats montrent que le béton fabriqué avec des granulats naturels a présenté un affaissement de 6 cm, tandis que cette valeur a diminué à 5 cm dans le cas de l'utilisation des granulats recyclés, ce qui reflète clairement l'impact de ce dernier sur le comportement du béton à l'état frais.

Cette diminution de l'affaissement est attribuée aux caractéristiques physiques des granulats recyclés, qui se distinguent par une porosité plus élevée que celle du granulat naturel, ainsi que par la présence de résidus d'ancienne pâte de ciment, augmentant sa capacité d'absorption de l'eau de gâchage. Ce phénomène réduit la quantité d'eau libre disponible dans le mélange, ce qui diminue la consistance du béton frais. Un tel comportement est attendu lors de l'introduction de matériaux à forte absorption d'eau dans la formulation, et souligne l'importance d'un contrôle rigoureux des paramètres de composition afin de maintenir de bonnes propriétés à l'état frais.

Malgré cette réduction observée de l'affaissement, l'utilisation du granulats recyclés reste techniquement envisageable, à condition de prendre les mesures nécessaires lors de la conception, comme l'ajustement du rapport eau/ciment (E/C) ou l'emploi d'adjuvants plastifiants ou superplastifiants pour compenser la perte de fluidité due à l'absorption d'eau. Ainsi, les résultats obtenus dans cette partie de l'étude confirment la faisabilité de l'utilisation

du granulats recyclés dans une approche de béton durable, à condition de bien maîtriser les paramètres influents.

3.2.2. Résistance à la compression

Dans cette partie, un essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes de béton fabriquées à partir de deux types de granulats : un mélange à base de granulats naturels seulement et un autre dont une partie des granulats (20%) a été remplacée par des granulats recyclés. La figure (3.2) illustre les valeurs mesurées de la résistance à la compression après 28 jours de cure.

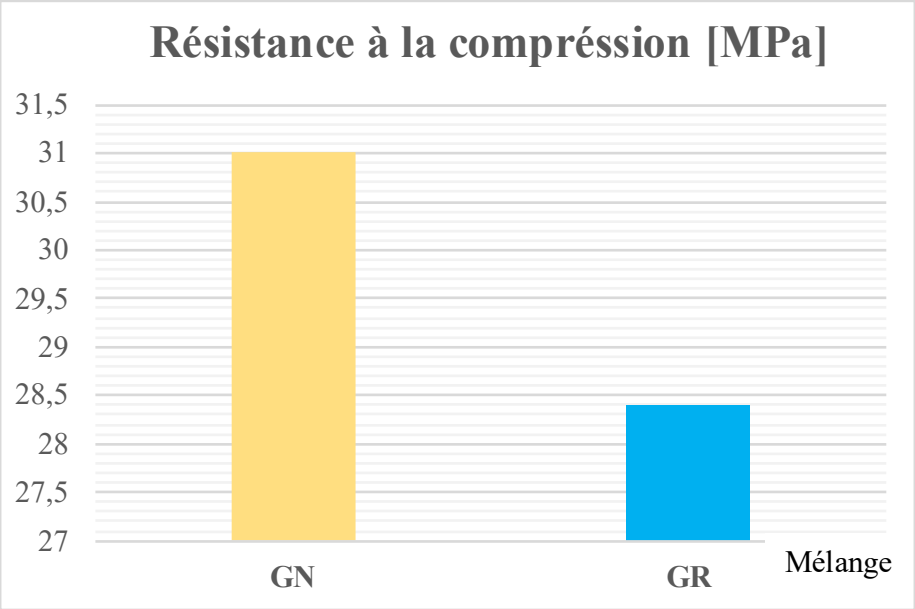


Figure 3.2 : Comparaison de la résistance à la compression entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés.

Les résultats ont montré que la formulation contenant des granulats naturels a développé une résistance à la compression plus élevée que celle incorporant des granulats recyclés, ce qui indique un léger impact de l'utilisation de ces derniers sur les performances mécaniques du béton.

Cette baisse relative de la résistance peut s'expliquer par certaines caractéristiques propres aux granulats recyclés, notamment la présence de résidus d'ancienne pâte de ciment adhérant à leur surface, ce qui peut nuire à l'adhérence avec la nouvelle matrice cimentaire. Par ailleurs, leur porosité plus élevée compromet la densité globale du béton et nuit à sa compacité. Toutefois, les résistances obtenues restent dans une plage acceptable, ce qui

confirme la faisabilité de l'incorporation des granulats recyclés dans la production de béton, à condition de bien maîtriser leurs propriétés physiques ou de recourir à des traitements préalables.

Ces résultats soulignent l'importance d'une évaluation rigoureuse des caractéristiques des granulats recyclés, afin d'assurer une qualité satisfaisante du béton final, en particulier dans des applications structurelles exigeant des performances mécaniques fiables, tout en s'inscrivant dans une logique de durabilité et de valorisation des matériaux issus de la déconstruction.

3.2.3. Résistance à la traction par flexion

Dans cette section, un essai de traction par flexion a été réalisé sur des échantillons de béton confectionnés avec deux types de granulats : un mélange à base de granulats naturels seulement et un autre dont une partie des granulats (20%) a été remplacée par des granulats recyclés. Cet essai vise à évaluer l'effet du type de granulat sur les propriétés mécaniques du béton à l'état durci. La figure (3.3) représente les valeurs obtenues de la résistance à la traction par flexion pour chaque formulation.

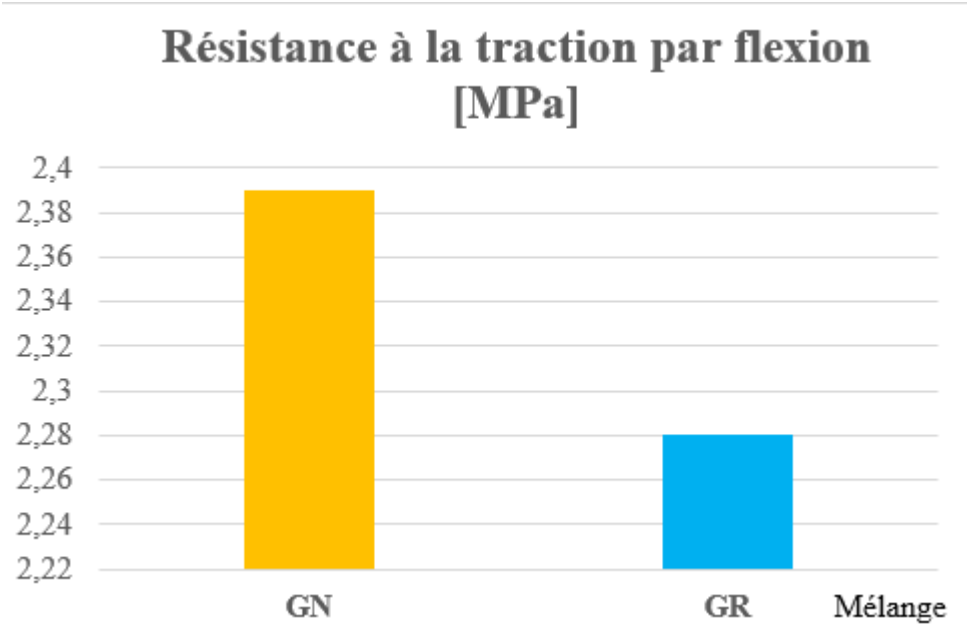


Figure 3.3 : Comparaison de la résistance à la traction par flexion entre le béton contenant des granulats naturels et celui contenant des granulats recyclés.

On constate que le béton contenant des granulats naturels affiche une résistance légèrement supérieure à celle incorporant des granulats recyclés, indiquant ainsi une différence de performance relativement faible.

Cette légère diminution peut s'expliquer par certaines caractéristiques des granulats recyclés, telles que la présence de résidus de pâte de ciment ancienne sur leur surface et une adhérence parfois moins efficace entre les particules, ce qui peut nuire à la transmission des efforts dans la matrice cimentaire. Par ailleurs, leur porosité plus élevée peut entraîner l'apparition de zones de faiblesse localisées. Néanmoins, les valeurs obtenues restent dans une plage acceptable, ce qui confirme le potentiel d'utilisation des granulats recyclés sans compromettre de manière significative les performances mécaniques, à condition d'adopter des formulations optimisées garantissant un bon compromis entre durabilité et efficacité structurelle.

3.3. Effet du pourcentage de substitution

3.3.1. Affaissement

En comparant les valeurs d'affaissement obtenues à partir des quatre formulations préparées avec différents taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés (0 %, 20 %, 30 % et 40 %), on observe une variation notable de l'ouvrabilité du béton. La figure (3.4) représente l'évolution de l'affaissement en fonction des différents taux de substitution. Les résultats montrent que la formulation de référence, contenant 100 % de granulats naturels, ainsi que celle avec 40 % de granulats recyclés, ont enregistré les valeurs d'affaissement les plus élevées, traduisant un comportement particulier dans ces deux cas par rapport aux autres mélanges.

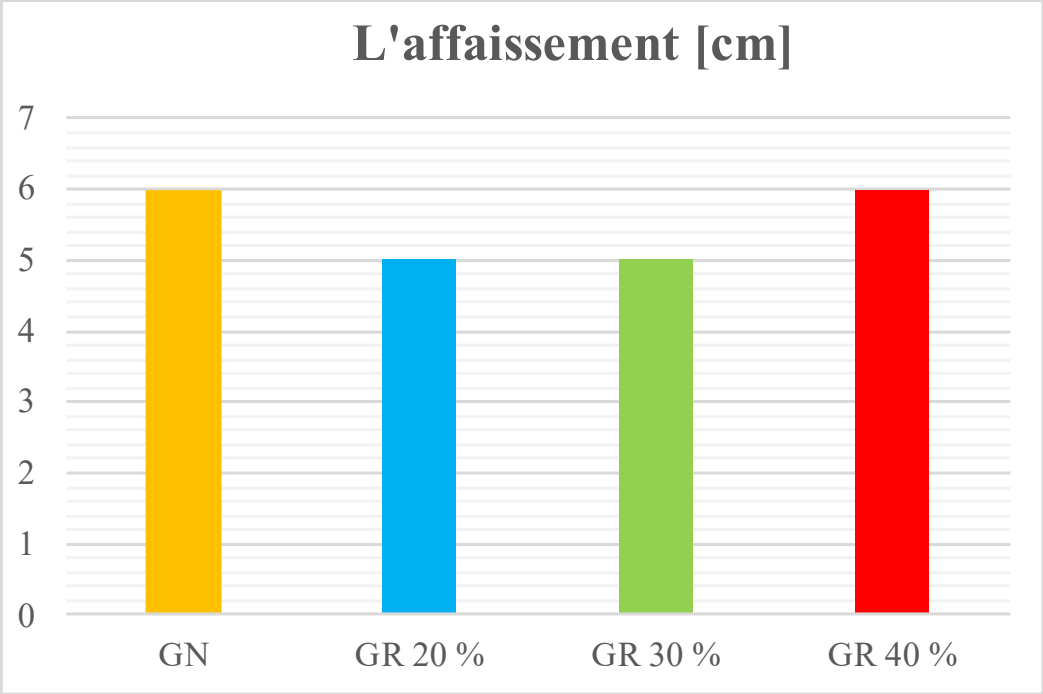


Figure 3.4 : Évolution de l'affaissement du béton en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés.

En revanche, les formulations contenant 20 % et 30 % de GR ont présenté une légère baisse de l'affaissement, ce qui reflète une diminution relative de l'ouvrabilité à ces taux moyens de substitution.

Ce comportement irrégulier indique que la relation entre le pourcentage de substitution et l'ouvrabilité n'est ni linéaire ni directe, mais influencée par plusieurs facteurs interdépendants. Aux taux faibles de GR, la diminution de l'affaissement peut être expliquée par la forte capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés, due à leur porosité ouverte et aux résidus d'ancienne pâte de ciment, ce qui réduit la quantité d'eau libre disponible dans le mélange et nuit ainsi à la fluidité. En revanche, à un taux de 40 %, la granulométrie et la répartition particulaire du mélange peuvent favoriser un meilleur agencement des grains et faciliter le mouvement de la pâte, contribuant ainsi à une meilleure ouvrabilité malgré un taux de substitution élevé.

Ces résultats soulignent l'importance de considérer plusieurs paramètres lors de l'incorporation des granulats recyclés, tels que la granulométrie, la rugosité de surface et la capacité d'absorption d'eau, en plus du taux d'utilisation. Un bon contrôle de ces paramètres techniques permet de maintenir des propriétés acceptables du béton frais même avec des taux

relativement élevés de GR, confirmant ainsi le potentiel de ce type de granulat dans une perspective de construction durable et de valorisation des ressources recyclées.

3.3.2. Résistance à la compression

Un essai de résistance à la compression a été réalisé sur quatre formulations de béton comportant des pourcentages variables de granulats recyclés (0 %, 20 %, 30 % et 40 %), dans le but d'évaluer l'effet du taux de substitution sur les propriétés mécaniques du béton à l'état durci. La figure (3.5) représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution. Les résultats obtenus montrent une variation notable de la résistance selon le taux de substitution. La formulation de référence, contenant uniquement des granulats naturels, a affiché la résistance la plus élevée, traduisant une excellente cohésion interne et une bonne compacité. En revanche, on observe une diminution progressive de cette résistance à mesure que le taux de granulats recyclés augmente, mettant en évidence une baisse marquée, notamment à 40 %, où la résistance mesurée est la plus faible parmi toutes les compositions.

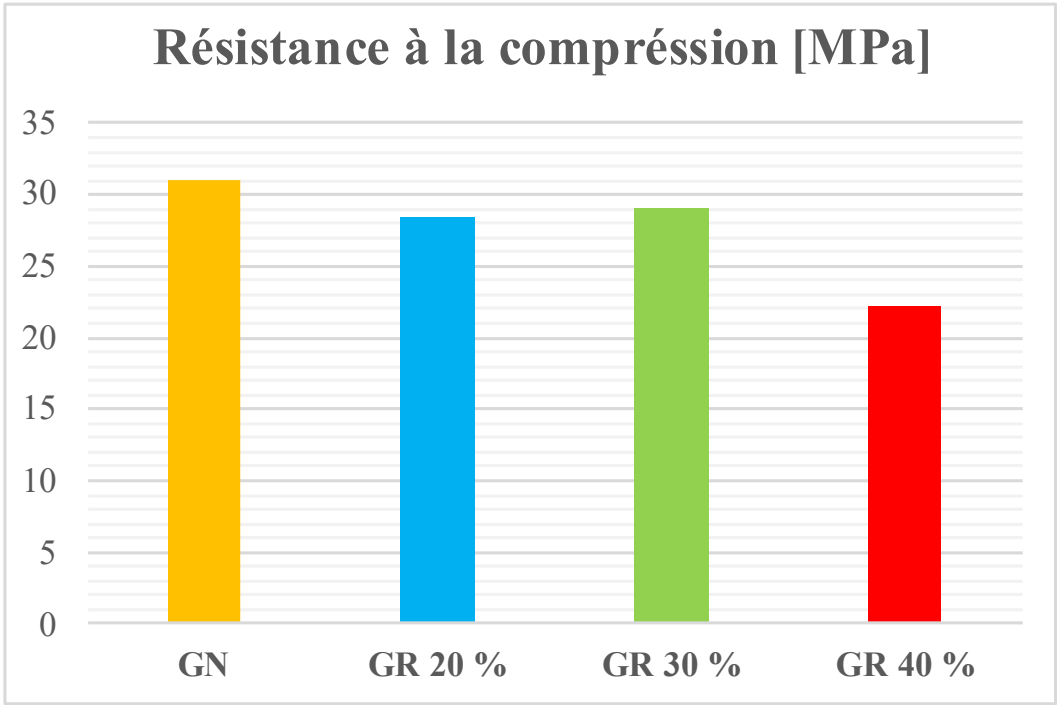


Figure 3.5: Évolution de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés.

En se concentrant sur les taux de 20 % et 30 %, on remarque que la perte de résistance reste relativement modérée, les valeurs obtenues demeurant proches et dans une plage acceptable. Cela suggère que l'incorporation de ces proportions de GR n'altère pas significativement les performances du béton. Toutefois, au-delà de ce seuil, notamment à 40 %, l'impact négatif devient plus prononcé. Cette baisse est principalement liée aux caractéristiques physiques des granulats recyclés, telles que leur porosité plus élevée et la présence de résidus d'ancienne pâte de ciment, qui affectent la compacité du mélange et réduisent l'adhérence au sein de la matrice cimentaire.

Ces constats mettent en évidence la nécessité de maîtriser le taux de substitution pour garantir une résistance mécanique satisfaisante. Le recours à des solutions complémentaires, telles que le prétraitement des granulats recyclés ou l'ajustement des dosages du mélange, pourrait s'avérer indispensable pour compenser les effets indésirables au-delà d'un certain seuil. Ainsi, l'usage raisonné et optimisé des granulats recyclés représente une voie prometteuse dans le domaine de la construction durable, à condition de respecter un équilibre rigoureux entre performance structurelle et exigence environnementale.

3.3.3. Résistance à la traction par flexion

Un essai de résistance à la traction par flexion a été réalisé sur quatre formulations de béton intégrant des pourcentages variables de granulats recyclés (0 %, 20 %, 30 % et 40 %), dans le but d'étudier l'effet de cette substitution sur le comportement du béton soumis à des contraintes de traction. La figure (3.6) illustre l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de granulats recyclés. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'impact de l'augmentation progressive des granulats recyclés sur la résistance mécanique après durcissement. La formulation de référence, composée uniquement de granulats naturels, a présenté les meilleures performances, traduisant une bonne cohésion interne de la matrice cimentaire. En revanche, une baisse globale de la résistance a été observée à mesure que le taux de substitution augmentait, en particulier pour la formulation contenant 40 % de GR, qui a affiché la résistance la plus faible, mettant en évidence une tendance générale à la diminution, bien que cette baisse ne soit pas parfaitement régulière.

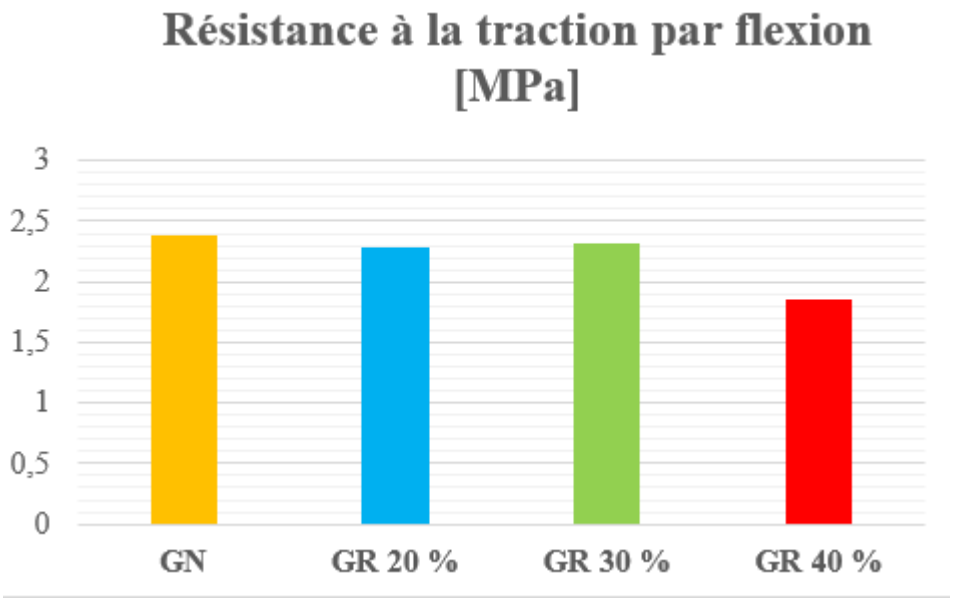


Figure 3.6 : Évolution de la résistance à la traction par flexion avec l'augmentation des granulats recyclés

Il est intéressant de noter que la formulation contenant 30 % de GR a présenté une résistance légèrement supérieure à celle avec 20 %, ce qui témoigne d'un comportement relativement irrégulier du matériau. Cette variation peut être expliquée par plusieurs facteurs, notamment la distribution granulométrique, la forme des granulats ou encore la qualité de l'adhérence entre les granulats recyclés et la pâte cimentaire. En effet, la porosité accrue du GR, ainsi que la présence de résidus de pâte de ciment ancienne, influencent négativement la capacité du béton à transférer les contraintes, affaiblissant ainsi sa cohésion globale.

Malgré ces limitations, les performances obtenues pour des taux modérés de substitution (20 % à 30 %) restent acceptables dans un cadre d'utilisation raisonnée, en particulier pour des applications ne nécessitant pas une résistance mécanique maximale. Le recours à ces formulations, à condition d'un dosage rigoureux et d'un bon contrôle des propriétés des matériaux, peut permettre de concilier objectifs environnementaux et exigences techniques, contribuant ainsi à promouvoir une démarche de construction durable fondée sur la valorisation des déchets.

3.4. Effet de la méthode de malaxage

3.4.1. Affaissement

Un essai d'affaissement a été réalisé afin d'évaluer l'influence de la méthode de malaxage sur la maniabilité du béton, en s'appuyant sur quatre formulations distinctes correspondant à des techniques de malaxage différentes, à savoir le malaxage normal, le malaxage double, le malaxage double modifié – P1, et le malaxage double modifié – P2. La +

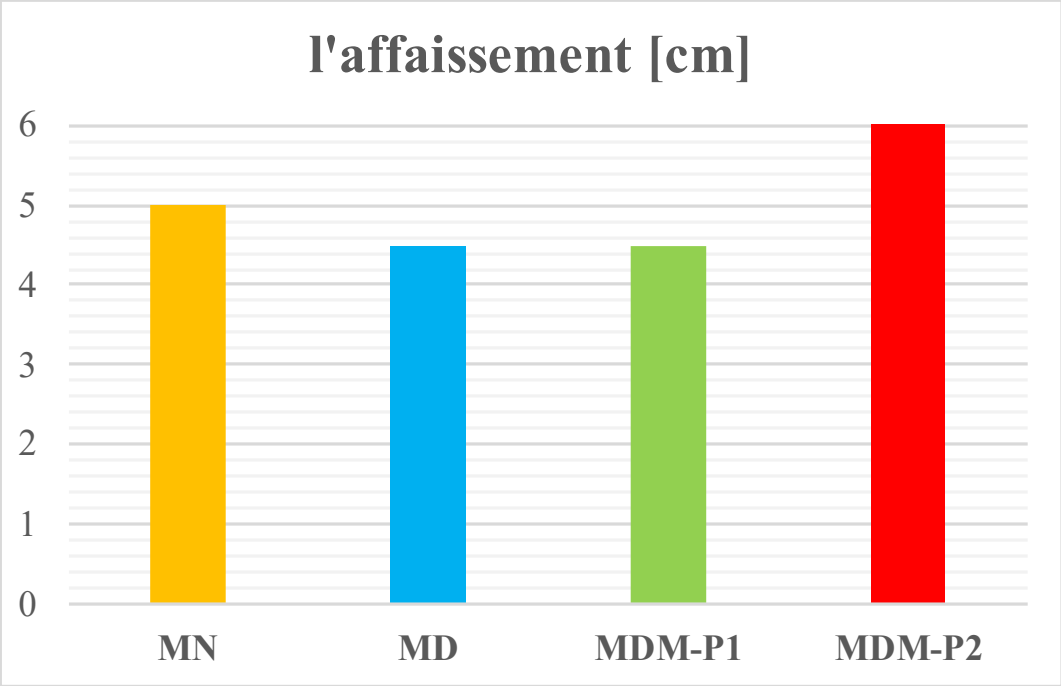


Figure 3.7: Influence de la méthode de malaxage sur l'ouvrabilité du béton, évaluée à travers l'essai d'affaissement

Les résultats obtenus révèlent une variation notable du comportement des bétons frais selon la méthode utilisée. La formulation malaxée selon la méthode modifiée P2 a présenté l'affaissement le plus important, traduisant une meilleure ouvrabilité, suivie de la formulation issue du malaxage normal. À l'inverse, les méthodes de malaxage double (classique et modifiée P1) ont conduit aux affaissements les plus faibles, suggérant une consistance plus rigide et donc une maniabilité réduite. Cette différence peut s'expliquer par les spécificités propres à chaque méthode de malaxage. En effet, la méthode P2 semble favoriser une dispersion plus homogène des constituants et une meilleure répartition de l'eau, réduisant

ainsi les pertes par absorption et améliorant la fluidité globale du mélange. En revanche, les méthodes de malaxage double, en raison d'un temps ou d'une intensité de malaxage accrus, pourraient augmenter l'absorption d'eau par les granulats recyclés, en particulier en raison de leur porosité, ce qui diminue l'eau libre disponible et entraîne une réduction de l'affaissement. Ces résultats soulignent ainsi le rôle déterminant de la méthode de malaxage dans le contrôle des propriétés rhéologiques du béton contenant des matériaux recyclés, et l'importance d'un choix adapté pour garantir une bonne ouvrabilité tout en assurant la performance globale du matériau.

3.4.2. Résistance à la compression

Dans le but d'analyser l'effet de la méthode de malaxage sur les performances mécaniques du béton, un essai de compression a été effectué sur des échantillons fabriqués à partir de quatre techniques distinctes : malaxage normal, malaxage double, malaxage double modifié – P1, et malaxage double modifié – P2. La figure (3.8) représente les résultats obtenus en termes de résistance à la compression pour chaque méthode.

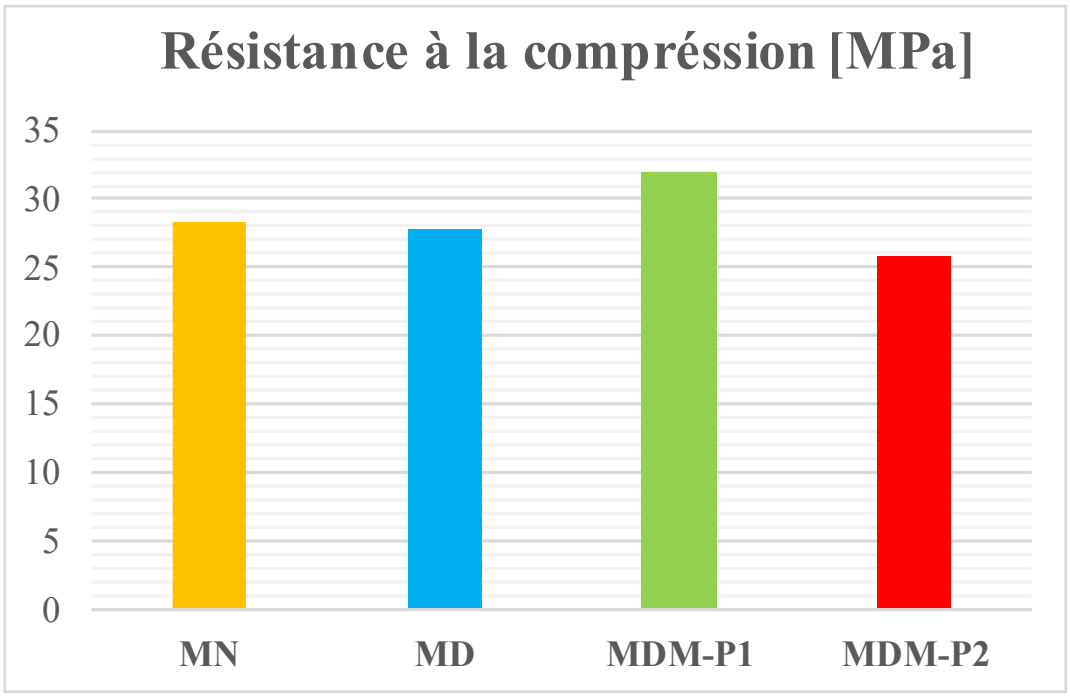


Figure 3.8: Influence de la méthode de malaxage sur la résistance à la compression du béton

L'interprétation des données révèle une nette supériorité de la méthode P1, qui a permis d'atteindre la résistance à la compression la plus élevée parmi l'ensemble des formulations testées. À l'opposé, la méthode P2 a donné les performances les plus faibles, suggérant une efficacité moindre dans la structuration interne du béton. Les méthodes de malaxage normal et double ont présenté des résultats intermédiaires, proches l'un de l'autre, traduisant une performance modérée mais stable. Ces écarts peuvent s'expliquer par la capacité variable des méthodes à assurer une distribution homogène des constituants, à limiter l'incorporation d'air et à maîtriser la répartition de l'eau dans la pâte cimentaire. En particulier, la méthode modifiée P1 semble avoir optimisé l'enrobage des granulats et favorisé une meilleure compacité, éléments clés pour renforcer la résistance mécanique. En revanche, la méthode P2 pourrait avoir provoqué une perte d'eau ou un sur-malaxage, nuisant à la cohésion et à la densité du matériau. Ces observations mettent en évidence le rôle déterminant du processus de malaxage dans le développement des propriétés mécaniques du béton, notamment lorsqu'il contient des granulats recyclés, et soulignent la nécessité de sélectionner une méthode adaptée pour garantir des performances optimales.

3.4.3. Résistance à la traction par flexion

Dans le but d'étudier l'influence de la méthode de malaxage sur la résistance à la traction par flexion du béton, un essai expérimental a été réalisé sur quatre formulations différentes, chacune préparée selon une technique spécifique : malaxage normal, malaxage double, malaxage double modifié – P1, et malaxage double modifié – P2. La figure (3.9) présente les valeurs mesurées de la résistance à la traction par flexion pour chaque méthode.

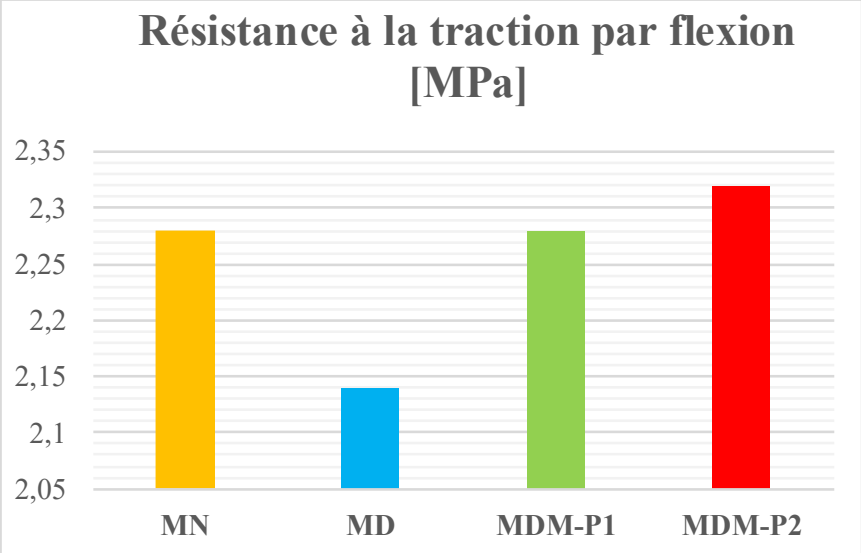


Figure 3.9 : Influence de la méthode de malaxage sur la résistance à la traction par flexion du béton.

Les résultats indiquent clairement que la méthode modifiée P2 a permis d'obtenir la résistance à la traction la plus élevée, démontrant ainsi son efficacité à améliorer la cohésion interne du béton. En comparaison, les méthodes de malaxage normal et modifié P1 ont affiché des performances relativement similaires, traduisant un niveau de résistance intermédiaire et acceptable. En revanche, le malaxage double a donné les résultats les plus faibles dans cet essai, suggérant une influence défavorable sur les propriétés mécaniques. Ces écarts peuvent être interprétés à la lumière de la capacité de chaque méthode à assurer une répartition homogène des constituants du mélange et une bonne structuration de la pâte cimentaire. En particulier, la méthode modifiée P2 semble avoir favorisé un meilleur enrobage des granulats et une compacité accrue du béton, facteurs essentiels pour améliorer la résistance à la traction. À l'inverse, il est probable que le malaxage double ait engendré une absorption excessive de l'eau ou une désorganisation de la matrice, affaiblissant ainsi l'adhérence interne. Ces observations mettent en évidence le rôle crucial de la méthode de malaxage dans le développement des propriétés mécaniques du béton, notamment lorsqu'on utilise des granulats recyclés, et soulignent la nécessité de choisir une technique de malaxage appropriée pour garantir des performances optimales.

3.5. Effet du traitement au ciment

3.5.1. Affaissement

Dans le cadre de l'évaluation de l'effet du prétraitement des granulats recyclés sur les propriétés du béton à l'état frais, un essai d'affaissement a été réalisé sur trois compositions différentes, dans le but d'analyser l'influence de l'immersion des granulats dans un mélange cimentaire sur la maniabilité du béton. La première composition repose uniquement sur des granulats naturels (GN), servant de référence. La deuxième intègre 20 % de granulats recyclés non traités (GR 20 %), tandis que la troisième utilise la même proportion de granulats recyclés, mais ayant subi un prétraitement consistant en une immersion dans un mélange d'eau et de ciment pendant 24 heures (TRC). Il est important de noter que lors du malaxage, la totalité de l'eau de gâchage prévue a été utilisée, sans soustraction de la quantité absorbée par les granulats durant le traitement. La figure (3.10) illustre les résultats enregistrés lors de cet essai, mettant en évidence l'effet du traitement sur l'affaissement.

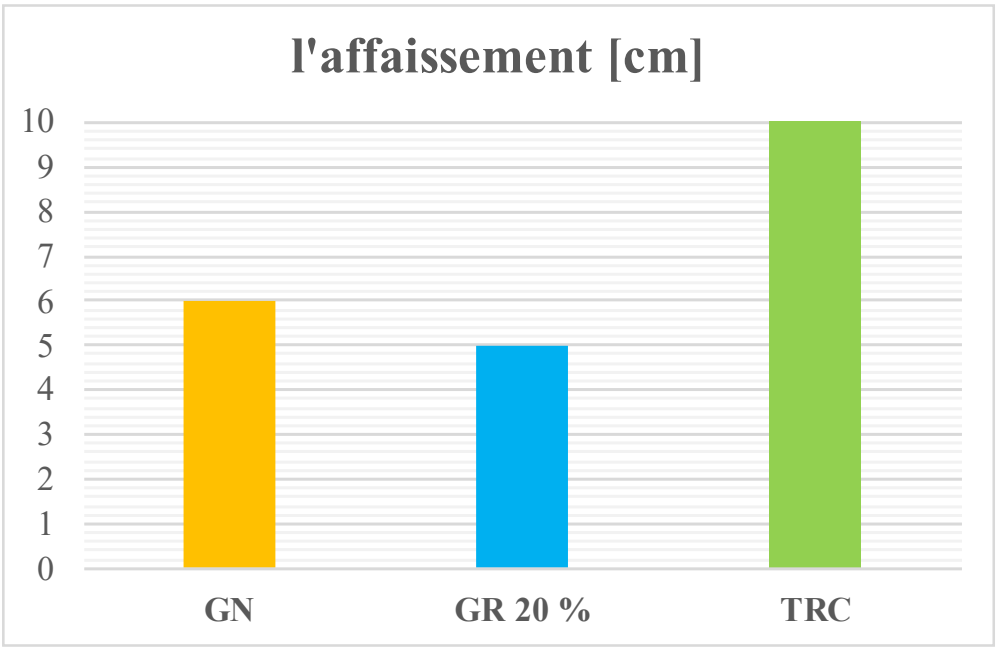


Figure 3.10 : Comparaison de l'affaissement entre un béton avec granulat naturel, un béton avec 20 % de granulat recyclé non traité, et un béton avec granulat recyclé traité au ciment

Les résultats obtenus indiquent un affaissement de 6 cm pour le béton à base de granulats naturels, ce qui reflète une consistance jugée satisfaisante. En revanche, le béton contenant 20 % de granulats recyclés non traités présente un affaissement réduit à 5 cm, traduisant une perte de fluidité due à la forte capacité d'absorption d'eau de ces granulats. La composition intégrant les granulats traités affiche, quant à elle, une nette amélioration avec un affaissement de 10 cm, marquant une fluidité accrue du mélange.

Cette amélioration peut s'expliquer par la formation d'une couche cimentaire autour des granulats lors du traitement, ce qui a permis de réduire leur porosité et, par conséquent, leur absorption d'eau au moment du malaxage. De plus, comme l'eau absorbée pendant le prétraitement n'a pas été déduite de la quantité totale ajoutée, une partie de cette eau est restée disponible dans le mélange, augmentant sa fluidité et facilitant son maniement. Ces résultats démontrent clairement que le prétraitement des granulats recyclés par immersion dans un mélange cimentaire améliore les propriétés rhéologiques du béton frais. Cette approche se révèle donc prometteuse pour les formulations contenant des granulats recyclés, en contribuant à une meilleure ouvrabilité et à une mise en œuvre plus aisée sur chantier.

3.5.2. Résistance à la compression

Dans le cadre de cette étude, une comparaison a été effectuée entre le comportement de trois formulations de béton en matière de résistance à la compression, selon le type de granulat utilisé dans chaque composition : granulat naturel (GN), granulat recyclé non traité incorporé à 20 % (GR 20 %), et granulat recyclé ayant subi un prétraitement au ciment (TRC). La figure (3.11) illustre les valeurs obtenues de la résistance à la compression après un durcissement de 28 jours sous eau, conformément aux normes techniques en vigueur.

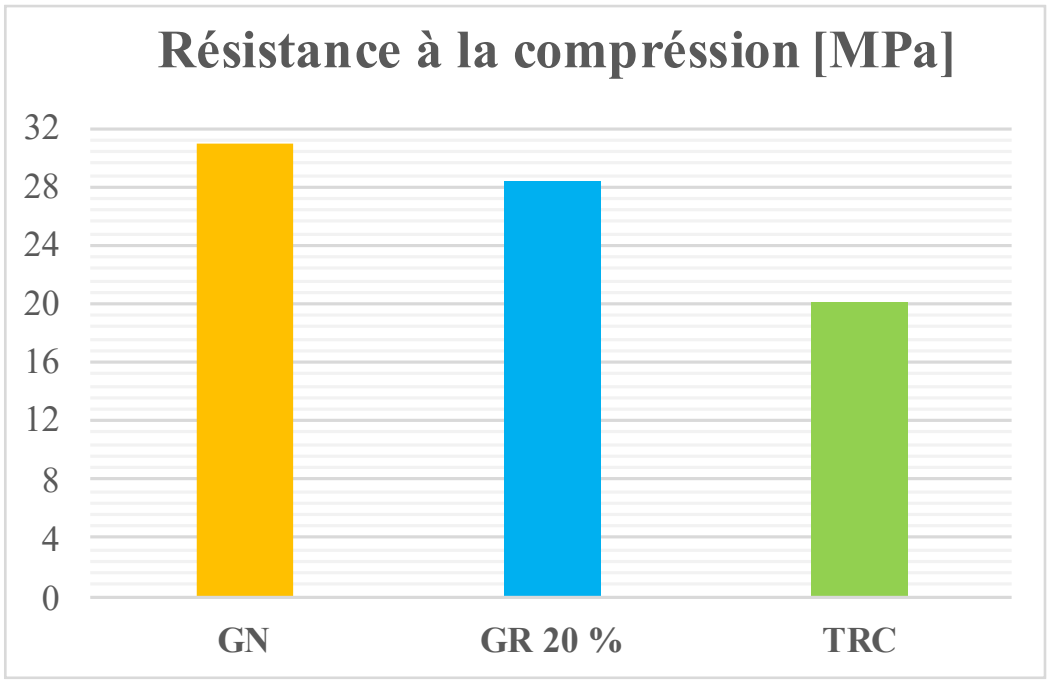


Figure 3.11 : Comparaison de la résistance à la compression entre un béton à base de granulats naturels, de granulats recyclés non traités (20 %), et de granulats recyclés prétraités au ciment

Ces essais ont été réalisés dans le but d'évaluer l'effet du type de granulat et de sa condition de traitement sur les performances mécaniques du béton.

Les résultats indiquent clairement que la formulation à base de granulat naturel a présenté la résistance à la compression la plus élevée, suivie par celle contenant 20 % de granulat recyclé non traité. En revanche, la formulation utilisant du granulat recyclé préalablement traité au ciment a affiché la valeur de résistance la plus faible parmi les trois.

Cette baisse de performance mécanique peut être attribuée à un déséquilibre dans le rapport eau/ciment lors de la fabrication du béton. En effet, le traitement préalable consistait à immerger les granulats recyclés dans un mélange de ciment et d'eau pendant une durée de 24 heures, entraînant l'absorption d'une partie de l'eau par les granulats. Or, lors du malaxage, la totalité de l'eau de gâchage prévue a été ajoutée sans prendre en compte cette absorption antérieure. Cela a conduit à une élévation involontaire du rapport E/C, ce qui a altéré la compacité de la pâte cimentaire et réduit la cohésion globale du mélange, entraînant ainsi une baisse significative de la résistance à la compression. Ces résultats mettent en lumière l'importance de considérer l'eau absorbée pendant le traitement préalable lors du calcul de la composition du béton, afin de préserver ses propriétés mécaniques et garantir des performances optimales.

3.5.3. Résistance à la traction par flexion

Dans ce cadre, l'objectif de cette étude est d'analyser l'effet du prétraitement des granulats recyclés à l'aide d'un mélange de ciment et d'eau sur le comportement du béton en termes de résistance à la traction par flexion. Pour ce faire, trois formulations de béton ont été préparées. La première contenait exclusivement des granulats naturels, utilisés comme référence. La seconde formulation incorporait 20 % de granulats recyclés non traités, tandis que la troisième utilisait la même proportion de granulats recyclés, mais ayant subi un traitement préalable consistant en une immersion dans un mélange d'eau et de ciment pendant une durée de vingt-quatre heures. La figure (3.12) présente les résultats expérimentaux de la résistance à la traction par flexion mesurée après 28 jours de cure humide. Permettant ainsi une comparaison directe entre les trois compositions testées. Les résultats obtenus montrent clairement que la formulation à base de granulats naturels offre la meilleure performance mécanique, suivie de celle contenant des granulats recyclés non traités. En revanche, le béton fabriqué avec des granulats recyclés prétraités au ciment a enregistré la valeur de résistance la plus faible. Cette diminution peut être attribuée à une mauvaise gestion du rapport eau/ciment (E/C) lors du malaxage. En effet, l'eau absorbée par les granulats pendant le prétraitement n'a pas été déduite de la quantité totale d'eau ajoutée lors du mélange, ce qui a entraîné un excès involontaire d'eau dans la formulation. Ce déséquilibre hydrique a eu pour effet d'altérer la cohésion de la pâte cimentaire, entraînant ainsi une détérioration notable des propriétés mécaniques du béton, en particulier sa résistance à la traction par flexion.

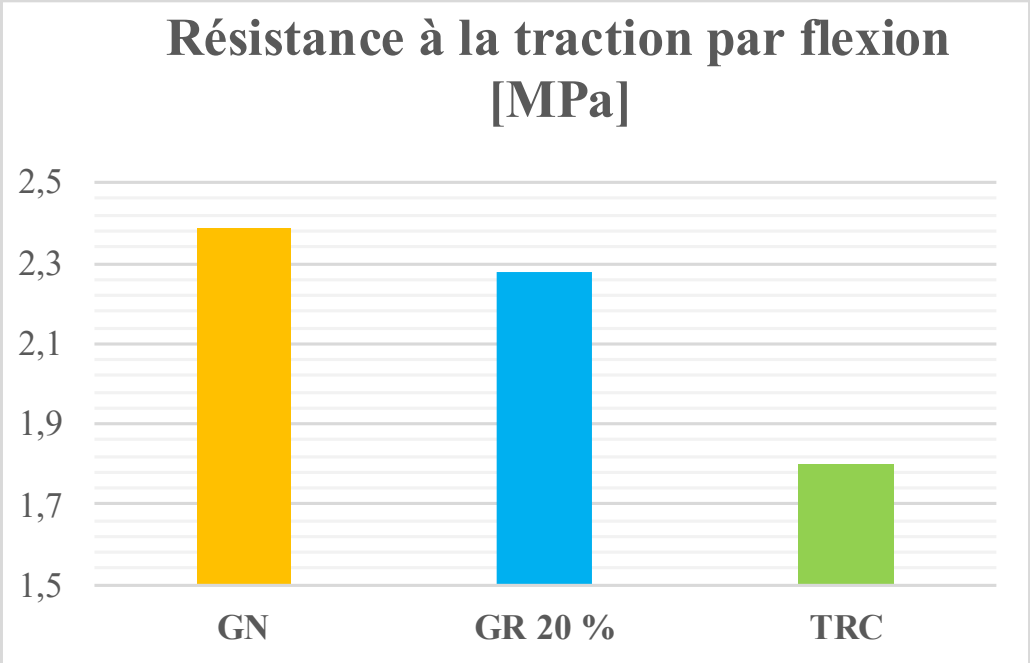


Figure 3.12 : Comparaison de la résistance à la traction par flexion entre un béton à base de granulats naturels, de granulats recyclés non traités (20 %), et de granulats recyclés prétraités au ciment

Conclusion Générale

Cette étude a porté sur l'analyse de l'influence de l'utilisation de granulats recyclés issus de la démolition sur les propriétés mécaniques du béton. Trois paramètres principaux ont été étudiés : le taux de substitution des granulats naturels, la méthode de malaxage adoptée, ainsi que le prétraitement des granulats par immersion dans un mélange ciment-eau. Un programme expérimental en laboratoire a été mis en œuvre, incluant des essais normalisés sur l'état frais et durci du béton, tels que l'affaissement, la résistance à la compression et la traction par flexion.

Les résultats obtenus ont permis de dégager plusieurs conclusions importantes, parmi lesquelles :

- L'incorporation des granulats recyclés dans le béton est envisageable sans altération majeure des performances, à condition de contrôler le taux de substitution. Plus le taux de substitution en granulats recyclés augmente plus la performance du béton se dégrade. De plus d'autres facteurs tels que la granulométrie et la qualité de surface des grains peuvent affecter cette relation entre performance et substitution en granulats recyclés.

- La méthode de malaxage joue un rôle crucial dans l'homogénéisation et la qualité de la composition. Parmi les méthodes étudiées, le malaxage double modifié P1 et P2 ont conduit vers les meilleures performances mécaniques du béton, avec une légère supériorité dans la résistance à la compression pour la méthode P1.

- Le prétraitement au ciment s'est révélé moins efficace pour améliorer les qualités du béton. Cela nécessite une investigation plus détaillée pour déterminer les causes qui ont mené vers des résultats qui contredisent les résultats reportés par des études antérieures. De plus, l'influence des facteurs qui peuvent affecter cette technique de traitement doit être examiné.

Sur la base de ces résultats, les recommandations suivantes sont proposées pour approfondir cette recherche :

- Étudier le comportement à long terme du béton recyclé soumis à des conditions environnementales sévères.
- Explorer d'autres techniques de traitement des granulats afin d'optimiser leurs caractéristiques.
- Tester des formulations avec des taux de substitution plus élevés, en adaptant la composition ou en introduisant des additions minérales ou chimiques.

- Intégrer une analyse environnementale et économique pour soutenir l'adoption de ce type de béton dans les projets de construction.
- Étendre les essais à des applications à l'échelle réelle sur chantier pour valider les performances en conditions pratiques.

Réferance :

[1] : González-Taboada, I.; González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F.; Carro-López, D.; (2016). Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. Mater. Construcc.; 66 [323]: e089.

[2] : Harkat, K., & Djabourebbi, S. (2020). Étude des propriétés mécaniques d'un béton à base des déchets d'un béton et du verre recyclés (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie). Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Civil et Hydraulique.

[3] : Bouhafara, H. (2022). Étude 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 [Mémoire de Master, Université Larbi Tébessi–Tébessa, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil]. Université Larbi Tébessi.

[4] : Kouarta, H., & Salah, Y. (2020). Étude bibliographique de la durabilité des bétons à base de déchets de marbres (Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, Algérie). Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil et Hydraulique.

[5] : Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B., & Foo, S. (2009). Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams. ACI Structural Journal, 106(6), 858–867.

[6] : Pérez-García, F., González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2009). Durability of recycled concrete: A review of recent research. Cement and Concrete Composites, 31(9), 682–688. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.007

[7] : ADEME. (2021). Le recyclage des déchets du BTP : Guide technique sur les granulats recyclés. Agence de la transition écologique. Disponible sur : https://www.ademe.fr

[8] : BRGM. (2012). Les granulats – État des lieux de la production, des ressources et des besoins à l'horizon 2030 en France. Rapport final BRGM/RP-61015-FR. https://infoterre.brgm.fr

[9] : Pagnan, L. (2011). Le recyclage des matériaux dans le BTP : état des lieux, enjeux et perspectives. Revue Environnement & Technique, (301), 40–45.

[10] Materiaux Recycles. (n.d.). Granulat de béton recyclé. https://materiauxrecycles.com/produits/granulat-de-beton-recycle/

[11] : Infociments. (2022, octobre). Les granulats recyclés et de prémélange dans la norme béton NF EN 206+A2/CN (2022). Infociments. Consulté le 25 juin 2025, من https://www.infociments.fr/betons/les-granulats-recycles-et-de-premelange-dans-la-norme-beton-nf-en-206a2cn-2022/

[12] : CEREMA. (n.d.). Recyclage du béton – Guide d'utilisation du béton recyclé. https://www.cerema.fr

[13] : UNPG. (s.d.). Granulats recyclés et artificiels. Consulté le 25 juin 2025, sur https://www.unpg.fr/le-granulat/les-familles-de-granulats/granulats-recycles-et-artificiels/

[14] : Santamaria Diaz, N. K. (2018). Valorisation des granulats recyclés dans le béton : propriétés à l'état frais et durci (thèse de maîtrise). Université de Sherbrooke. Consulté le 25 juin 2025.

[15] : Recybéton. (n.d.). Programme national Recybéton : recommandations pour l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Consulté le 25 juin 2025, de https://bybeton.fr/beton-recycle-dans-le-beton-ou-en-est-on/

[16] : AFNOR. (2022, novembre). NF EN 206+A2/CN : Béton – Spécification, performance, production et conformité.

[17] : Larrard, F., & Colina, H. (éds.). (2018). Le béton recyclé : Comment recycler le béton dans le béton [Collection IFSTTAR]. IFSTTAR/CERIB. Consulté le 25 juin 2025, sur https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/recybeton-ilovepdf-compressed.pdf

[18] : Katz A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. Journal of Materials inCivil Engineering 16 (2004) 597-603.

[19] : Cheng H.; Wang C. Experimental study on strengthen concrete regenerated aggregatewith [] : Li J.; Xiao H.; Zhou Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanicpowder on properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23 (2009) 1287-1291.water glass. New Building Materials 12 (2004) 12-15.

[20] : Li J.; Xiao H.; Zhou Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanicpowder on properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23 (2009) 1287-1291.

[21] : Tam V. W. Y.; TamC. M.; LeK. N. Removal of cement mortar remains from recycledaggregate using pre-soaking approaches. Ressources, Conservation and Recycling 50 (2007) 82-101.

[22] : Tsujino M.; Nogushi T.; Tamura M.; Kanematsu M.; Maruyama I. Application ofconventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment. Journal of Advanced Concrete Technology 5 (2007)13-25.