

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Départements de Génie Civil



MÉMOIRE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par

Mohammed Amin YELES

Thème

**Élaboration d'un éco-béton à base de trois phases
de béton recyclé**

Dirigé par :

Pr Karim . Ezziane.

Année universitaire : 2024 / 2025

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire : A mes parents qui
m'ont soutenu tout au Long de mon
parcours scolaire Et universitaire.*

Merci du Fond Du Cœur, A Tout mes

Frères et sœur YELES,

Je remercie aussi mon amie DR. Younes

NADOUR,

*Et tous mes Amis et mes collègues de la
promotion 2024-2025 « MATERIAUX en
génie civil».*

Merci.

Mohammed Amin

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Géo-Matériaux de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie).

Avant toute chose je remercie "ALLAH" le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier tous particulièrement :

Mon directeur de mémoire, Karim EZZIAN, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir donné l'occasion de réaliser ce mémoire dans les bonnes conditions. Je tiens également à le remercier pour sa disponibilité, son aide et sa sympathie, sa grande gentillesse, de ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont pris le temps de lire et d'examiner ce travail et de souligner ses réalisations.

Je tiens à remercier tous les enseignants et ingénieurs de laboratoire de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef, en particulier l'ingénieur Aissa SAYAH pour sa disponibilité durant la campagne expérimentale.

En fin, Un grand merci au Dr Younes NADOUR à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir partagé ses connaissances sur le sujet.

Mohammed Amin

Résumé

Cette étude a pour objectif le développement d'un béton compacté au rouleau (BCR) écologique intégrant des granulats recyclés, du sable recyclés ainsi que de la poudre de béton recyclé. Contrairement aux recherches antérieures qui se sont principalement limitées à la substitution d'une seule phase de composition du béton et à l'étude d'un taux de remplacement élevé, cette recherche adopte une approche innovante en remplaçant simultanément le sable, le gravier et les fines à un taux de 20 % chacun. Ce taux a été choisi en s'appuyant sur les résultats de la littérature qui montrent qu'au-delà de cette limite, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton diminuent significativement. Grâce à cette triple substitution, un squelette granulométrique plus homogène et plus performant que celui des mélanges naturels a été obtenu. Les essais réalisés ont montré que ce BCR recyclé peut atteindre, voire dépasser, les performances du béton traditionnel, tout en contribuant à la valorisation des déchets et à la réduction de l'impact environnemental dans le secteur du génie civil.

Mots clés : BCR, Béton, Durabilité, Environnement, Recyclage, Résistance.

Abstract

This study aims to develop an eco-friendly roller-compacted concrete (RCC) incorporating recycled aggregates from three distinct concrete sources. While prior research has primarily focused on the effects of replacing a single phase of component concrete, this work proposes a more comprehensive substitution of all three granular components: coarse aggregates, fine aggregates, and cementitious fines, each at a 20% replacement rate. This percentage was selected based on previous findings highlighting significant reductions in performance beyond this threshold. The results reveal that this simultaneous substitution improved the overall granulometric skeleton of the mix, achieving better particle packing and compaction behavior than the natural aggregate mixture. Physical, mechanical, and durability tests confirm that the recycled RCC can match or even exceed the performance of conventional concrete, making it a viable and sustainable alternative for civil infrastructure.

Keywords: Concrete, Sustainability, Environment, Recycling, Resistance.

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير خرسانة مدمجة بالدرجة صديقة للبيئة، تعتمد على استخدام ركام معاد تدويره مستخرج من ثلاث مراحل مختلفة من الخرسانة. وعلى عكس معظم الدراسات السابقة التي ركزت على استبدال نوع واحد فقط من الركام، والاعتماد على نسب استبدال عالية قد يؤدي إلى تدهور الخصائص الميكانيكية، فإن هذه الدراسة تقترح نهجاً مبتكراً من خلال استبدال الرمل والحصى والمواد الناعمة بنسبة 20% لكل منها. تم اختيار هذه النسبة استناداً إلى أبحاث سابقة أشارت إلى أن تجاوز هذا الحد يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في أداء الخرسانة. وقد أظهرت نتائج التجارب أن هذا الاستبدال الثلاثي ساهم في تحسين توزيع الحبيبات (الهيكل الحبيبي) مقارنة بالخلطات الطبيعية، مما أدى إلى تحسين الكثافة والصلابة ومتانة الخرسانة. وتؤكد هذه الدراسة أن استخدام الركام المعاد تدويره بهذا الشكل يوفّر بديلاً فعالاً ومستداماً للخرسانة التقليدية في مشاريع الهندسة المدنية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة مدمجة بالدرجة، الخرسانة، الاستدامة، البيئة، إعادة التدوير، المقاومة.

Table des matières

DEDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	V
ملخص	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES SYMBOLES	X
INTRODUCTION GENERALE.....	2
<i>Chapitre 01 : Recyclage de déchet de construction et de démolition</i>	
1.1. INTRODUCTION	4
1.2. RECYCLAGE DES DECHETS	4
1.2.1. IMPORTANCE DE RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL.....	5
1.2.2. RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE MONDE :.....	5
1.2.2.1. En Europe	5
1.2.2.2. En Asie	6
1.2.2.3. En Amérique	7
1.2.2.4. En Algérie	7
1.2.3. DIFFERENTS TYPES DE RECYCLAT.....	8
1.2.3.1. Laitiers.....	8
1.2.3.2. Cendres volantes	8
1.2.3.3. Verre de récupération	8
1.2.3.4. Pneus usagers.....	9
1.2.3.5. Déchets de marbre	9
1.2.3.6. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières	9
1.2.3.7. Béton récupéré	9
1.2.3.8. Briques concassées.....	9
1.3. GRANULAT RECYCLE	10
1.3.1. DEFINITION	10
1.3.2. DESCRIPTION DU GRANULAT RECYCLE.....	10
1.3.3. GRANULAT RECYCLE FIN	11
1.3.4. PROCESSUS DE FABRICATION DES GRANULATS RECYCLES	12
1.4. REVUE LITTERATURE DE BETON COMPACTE AU ROULEAU (BCR).....	14
1.4.1. DEFINITION	14
1.4.2. HISTORIQUE ET APPLICATIONS MAJEURES.....	15
1.4.3. AVANTAGES DU BCR.....	18
1.4.4 LIMITATIONS DU BCR.....	18
1.5. PROPRIETES DU BCR	19
1.5.1. PROPRIETES A L'ETAT FRAIS.....	20
1.5.2. PROPRIETES A L'ETAT DURCI	21
1.5.3. DURABILITE ET PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES.....	22
1.6. CONCLUSION	22

Chapitre 02 : Protocole expérimental

2.1. INTRODUCTION	24
2.2. MATERIAUX UTILISES.....	24
2.2.1. CIMENT	24
2.2.2. EAU DE GACHAGE	25
2.2.3. SABLE NATUREL ET RECYCLE	25
2.2.4. FINES RECYCLE.....	26
2.2.5. GRAVIERS NATUREL ET GRAVIER RECYCLE	27
2.2.6. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS UTILISES	29
2.2.6.1. <i>Analyse Granulométrique</i> :.....	29
2.2.6.2. <i>Equivalent de sable</i>	30
2.2.6.3. <i>Module de finesse</i>	30
2.2.6.4. <i>Masses volumique</i>	31
2.2.6.5. <i>Absorption d'eau</i>	33
2.2.6.6. <i>Indice de forme</i>	34
2.2.6.7. <i>Essai de Los Angeles</i>	35
2.2.6.8. <i>Essai de Micro-Deval</i>	36
2.2.6.9. <i>Fragmentation Dynamique</i>	37
2.2.6.10. <i>Quantité de mortier attaché</i>	37
2.3. FORMULATION DU BCR	39
2.3.1. TECHNIQUES EXPERIMENTALES A L'ETAT FRAIS	41
2.3.1.1. <i>Compactage</i>	41
2.3.1.2. <i>Masse volumique du béton frais</i>	42
2.3.2. TECHNIQUES EXPERIMENTALES A L'ETAT DURCI	42
2.3.2.1. <i>Masse volumique de béton durci</i>	43
2.3.2.2. <i>Essai de compression simple</i>	44
2.3.2.3. <i>Essai de fendage</i>	44
2.3.3. DURABILITE	45
2.3.3.1. <i>Absorption capillaire</i>	45
2.3.3.2. <i>Absorption par immersion</i>	46
2.3.3.3. <i>Perméabilité à l'eau</i>	47
2.4. CONCLUSION	48

Chapitre 03 : Résultats et interprétations

3.1. INTRODUCTION	49
3.2. PRESENTATION DES RESULTATS.....	49
3.2.1. MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS	49
3.2.2. MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT DURCI	50
3.2.3. RESISTANCE A LA COMPRESSION	50
3.2.4. RESISTANCE AU FENDAGE	51
3.2.5. ABSORPTION PAR CAPILLAIRE	52
3.2.6. ABSORPTION PAR IMMERSION	52
3.2.7. PERMEABILITE A L'EAU	53
3.3. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	54
3.4. CONCLUSION	56
CONCLUSIONS GENERALES	58
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	61

Liste des figures

FIGURE 1. 1. COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION TOTALE DES GRANULATS ET DES GRANULATS RECYCLES DE CERTAINS PAYS EUROPEENS EN 2015 [4].	6
FIGURE 1. 2. FORMES DES GRANULATS RECYCLES [16].	11
FIGURE 1. 3. CHAINE DE PRODUCTION DES GRANULATS RECYCLES GROSSIERS ET FINS [21].	13
FIGURE 1. 4. UNE TECHNIQUE DE PAVAGE CONSIDEREE COMME BCR EN SUEDE EN 1930 [24].	15
FIGURE 1. 5. SURFACE DE TRI DE BOIS, COLOMBIE-BRITANNIQUE[25].	16
FIGURE 1. 6. BARRAGE DE SHIMAJIGAWA AU JAPON[26].	17
FIGURE 1. 7. DEFINITION DU BCR SELON LA TENEUR EN LIANT ET EN EAU [27].	18
FIGURE 1. 8. RELATION ENTRE LE DEGRE DE COMPACTITE ET LES PROPRIETE MECANIQUE [28].	20
FIGURE 1. 9. EXEMPLE DE L'EVOLUTION DE LA MANIABILITE DANS LE TEMPS D'UN MELANGE DE BCR [31].	20
FIGURE 1. 10. RESISTANCE A LA COMPRESSION PAR RAPPORT AU NOMBRE DE GIRATIONS[37].	21
FIGURE 2. 1. SAC DE CIMENT D'OUED SLY (CHLEF) (CEM II/A 42.5).	25
FIGURE 2. 2. PROCESSUS DE FABRICATION DU SABLE DE BETON RECYCLE.	25
FIGURE 2. 3. VUE SUR LES DEUX SABLES UTILISES (SABLE NATUREL/ SABLE RECYCLE).	26
FIGURE 2. 4. ETAPES D'OBTENTION DES FINES DE DECHETS DE CHANTIERS.	27
FIGURE 2. 5. FINES RECYCLE.	27
FIGURE 2. 6. VUE SUR LES DEUX GRAVIERS UTILISES (GRAVIER NATUREL/ GRAVIER RECYCLE).	28
FIGURE 2. 7. CONCASSEUR A MACHOIRE.	28
FIGURE 2. 8. COURBES GRANULOMETRIQUES DES DEUX SABLES UTILISES.	29
FIGURE 2. 9. COURBES GRANULOMETRIQUES DES DEUX GRAVIERS UTILISES.	29
FIGURE 2. 10. ESSAI DE L'EQUIVALENT DE SABLE.	30
FIGURE 2. 11. VUE DE L'ESSAI DE MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.	31
FIGURE 2. 12. PYCNOMETRE UTILISE POUR DETERMINER LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE D'UN SABLE.	32
FIGURE 2. 13. ESSAI DE COEFFICIENT D'ABSORPTIONS DE GRANULATS.	33
FIGURE 2. 14. L'APPAREIL DE PIED A COULISSE POUR MESURE DES DIMENSIONS DES GRANULATS.	35
FIGURE 2. 15. APPAREIL LOS ANGELES.	36
FIGURE 2. 16. APPAREIL MICRO-DEVAL.	36
FIGURE 2. 17. ESSAI DE FRAGMENTATION DYNAMIQUE.	37
FIGURE 2. 18. METHODE DE LA DISSOLUTION DANS L'ACIDE CHLORIDRIQUE.	38
FIGURE 2. 19. METHODE DE L'EXPANSION THERMIQUE.	38
FIGURE 2. 20. VUE DE L'IMMERSION DES GRANULATS DANS L'EAU.	41
FIGURE 2. 21. VUE SUR LE SECHAGE DES GRANULATS AVEC UN CHIFFON.	41
FIGURE 2. 22. DAM DE COMPACTAGE ET LE MOULE PROCTOR STANDARD.	42
FIGURE 2. 23. MODE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES APRES DEMOULAGE.	43
FIGURE 2. 24. MODE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES APRES 24 H.	43
FIGURE 2. 25. ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE.	44
FIGURE 2. 26. ESSAI DE FENDAGE.	45
FIGURE 2. 27. ESSAI D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE.	46
FIGURE 2. 28. ESSAI D'ABSORPTION PAR IMMERSION.	47
FIGURE 2. 29. ESSAI DE PERMEABILITE A L'EAU.	48
FIGURE 3. 1. MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT FRAIS.	49
FIGURE 3. 2. MASSE VOLUMIQUE A L'ETAT DURCI.	50
FIGURE 3. 3. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES DEUX BCR.	50
FIGURE 3. 4. VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES DEUX BCR.	51
FIGURE 3. 5. ABSORPTION CAPILLAIRE DES BCR'S A 28 JOURS.	52
FIGURE 3. 6. ABSORPTION PAR IMMERSION DES BCRs A 28 JOURS.	53
FIGURE 3. 7. FACIES DE PROFONDEUR DE PENETRATION D'EAU DE BCR A 28 JOURS.	54

Liste des tableaux

TABLEAU 2. 1. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT UTILISE	24
TABLEAU 2. 2. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS UTILISES.	39
TABLEAU 2. 3. COMPOSITION DES DEUX BCR.	40

Liste des symboles

DCD	Déchet de Construction et de démolition
C & D	Construction et démolition
GBR	Granulat de béton recyclé
GN	Granulat naturel
SBR	Sable de béton recyclé
SN	Sable naturel
E/C	Rapport eau/ciment
BCR	Béton compacté au rouleau
BCR-N	Béton compacté au rouleau à base des granulats naturels
BCR-R	Béton compacté au rouleau à base des granulats recyclés

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte de pénurie croissante de ressources naturelles et d'augmentation des déchets de construction et de démolition (DCD), le recyclage des matériaux dans le secteur du génie civil devient une nécessité urgente. Le béton compacté au rouleau (BCR) se présente comme une solution économique et technique particulièrement adaptée à cette problématique. Cependant, la majorité des recherches antérieures se sont focalisées sur la substitution d'un seul type de granulat – souvent les granulats grossiers – et sur l'effet du taux de remplacement.

Ce travail se distingue par une approche innovante : la substitution simultanée de trois constituants granulaires (sable, gravier et fines) à des taux de 20 % chacun. Ce taux a été retenu après une revue critique de la littérature, qui montre qu'au-delà de ce seuil, les propriétés mécaniques et la durabilité peuvent se détériorer considérablement. Cette stratégie permet non seulement une valorisation plus importante des matériaux recyclés, mais aussi une amélioration notable du squelette granulométrique global. Celui-ci s'est avéré plus performant que celui obtenu avec les matériaux naturels, favorisant une meilleure compacité et une distribution granulaire plus homogène.

Ainsi, cette recherche vise à démontrer la faisabilité d'un BCR éco-conçu à hautes performances, en combinant innovation technique, rigueur scientifique et engagement pour la durabilité.

Ce travail est composé de trois parties ; la première est consacrée à la présentation globale des différents travaux sur les granulats et le béton recyclés. La seconde partie présente le protocole expérimental adopté pour cette recherche. La dernière partie récapitule les résultats obtenus et leur analyse afin de mieux comprendre l'effet des constituants recyclés. Ce travail se termine par une conclusion générale et des recommandations.

Recyclage de déchet de construction et de démolition

1.1. Introduction

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Chaque année, les secteurs du bâtiment et des travaux publics génèrent des centaines de millions de tonnes de déchets de démolition, majoritairement inertes. Face à l'épuisement des ressources naturelles, leur réutilisation s'est rapidement imposée comme une priorité pour le développement durable.

Le béton, qui représente près de 75 % des matériaux de construction utilisés dans le génie civil, est également la principale source de déchets de démolition. Ainsi, une gestion efficace de ces déchets contribue significativement à la préservation de l'environnement. Par ailleurs, l'exploitation intensive des granulats naturels, combinée à la croissance démographique mondiale, a entraîné une raréfaction de ces ressources. Dans ce contexte, la réutilisation des déchets de construction et de démolition pour la fabrication de béton apparaît comme une solution prometteuse [1].

1.2. Recyclage des déchets

Le recyclage est un processus de gestion des déchets, qu'ils soient industriels ou domestiques, visant à réintroduire certains matériaux dans le cycle de production. Ce procédé présente deux avantages écologiques majeurs ; il permet de réduire la quantité de déchets et de contribuer à préservation des ressources naturelles. Il s'inscrit dans un modèle économique propre aux sociétés de consommation modernes et, depuis les années 1970, constitue un secteur clé dans les économies des pays développés. Le recyclage fait partie d'une approche plus large de gestion des déchets, connue sous le nom de stratégie des trois R :

- **Réduire** : Diminuer la production de déchets en limitant la consommation et en optimisant l'utilisation des ressources.
- **Réutiliser** : Donner une seconde vie aux objets en les détournant de leur usage initial ou en prolongeant leur utilisation.
- **Recycler** : Transformer les déchets en nouveaux matériaux utilisables dans la fabrication de nouveaux produits [2].

1.2.1. Importance de recyclage dans le génie civil

Les contraintes environnementales et économiques poussent de plus en plus à substituer partiellement les matériaux traditionnels utilisés dans le secteur du bâtiment et des travaux publics par des alternatives locales. L'intégration des déchets recyclés, notamment en tant que granulats pour les routes et la construction, présente plusieurs avantages :

- Préservation des ressources naturelles en limitant l'extraction de matières premières.
- Réduction des distances de transport des matériaux, entraînant une baisse de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.
- Mise en œuvre rapide des chantiers, réduisant ainsi les nuisances pour les habitants.
- Diminution des volumes de déchets mis en décharge.
- Réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction.

Cette approche contribue à une gestion plus durable des matériaux tout en limitant l'impact écologique des infrastructures [3].

1.2.2. Recyclage des déchets dans le monde :

Les premières expérimentations sur le recyclage du béton ont été initiées aux États-Unis et au Japon à la fin des années 1970. L'objectif était de transformer les blocs de béton en matériaux réutilisables dans les travaux publics en les broyant de manière similaire à une roche naturelle, afin d'obtenir un mélange de sables et de gravillons comparable aux granulats issus des carrières classiques.

1.2.2.1. En Europe

Dans l'Union européenne, les taux de recyclage et de valorisation des déchets de construction et de démolition (DCD) présentent des disparités marquées entre États membres, avec des chiffres variant de 1% à 22%. Les pays les plus performants dans ce domaine sont le Royaume-Uni, les Pays-Bas, la Belgique, la France et l'Allemagne. Ils sont identifiés dans la figure 1.1 [4].

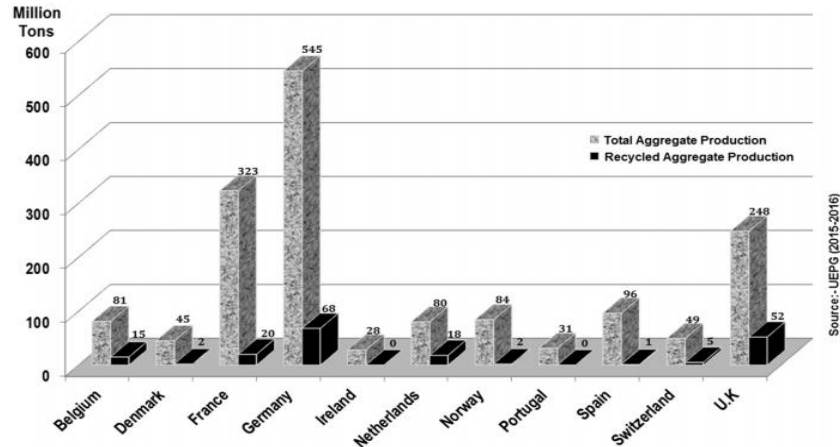


Figure 1. 1. Comparaison entre la production totale des granulats et des granulats recyclés de certains pays européens en 2015 [4].

Le cas du Royaume-Uni montre une évolution significative dans l'usage des granulats recyclés, désormais intégrés dans diverses applications constructives. Les données historiques indiquent une consommation annuelle de 20 millions de tonnes en 1980, pour atteindre un maximum de 71 millions de tonnes en 2015. On observe toutefois un recul à 52 millions de tonnes en 2009, représentant alors 26% du volume total des granulats utilisés sur le territoire britannique [5].

1.2.2.2. En Asie

En Chine, la production de matériaux recyclés provient principalement des activités de démolition ainsi que des catastrophes naturelles. Par exemple, le séisme de Wenchuan en 2008 (province du Sichuan), qui a fait 90 000 victimes, a généré approximativement 380 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition (DCD) [6]. Le volume de ces déchets s'est élevé à 239 millions de tonnes en 2010. Dans un contexte d'urbanisation accélérée, le secteur chinois consomme annuellement 820 millions de tonnes de ciment et 8 milliards de tonnes de granulats pour répondre à la demande croissante. Toutefois, contrairement à l'UE, les pratiques de réutilisation et recyclage restent limitées, conduisant à l'élimination de la majorité des DCD dans des décharges [7].

A Taiwan, une politique intégrée de gestion des DCD a été instaurée en 1999 suite au séisme dévastateur ayant endommagé 100 000 habitations. Les opérations de reconstruction devaient produire plus de 30 millions de tonnes de DCD. Grâce à des installations dédiées, 80 % des matériaux sont recyclés pour les centres d'enfouissement, tandis que 30% servent à la construction routière [8].

Le Japon, pionnier en matière de valorisation des DCD, atteint un taux de recyclage de 98 %, incluant l'utilisation dans le béton structurel [4].

1.2.2.3. En Amérique

Au Québec, le secteur des déchets de construction et de démolition (DCD) a connu des avancées notables. En 2008, 4,6 millions de tonnes de DCD y ont été générées, dont 74% ont été valorisées ; un taux de récupération remarquable. Cette performance s'explique en partie par la mobilisation proactive des acteurs industriels, structurés depuis 1997 au sein du Regroupement des récupérateurs et recycleurs de matériaux de DCD du Québec (3R MCDQ). Cette organisation joue un rôle clé dans la promotion d'approches circulaires (recyclage, réemploi, valorisation) à travers des initiatives concrètes.

Le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) a complété cette démarche par une étude approfondie sur le recyclage des matériaux minéraux (bétons, briques, asphalte). Cette recherche visait à :

- Recenser les techniques de valorisation les plus prometteuses
- Documenter les applications existantes pour ces matériaux recyclés
- Établir un benchmarking international des meilleures pratiques

Cette double approche - concertation sectorielle et recherche appliquée - positionne le Québec comme un territoire innovant dans la gestion des DCD [1].

1.2.2.4. En Algérie

L'Algérie fait face à un déficit en granulats estimé entre 10 et 20 %, tandis que les déchets de construction et de démolition (C&D) restent peu valorisés. Une seule initiative de recyclage a été menée à El-Asnam (Chlef) après le séisme de 1980, en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de la Construction Belge (CSTC) [9]. En 2014, la production annuelle de déchets de C&D était estimée à 11 millions de tonnes, constituant un gisement valorisable potentiellement rentable. Toutefois, l'industrialisation et l'urbanisation du pays, amorcées dans les années 2010, ne se sont pas accompagnées de politiques environnementales rigoureuses, limitant ainsi le développement d'une filière de recyclage efficace.

1.2.3. Différents types de recyclât

1.2.3.1. Laitiers

Les laitiers sont des coproduits de la sidérurgie, obtenus lors de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Selon le mode de refroidissement, on distingue :

- Le laitier cristallin (refroidi lentement à l'air libre), utilisé comme granulats dense pour béton.
- Le laitier expansé (refroidi brutalement par trempe à l'eau), valorisé pour sa structure poreuse et légère.

Des études comparatives [10], démontrent que les bétons formulés avec des granulats de laitier présentent une résistance mécanique supérieure à ceux à base de granulats calcaires traditionnels.

1.2.3.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont issues de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales thermiques, les cendres volantes se distinguent par :

- Leur réactivité pouzzolanique (liée à leur teneur en silice et alumine).
- Leur rôle dans l'optimisation énergétique: le carbone résiduel favorise l'auto-combustion lors du frittage.

Leur classification dépend :

- De leur teneur en CaO (cendres siliceuses vs. calciques).
- Du type de charbon source (anthracite, bitumineux, etc.) [11].

1.2.3.3. Verre de récupération

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier [12].

Le verre recyclé, avec des millions de tonnes généré annuellement, est valorisé en construction sous deux formes :

- Granulats (> 4 mm) : Utilisés en substitution partielle des granulats traditionnels, mais avec une résistance mécanique réduite
- Poudres (< 4 mm): Intégrées dans les mortiers ou comme ajout cimentaire, améliorant la finesse et la durabilité [11].

1.2.3.4. Pneus usagers

Les granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus offrent des propriétés uniques:

- Ductilité accrue: Retardement de la fissuration grâce à une meilleure absorption des déformations.
- Limite majeure: Faible résistance en compression, restreignant leurs applications aux chapes isolantes ou revêtements anti-vibratiles [13].

1.2.3.5. Déchets de marbre

Les résidus de transformation du marbre (granulats et poudres) sont recyclés dans :

- Les revêtements de sol (granito, carrelage).
- Les peintures (comme charge minérale).
- Les bétons décoratifs (pour leur blancheur et faible absorption d'eau) [12].

1.2.3.6. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières

Bien que peu exploités aujourd'hui, ces déchets présentent un potentiel pour :

- La fabrication de briques autoclaves.
- Les bétons légers (granulats poreux). Leur hétérogénéité chimique reste un défi à maîtriser pour une valorisation à grande échelle.

1.2.3.7. Béton récupéré

La raréfaction des ressources naturelles et les contraintes environnementales stimulent l'usage du béton concassé.

a) Propriétés mécaniques :

- Résistance en compression: 10–30% inférieure au béton conventionnel.
- Module d'élasticité: Plus faible, surtout à faible rapport E/C.

b) Solutions d'amélioration :

- Ajout de superplastifiants.
- Augmentation du dosage en ciment [12].

1.2.3.8. Briques concassées

Les briques concassées constituent une alternative prometteuse aux granulats naturels, offrant des avantages environnementaux notables par la réduction des déchets de construction et la préservation des ressources. Cependant, leur utilisation se heurte à des

défis techniques, notamment leur forte absorption d'eau, la présence d'impuretés et des incertitudes quant à leur comportement mécanique, ce qui freine leur adoption [14].

Les recherches actuelles, principalement européennes et américaines, se concentrent sur leur emploi comme granulats grossiers [15], tandis que d'autres applications potentielles restent à explorer. Le développement de méthodes de prétraitement et de formulations adaptées apparaît essentiel pour favoriser l'utilisation de ces matériaux recyclés dans le béton.

1.3. Granulat recyclé

1.3.1. Définition

Les granulats recyclés désignent des matériaux issus du traitement et de la valorisation de déchets de construction, principalement obtenus par le concassage de béton de démolition, ainsi que de sous-produits industriels comme les laitiers sidérurgiques. Ces matériaux constituent une alternative écologique aux granulats naturels, permettant à la fois de réduire l'enfouissement des déchets de chantier et de préserver les ressources minérales. Leur production s'intègre dans une démarche d'économie circulaire, bien qu'elle doive répondre à des exigences techniques strictes concernant leurs caractéristiques physiques et mécaniques pour garantir leur performance dans les applications constructives. Actuellement, on distingue plusieurs types de granulats recyclés, notamment les granulats de béton recyclé et ceux issus de laitiers, chacun présentant des propriétés spécifiques qui conditionnent leurs domaines d'utilisation privilégiés dans le bâtiment et les travaux publics.

1.3.2. Description du granulat recyclé

Les granulats de béton recyclés (GBR) présentent une composition hétérogène distincte des granulats naturels (GN), en raison de leur structure composite. Ils sont constitués de :

- Granulats naturels partiellement concassés: Fragments résiduels issus du béton d'origine.
- Pâte de ciment hydratée adhérente: Enrobage partiel des granulats naturels, résultant du concassage du béton parent (Figure 1.2).

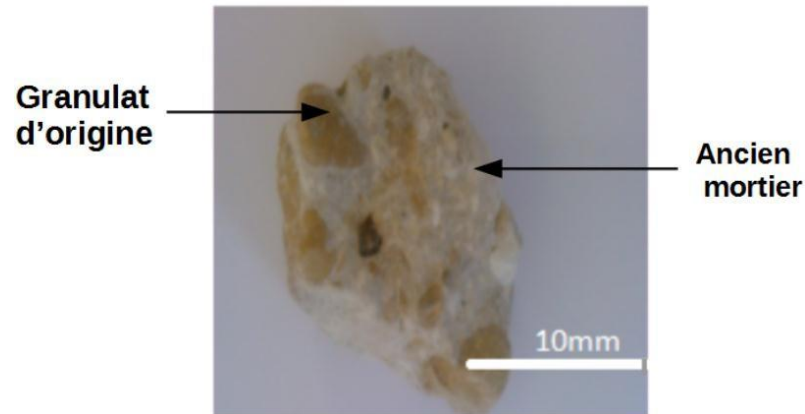


Figure 1. 2. Formes des granulats recyclés [16].

Les propriétés d'un GBR reste dépendant de la quantité et la qualité de la pâte adhéree à sa surface :

La proportion de pâte de ciment dans les GBR dépend directement de la formulation du béton parent (rapport E/C, dosage en liant, etc.).

Cette hétérogénéité influence leurs performances mécaniques (résistance, absorption d'eau) comparativement aux GN [16].

1.3.3. Granulat recyclé fin

L'incorporation de granulats recyclés dans la production de béton fait l'objet de recherches approfondies, révélant des comportements différenciés selon la fraction granulométrique considérée. Les études montrent que le remplacement partiel des gros granulats naturels par des granulats recyclés n'affecte pas significativement les propriétés du béton. En revanche, l'utilisation de la fraction fine des granulats recyclés suscite des débats dans la communauté scientifique. Le principal défi identifié concerne leur absorption d'eau élevée, pouvant altérer les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais et ses performances mécaniques finales.

Plusieurs travaux de recherche, notamment ceux de [17-19], démontrent cependant que l'emploi de fines recyclées peut s'avérer viable à condition de maîtriser leur dosage. Ces études mettent en évidence des résistances à la compression comparables à celles des bétons conventionnels (jusqu'à 60 MPa), attribuées à la présence de ciment non hydraté dans les fines et à leur porosité favorisant l'adhérence avec la pâte cimentaire.

La problématique de l'ouvrabilité a été particulièrement étudiée par T.C. Hansen (1986)[20], révélant qu'un béton entièrement composé de granulats recyclés nécessite

environ 5% d'eau supplémentaire par rapport à un béton mixte (combinant granulats recyclés grossiers et sable naturel). Cette augmentation des besoins en eau, directement liée à la granulométrie et à la nature des fines recyclées, impacte également les dosages en adjuvants nécessaires pour obtenir des propriétés rhéologiques équivalentes.

La composition complexe des fines recyclées, mélange de particules minérales naturelles et de pâte de ciment hydratée, soulève des questions fondamentales sur leur contribution respective aux propriétés du béton. Une meilleure compréhension de ces mécanismes apparaît essentielle pour optimiser l'utilisation des granulats recyclés fins tout en limitant l'impact environnemental, notamment en contrôlant les besoins en eau qui influent directement sur les résistances mécaniques finales. Ces recherches ouvrent ainsi la voie vers une valorisation plus systématique des fines recyclées dans des bétons à performances contrôlées.

1.3.4. Processus de fabrication des granulats recyclés

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont les suivantes :

- Sélection et stockage des produits bruts.
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (B.R.H.), à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille et à retirer les impuretés les plus grosses.
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un dé-ferraillage électromagnétique.
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné, à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné, à retirer les impuretés (bois, papiers, plastiques) résiduelles.
- Concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire. L'installation secondaire peut aussi être équipée d'un séparateur magnétique, d'un dispositif d'épuration (lavage, tables densimétriques, ...). On voit donc que les centres de recyclage peuvent offrir une technicité très variée allant du simple concasseur à mâchoire sans criblage ni épuration jusqu'à l'installation industrielle sophistiquée disposant de deux, voire trois niveaux de concassage, de criblage et d'épuration.

1.4. Revue littérature de béton compacté au rouleau (BCR)

Cette partie présente une revue de la documentation sur la technologie du béton compacté au rouleau (BCR). Il parcourt en premier lieu la notion du BCR. Par la suite, les techniques d'utilisation du BCR en corps de barrage et en routes sont couvertes. Les performances et les caractéristiques du BCR sont aussi traitées.

Une description est consacrée aux différents composants du BCR ainsi que ses différents procédés et techniques de mise en place. Enfin, les travaux de recherches sur le BCR, tel que les méthodes et les formulations, sont présentés.

1.4.1. Définition

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) se distingue comme un béton à affaissement nul, de consistance très ferme, partageant la même composition de base qu'un béton conventionnel (ciment, granulats, eau et éventuels adjuvants). Sa particularité réside dans son mode de mise en œuvre : préparé comme un béton classique, il est ensuite placé et compacté selon des techniques similaires à celles utilisées pour les sols, à l'aide d'engins de travaux publics tels que des paveuses et des rouleaux vibrants.

Selon l'Institut Américain du Béton, le BCR se définit par sa capacité, à l'état frais, à supporter la charge des rouleaux compacteurs tout en permettant un compactage efficace. Ce matériau présente une apparente sécheresse qui nécessite l'application d'une énergie de compactage importante pour atteindre sa consolidation optimale. La formulation du mélange doit donc trouver un équilibre délicat ; suffisamment rigide pour résister à l'action des compacteurs sans s'affaisser, tout en conservant une humidité et une maniabilité minimales pour éviter les phénomènes de ségrégation.

Le BCR occupe une position intermédiaire entre les sols et les bétons traditionnels. Durant les premières heures suivant son malaxage, son comportement s'apparente à celui d'un sol (techniques de mise en place et de compactage similaires), avant d'acquérir progressivement les caractéristiques d'un béton durci et indéformable. Cette phase de transition, encore mal comprise, représente un champ de recherche important tant sur le plan théorique qu'expérimental pour mieux appréhender ses mécanismes fondamentaux de comportement.

D'un point de vue économique, les études de Vahedifard et al. (2010) [22]

démontrent l'intérêt financier du BCR comme alternative aux matériaux traditionnels, particulièrement pour les chaussées soumises à de fortes sollicitations. Les économies réalisées peuvent atteindre jusqu'à 58% par rapport à l'utilisation de béton de pavage classique, ce qui en fait une solution particulièrement attractive pour les infrastructures routières [23].

1.4.2. Historique et applications majeures

Le béton compacté au rouleau (BCR) s'est imposé comme une solution privilégiée dans la construction de routes et de barrages, grâce à ses nombreux atouts techniques et économiques : coût réduit, rapidité d'exécution et performances mécaniques élevées. Son histoire remonte à 1942, lorsque le *U.S. Army Corps of Engineers* réalisa pour la première fois une chaussée en BCR à Yakima, dans l'État de Washington.

Une technique similaire, le gravier traité, avait fait son apparition en Suède dès 1930. Bien que partageant une composition et des méthodes de compactage analogues à celles du BCR (Figure 1.4), ce matériau s'en distingue par sa teneur en liants et la granulométrie de ses agrégats. Utilisé principalement pour les routes, le renforcement des sols et l'étanchéité, le gravier traité est parfois considéré dans la littérature comme une variante du BCR.



Figure 1. 4. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930 [24].

Parmi les réalisations les plus marquantes figurent le chantier de l'usine *General Motors Saturn* au Tennessee, où plus de 540 000 m² de BCR (d'une épaisseur variant entre 203 et 254 mm) ont été mis en œuvre. Initialement prévu en enrobé bitumineux, le projet a

finalement opté pour un gravier traité au ciment, avec un dosage élevé en liant (13 %) afin d'améliorer la résistance au gel-dégel et à l'abrasion.

Au Canada, l'adoption du BCR dans le domaine routier débute en 1976 avec l'aménagement d'une aire de stockage de billes de bois de 52 000 m² en Colombie-Britannique (Figure 1.5). Le succès de cette première expérience a conduit à la réalisation d'autres plates-formes similaires entre 1976 et 1978, toujours en service aujourd'hui avec un entretien minimal.



Figure 1. 5. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique[25].

Parallèlement, l'*U.S. Army Corps of Engineers* explore dès 1980 l'usage du BCR pour des applications militaires. Deux projets pilotes voient le jour en 1983, destinés à supporter le passage de véhicules blindés. En 1984, un chantier de plus de 15 000 m² démontre la capacité du matériau à résister à des charges lourdes, avec une résistance à la flexion atteignant 5,5 MPa. La décennie 1980 voit également l'essor du BCR dans les terminaux intermodaux, comme à Houston (44 313 m²) et Denver (107 021 m²), ainsi que dans les infrastructures portuaires, notamment à Boston.

L'application du BCR aux ouvrages hydrauliques prend son essor dans les années 1960, avec les barrages de Gere (Italie) et Manicouagan I (Canada). Ces réalisations pionnières utilisaient un béton dense, compacté par bulldozers, considéré aujourd'hui comme une forme primitive de BCR.

En 1970, Raphael propose dans son article « *The Optimum Gravity Dam* »

d'optimiser le volume du barrage-poids grâce au BCR. Son approche repose sur l'utilisation d'engins de chantier puissants pour compacter un mélange de tout-venant cimenté, permettant une réduction significative des sections tout en améliorant la résistance au cisaillement.

Deux ans plus tard, Canon approfondit ces travaux en démontrant l'efficacité d'un béton à granulométrie contrôlée, transporté par camions et compacté par rouleaux vibrants. Cette méthode, présentée comme supérieure aux techniques conventionnelles, ouvre la voie aux barrages modernes en BCR.

Les années 1970 voient l'émergence de la technique *Roller-Compacted Dam (RCD)* au Japon, appliquée partiellement au barrage de Shimajigawa (achevée en 1981) (figure 1.6). Le premier ouvrage entièrement réalisé en BCR est le barrage de Willow Creek (1982), avec un volume de 330 000 m³.



Figure 1. 6. Barrage de Shimajigawa au Japon[26].

En Afrique, le béton compacté au rouleau (BCR) demeure une technique émergente, principalement limitée à la construction de barrages comme ceux de Rmil en Tunisie et Koudiat Acerdoune en Algérie. Son application dans le domaine routier reste encore inexplorée, malgré un contexte particulièrement favorable : abondance de granulats naturels (roulés et concassés), répartition homogène des cimenteries sur le territoire, pénurie fréquente de liants bitumineux, ainsi que les avantages économiques et logistiques du BCR (coût réduit et rapidité d'exécution). Ces atouts stratégiques plaident en faveur d'études approfondies de caractérisation et de faisabilité pour son intégration dans les infrastructures routières. La Figure 1.7 illustre d'ailleurs la position du BCR par rapport aux autres matériaux de construction, mettant en évidence son potentiel inexploité. [27]

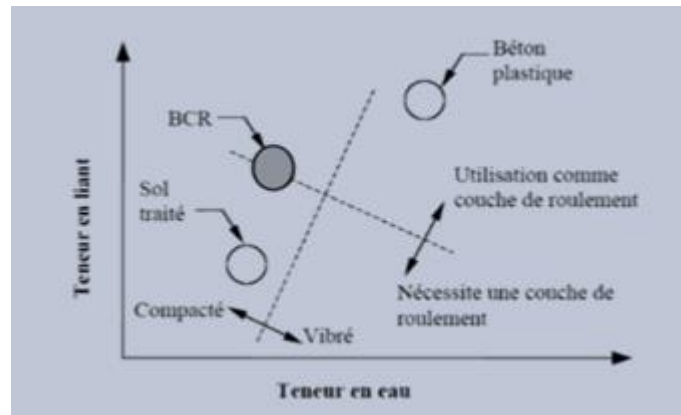


Figure 1. 7. Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau [27].

1.4.3. Avantages du BCR

Le Béton Compacté au Rouleau présente plusieurs atouts majeurs [23] :

- **Durabilité exceptionnelle** : Le BCR offre une longévité supérieure aux matériaux traditionnels, réduisant significativement les interventions de construction et d'entretien qui perturbent la circulation.
- **Maintenance réduite** : Contrairement aux chaussées bitumineuses nécessitant des travaux tous les 3-5 ans, les ouvrages en BCR ne requièrent que des interventions mineures après 12 ans d'utilisation.
- **Résistance aux déformations** : Sa rigidité intrinsèque prévient la formation d'ornières sous les charges lourdes et élimine les déformations thermiques, contrairement aux revêtements souples sujets au fluage et aux ondulations.
- **Sécurité accrue** : Les études démontrent une adhérence supérieure sur surface mouillée et des distances de freinage réduites par rapport à l'asphalte, particulièrement en présence d'ornières
- **Efficacité énergétique** : La rigidité structurale permet des économies de carburant atteignant 20% en minimisant la déflexion sous les poids lourds.
- **Visibilité nocturne améliorée** : Sa surface claire réfléchit mieux l'éclairage, offrant une meilleure perception visuelle de nuit comparé aux revêtements sombres.

1.4.4 Limitations du BCR

- **Qualité de surface** : La texture et l'uni des surfaces en BCR constituent ses principales contraintes. La macro-texture est évaluée par [23] :

- ✓ Essai de tache de sable (ASTM E965)
 - ✓ Méthodes laser
 - ✓ Texturométrie
 - ✓ Stéréoscopie
- **Problématique d'uni** : L'uni, défini par les variations altimétriques par rapport à un plan théorique, reste un défi pour les applications à haute vitesse. Deux types de défauts prédominent :
 - Ondulations longitudinales
 - Ondulations transversales
 - **Facteurs influençant la qualité** : La régularité dépend étroitement de :
 - ✓ La précision des procédures constructives
 - ✓ L'homogénéité du compactage
 - ✓ La performance des finisseurs
 - ✓ Les techniques de compactage employées

Cette sensibilité aux conditions de mise en œuvre explique pourquoi le BCR trouve encore des limitations dans les applications où la qualité de roulement est critique.

1.5. Propriétés du BCR

La compacité constitue un paramètre fondamental dans la formulation des bétons compactés au rouleau (BCR), influençant directement leurs propriétés mécaniques et leur durabilité Pilon, (1998) [28]. L'optimisation de la teneur en eau permet d'atteindre un compromis entre une bonne ouvrabilité à l'état frais et une capacité portante immédiate, tout en visant une densification maximale proche de l'optimum Proctor modifié. Une compacité élevée, caractérisée par une porosité inférieure à 3 % [29], se traduit par une amélioration significative des résistances mécaniques, notamment en compression où une augmentation de seulement 1% du degré de compaction peut générer un gain de 3 à 5 MPa. Ce phénomène s'explique par la réduction de l'épaisseur de la pâte et par un meilleur contact entre les granulats, bien que l'impact sur la résistance en flexion soit moins marqué ($\pm 10\%$ contre $\pm 25\%$ en compression pour une variation de compacité de 94 % à 96 %).

Les principaux facteurs affectant le compactage incluent la granulométrie du squelette granulaire, la morphologie des particules, la teneur en eau et le volume de pâte, soulignant l'importance d'un contrôle rigoureux de ces paramètres lors de la mise en œuvre.

La figure 1.8 illustre cette relation critique entre le degré de compaction et les performances mécaniques, confirmant que les mélanges les mieux consolidés présentent les propriétés les plus optimales.

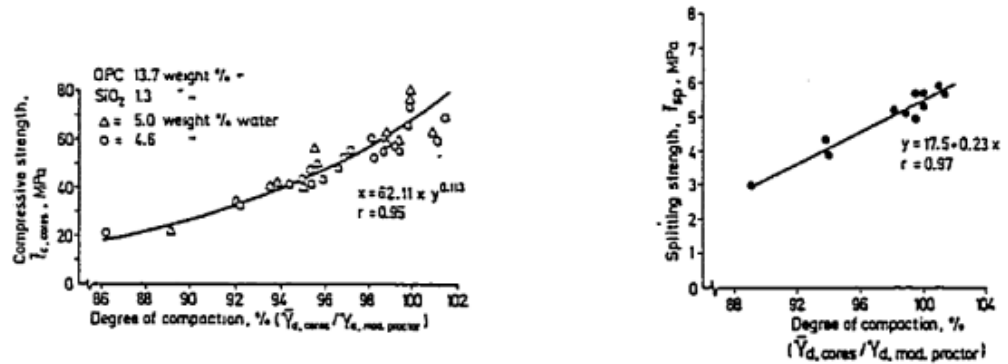


Figure 1. 8. Relation entre le degré de compacité et les propriétés mécaniques [28].

1.5.1. Propriétés à l'état frais

La maniabilité du BCR, mesurée par l'essai VEBE (ASTM C1170/C1170M-08)[30], est un paramètre clé [31]. Contrairement aux bétons conventionnels, le BCR présente un affaissement quasi-nul, avec un temps VEBE optimal généralement compris entre 40 et 90 secondes. Cette caractéristique est cruciale pour assurer une bonne mise en place et un compactage efficace.

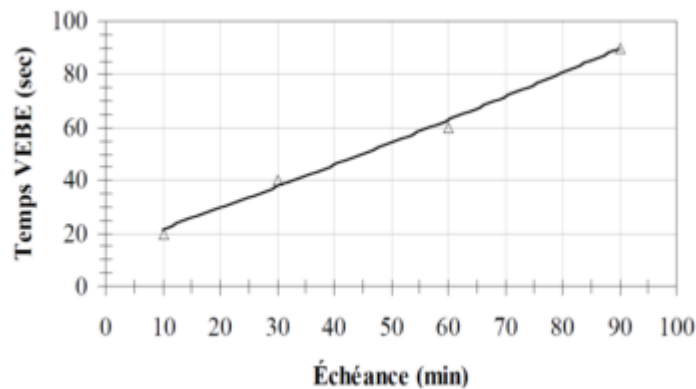


Figure 1. 9. Exemple de l'évolution de la maniabilité dans le temps d'un mélange de BCR [31].

La masse volumique fraîche, indicateur de la compacité, peut être déterminée par différentes méthodes normalisées (Proctor, vibrocompactage, marteau vibrant). Pittman [32] a montré qu'elle dépend fortement des conditions de compactage : type d'équipement, nombre de passes, délai de compactage et épaisseur de couche. Des études [33, 34] dont nous discuterons plus tard ont confirmées que l'utilisation de granulats recyclés peut augmenter cette masse volumique jusqu'à 5%, améliorant ainsi la compacité.

1.5.2. Propriétés à l'état durci

Les performances mécaniques du BCR sont généralement supérieures à celles du béton conventionnel. Les données de l'Association Canadienne du Ciment (2005) montrent des plus grandes résistances en compression et en flexion de BCR. La microstructure plus dense du BCR se traduit également par une porosité réduite (6% contre 11,2%) et une perméabilité plus faible [35].

Amer, (2003) [36] a démontré l'importance cruciale du compactage, avec une relation linéaire entre le nombre de girations et l'amélioration des résistances mécaniques [37].

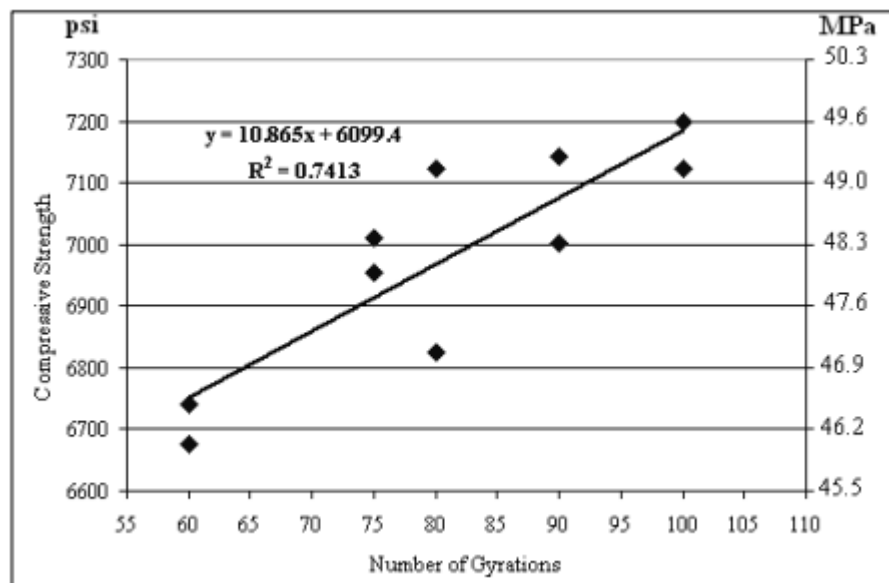


Figure 1. 10. Résistance à la compression par rapport au nombre de girations[37].

Plus récemment, Ashteyat et al. (2022) [34] ont validé ces résultats tout en mettant en évidence l'effet bénéfique des ajouts minéraux comme la fumée de silice.

1.5.3. Durabilité et performances environnementales

La durabilité exceptionnelle du BCR, liée à sa faible perméabilité, en fait un matériau privilégié pour les ouvrages hydrauliques. Plusieurs études comme Houehanou, E.C. (2005) [38] ont confirmé ses excellentes résistances aux cycles gel-dégel et aux attaques sulfatiques.

D'un point de vue environnemental, l'utilisation de granulats recyclés permet de réduire l'empreinte carbone tout en maintenant, voire améliorant, les performances mécaniques. La récente norme européenne BS EN 16907-4 (2022) reconnaît d'ailleurs officiellement le BCR comme solution durable pour les infrastructures.

1.6. Conclusion

Le BCR combine d'excellentes propriétés mécaniques, une grande durabilité et des avantages environnementaux. Ses performances dépendent étroitement :

- Du contrôle rigoureux de la maniabilité à l'état frais
- Des paramètres de compactage
- De la qualité des constituants
- De l'utilisation éventuelle d'ajouts ou de granulats recyclés

Les récents développements dans ce domaine ouvrent des perspectives prometteuses pour des applications toujours plus variées, tout en répondant aux enjeux de construction durable.

Protocole expérimental

2.1. Introduction

Cette étude expérimentale a été menée au Laboratoire Géomatériaux (LaG) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie). Avant de procéder aux investigations pratiques, il est essentiel de caractériser les matériaux constitutifs des bétons compactés au rouleau (BCR), car leurs propriétés influencent directement les performances mécaniques et la durabilité du matériau final.

Ce chapitre décrit les constituants employés dans la formulation des BCR, ainsi que les protocoles d'essais normalisés appliqués pour leur évaluation. L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser l'impact du remplacement partielle des granulats naturels par des granulats recyclés (fins et gros) et d'une partie de ciment par de la poudre de béton sur le comportement mécanique et la durabilité des BCR, afin d'en valider la faisabilité pour des applications pratiques dans le génie civil.

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1. Ciment

Le liant hydraulique employé dans cette étude est un ciment Portland composé de type (CEM II/A-L 42.5), fabriqué par l'usine cimentière d'Oued Sly (Chlef, Algérie). Ce matériau présente une teneur en calcaire de 18% et se caractérise par une masse volumique de 3.1, accompagnée d'une finesse de mouture de 3298 cm^2/g . Conformément à sa classification normative, il développe une résistance en compression dépassant 42.5 MPa après 28 jours. Les propriétés chimiques et minéralogiques détaillées de ce ciment sont systématiquement reportés dans le tableau suivant :

Tableau 2. 1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

Composition chimique (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
62.78	20.68	4.80	4.70	0.55	2.27	0.15	0.42	0.90
Composition minéralogique (%)								
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		
60.83		18.92		8.82		10.96		



Figure 2. 1. Sac de ciment d'Oued Sly (Chlef) (CEM II/A 42.5).

2.2.2. Eau de gâchage

L'eau de gâchage employée dans cette étude provient du réseau d'eau potable du laboratoire, prélevée directement aux points d'utilisation.

2.2.3. Sable naturel et recyclé

Cette étude a mobilisé deux granulats fins distincts :

- **Un sable naturel (0/4 mm) (SN)** d'origine alluvionnaire, prélevé dans le bassin de la rivière de Cheliff près d'Ain Defla.
- **Un sable recyclé (0/4 mm) (SBR)** obtenu par concassage mécanique de blocs de béton durci fabriqués en laboratoire.

Le granulat recyclé correspond à la fraction fine résiduelle après extraction des granulats grossiers (4/16 mm) lors du processus de concassage. La Figure 2.2 schématise la chaîne opératoire de production de ce matériau secondaire, tandis que la Figure 2.3 présente une comparaison visuelle des deux types de sable.

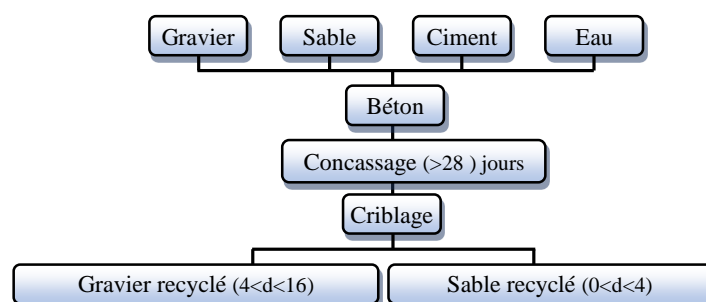


Figure 2. 2. Processus de fabrication du sable de béton recyclé.



a) Sable recyclé



b) Sable naturel

Figure 2. 3. Vue sur les deux sables utilisés (sable naturel/ sable recyclé).

2.2.4. Fines recyclé

Pour valoriser efficacement les déchets de chantier en tant que substitut au ciment, un protocole spécifique de traitement des fines de béton recyclé a été mis en œuvre. Le processus comprend les étapes mécaniques suivantes pour obtenir une granulométrie optimale :

- **Préparation des matériaux :**
 - ✓ Tri sélectif et séparation manuelle des débris de béton
 - ✓ Concassage primaire à l'aide d'un broyeur à disques
- **Procédé de broyage fin :**
 - ✓ Chargement :
 - ✓ kg de matériau concassé par cylindre (4 cylindres au total).
- **Milieu de broyage :**
 - ✓ billes en acier de grande taille (Ø 25 mm).
 - ✓ 1,5 kg de billes en acier de petite taille (Ø 10 mm) par cylindre.
- **Régime de broyage intermittent :**
 - ✓ Sessions quotidiennes de 3 à 6 heures.
 - ✓ Durée totale : 10 jours.

- Contrôle final de la granulométrie :
- Tamisage à 80 μm (selon la norme EN 933-2) [39]

La figure 2.4 illustre l'ensemble du procédé de transformation, depuis les gros éléments de béton démolé jusqu'à la poudre fine semblable au ciment.

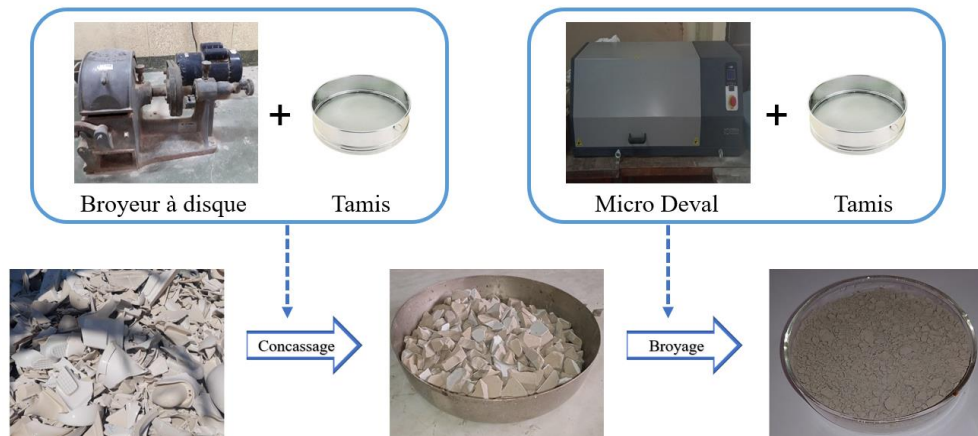


Figure 2. 4. Etapes d'obtention des fines de déchets de chantiers.

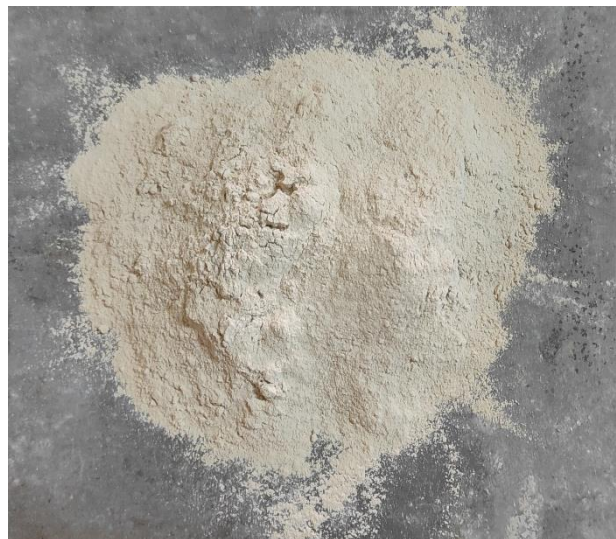


Figure 2. 5. Fines recyclé.

2.2.5. Gravier naturel et gravier recyclé

Deux types de granulats ont été étudiés ; un gravier naturel (GN) d'origine calcaire (4/16 mm) provenant de la carrière d'ENOF (Oued Fodda), et un gravier de béton recyclé (GBR) illustré dans la figure 2.6 obtenu par concassage contrôlé d'éprouvettes de béton

ordinaire fabriquées en laboratoire. Le béton source ou parents est conçu avec les mêmes matériaux et méthodes que le béton témoin, il a subi plus de 28 jours de durcissement avant d'être fragmenté manuellement à la massette, puis broyé mécaniquement à l'aide d'un mini-concasseur à double mâchoires (figure 2.7). Un tamisage rigoureux a permis d'obtenir une distribution granulométrique (4/16 mm) identique à celle du GN.

Cette approche méthodologique, utilisant du béton laboratoire plutôt que des déchets réels de construction, a permis d'éliminer les aléas liés aux contaminants (peinture, plâtre, particules étrangères) tout en garantissant une comparabilité optimale entre les deux types de granulats.



a) gravier recyclé



b) gravier naturel

Figure 2. 6. Vue sur les deux graviers utilisés (gravier naturel/ gravier recyclé).



Figure 2. 7. Concasseur à mâchoire.

2.2.6. Caractéristiques des granulats utilisés

2.2.6.1. Analyse Granulométrique :

Les courbes granulométriques des deux type de sable (SN et SBR) et des deux types de granulats (GN et GBR) selon la norme EN 933-1 [40] sont représentées dans les figures suivantes :

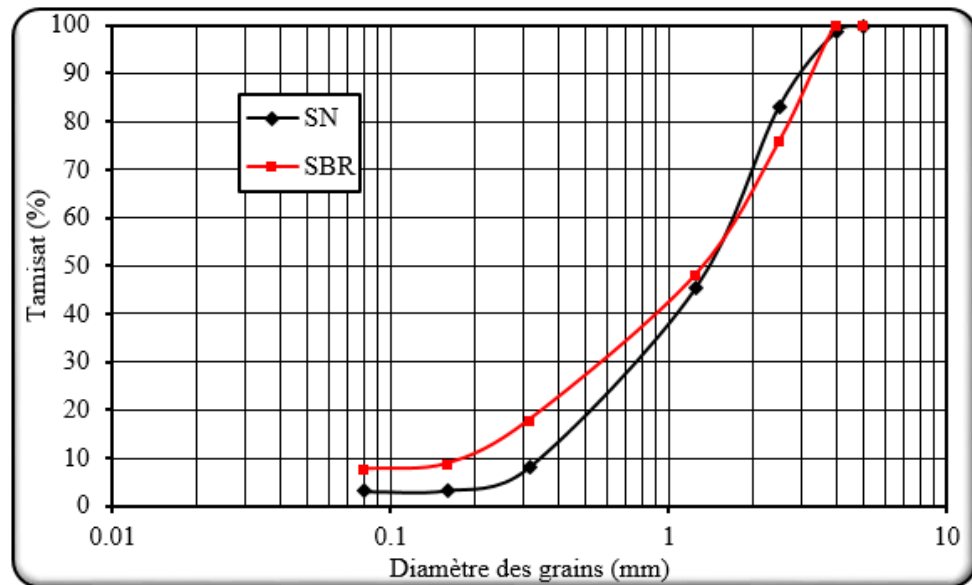


Figure 2. 8. Courbes granulométriques des deux sables utilisés.

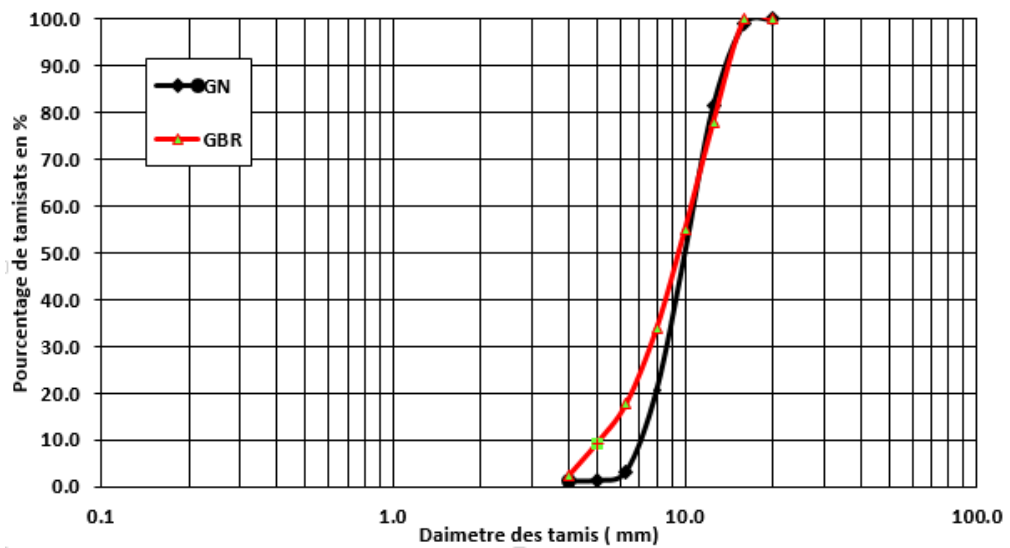


Figure 2. 9. Courbes granulométriques des deux graviers utilisés.

2.2.6.2. Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable est réalisé selon la norme BS EN 933-8 [41], et cela permet d'évaluer la propreté du sable en quantifiant la présence de particules fines et de poussières. Il existe deux types de mesures :

- Méthode visuelle : Lecture directe des hauteurs (sable propre vs. mélange).
- Méthode au piston : Un piston est inséré délicatement, et la hauteur est relevée.

L'équivalent de sable est exprimé par la relation suivants (Figure 2.10) :

$$E_s = \frac{H_2}{H_1} 100 \quad (2.1)$$

Le sable naturel (SN) présente un équivalent de sable de 89%, supérieur au sable recyclé (SBR) à 80%. Cette différence indique que le SN contient moins d'impuretés (argiles, limons) que le SBR, ce qui en fait un matériau plus propre et mieux adapté aux bétons nécessitant une faible demande en eau. Bien que le SBR reste acceptable ($E_s > 75\%$), sa teneur plus élevée en fines peut affecter la maniabilité et les résistances mécaniques des bétons.

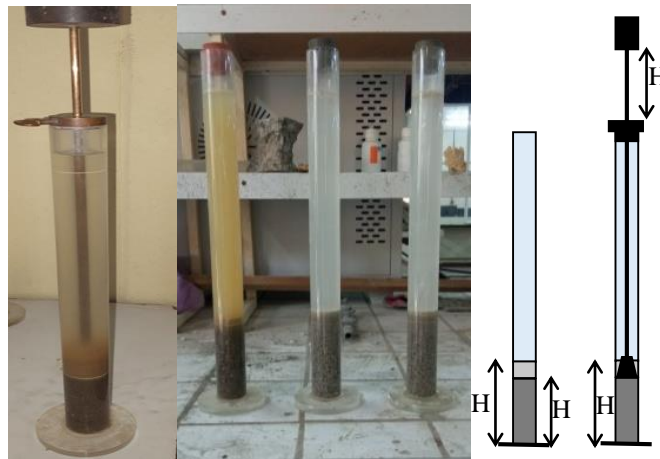


Figure 2. 10. Essai de l'équivalent de sable.

2.2.6.3. Module de finesse

Selon la norme EN 933-1 [40], le module de finesse du sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivants : 0,08-0,16-0,315-1.25-2.5-5 mm, donné par l'expression suivants :

$$M_f = \frac{R_5 + R_{2.5} + R_{1.25} + R_{0.315} + R_{0.16} + R_{0.08}}{100} \quad (2.2)$$

Selon la valeur du module de finesse, on peut classer les sables comme suit :

- $1.8 < MF < 2.2$: sable fin, particulièrement utilisé pour son effet positif sur

l'ouvrabilité lors de la mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

- 2.2 < MF < 2.8 : sable favorisé : adapté pour atteindre une ouvrabilité appropriée et de bonne résistance en diminuant les risques de ségrégation.
- 2.8 < MF < 3.3 : sable grossier : souvent utilisé afin d'obtenir des résistances élevées cependant cela s'accompagne avec des effets négatifs ; diminution de l'ouvrabilité et aussi des risques de ségrégation.

Les valeurs similaires du module de finesse (SN : 2.71, SBR : 2.62) suggèrent que les deux sables ont des distributions granulométriques comparables. Cependant, le SBR est légèrement plus fin, ce qui pourrait influencer la rhéologie du béton en augmentant la surface spécifique à enrober par la pâte de ciment.

2.2.6.4. Masses volumique

La masse volumique est une propriété fondamentale permettant de caractériser la compacité et la densité des granulats. Deux méthodes distinctes ont été appliquées pour évaluer :

a) Masse Volumique Apparente (ρ_a)

La masse volumique apparente, incluant les vides inter granulaires, a été déterminée conformément à la norme EN 1097-6 [42]. Le protocole expérimental est le suivant :

- Un récipient étalonné de 1 Litre est pesé à vide (M_1).
- Les granulats (naturels ou recyclés) sont versés sans compactage à une hauteur maximale de 5 cm à l'aide d'une main écope, puis arasés.
- Le récipient rempli est pesé (M_2).
- La masse volumique apparente est calculée par :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \quad (2.3)$$

Où : V = 1000 ml (volume du récipient).



Figure 2. 11. Vue de l'essai de masse volumique apparente.

La masse volumique apparente plus faible du SBR (1560 kg/m³) par rapport au SN (1640 kg/m³) révèle une porosité accrue, liée à la présence de mortier adhérent. Cette caractéristique explique en partie la plus grande absorption d'eau du SBR et doit être prise en compte dans les formulations.

b) Masse Volumique Absolue (ρ_{abs})

- La masse volumique absolue, excluant les vides, a été mesurée via un pycnomètre.
- Les granulats sont lavés, séchés pendant 24 h, puis introduits dans un pycnomètre.
- Le pycnomètre est pesé à vide (m_0), puis avec l'échantillon (m_1).
- l'eau est ajoutée pour éliminer l'air, et le pycnomètre est pesé (m_3).
- Enfin, le pycnomètre est rempli uniquement d'eau et pesé (m_2).
- La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{m_1 - m_0}{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)} \rho_e \quad (2.4)$$

Où : ρ_e = masse volumique de l'eau (1 g/cm³).



Figure 2.12. Pycnomètre utilisé pour déterminer la masse volumique absolue d'un sable.

La différence entre les masses volumiques absolues (SN : 2670.8 kg/m³, SBR : 2510 kg/m³) confirme que le SBR contient des phases moins denses (mortier), ce qui affecte ses propriétés mécaniques globales. Pour le gravier, l'écart GN/GBR (2700 vs 2570 kg/m³) montre le même phénomène.

2.2.6.5. Absorption d'eau

Le taux d'absorption d'eau des granulats est une caractéristique essentielle évaluée conformément à la norme EN, 1097-6 [43]. Cette propriété influence directement la formulation des bétons en affectant la demande en eau et les propriétés rhéologiques du mélange. Le protocole expérimental consiste à :

- Sécher les échantillons à l'étuve jusqu'à masse constante
- Les saturer d'eau pendant 24 heures
- Peser les granulats en état saturé superficiellement sec (SSS)
- Le calcul du taux d'absorption s'effectue selon la formule suivante :

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.5)$$

Où :

Ab : Taux d'absorption (%)

Ma (g) : Masse de l'échantillon à l'état humide (g)

Ms : Masse de l'échantillon à l'état sec (g)

Cette mesure permet d'ajuster précisément le dosage en eau lors de la formulation des bétons, particulièrement crucial pour les bétons à base de granulats recyclés dont le pouvoir absorbant est généralement plus élevé que celui des granulats naturels.



Figure 2.13. Essai de coefficient d'absorption de granulats.

L'absorption significativement plus élevée du SBR (5.3%) et du GBR (6.3%) par rapport à leurs équivalents naturels (SN: 1.6%, GN: 0.94%) démontre l'impact du mortier adhérent. Ces valeurs imposent des ajustements du dosage en eau pour maintenir les propriétés rhéologiques du béton.

2.2.6.6. Indice de forme

Le coefficient de forme caractérise le granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Il est déterminé par un double tamisage d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrée utilisés pour l'étude de la granulométrie. La méthode utilisée pour la détermination de l'indice de forme des agrégats grossiers est décrite par la norme EN 933-4:2008 [44]. Cette méthode d'essai spécifiée dans la présente Norme européenne est applicable aux fractions granulométriques d_i/D_i où $D_i \leq 63$ mm et $d_i \geq 4$ mm. Pour appliquer la présente norme, certaines définitions et conditions doivent être respectées :

- La fraction d'un agrégat concernée par l'essai est celle comprise entre $D_i \leq D \leq d_i$
- Un seul test est exécuté pour l'ensemble de l'échantillon.
- La masse de l'échantillon testé doit être séchée jusqu'à la stabilisation de la masse à 0.1%.
- La longueur L d'une particule est définie par la plus grande distance entre deux plans parallèles tangents à la surface de la particule.
- L'épaisseur d'une particule est définie par la plus petite distance entre deux plans parallèles tangents à la surface de la particule.

Le principe de l'essai consiste à classer les particules individuellement sur la base du rapport de leur longueur L à l'épaisseur E en utilisant un pied à coulisse de particules. L'indice de forme est calculé comme la masse de particules avec un rapport des dimensions L/E supérieur à 3 exprimé en pourcentage de la masse totale sèche des particules testées.

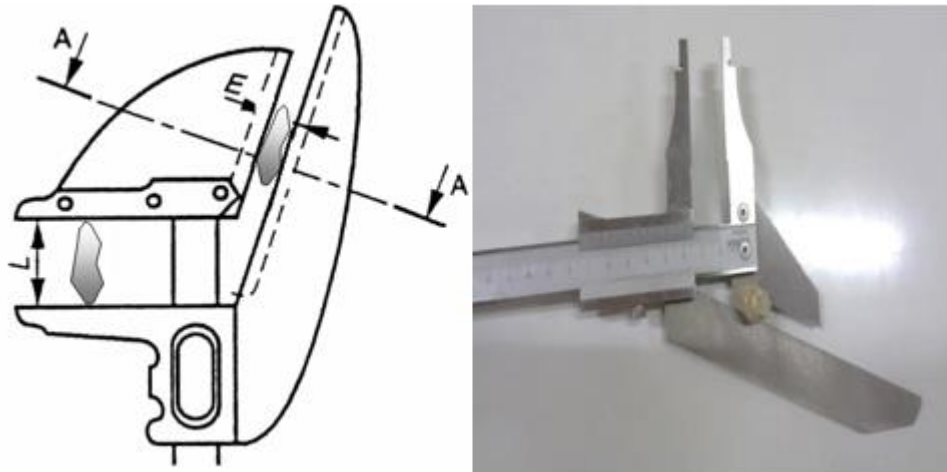


Figure 2. 14. l'appareil de pied à coulisse pour mesure des dimensions des granulats.

L'indice de forme est calculé :

$$C_F = \frac{\sum M_{2i}}{M_{1i}} 100 \quad (2.6)$$

Avec :

- M_{2i} : masse des particules non cubiques de fraction granulaire.
- M_{1i} : masse des particules testées.

Le GBR présente un coefficient de forme plus faible (20) que le GN (34.7), indiquant une morphologie plus anguleuse due au processus de concassage. Cette caractéristique peut améliorer l'adhérence pâte-granulat mais peut réduire la maniabilité.

2.2.6.7. Essai de Los Angeles

L'essai Los Angeles évalue la résistance à la fragmentation des granulats par chocs dans un tambour rotatif suivant la norme NF P18 573 [45] . Les résultats montrent que les granulats naturels présentent une meilleure résistance ($LA \leq 40$) que les granulats recyclés ($LA = 30-50$) selon les normes XP P 18 540 [46] principalement en raison de la présence de mortier adhérent dans ces derniers. Cette différence doit être prise en compte dans les formulations de béton. La Figure 3.15 illustre l'appareil utilisé.



Figure 2. 15. Appareil Los Angeles.

Le coefficient Los Angeles plus élevé du GBR (36.4%) comparé au GN (24%) révèle une fragilité accrue des granulats recyclés, directement liée à la présence de mortier adhérent et à leur microstructure plus poreuse.

2.2.6.8. Essai de Micro-Deval

L'essai Micro-Deval évalue la résistance à l'usure des granulats, avec un coefficient MDE d'autant meilleur qu'il est faible. Selon les normes :

- Granulats naturels (NF P18-577 [47]) : $MDE \leq 35$.
- Granulats recyclés (XP P 18 540 [46]) : MDE entre 15-50.

Les granulats recyclés présentent généralement des valeurs plus élevées en raison du mortier adhérent et de leur porosité accrue, nécessitant une sélection rigoureuse selon l'application béton visée.



Figure 2. 16. Appareil Micro-Deval.

La valeur MDE du GBR (15%) nettement supérieure à celle du GN (4%) confirme la moindre résistance à l'usure des granulats recyclés en milieu humide, limitant leur utilisation dans les applications soumises à forte abrasion.

2.2.6.9. Fragmentation Dynamique

L'essai de fragmentation dynamique NF P 18-574 [48] détermine la résistance aux chocs des granulats en mesurant le pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm générées sous l'impact d'une masse normalisée (Figure 2.17). Le coefficient de fragmentation dynamique obtenu présente une bonne corrélation avec le test Los Angeles.



Figure 2. 17. Essai de fragmentation dynamique

Les résultats (GN : 19%, GBR : 28%) corroborent les essais Los Angeles, montrant une résistance aux chocs réduite pour les GBR, cohérente avec leur composition hétérogène.

2.2.6.10. Quantité de mortier attaché

Les propriétés des granulats recyclés (GBR) dépendent significativement de leur teneur en mortier adhérent, paramètre clé nécessitant une caractérisation précise. La littérature scientifique [49, 50] recense plusieurs techniques d'évaluation, dont deux approches standardisées ont été comparées dans cette étude.

a) La méthode chimique par dissolution acide : Elle consiste à :

- immerger 100 g de GBR dans une solution d'HCl à 10% pendant 8 heures.
- suivie d'un lavage à l'eau.
- un séchage à 105°C pendant 24 h.
- un détachement mécanique des résidus à l'aide d'un marteau en caoutchouc.



Figure 2. 18. Méthode de la dissolution dans l'acide Chloridrique.

b) la méthode thermique : Elle implique :

- une saturation hydrique initiale de 2 h.
- un traitement thermique à 500°C pendant 2 h (Figure 2.19).
- puis un choc thermique par immersion dans l'eau froide.
- compléter par un nettoyage mécanique similaire.



Figure 2. 19. Méthode de l'expansion thermique.

L'écart entre les méthodes thermique (32%) et chimique (45%) pour quantifier le mortier attaché aux GBR souligne l'importance du protocole de mesure et la nature complexe de ces matériaux.

Tous les essais de caractérisation ont été effectués sur les granulats naturels et recyclés et les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 2. 2. Caractéristiques des granulats utilisés.

	SN	SBR	GN	GBR
Equivalent de sable	89	80	/	/
Module de finesse	2.71	2.62	/	/
Masse volumique apparente (kg/m³)	1640	1560	1329.7	1189.4
Masse volumique absolue (kg/m³)	2670.8	2510	2700	2570
Absorption d'eau (%)	1.6	5.3	0.94	6.3
Coefficient de form	/	/	34.7	20
Coefficient de Los Angeles (%)	/	/	24	36.4
Coefficient Micro Deval (%)	/	/	4	15
Coefficient de fragmentation dynamique (%)	/	/	19	28
Quantité de mortier attaché (%) par la methode thermique	/	/	/	32
Quantité de mortier attaché (%) par la methode chimique	/	/	/	45

2.3. Formulation du BCR

Dans cette étude, une approche systématique de substitution a été adoptée, remplaçant 20 % de chaque composant naturel par son équivalent recyclé : 20 % des granulats naturels par des granulats recyclés, sable naturel par du sable recyclé et ciment par des fines recyclées. La formulation vise un béton à affaissement nul ($A=0$ mm) avec un rapport E/C fixé à 0.3, éliminant ainsi tout ajustement par adjuvants pour isoler l'effet des matériaux recyclés.

Les paramètres clés incluent :

- Une optimisation de la teneur en liant pour compenser la porosité accrue des granulats recyclés.
- Un contrôle strict de l'eau (rapport E/C 0.3) assurant une maniabilité adaptée au compactage sans ségrégation.
- Une granulométrie équilibrée malgré l'hétérogénéité des matériaux recyclés.

Cette méthodologie permet d'évaluer précisément l'impact des substitutions sur la compacité, les propriétés mécaniques et la durabilité, tout en maintenant une base comparative claire avec un BCR traditionnel. Le Tableau 2.3 récapitule les compositions

des deux formulations de BCR étudiées. Les deux mélanges partagent les mêmes paramètres de base (affaissement nul, $E/C = 0.3$, sans adjuvants).

BCR-N : Composition 100 % naturelle (granulats, sable et ciment conventionnels)

BCR-R : Version avec substitution de 20% des matériaux naturels par leurs équivalents recyclés (granulats, sable et fines)

Tableau 2.3 : Composition des deux BCR (kg/m^3).
BCR-R : Fines = 20%, SBR=20%, GBR=20%

Type de BCR	Ciment	Eau	GN	SN	Fines	GBR	SBR
BCR-N	453	136	1340	1062	-/-	-/-	-/-
BCR-R	362.4	136	1072	849.6	74.5	255.1	199.7

Le taux de remplacement de 20 % a été délibérément choisi en s'appuyant sur plusieurs études antérieures, lesquelles ont démontré que des substitutions supérieures entraînent souvent une dégradation significative des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton. Ce seuil représente donc un compromis judicieux entre performance technique et valorisation des matériaux recyclés. Les directives européennes propose un taux de BGR supérieur à 20% pour que le béton doit être classé comme un matériau de recyclage. Ceci nous a amené à prendre ce taux pour faire les essais.

Contrairement aux approches classiques qui se limitent à la substitution d'un seul type de granulats, cette étude adopte une stratégie globale en remplaçant simultanément les fines, le sable et les graviers. Cette méthode permet une optimisation du squelette granulométrique, favorisant une meilleure compacité, une homogénéité granulaire accrue des fine, de meilleures performances globales du béton.

Concernant la procédure de mélange de BCR, les granulats (ciment, sable et graviers.) ont été ajoutés au malaxeur et malaxés pendant 2 min à sec. Le volume total d'eau a été ajouté au mélange progressivement et malaxée pendant 1 min. Les granulats recyclés (sable et gravier) ont d'abord été immergé dans l'eau (figure 2.20) jusqu'à 24 h par la suite un peu de séchage pour éliminer l'eau adsorbé au granulats à l'aide d'un chiffon (figure 2.21) pour éviter qu'ils affectent le rapport E/C fixé à 0,3 [51, 52].



Figure 2. 20. Vue de l'immersion des granulats dans l'eau.



Figure 2. 21 . Vue sur le séchage des granulats avec un chiffon.

2.3.1. Techniques expérimentales à l'état frais

2.3.1.1. Compactage

Le compactage a été effectué en utilisant une dam de compactage et un moule Proctor standard, sous le code produit (UTS-0605NF et UTS-0600NF) conforme à la norme NF P94-093, pour donner un compactage normalisé effectué en trois couche avec l'énergie de 25 coups par couche [53].



Figure 2.22. Dam de compactage et le moule Proctor standard.

2.3.1.2. Masse volumique du béton frais

La masse volumique du béton frais a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12350-6 [54]. Elle a été déterminée lors des essais d'étude et correction de la composition des mélanges par la mise en place du béton frais dans un récipient rigide et étanche à l'eau de volume de ($V = 5 \ell$) et de masse (m_1) puis pesé l'ensemble, soit la masse (m_2). La masse volumique (M_v) du béton frais est donnée par la formule suivante :

$$M_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.7)$$

Car le béton confectionner est possible de démoulée juste après le compactage alors la masse volumique été calculé directement par la mesure de la masse d'échantillons et en la divisant sur la dimension du volume du moule Proctor.

2.3.2. Techniques expérimentales à l'état durci

Pour l'étude de l'évolution mécanique des bétons étudiés, on a mesuré la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage sur des éprouvettes cylindrique à un âge de 7, 14 et 28 jours.

Après coulage, les éprouvettes sont démoulées et recouvertes d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge (figure 2.23). Après 24 h, les éprouvettes sont conservées dans un bain thermostatique saturé en chaux sous une température de 20°C jusqu'à échéance des essais mécaniques (Figure 2.24),

Une heure avant chaque essai mécanique, les éprouvettes sont ressorties du bac et mises à l'air libre sous les conditions ambiantes du laboratoire.

Les résistances aux différents âges sont les moyennes de trois éprouvettes, et toutes les éprouvettes sont des cylindres de moule Proctor de diamètre (10x 12) cm.



Figure 2. 23. Mode de conservation des éprouvettes après démoulage.



Figure 2. 24. Mode de conservation des éprouvettes après 24 h

2.3.2.1. Masse volumique de béton durci

La masse volumique du béton durci a été déterminée selon la norme européenne NF EN12390-7 [55]. Elle a été déterminée à 28 jours sur des éprouvettes de masse constante (m) après séchage et de volume réel (V). Avant chaque pesée les échantillons doivent être séchés dans une étuve ventilée à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.2% en 24 h.

2.3.2.2. Essai de compression simple

La résistance à la compression du béton est réalisée à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 3000 kN à une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s, conformément la norme NF EN 12390-3 [56] (Figure 2.25).



Figure 2. 25. Essai de compression simple.

2.3.2.3. Essai de fendage

L'essai de fendage est exécuté selon la norme NF EN 12390-6 [57] à l'aide de la presse hydraulique de compression simple, est évaluée selon l'équation suivant :

$$f_{tf} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2.8)$$



Figure 2. 26. Essai de fendage.

2.3.3. Durabilité

La caractérisation de BCR à base de granulats recyclés d'un point de vue durabilité, en effectuant les essais de l'absorption par immersion, par capillarité et perméabilité à l'eau.

2.3.3.1. Absorption capillaire

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée d'éprouvette selon la norme ASTM C1585-04 [58]. Le principe est de placer une face d'about de l'échantillon au contact d'une nappe d'eau à 5 mm de profondeur maintenue à niveau constant (Figure 2.27) et de mesurer les gains de poids de l'échantillon à des intervalles de temps (6 min, 12 min, 30 min, 1h, 2h, 4h et 24h). Les faces latérales sont préalablement imperméabilisées par une couche de résine (paraffine ou un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uni-axial, et éviter l'évaporation par ces mêmes faces.

Le coefficient d'absorption capillaire (C) est calculé comme ça :

$$C a = \frac{\Delta M}{A} \text{ exprimé en } \Rightarrow \left(\frac{kg}{m^2} \right) \quad (2.9)$$

$$SP = \frac{Ca}{\sqrt{t}} \text{ exprimé en } \Rightarrow \left(\frac{kg}{m^2} \cdot s^{-0.5} \right) \quad (2.10)$$

Où :

- ΔM : Masse d'eau absorbée (kg)
- A : Surface en contact avec l'eau (m²)
- Ca : la quantité d'eau absorbé par unité de surface $\left(\frac{kg}{m^2} \right)$

- **SP** : coefficient d'absorption d'eau par capillarité ou sorptivité ($\frac{kg}{m^2} \cdot s^{-0.5}$)
- **t** : Temps (s).



Figure 2. 27. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

2.3.3.2. Absorption par immersion

L'absorption d'eau par immersion d'un béton est la capacité d'absorption massique exprimée par la quantité d'eau absorbée par une éprouvette de béton. L'essai consiste selon la norme ASTM C642-06 [59], à mettre les éprouvettes de 28 jours d'âge dans l'étuve à 105 ± 5 °C et de les peser jusqu'à avoir un poids constant, ensuite les immerger totalement dans un bac d'eau pendant 24 heures à 20 ± 2 °C jusqu'à saturation du matériau (Figure 2.28).

L'absorption exprimée en pourcent est calculée par la relation suivante :

$$W(\%) = \frac{M_s - M_h}{M_h} \times 100 \quad (2.11)$$

Ou :

- M_s : masse de l'éprouvette sèche ;
- M_h : masse de l'éprouvette après 24 h d'immersion dans l'eau.

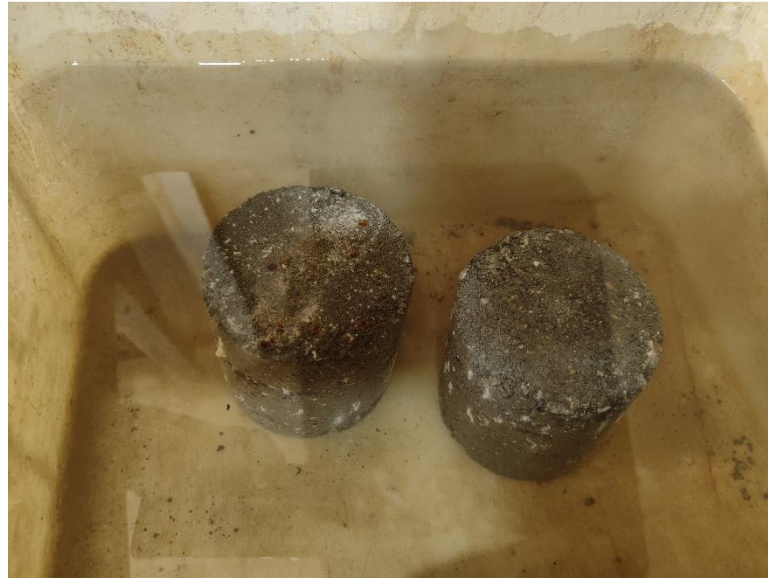


Figure 2. 28. Essai d'absorption par immersion.

2.3.3.3. Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau, évaluée selon la norme NF EN 12390-8 [60], constitue un indicateur clé de la durabilité des bétons. Les essais réalisés sur éprouvettes de 28 jours, sous une pression de 500 kPa pendant 72 heures, révèlent des profondeurs de pénétration classées en trois catégories :

- faible (<30 mm).
- moyenne (30-60 mm).
- élevée (>60 mm).

Ces mesures, effectuées avec une précision au millimètre après fendage des échantillons, mettent en évidence l'influence cruciale de la microstructure du béton sur sa résistance aux agents agressifs. Les bétons présentant une perméabilité élevée, où la pénétration dépasse 60 mm, s'avèrent particulièrement vulnérables aux processus de dégradation, nécessitant souvent des mesures correctives telles que l'ajout d'adjuvants étanchéifiant ou l'optimisation du rapport E/C. À l'inverse, les bétons dont la pénétration reste inférieure à 30 mm démontrent une excellente durabilité, les rendant adaptés aux environnements sévères.

Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle rigoureux de la perméabilité dans la conception des formulations béton, particulièrement lorsqu'il s'agit de matériaux incorporant des granulats recyclés dont la porosité peut affecter significativement les performances à long terme.



Figure 2. 29. Essai de perméabilité à l'eau.

La norme indique que cette essai doit être réalisé sur des éprouvette de dimension (15 x 30) cm, et puis que mes échantillons à dimension de (10 x 12) cm alors je suis content de la comparaison entre les deux bétons.

2.4. Conclusion

Ce travail expérimental a pour objectif de mettre en évidence l'influence du remplacement de gravier naturel par le gravier recyclé sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons. Il a été montré dans ce chapitre que les propriétés physiques de granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels. Ces granulats ont eu une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée.

La grande capacité d'absorption d'eau du GBR se manifeste pratiquement par une augmentation de la demande en eau de gâchage. Ce problème est corrigé par l'utilisation de gravier recyclé pré-saturé par immersion totale dans l'eau pendant 24 h avant le coulage. Nous avons adopté pour les formulations des BCR testés le même rapport Eau/Ciment, fixé à 0,3.

Résultats et interprétations

3.1. Introduction

Cette étude vise à analyser les effets du remplacement partiel des granulats naturels par des granulats recyclés dans la formulation des BCR, en se concentrant particulièrement sur l'évaluation de leurs propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. L'objectif principal est de caractériser l'influence des granulats recyclés sur le comportement du béton frais et durci, tout en identifiant les paramètres clés affectant leurs performances. Une attention particulière est portée sur l'impact des caractéristiques spécifiques des granulats recyclés, notamment leur porosité accrue, la présence de mortier adhérent et leur absorption d'eau plus élevée, qui sont susceptibles d'affecter significativement les propriétés finales du béton. Cette analyse comparative permettra d'établir des recommandations pour une utilisation optimale des granulats recyclés dans différentes applications béton, en tenant compte à la fois des contraintes techniques et des impératifs de développement durable.

3.2. Présentation des résultats

3.2.1. Masse volumique à l'état frais

La figure 3.1 illustre les valeurs de masse volumique à l'état frais pour deux types de BCR : le béton compacté au rouleau avec granulats naturels (BCR-N) et celui avec granulats recyclés (BCR-R). On observe clairement que la masse volumique du BCR-R est supérieure à celle du BCR-N.

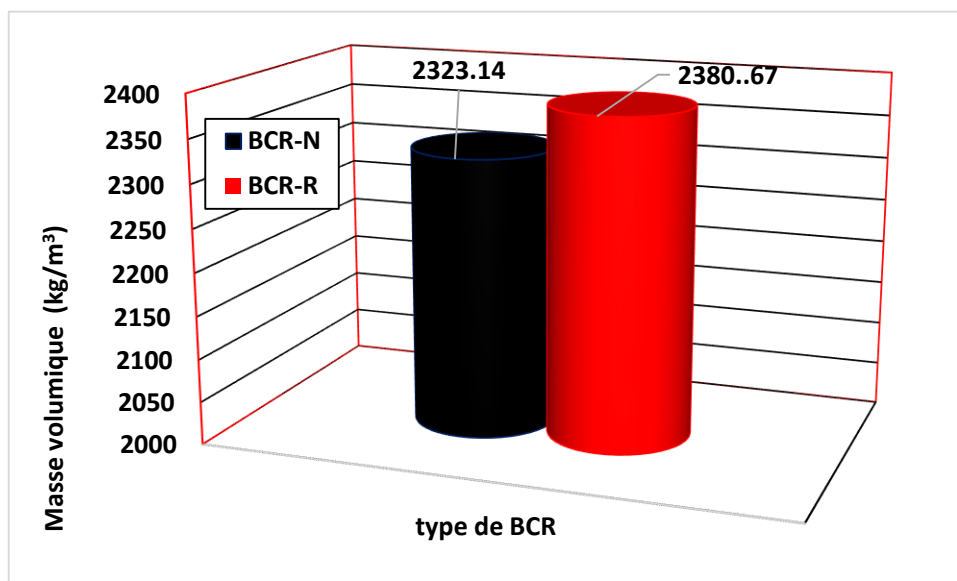


Figure 3. 1. Masse volumique à l'état frais.

3.2.2. Masse volumique à l'état durci

La figure 3.2 montre que la masse volumique du béton compacté au rouleau fabriqué avec des granulats recyclés (BCR-R) est plus élevée (2369,29 kg/m³) que celle du béton à base de granulats naturels (BCR-N), qui atteint 2301,08 kg/m³.

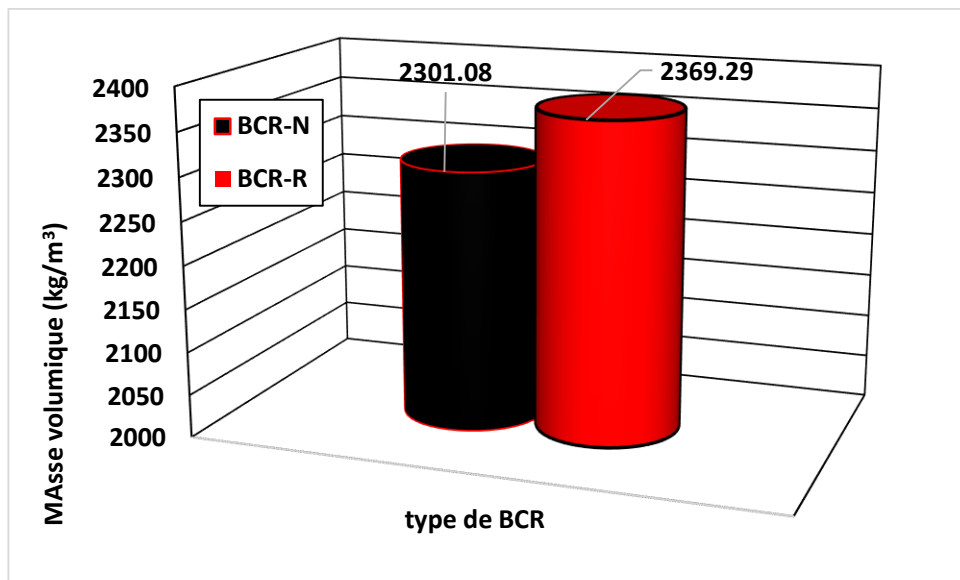


Figure 3. 2. Masse volumique à l'état durci.

3.2.3. Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression pour les deux mélanges de BCR est donnée par la figure 3.3. Ces mesures permettent d'évaluer le développement mécanique du béton au fil du temps.

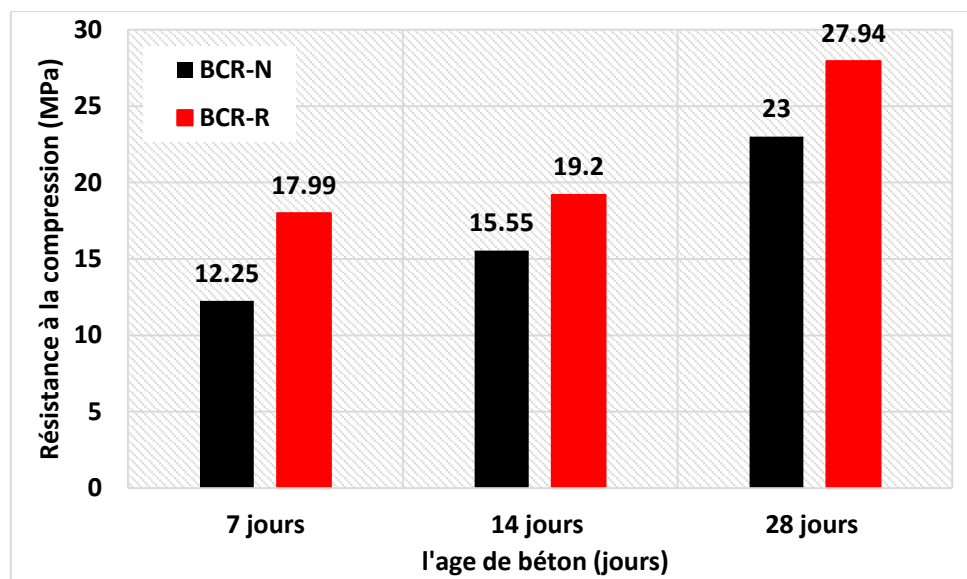


Figure 3. 3. Variation de la résistance à la compression des deux BCR.

Les résultats de la figure 3.3 montrent que la résistance à la compression augmente avec l'âge, pour tous les BCRs. En effet, il y a eu des gains de résistances de 87.76%, et 55.32 % de 7 à 28 jours, pour les BCR-N, BCR-R, respectivement.

La progression plus modérée de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours dans le BCR-R peut s'expliquer par un développement mécanique plus rapide au jeune âge, favorisé par la présence de pâte de ciment résiduelle et l'effet de rétention d'eau interne des granulats recyclés. Ces mécanismes accélèrent l'hydratation initiale, ce qui se traduit par une résistance élevée dès 7 jours, mais un gain relatif plus limité par la suite. À l'inverse, le BCR-N présente une évolution plus linéaire, avec une hydratation continue du ciment sur la durée.

3.2.4. Résistance au fendage

L'évolution de la résistance à la traction par fendage pour les deux mélanges de BCR est donnée par la figure 3.4. Ces essais permettent d'évaluer la capacité du matériau à supporter des efforts de traction indirecte et à résister à la fissuration en service.

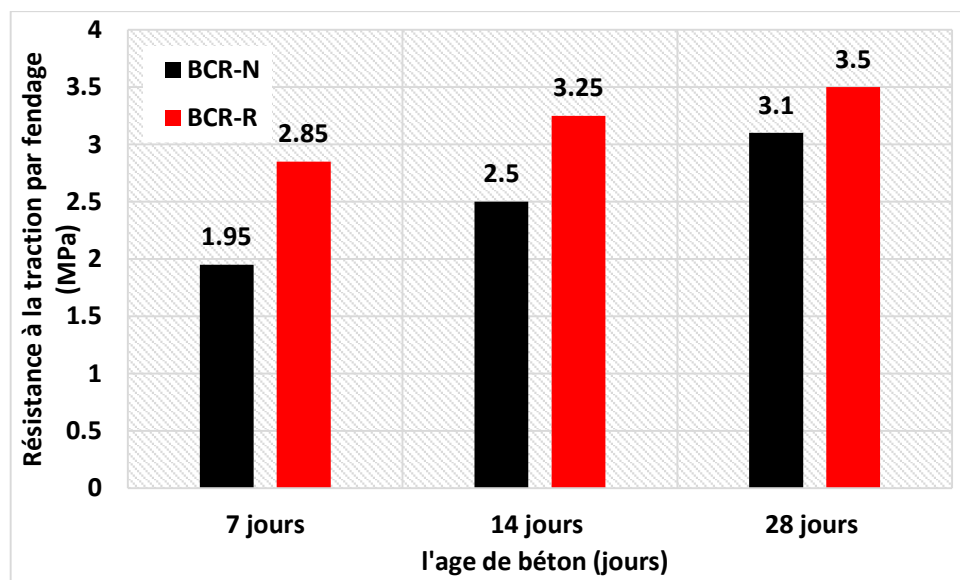


Figure 3. 4. Variation de la résistance à la compression des deux BCR.

Le BCR-N présente une évolution de la résistance à la flexion de 1,95 MPa à 7 jours à 3,25 MPa à 28 jours, soit un gain de 1,30 MPa. De son côté, le BCR-R passe de 2,85 MPa à 3,50 MPa sur la même période, soit un gain absolu plus faible (0,65 MPa), mais une valeur finale supérieure de 7,7 % à celle du BCR-N à 28 jours.

Ces résultats prolongent la tendance observée en compression, avec une meilleure performance globale du BCR-R dès le jeune âge, et une résistance finale supérieure à celle du BCR-R.

Cette tendance renforce les observations faites sur la résistance à la compression et suggère une cohérence dans le comportement mécanique amélioré du béton recyclé.

3.2.5. Absorption par capillaire

L'absorption d'eau par le béton durci dépend de la porosité et de la vitesse d'absorption par capillarité (sportivité). La figure 3.5 présente les résultats de l'absorption d'eau par capillarité des deux BCRs à 28 jours.

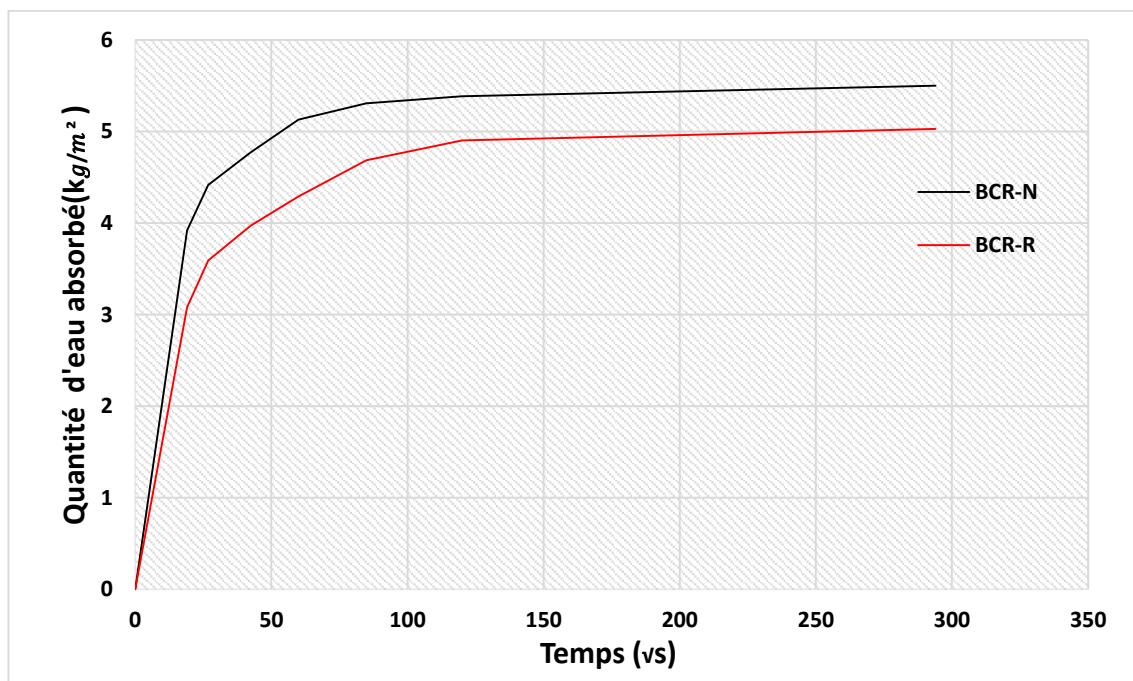


Figure 3. 5. Absorption capillaire des BCR's à 28 jours.

Selon la figure 3.5, on voit que les valeurs de l'absorption capillaire croient avec le temps pour tous les BCR's. Certes, les bétons BCR-N présentent une absorption capillaire plus élevée que le BCR-N, pour une durée d'absorption de 1440 minutes à 28 jours de cure.

En effet, les valeurs de l'absorption d'eau par capillarité des BCR-N et BCR-R sont de 5500.3819×10^{-3} et 5029.2844 kg/m^2 , respectivement, à 28 jours.

3.2.6. Absorption par immersion

La figure 3.6 montre les résultats de l'absorption d'eau par immersion à 28 jours.

Cet essai vise à évaluer la capacité du matériau à absorber l'eau lorsqu'il est complètement immergé, ce qui renseigne indirectement sur sa porosité ouverte accessible et, par conséquent, sur sa durabilité.

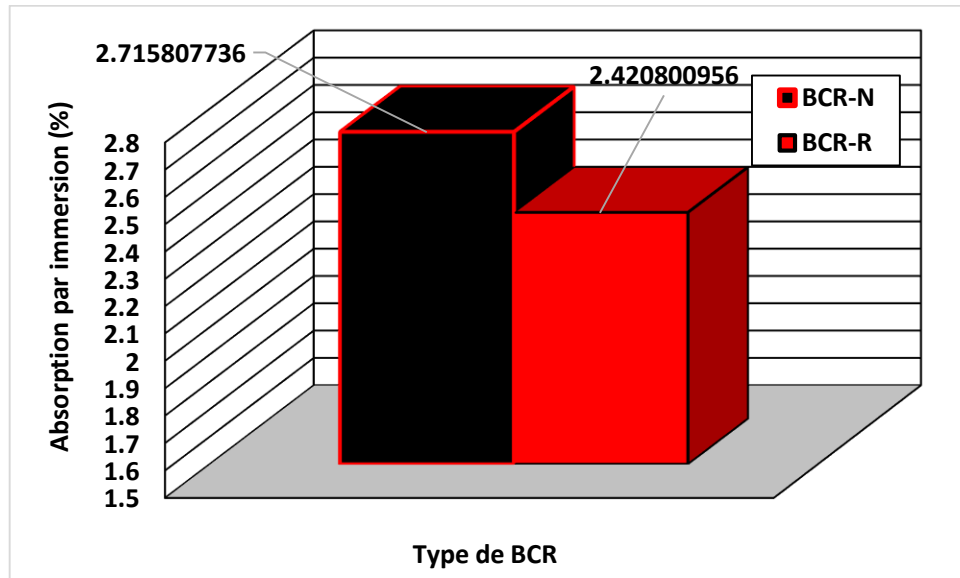


Figure 3. 6. Absorption par immersion des BCRs à 28 jours.

Comme pour l'absorption d'eau par capillarité, l'absorption d'eau par immersion enregistre une moindre performance de BCR-N. Les résultats montrent que le BCR-N présente un taux d'absorption de 2,71 %, tandis que le BCR-R affiche une valeur légèrement inférieure de 2,42 %. La différence, bien que modérée, témoigne d'une meilleure résistance à l'imbibition dans la formulation à base de granulats recyclés.

3.2.7. Perméabilité à l'eau

La figure 3.7 illustre les résultats des essais de perméabilité à l'eau, mesurés en termes de profondeur de pénétration de l'eau sous pression dans les deux formulations de béton compacté au rouleau BCR-N et BCR-R. Cet essai permet d'évaluer la compacité et la porosité connectée du matériau, des propriétés directement liées à la durabilité à long terme.



Figure 3. 7. Faciès de profondeur de pénétration d'eau de BCR à 28 jours.

Les résultats de perméabilité à l'eau révèlent une performance supérieure du BCR-R, qui enregistre une profondeur de pénétration de 67 mm contre 85 mm pour le BCR-N. Cette réduction de perméabilité indique une structure interne plus dense et moins poreuse dans le béton recyclé, ce qui pourrait avoir des implications positives en matière de durabilité, notamment face aux agressions environnementales comme la pénétration des chlorures ou la carbonatation.

3.3. Analyse et discussion des résultats

L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude révèle une tendance claire en faveur de la formulation à base de granulats recyclés (BCR-R), qui présente, dans la majorité des cas, des performances Physico-mécanique supérieures ou comparables à celles du béton compacté au rouleau à base de granulats naturels (BCR-N). Cette observation mérite d'être analysée à travers les paramètres mesurés.

Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les granulats recyclés utilisés dans le BCR-R peuvent présenter une texture plus rugueuse qui entrave le déplacement des grains lors du compactage. Par contre, la présence élevée de fines joue un rôle favorable pour augmenter la compacité. Par ailleurs, les granulats recyclés, souvent plus anguleux et irréguliers que les granulats naturels, peuvent entraîner un meilleur emboîtement entre les particules, ce qui améliore la structure interne du béton et limite la formation de vides d'air pendant le compactage. Cette structure plus dense se traduit alors

par une masse volumique plus élevée à l'état durci. Ce qui favorise un meilleur enrobage par la pâte cimentaire et une compacité plus importante du mélange à l'état frais. La combinaison de l'ajout des trois phases de béton à savoir le ciment, le sable et le gravier contribue à donner un béton plus dense contrairement à la majorité des recherches qui se limitent à substituer un seul type de granulat.

Ce résultat suggère que l'utilisation de granulats recyclés ne compromet pas la densité initiale du béton, bien au contraire. Une masse volumique plus élevée est généralement associée à une meilleure compacité du béton, ce qui est généralement associé à de meilleures performances mécaniques à l'état durci, notamment en termes de résistance à la compression.

Par ailleurs, les granulats recyclés utilisés ont été préalablement immergés puis essuyés en surface avant incorporation, ce qui a permis de limiter leur absorption d'eau pendant le malaxage et de préserver l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Ce traitement contribue aussi à stabiliser les conditions internes d'hydratation, ce qui peut améliorer l'efficacité des réactions chimiques dès les premiers jours. Il est également possible que l'eau résiduelle présente à la surface des granulats recyclés, malgré l'essuyage préalable, ait agi comme une eau d'appoint, favorisant localement la compacité du mélange au moment du compactage, ce qui se reflète dans les propriétés observées.

L'ensemble de ces facteurs agit de manière complémentaire pour améliorer à la fois la compacité, la cohésion interne et la durabilité du béton recyclé, tout en démontrant que, sous certaines conditions de formulation et de préparation, les granulats recyclés peuvent constituer une alternative performante et fiable aux granulats naturels.

D'un point de vue environnemental, ces observations renforcent l'intérêt de substituer partiellement ou totalement les granulats naturels par des granulats recyclés dans les formulations de BCR, permettant ainsi une valorisation efficace des déchets de construction tout en assurant la qualité du matériau obtenu.

3.4. Conclusion

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques conformes aux dimensions du moule Proctor, dans des conditions de laboratoire strictement contrôlées. L'ensemble des manipulations a été conduit selon des protocoles standardisés et à l'aide d'un matériel de précision, garantissant la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus. Le respect rigoureux des normes en vigueur ainsi que la répétition des mesures et les contrôles qualité effectués tout au long de l'étude confirment la validité des données expérimentales. Cette démarche méthodologique rigoureuse a permis de produire des résultats scientifiquement solides, contribuant à une meilleure compréhension du comportement des bétons compactés au rouleau incorporant des granulats recyclés. Les conditions expérimentales maîtrisées, associées à une analyse approfondie des résultats, ont ainsi permis de formuler des recommandations techniques fondées et pertinentes pour une utilisation durable des matériaux recyclés dans le domaine du BCR.

Conclusions Générales

Conclusions générales

Les résultats obtenus à travers cette étude confirment que le béton compacté au rouleau peut intégrer efficacement des granulats recyclés issus de déchets de construction, sans compromettre ses performances. L'un des apports majeurs de ce travail est d'avoir démontré que la substitution simultanée de trois types de granulats – à un taux de 20 % chacun – permet non seulement de respecter les seuils critiques identifiés dans la littérature, mais surtout d'obtenir un squelette granulométrique amélioré par rapport à celui d'un béton conventionnel. Cette configuration granulaire optimisée favorise une meilleure compacité, une densité accrue et une réduction des vides, ce qui se traduit par une augmentation mesurable des résistances mécaniques et de la durabilité.

En s'éloignant des approches classiques à substitution unique, cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour la formulation de bétons recyclés plus homogènes, plus fiables, et mieux adaptés aux exigences du génie civil durable. Elle encourage également à repenser les stratégies de valorisation des DCD en intégrant une vision globale du mélange granulaire.

A travers les résultats obtenus, certaines conclusions peuvent être tirées en comparaison des deux bétons après la substitution de 20% de gravier, 20% de sable et 20% de ciment :

- ✓ La masse volumique à l'état frais d'un BCR-N est de 2323.14 kg/m³ qui augmente pour un BCR-R à 2380.67 kg/m³.
- ✓ À l'état durci, cette tendance se confirme avec une masse volumique de 2346,22 kg/m³ pour le BCR-R, contre 2301,44 kg/m³ pour le BCR-N.
- ✓ En termes de résistance à la compression, le BCR-R atteint 27,94 MPa à 28 jours, dépassant la valeur de 23,00 MPa enregistrée pour le BCR-N, soit une augmentation d'environ 21,5 %.
- ✓ Le gain de résistance à la compression entre 7 et 28 jours est de 87,75 % pour le BCR-N, contre 55,3 % pour le BCR-R, ce qui témoigne d'un développement plus rapide de la résistance dans les premières phases de cure pour le béton recyclé.
- ✓ La résistance à la traction par flexion à 28 jours est également plus élevée pour le BCR-R, atteignant 3,50 MPa contre 3,25 MPa pour le BCR-N, soit un gain de 7,7 %.

- ✓ À 28 jours, l'absorption d'eau par capillarité du BCR-R est inférieure à celle du BCR-N, avec des valeurs respectives de 5029,28 g/m² et 5500,38 g/m², ce qui témoigne d'une structure poreuse moins développée dans le béton contenant des granulats recyclés.
- ✓ Le taux d'absorption par immersion du BCR-R est de 2,42 %, inférieur à celui du BCR-N (2,71 %), révélant une structure interne plus dense et moins poreuse.
- ✓ La perméabilité à l'eau mesurée par la profondeur de pénétration est réduite pour le BCR-R (67 mm) par rapport au BCR-N (85 mm), indiquant une meilleure étanchéité du béton à base de granulats recyclés.

Cette étude rejoint les conclusions de travaux précédents [51, 61-64], qui ont démontré que la substitution à hauteur de 20 % représente un compromis optimal entre durabilité, performance et valorisation des matériaux recyclés.

Cette recherche ouvre des perspectives concrètes pour l'intégration à grande échelle des granulats recyclés dans les projets de génie civil. L'approche tripartite de substitution contrôlée à 20 % a montré qu'il est possible de concilier durabilité environnementale et performance technique. À l'avenir, cette méthode pourrait être appliquée à des ouvrages routiers, des plateformes logistiques ou des barrages, en combinaison avec d'autres technologies durables telles que les liants alternatifs (pouzzolanes, géopolymères) ou les adjuvants avancés.

Il serait également pertinent d'étendre ce travail à des chantiers pilotes réels intégrant des déchets de construction plus hétérogènes, afin de valider la robustesse de la formulation dans des conditions opérationnelles. Le développement d'outils de simulation du squelette granulométrique et d'optimisation des formulations recyclées pourrait aussi renforcer cette dynamique de recherche.

Références bibliographique

Référence bibliographique

- [1] N. LAHMAR, *Propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons à base de granulats recyclés*, Bensaid BOULEKBACHE/El-Hadj MEZIANE, 2021.
- [2] S. Saadani, H. Houari, *Comportement des bétons à base de granulats recyclés*, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2000.
- [3] M. Serifou, *Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation*, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I; Université Félix Houphouët ..., 2013.
- [4] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, *A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)*, *Construction and Building Materials* 172 (2018) 272-292.
- [5] R. Oliveira Neto, P. Gastineau, B.G. Cazacliu, L. Le Guen, R.S. Paranhos, C.O. Petter, *An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms*, *Waste Management* 60 (2017) 277-289.
- [6] J. Xiao, H. Xie, C. Zhang, *Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area*, *Resources, Conservation and Recycling* 61 (2012) 109-117.
- [7] J. Shi, Y. Xu, *Estimation and forecasting of concrete debris amount in China*, *Resources, Conservation and Recycling* 49(2) (2006) 147-158.
- [8] W.-L. Huang, D.-H. Lin, N.-B. Chang, K.-S. Lin, *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*, *Resources, conservation and recycling* 37(1) (2002) 23-37.
- [9] P. DE, *RECYCLAGE DES DECOMBRES D'UNE VILLE SINISTREE*, (1982).
- [10] R. V-S, *Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton*, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada (1981).
- [11] M. Serifou, *Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation*, 2013.
- [12] S. Saadani, *Comportement des bétons à base de granulats recyclés Mémoire de Magister*, Université Mentouri Constantine, 2006, p. 156.
- [13] S. Bonnet, A. Turatsinze, J.-L. Granju, *Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment*, *Annales du bâtiment et des travaux publics* N° 6 (2004).
- [14] T. Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*, , RILEM Report No. 6, London E and FN Spon; (1992).
- [15] K.F. Devenny A, *The use of crashed brick as coarse aggregate in concrete.*, *Masonry Int* (1999;).
- [16] Y. NADOUR, *Propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des bétons autoplaçants à base de granulats recyclés*, HAMRAT Mostefa/BOULEKBACHE Bensaid, 2023.
- [17] L. Evangelista, J. De Brito, *Concrete with fine recycled aggregates: a review*, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 18(2) (2014) 129-172.
- [18] L. Evangelista, J. De Brito, *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*, *Cement and concrete composites* 29(5) (2007) 397-401.

- [19] L. Evangelista, J. De Brito, *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates*, *Cement and concrete composites* 32(1) (2010) 9-14.
- [20] T.C. Hansen, *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985*, *Materials and structures* 19 (1986) 201-246.
- [21] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, S.-J. Chao, *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes*, *Construction and Building Materials* 112 (2016) 708-715.
- [22] F. Vahedifard, M. Nili, C.L. Meehan, *Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement*, *Construction and Building Materials* 24(12) (2010) 2528-2535.
- [23] S. MAHMOUDI, B. MOUILAH, *Etude de formulation d'un béton pour chaussée rigide*, (2021).
- [24] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. Hazaree, H. Ceylan, F. Bektas, *Guide for roller-compacted concrete pavements*, (2010).
- [25] R.A. Serne, *Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada*, *Proceedings of the International Conference on Concrete Pavements*, 1997.
- [26] A. Committee, *Roller-compacted Mass Concrete*, American Concrete Institute, 1999.
- [27] M. ZDIRI, M.B. OUEZDOU, J. NEJI, *LE BCR A FAIBLE DOSAGE EN CIMENT, UNE SOLUTION POUR LE RENFORCEMENT DES VOIES FORTEMENT SOLLICITEES. CAS DES MATERIAUX DE GISEMENTS LOCAUX*.
- [28] B. Pilon, *Propriétés mécaniques et durabilité au gel des bétons obtenus par retraitement à haute performance*, Université Laval 1998.
- [29] K. Kokubu, J. Cabrera, A. Ueno, *Compaction properties of roller compacted concrete*, *Cement and concrete composites* 18(2) (1996) 109-117.
- [30] A. C/CM-20, *Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table*, (2014).
- [31] P. Gauthier, J. Marchand, *Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec*, Association Béton, Québec (ABQ) Québec (2004) 63-87.
- [32] D.W. Pittman, *The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements*, 1989.
- [33] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, R. Degeimbre, *Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates*, *Construction and Building Materials* 23(11) (2009) 3382-3387.
- [34] A. Ashteyat, A. Obaidat, M. Kirgiz, B. AlTawallbeh, *Production of roller compacted concrete made of recycled asphalt pavement aggregate and recycled concrete aggregate and silica fume*, *International journal of pavement research and technology* (2022) 1-16.
- [35] M. Zdiri, M. Ben Ouezdou, J. Neji, *Les bétons compactés au rouleau à faible dosage en ciment, une solution pour les routes rurales: cas des matériaux de gisements locaux*, *Revue HTE* 134 (2006) 34-44.
- [36] N. Amer, N. Delatte, C. Storey, *Using gyratory compaction to investigate density and mechanical properties of roller-compacted concrete*, *Transportation research record* 1834(1) (2003) 77-84.
- [37] N. Amer, N. Delatte, C. Storey, *Using Giratory Compaction to Investigate Density and Mechanical Properties of RCC*, TRB, 2003.
- [38] E.C. Houehanou, *Étude de l'influence de l'entraînement de l'air sur la maniabilité et la résistance*

à la compression des betons compactés au rouleau, *Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa*2005.

[39] N. Norme Européenne, EN 933-2, Mai 1996, I Essai pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats-Partie 2: Détermination de la Granularité-Tamis de Contrôle, Dimensions Nominales des Ouvertures", Éditions AFNOR, Paris (1996).

[40] N. AFNOR, 933-1; Essais Pour Déterminer les Caractéristiques Géométriques des Granulats—Partie 1: Détermination de la Granularité—Analyse Granulométrique par Tamisage, AFNOR: Saint-Denis, France (2012).

[41] N. Norme, EN 933-8.(1999). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats—Partie 8: Évaluation des fines—Équivalent de sable, Paris, Association Française de Normalisation (AFNOR), 16 p., remplace les normes expérimentales françaises p. 18-597. of concrete cube, *International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)*—volume1 (3).

[42] N. Norme, EN 1097-6 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie.

[43] N. EN, 1097-6: Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, AFNOR: Paris, France (2022).

[44] BSI, BS EN 933-4: 2008. Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle shape. Shape index, BSI London, UK, 2008.

[45] NF P 18 573, Essai Los Angeles, 1990.

[46] XP-P-18-540, Granulats Définitions, conformité, spécifications, (1997).

[47] NF P 18-577, Essai Deval, 1990.

[48] NF P 18-574, fragmentation dynamique, 1990.

[49] A. Akbarnezhad, K. Ong, M. Zhang, C. Tam, Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates, *Journal of Testing and Evaluation* 41(3) (2013) 441-450.

[50] S. Braymand, S. Roux, H. Fares, K. Déodonne, F. Feugeas, Separation and quantification of attached mortar in recycled concrete aggregates, *Waste and Biomass Valorization* 8 (2017) 1393-1407.

[51] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and concrete research* 37(5) (2007) 735-742.

[52] D. Pickel, S. Tighe, J.S. West, Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete, *Construction and Building Materials* 141 (2017) 245-252.

[53] H. CHERFAOUI, Étude de l'influence de l'ajout de sable concassé sur le comportement mécanique des tufs, Université Kasdi Merbah Ouargla.

[54] NF EN 12350-6, Essais pour béton frais - Partie 6: masse volumique, AFNOR, 2012.

[55] NF EN 12390-7, Essai pour béton durci - Partie 7 : Masse volumique du béton, AFNOR, 2001.

[56] NF EN 12390-3, Essais pour béton durci - Part 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR, 2003.

[57] NF EN 12390-6, Essais pour béton durci-Partie 6: Détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes (2012).

[58] ASTM, *Standard test methods for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes*, (2004).

[59] A. ASTM C642, *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*, ASTM, ASTM International (2013).

[60] N. EN, 12390-8: *Norme: Essai pour béton durci-partie 8: Profondeur de pénétration d'eau sous pression*, AFNOR, oct (2001).

[61] S.M. Levy, P. Helene, *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*, *Cement and concrete research* 34(11) (2004) 1975-1980.

[62] J.M. Gómez-Soberón, *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study*, *Cement and concrete research* 32(8) (2002) 1301-1311.

[63] V.W. Tam, C. Tam, *Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach*, *Journal of Materials Science* 42 (2007) 3592-3602.

[64] A. AIT MOHAMED AMER, *Valorisation des matériaux de démolition dans la construction*, 2017.