



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil et d'Irrigation

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matières en Génie Civil

Présenté par :

1. Labbi Fatma Zohra

2. Donia Degaa

Intitulé :

**Contribution à l'amélioration de la qualité des
granulats recyclés : Expérimentation et optimisation**

Soutenu le : 28/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : Zrigu Taher

Président

Dr : Kaab Mohammed Zuhair

Examineur

Dr : Djedid Tarek

Encadreur

Dr : Khelifi Abdelhamid

Concadreur

Année académique : 2024/2025

مَدَامَ مَدَامَ

Remerciements

On remercie Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement du Dr Tarek Djedid. On le remercie pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Dr Abdelhamid Khelifi, Maître Assistant et encadrant du mémoire, pour ses conseils scientifiques avisés.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Mohammed Chedala, Responsable du Laboratoire, pour son aide pratique, son soutien moral et ses encouragements.

Nous exprimons également toute notre reconnaissance aux frères Mosaab Labbi et Fathi Labbi, pour leur aide précieuse, leur soutien constant et leur présence bienveillante qui ont grandement contribué au bon déroulement de ce travail. Que Dieu les en récompense généreusement.

Nous n'oublions pas non plus de remercier l'ensemble de nos enseignants pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve, malgré leurs nombreuses charges académiques et professionnelles.



*Alhamdoulillah, qui m'a accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires
pour mener à bien ce travail.*

*Louange à Dieu pour Ses bienfaits innombrables et Son soutien tout au long de
ce parcours.*

*À mes chers parents, Ma source d'amour, de soutien et de motivation. Merci
pour vos prières, vos encouragements, vos sacrifices et votre présence inestimable.
Cette réussite vous est dédiée.*

*À mes enseignants et encadreurs, Je vous remercie sincèrement pour votre
disponibilité, vos conseils avisés et votre accompagnement précieux tout au long de
ce mémoire.*

*À toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près ou de loin, par un mot, un
geste, un sourire ou une pensée : Je vous suis profondément reconnaissante.*

Enfin, à ceux qui ont cru en moi lorsque je doutais, Merci du fond du cœur.



Résumé

Résumé

Avec l'évolution rapide du secteur du bâtiment, la gestion des déchets de démolition est devenue un défi environnemental et économique majeur. Parmi les solutions durables, le recyclage des déchets de béton et de céramique apparaît comme une alternative prometteuse pour préserver les ressources naturelles et réduire les volumes de déchets. Cette étude vise à améliorer la qualité des granulats recyclés issus de ces déchets à travers différentes méthodes de traitement.

Le travail porte sur le colmatage et le traitement chimique, appliqués dans le but d'améliorer les propriétés physiques des granulats, notamment la porosité, la capacité d'absorption et la masse volumique. Une série d'essais en laboratoire a été réalisée sur des échantillons avant et après traitement afin d'évaluer l'efficacité des techniques utilisées.

Les résultats ont montré une réduction de la porosité, ainsi qu'une amélioration notable de la masse volumique et de l'absorption. Par exemple, le sable de béton a présenté les meilleures performances globales (masse volumique élevée, faible porosité/absorption) avec un traitement de 2 % de chaux et 6 % de NaHCO_3 pendant 48 heures. Le sable céramique, bien que montrant une bonne masse volumique, a gardé une porosité élevée (34,7 %) même avec 6 % de chaux et 6 % de NaHCO_3 pendant 24 heures. Le gravier de béton a donné d'excellents résultats en termes de densité et de réduction de porosité/absorption avec 6 % de chaux et 4 % de NaHCO_3 (48h). Enfin, le gravier céramique a montré une masse volumique correcte mais une porosité toujours élevée (27,4 %) malgré un traitement avec 4 % de chaux et 4 % de NaHCO_3 pendant 48 heures.

Ces granulats deviennent ainsi plus aptes à une réutilisation dans les applications non structurelles. Cette recherche encourage l'intégration des granulats recyclés dans les matériaux de construction, tout en stimulant la recherche de solutions innovantes et durables dans le génie civil.

Mots clés: *Granulats recyclés, Recyclage, Traitement chimique, Méthode de comblement des vides, Porosité, Propriétés physiques, Déchets de béton et de céramique, Amélioration des matériaux.*

ملخص

مع التطور السريع الذي يشهده قطاع البناء، أصبحت إدارة نفايات الهدم تحديًا بيئيًا واقتصاديًا كبيرًا. ومن بين الحلول المستدامة، يُعدّ تدوير مخلفات الخرسانة والسيراميك خيارًا واعدًا للحفاظ على الموارد الطبيعية والحد من حجم النفايات. تهدف هذه الدراسة إلى تحسين جودة الركام المعاد تدويره الناتج عن هذه المخلفات، من خلال استخدام طرق معالجة مختلفة.

تم في هذا العمل تطبيق طريقة سد الثغرات والمعالجة الكيميائية لتحسين الخصائص الفيزيائية للركام، مثل المسامية، والقدرة على الامتصاص، والكتلة الحجمية. شملت المنهجية إجراء تجارب مخبرية على عدة عينات قبل وبعد المعالجة، من أجل تقييم فعالية الطرق المستخدمة.

أظهرت النتائج انخفاضًا في المسامية، وتحسنًا ملحوظًا في الكثافة الحجمية والامتصاص. فعلى سبيل المثال، سجّل رمل الخرسانة أفضل أداء إجمالي (كثافة حجمية مرتفعة، انخفاض في المسامية والامتصاص) باستخدام معالجة بنسبة 2% من الجير و6% من بيكربونات الصوديوم (NaHCO_3) لمدة 48 ساعة. أما رمل السيراميك، فقد أظهر كثافة حجمية جيدة، لكن بقيت مساميته مرتفعة (34.7%) رغم معالجته بنسبة 6% من الجير و6% من NaHCO_3 لمدة 24 ساعة. وحقق حصى الخرسانة نتائج ممتازة من حيث الكثافة وخفض المسامية/الامتصاص عند معالجته بنسبة 6% جير و4% NaHCO_3 لمدة 48 ساعة. أما حصى السيراميك، فرغم تحقيقه كثافة حجمية مقبولة، إلا أن مساميته بقيت مرتفعة (27.4%) رغم المعالجة بنسبة 4% جير و4% NaHCO_3 لمدة 48 ساعة.

وبالتالي، يصبح هذا الركام المعالج أكثر قابلية لإعادة الاستخدام في التطبيقات غير الإنشائية. وتشجع هذه الدراسة على دمج الركام المعاد تدويره في مواد البناء، كما تحفّز البحث عن حلول مبتكرة ومستدامة في مجال الهندسة المدنية.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، التدوير، المعالجة الكيميائية، طريقة ملء الفراغات، المسامية، الخصائص الفيزيائية، نفايات الخرسانة والسيراميك، تحسين المواد.

Abstract

With the rapid development of the construction sector, the management of demolition waste has become a major environmental and economic challenge. Among the sustainable solutions, the recycling of concrete and ceramic waste appears to be a promising alternative to preserve natural resources and reduce waste volume. This study aims to improve the quality of recycled aggregates from these wastes through various treatment methods.

The work focuses on slurry sealing (clogging) and chemical treatment, applied to enhance the physical properties of aggregates such as porosity, water absorption, and bulk density. A series of laboratory experiments was carried out on samples before and after treatment to evaluate the efficiency of the adopted methods.

The results showed a reduction in porosity as well as a significant improvement in bulk density and absorption. For example, concrete sand showed the best overall performance (high bulk density, low porosity/absorption) with 2% lime and 6% NaHCO₃ treatment for 48 hours. Ceramic sand achieved good bulk density, but retained a high porosity (34.7%) even with 6% lime and 6% NaHCO₃ for 24 hours. Concrete gravel yielded excellent results in terms of density and reduced porosity/absorption when treated with 6% lime and 4% NaHCO₃ for 48 hours. Lastly, ceramic gravel showed acceptable bulk density but still high porosity (27.4%) despite treatment with 4% lime and 4% NaHCO₃ for 48 hours.

As a result, these treated aggregates become more suitable for reuse in non-structural applications. This research encourages the integration of recycled aggregates into construction materials while promoting the search for innovative and sustainable solutions in civil engineering.

Keywords: *Recycled aggregates, Recycling, Chemical treatment, Void filling method, Porosity, Physical properties, Concrete and ceramic waste, Material enhancement.*



Les Index

Table des matières

Le Titre	N°
<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Table des matières</i>	I - V
<i>Liste de Figures</i>	VI - VIII
<i>Liste de Tableau</i>	IX
<i>Liste des abréviations et des symboles</i>	X - XI
<i>Introduction General</i>	XI - XIII
<i>Chapitre I. Recherche bibliographique</i>	01
<i>I.1 Introduction</i>	02
<i>I.2. Généraliste sur les recyclages des matériaux en génie civil</i>	02
<i>I.2.1. Notion des déchets</i>	02
<i>I.2.2. Classification des déchets</i>	03
<i>I.2.2.1. Selon la réglementation algérienne</i>	03
<i>I.2.2.2. Selon la nature</i>	04
<i>I.2.2.3. Selon l'origine</i>	05
<i>I.2.2.4. Selon nature des déchets de bâtiment</i>	07
<i>I.2.3. Gestion des déchets</i>	08
<i>I.2.3.1. La réduction</i>	08
<i>I.2.3.2. La réutilisation (réemploi)</i>	08
<i>I.2.3.3. Le tri sélectif des déchets</i>	08
<i>I.2.3.4. La collecte</i>	09
<i>I.2.3.5. Les installations</i>	09
<i>I.2.3.6. Les traitements</i>	09
<i>I.2.4. Stratégies de traitement des déchets</i>	12
<i>I.2.4.1. Arrêt de la production du déchet ou du produit générateur de déchet</i>	12
<i>I.2.4.2. Optimisation et innovation technologique</i>	12
<i>I.2.4.3. Mise en œuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets de la production et de la consommation</i>	12

<i>I.2.4.4. Rejet « éco compatible » des déchets</i>	12
<i>I.2.4.5. Stockage</i>	13
<i>I.2.5. Utilisation des matériaux recyclés</i>	13
<i>I.3. Recyclage des bétons de démolition et de granulats de céramique</i>	13
<i>I.3.1. Généralités sur le béton et le recyclage de granulats de béton</i>	13
<i>I.3.1.1. Définition</i>	13
<i>I.3.1.2. Les différentes catégories de béton</i>	14
<i>I.3.1.3. Les propriétés du béton</i>	14
<i>I.3.1.4. Le recyclage des granulats de béton</i>	16
<i>I.3.1.5. Domaine d'utilisation des granulats recyclés de béton</i>	18
<i>I.3.2. Généralités sur la céramique et recyclage de granulats de céramique</i>	19
<i>I.3.2.1. Définition</i>	19
<i>I.3.2.2. Classification des céramiques</i>	19
<i>I.3.2.3. Sources et classification des déchets de céramique</i>	20
<i>I.3.2.4. Composition chimique et minéralogique de déchets de céramique</i>	21
<i>I.4. Amélioration de la qualité des granulats recyclés issus des déchets de béton de démolition</i>	22
<i>I.4.1. Le traitement thermique</i>	22
<i>I.4.2. Le traitement mécanique</i>	23
<i>I.4.3. Le traitement chimique</i>	23
<i>I.4.4. Le traitement électrique</i>	24
<i>I.4.5. La méthode de colmatage</i>	25
<i>I.5. Traitement chimique des granulats recyclés</i>	25
<i>I.5.1. Traitement avec bactérie</i>	25
<i>I.5.2. Traitement par produits chimiques</i>	27
<i>I.6. Conclusion</i>	28
Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales	29
<i>II.1. Introduction</i>	30
<i>II.2. Matériaux utilisés</i>	30
<i>II.2.1. Description des matériaux utilisés (Granulats recyclés (GR))</i>	30
<i>II.2.2. Préparation des matériaux</i>	32
<i>II.3. Méthodes expérimentales (caractérisation physique)</i>	34

<i>II.3.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)</i>	34
<i>II.3.2. La masse volumique (EN 1097-6)</i>	41
<i>II.3.3. Equivalent de sable (EN 933-8)</i>	44
<i>II.3.4. Porosité des granulats (EN 1097-6)</i>	47
<i>II.3.5. L'absorption par immersion des granulats (EN 1097-6)</i>	49
<i>II.4. Amélioration des granulats recyclés par traitement chimique</i>	51
<i>II.4.1. Méthodologie du traitement chimique</i>	51
<i>II.4.2. Préparation des granulats traités</i>	52
<i>II.5. Conclusion</i>	55
Chapitre III. Résultats et discussion optimisations	56
<i>III.1. Introduction</i>	57
<i>III.2. Analyse des résultats expérimentaux des propriétés physiques des échantillons</i>	57
<i>III.2.1. Sable de céramique recyclé (SCR)</i>	57
<i>III.2.2. Gravier de céramique recyclé (GCR)</i>	61
<i>III.2.3. Sable de béton recyclé (SBR)</i>	65
<i>III.2.4. Gravier de béton recyclé (GBR)</i>	69
<i>III.3. Étude de l'optimisation des propriétés des échantillons traités</i>	73
<i>III.3.1. Sable de céramique</i>	73
<i>III.3.1.1. Modèle et facteurs significatifs</i>	73
<i>III.3.1.2. Coefficient de corrélation</i>	74
<i>III.3.1.3. Données</i>	75
<i>III.3.1.4. Solutions</i>	75
<i>III.3.2. Sable du béton de démolition</i>	76
<i>III.3.2.1. Modèle et facteurs significatifs</i>	76
<i>III.3.2.2. Coefficient de corrélation</i>	77
<i>III.3.2.3. Données</i>	78
<i>III.3.2.4. Solutions</i>	78
<i>III.3.3. Gravier de céramique</i>	79
<i>III.3.3.1. Modèle et facteurs significatifs</i>	79
<i>III.3.3.2. Coefficient de corrélation</i>	79
<i>III.3.3.3. Données</i>	81

<i>III.3.3.4. Solutions</i>	81
<i>III.3.4. Gravier du béton de démolition</i>	82
<i>III.3.4.1. Modèle et facteurs significatifs</i>	82
<i>III.3.4.2. Coefficient de corrélation</i>	82
<i>III.3.4.3. Données</i>	84
<i>III.3.4.4. Solutions</i>	84
<i>III.3.5. Synthèse globale</i>	85
<i>III.3.5.1. Facteurs clés</i>	85
<i>III.3.5.2. Optimisation</i>	85
<i>III.3.5.3. Synthèse</i>	85
<i>III.4. Conclusion</i>	86
<i>Conclusion Générale</i>	87-88
<i>Références</i>	89-92
<i>Annex</i>	

Liste de Figures

Figures	N°
<i>Chapitre I. Recherche bibliographique</i>	
<i>Figure I.1. Le b.a.-ba du tri des déchets [Photographie].</i>	03
<i>Figure I.2. Couverture du guide pratique sur la gestion des déchets inertes, publié par Écominéro.</i>	04
<i>Figure I.3. Déchets dangereux.</i>	04
<i>Figure I.4. Déchets non dangereux.</i>	05
<i>Figure I.5. Déchets ménagers et assimilés.</i>	05
<i>Figure I.6. Déchets médicaux et pharmaceutiques.</i>	06
<i>Figure I.7. Déchets agricoles.</i>	06
<i>Figure I.8. Les déchets organiques.</i>	07
<i>Figure I.9. Composteur des déchets [12].</i>	10
<i>Figure I.10. Procédé de production de biogaz et digestat [4].</i>	10
<i>Figure I.11. (reduce, reuse, recycle) Symbol [4].</i>	11
<i>Figure I.12. Stratégies de gestion des déchets [7].</i>	13
<i>Figure I.13. Économie circulaire dans le domaine de la construction [36].</i>	16
<i>Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales</i>	
<i>Figure II.1. Détails des granulats de béton recyclé utilisés dans l'étude : source, forme, état initial et fractions granulométriques ciblées.</i>	31
<i>Figure II.2. Détails des granulats de céramique recyclé utilisés dans l'étude : source, forme, état initial et fractions granulométriques ciblées.</i>	32
<i>Figure II.3. Préparation des matériaux recyclés.</i>	34
<i>Figure II.4. Essai de granulométrie.</i>	36
<i>Figure II.5. Courbe granulométrique du sable de béton recyclé.</i>	37
<i>Figure II.6. Courbe granulométrique du Sable de céramique recyclé.</i>	38
<i>Figure II.7. Courbe granulométrique du gravier de béton recyclé.</i>	39
<i>Figure II.8. Courbe granulométrique du gravier de céramique recyclé.</i>	40

<i>Figure II.9. Masse volumique apparente.</i>	42
<i>Figure II.10. Masse volumique absolue.</i>	43
<i>Figure II.11. Échantillons de masse volumique absolue après stabilisation.</i>	43
<i>Figure II.12. Processus d'essai d'équivalent de sable.</i>	46
<i>Figure II.13. Processus de mesure de la porosité.</i>	49
<i>Figure II.14. Processus de mesure de l'absorption.</i>	50
<i>Figure II.15. Produits chimiques : NaHCO_3 et la chaux.</i>	51
<i>Figure II.16. Traitement des matériaux à l'aide de produits chimiques pour améliorer leurs propriétés.</i>	52
<i>Figure II.17. Étapes de préparation des matériaux traités : du lavage au stockage.</i>	53
<i>Figure II.18. Étapes de préparation des matériaux traités : du lavage au stockage.</i>	54
Chapitre III. Résultats et discussion optimisations	56
<i>Figure III.1. Évolution du taux de la masse volumique apparente du SCR après traitement chimique.</i>	57
<i>Figure III.2. Évolution du taux d'absorption par immersion du SCR après traitement chimique.</i>	58
<i>Figure III.3. Évolution du taux de porosité du SCR après traitement chimique.</i>	60
<i>Figure III.4. Évolution du taux de la masse volumique apparente du GCR après traitement chimique.</i>	61
<i>Figure III.5. Évolution du taux d'absorption par immersion du GCR après traitement chimique.</i>	62
<i>Figure III.6. Évolution du taux de porosité du GCR après traitement chimique.</i>	64
<i>Figure III.7. Évolution du taux de la masse volumique apparente du SBR après traitement chimique.</i>	65
<i>Figure III.8. Évolution d'absorption par immersion du taux du SBR après traitement chimique.</i>	66
<i>Figure III.9. Évolution de la porosité du taux du SBR après traitement chimique.</i>	68
<i>Figure III.10. Évolution de la masse volumique apparente du taux du GBR après traitement chimique.</i>	69
<i>Figure III.11. Évolution d'absorption par immersion du taux du GBR après traitement chimique.</i>	70
<i>Figure III.12. Évolution de la porosité du taux du GBR après traitement chimique.</i>	72

<i>Figure III.13. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du sable céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	74
<i>Figure III.14. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du sable de céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	74
<i>Figure III.15. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du sable céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	75
<i>Figure III.16. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du sable béton de démolition et traité chimiquement.</i>	76
<i>Figure III.17. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du sable béton de démolition et traité chimiquement.</i>	77
<i>Figure III.18. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du sable béton de démolition et traité chimiquement.</i>	77
<i>Figure III.19. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	79
<i>Figure III.20. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	80
<i>Figure III.21. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.</i>	80
<i>Figure III.22. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du gravier béton de démolition et traité chimiquement.</i>	82
<i>Figure III.23. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du gravier béton de démolition et traité chimiquement.</i>	83
<i>Figure III.24. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du gravier béton de démolition et traité chimiquement.</i>	83

Liste de Tableau

Figures	N°
<i>Chapitre II. Matériaux et procédures expérimentales</i>	29
<i>Tableau II.1. Module de la finesse de sable.</i>	35
<i>Tableau II.2. Analyse granulométrique du sable de béton recyclé.</i>	36
<i>Tableau II.3. Analyse granulométrique du sable de céramique recyclé.</i>	37
<i>Tableau II.4. Analyse granulométrique du gravier de béton recyclé.</i>	38
<i>Tableau II.5. Analyse granulométrique du gravier de céramique recyclé.</i>	39
<i>Tableau II.6. Masse volumique des granulats utilisés.</i>	44
<i>Tableau II.7. Compacité, Porosité et L'indice des vides des granulats utilisés.</i>	44
<i>Tableau II.8. Equivalent de sable de béton recyclé.</i>	47
<i>Tableau II.9. Equivalent de sable de céramique recyclé.</i>	47
<i>Tableau II.10. Valeur de Equivalent de sable.</i>	47

Liste des abréviations et des symboles

Symbole	Définition
DAE	<i>Déchets des Activités Économiques</i>
DI	<i>Les déchets Inertes</i>
DIB	<i>Les déchets Industriels Banals</i>
CET	<i>Centre d'Enfouissement Technique</i>
CRIC	<i>Comité de Réflexion pour l'Intégration des matériaux recyclés dans la Construction</i>
COPRO	<i>Organisme de Certification pour les Produits</i>
GRB	<i>Granulat recyclé de béton</i>
GR	<i>Granulats recyclés</i>
GN	<i>Granulats naturels</i>
BTP	<i>Bâtiment et Travaux Publics</i>
C2CA	<i>Concrete to Cement and Aggregate</i>
MICP	<i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i>
GBR	<i>Granulats de béton recyclé</i>
GCR	<i>Granulats de céramique recyclé</i>
MF	<i>Module de finesse</i>
GCR	<i>Gravier de béton recyclé</i>
SCR	<i>Sable de béton recyclé</i>
GBR	<i>Gravier de céramique recyclé</i>
SBR	<i>Sable de céramique recyclé</i>
R	<i>Refus cumulé</i>
T	<i>Tamisât cumulé</i>
F	<i>Fond de tamis</i>
D	<i>le diamètre</i>
ES	<i>Equivalent de sable</i>
ESV	<i>Equivalent de sable visual</i>
Ab	<i>absorption</i>



Introduction

Généralités

Introduction Généralités

Le monde connaît aujourd'hui un développement urbain accéléré, accompagné d'une augmentation significative de la demande en matériaux de construction, dans un contexte de prise de conscience environnementale croissante quant à la nécessité de préserver les ressources naturelles et de réduire la pollution. Dans ce cadre, le secteur du génie civil est confronté à deux défis majeurs : d'une part, limiter l'épuisement des ressources naturelles, et d'autre part, réduire l'impact environnemental des déchets issus de la démolition et de la construction. Les déchets provenant du béton et des matériaux céramiques figurent parmi les plus courants dans cette catégorie, ce qui rend leur recyclage une option prometteuse sur les plans économique et environnemental.

Ce travail s'inscrit dans la démarche du développement durable et vise à contribuer à l'amélioration de la qualité des granulats recyclés issus des déchets de béton et de céramique. Bien que ces granulats présentent un certain potentiel, ils affichent souvent des propriétés physiques et chimiques inférieures à celles des granulats naturels, principalement en raison de la présence de pâte de ciment résiduelle et d'une porosité élevée. Afin de surmonter ces limitations, ce mémoire se concentre sur le traitement chimique comme solution efficace pour améliorer la structure des granulats et renforcer leurs performances, en vue de leur réintégration optimale dans les mélanges de béton.

L'intérêt de cette recherche réside dans la recherche de solutions pratiques et efficaces pour une valorisation accrue des déchets inertes issus des activités de construction, notamment dans la production de béton recyclé de meilleure qualité. Cette approche permet non seulement de réduire la pression sur les carrières naturelles, mais aussi de limiter les quantités importantes de déchets envoyées aux décharges, ce qui constitue une avancée significative vers la réalisation des objectifs de durabilité environnementale dans le secteur de la construction.

Le choix de ce sujet repose sur plusieurs motivations, notamment l'intérêt croissant pour les matériaux alternatifs et les techniques innovantes de traitement des granulats recyclés, ainsi que le besoin en données expérimentales dans un domaine en constante évolution. Ce sujet s'inscrit également en parfaite adéquation avec les objectifs du développement durable et les exigences de la transition écologique aux niveaux national et international.

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer à l'amélioration des propriétés des granulats recyclés à travers l'exploration et l'évaluation du traitement chimique, afin d'en améliorer la qualité et de favoriser leur intégration dans la composition du béton.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le recyclage des matériaux dans le domaine du génie civil, en mettant l'accent sur les déchets de béton et de céramique ainsi que sur les différentes méthodes de traitement.

Le deuxième chapitre présente les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour évaluer les performances des granulats traités.

Le troisième chapitre expose et analyse les résultats obtenus, suivi d'une phase d'optimisation visant à déterminer les conditions idéales pour améliorer la qualité des granulats recyclés.

Ainsi, ce mémoire aspire, à son échelle, à contribuer à une meilleure intégration des matériaux recyclés dans le domaine de la construction, tout en répondant aux exigences de performance et de durabilité du béton moderne.



Chapitre I

Recherche bibliographique



I.1. Introduction

Les activités de construction et de démolition génèrent d'importantes quantités de déchets, dont la majorité est envoyée en décharge, posant ainsi des enjeux environnementaux. Le recyclage reste limité en raison des difficultés liées au tri et à la collecte, notamment lorsque les déchets sont mélangés. Cependant, une partie de ces déchets peut être réutilisée après un traitement adapté, notamment dans les travaux d'infrastructures.

Ce chapitre vise à présenter les types de déchets du bâtiment, leurs caractéristiques et les méthodes de gestion et de valorisation. Une attention particulière sera portée à la valorisation chimique de certains déchets comme le béton et le carrelage, visant à améliorer la qualité des matériaux recyclés pour une réintégration efficace dans des formulations de béton plus durables.

I.2. Généraliste sur les recyclages des matériaux en génie civil

I.2.1. Notion des déchets

La problématique des déchets s'est intensifiée avec l'essor de l'urbanisation. La quantité de déchets ne cesse d'augmenter de manière alarmante, et leur nature variée complique la mise en place d'un système de traitement généralisé. Ainsi, une meilleure connaissance de leur composition et de leurs caractéristiques est essentielle pour choisir la filière de traitement la plus appropriée et durable [1].

Définition d'un déchet

Le terme « déchet » fait référence à la diminution d'une chose, que ce soit en volume, en valeur ou en qualité. Il s'agit d'un résidu considéré comme inutile ou inutilisable, n'ayant plus de valeur ni d'usage.

Selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, un déchet est défini comme : « tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou objet abandonné ou destiné à l'être par son détenteur ».

En d'autres termes, un déchet est tout produit ou résidu, provenant du métabolisme ou d'activités humaines—qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles—qui n'est plus utilisable par celui qui l'a généré [2].

I.2.2. Classification des déchets

I.2.2.1. Selon la réglementation algérienne

Déchets ménagers et assimilés : L'ensemble des déchets produits par les ménages, ainsi que ceux provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales ou autres, dès lors que leur nature et leur composition les rendent comparables aux déchets domestiques [1].



Figure I.1. Le b.a.-ba du tri des déchets [Photographie] [8].

Déchets spéciaux : Ce sont tous les déchets issus des activités industrielles, agricoles, médicales, de services ou autres, qui ne peuvent pas être collectés, transportés ou traités de la même manière que les déchets ménagers ou inertes, en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent [1].

Déchets spéciaux dangereux : Tous les déchets dangereux, dont les composants ou les substances nuisibles qu'ils contiennent peuvent représenter un risque pour la santé publique ou l'environnement [1].

Déchets inertes : Déchets issus des carrières, mines ou travaux de construction, ne subissant aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et non contaminés par des substances dangereuses ou nuisibles à la santé ou à l'environnement [1].



Figure I.2. Couverture du guide pratique sur la gestion des déchets inertes, publié par Écominéro [9].

I.2.2.2. Selon la nature

Déchets dangereux : Les déchets dangereux, issus principalement des activités industrielles, contiennent des substances nocives pour la santé et l'environnement. Leur traitement nécessite des précautions spécifiques en raison de leur dangerosité. Un déchet est considéré comme dangereux s'il possède les caractéristiques suivantes : explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, infectieux, corrosif mutagène, ... [1].



Figure I.3. Déchets dangereux [1].

Déchets non dangereux : Les déchets non dangereux ne présentent pas de risque pour la santé ou l'environnement, car ils ne contiennent pas de substances toxiques. Ils proviennent principalement des entreprises, des industries, des collectivités et des ménages. Leur traitement permet de les recycler ou de les transformer en matières premières secondaires, contribuant ainsi à préserver les ressources naturelles [1].



Figure I.4. Déchets non dangereux [10].

Parmi ces déchets, on trouve : Déchets Industriels Banals, Ordures ménagères résiduelles, Bois (types A et B), Déchets verts, Verre, Papier, carton, Déchets minéraux [1].

Déchets inertes : Les déchets inertes sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique significative. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne réagissent pas, ne sont pas biodégradables et ne polluent pas l'environnement ni ne nuisent à la santé humaine [1].

Déchets ultimes : Les déchets ultimes sont des déchets qui ne peuvent plus être valorisés, ni par recyclage ni par valorisation énergétique, et qui ne peuvent plus être traités techniquement ou économiquement pour en extraire des éléments utiles ou réduire leur dangerosité [1].

I.2.2.3. Selon l'origine

Déchets ménagers et assimilés : Les déchets produits par les ménages ainsi que ceux générés par les activités économiques, commerciales ou artisanales, présentant une nature, une composition et des caractéristiques comparables à celles des déchets domestiques [1].



Figure I.5. Déchets ménagers et assimilés [1].

Déchets des Activités Economiques (DAE) : Ce sont des déchets générés par les entreprises dont la nature et la composition sont comparables à celles des déchets ménagers. La législation les qualifie de « déchets assimilés aux ordures ménagères », ce qui permet leur collecte et leur traitement selon les mêmes modalités [1].

Déchets industriels : Tout résidu provenant d'une activité industrielle, agroalimentaire, artisanale ou d'une activité de nature comparable [1].

Déchets médicaux et pharmaceutiques : Ce sont les déchets issus des activités médicales ou vétérinaires (diagnostic, traitement, prévention) ainsi que ceux produits par les hôpitaux, cliniques, laboratoires et établissements de recherche liés à ces domaines [1].



Figure I.6. Déchets médicaux et pharmaceutiques [1].

Déchets agricoles : Tout résidu organique provenant directement des activités agricoles, d'élevage ou de jardinage (comme le gazon, les branches, etc.).



Figure I.7. Déchets agricoles [11].

Déchets organiques : Les termes comme biodégradables, compostables, bio-déchets ou fermentescibles désignent tous des déchets organiques. Ce sont des matières pouvant se décomposer naturellement, en présence ou non d'oxygène, par des micro-organismes (bactéries, champignons) ou des réactions chimiques (oxydation, minéralisation). Il s'agit notamment des

résidus verts, boues d'épuration, déchets de cuisine, papier journal, fleurs coupées, à condition qu'ils ne soient pas contaminés [1].



Figure I.8. Les déchets organiques [11].

I.2.2.4. Selon nature des déchets de bâtiment

Les déchets Inertes (DI) : Les déchets inertes désignent des résidus d'origine minérale, exempts de toute contamination. Ils ne subissent ni décomposition biologique, ni combustion, et n'engendrent aucune réaction chimique ou physique notable. Leur nature non biodégradable et stable les rend inoffensifs pour l'environnement et la santé humaine, même au contact d'autres substances. Ils sont principalement issus des opérations de construction, de rénovation ou de démolition dans le secteur du bâtiment [3].

Exemples : béton, briques, tuiles, céramiques, pierres.

Les déchets Industriels Banals (DIB) : sont des déchets qui ne sont ni inertes ni dangereux. Issus des activités des entreprises, ils peuvent généralement être traités dans les mêmes installations que les ordures ménagères. Il s'agit par exemple de cartons, de verre, de déchets alimentaires ou d'emballages divers [3].

Dans le secteur du bâtiment, ces déchets se composent principalement de :

- Bois usagé.
- Plastiques divers.
- Métaux ferreux et non ferreux.
- Déchets textiles.
- Résidus de plâtre provenant des cloisons en plaques.
- Cartons issus des cloisons, des portes ou des emballages.

Déchets de chantier : Les déchets de chantier regroupent tous les résidus issus des travaux de construction ou de démolition, comme la terre non polluée provenant des fouilles, les gravats composés de matériaux minéraux (pierres, briques, béton, tuiles), les déchets combustibles (bois, plastique, carton, etc.), et les déchets mélangés contenant différents matériaux (bois, métal, plastique, etc.). Les gravats incluent les matériaux bitumineux (issus de la démolition ou du fraisage des routes), les matériaux non bitumineux (fondations), le béton de démolition, ainsi que les mélanges de débris minéraux non triés provenant de différents types de maçonnerie [3].

Déchets de démolition : La démolition produit de nombreux déchets lourds, souvent mélangés, ce qui complique leur recyclage. Les méthodes classiques comme l'expansion ou l'explosion rendent le tri difficile. La déconstruction, avec un tri à la source, permet une meilleure valorisation, mais demande une organisation spécifique et des coûts adaptés [3].

I.2.3. Gestion des déchets

La gestion des déchets englobe l'ensemble des activités liées à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, ainsi que le contrôle de ces opérations, conformément à la loi 01-19. Dans ce domaine, il convient de privilégier, dans l'ordre, la réduction à la source, la réutilisation, le recyclage, la valorisation, puis l'élimination.

I.2.3.1. La réduction

La réduction poursuit un double objectif : d'un côté, diminuer la consommation de produits pour garantir une gestion durable des ressources naturelles ; de l'autre, limiter les effets environnementaux liés à la gestion des déchets [4].

I.2.3.2. La réutilisation (réemploi)

L'objectif fondamental du réemploi des déchets consiste à maintenir les matériaux dans le circuit économique aussi longtemps que possible, en vue de rationaliser l'utilisation des matières premières et de limiter l'accumulation des déchets, conformément aux principes du développement durable [4].

I.2.3.3. Le tri sélectif des déchets

Constitue une condition préalable indispensable à leur valorisation ou à leur recyclage, dans la mesure où la collecte en mélange n'est plus admissible. De ce fait, les ménages représentent le premier maillon de la chaîne de valorisation des matières recyclables, en raison de leur aptitude et

de leur engagement à trier les déchets domestiques, une pratique révélatrice d'une conscience environnementale affirmée [4].

I.2.3.4. La collecte

La gestion des déchets ménagers peut s'effectuer de différentes manières dans les villes des pays en développement, en fonction du pays, de la taille de la ville, des ressources financières et des technologies disponibles. C'est comme suivi [4] :

- Collecte par apport volontaire en container.
- Collecte séparative par apport volontaire.
- Collecte en porte à porte par moyens lourds.
- Collecte en mélange.
- Collecte séparative.

I.2.3.5. Les installations

Déchetterie : est un site sécurisé, clôturé et surveillé, destiné à accueillir les particuliers souhaitant se débarrasser de leurs déchets encombrants, ainsi que d'autres déchets préalablement triés, en les déposant dans des conteneurs spécifiques afin de favoriser leur valorisation et leur traitement adéquat [4].

Le centre de tri : Le centre de tri est un maillon clé de la collecte sélective. Il reçoit les déchets recyclables ménagers, issus de la collecte en porte-à-porte ou de l'apport volontaire, pour les trier et en extraire les matériaux conformes aux normes minimales de recyclage [4].

Station de transit : La station de transit, ou centre de transfert, accueille les déchets ménagers collectés, les stocke temporairement dans des fosses ou conteneurs, avant leur transport en grande quantité vers un site de traitement ou de stockage [4].

I.2.3.6. Les traitements

Le compostage : " La compostage est un processus biologique au cours duquel la matière organique est transformée sous l'effet de l'activité microbienne, en présence d'oxygène, pour produire un humus ou terreau ayant l'aspect de la tourbe. Dans un environnement riche en oxygène " [4].



Figure I.9. Composteur des déchets [52].

La méthanisation : La méthanisation est un processus biologique naturel permettant la dégradation des matières organiques présentes dans les déchets, en absence d'oxygène (réaction anaérobie). Ce phénomène est réalisé par des micro-organismes, notamment des bactéries qui utilisent ces matières comme source d'énergie et de croissance, dans un réacteur appelé digesteur, sous des conditions maîtrisées de température et d'humidité [5].

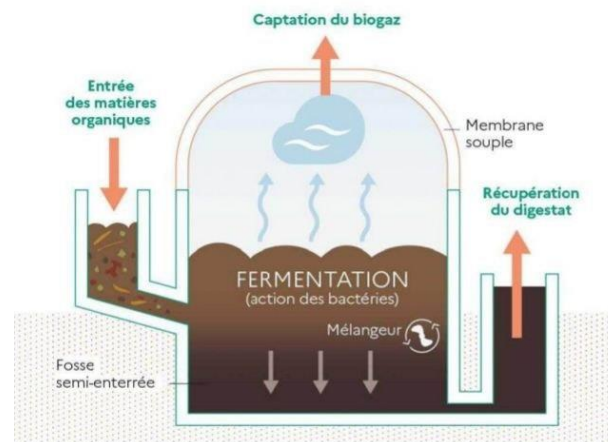


Figure I.10. Procédé de production de biogaz et digestat [4].

Le recyclage

- Définition** : Le recyclage est un procédé qui permet de transformer les déchets industriels et ménagers pour réintégrer les matériaux qui les composent dans le cycle de production. Il a deux impacts écologiques principaux : la réduction du volume des déchets et la conservation des ressources naturelles. Il fait partie de la stratégie des trois R :
 Réduire : diminuer la production de déchets,
 Réutiliser : donner une nouvelle utilisation aux produits usagés,
 Recycler : traiter les déchets pour les revaloriser [6].



Figure I.11. (reduce, reuse, recycle) Symbol [4].

- **Enjeux du recyclage**

Le recyclage présente trois principaux enjeux [4] :

Environnemental : il permet de préserver les ressources naturelles, de limiter la pollution et de réduire la consommation d'énergie.

Social : il contribue à un cadre de vie plus sain en diminuant les nuisances visuelles et olfactives.

Économique : il génère des bénéfices grâce à la valorisation des déchets et permet des économies en réduisant leur production à la source.

Incinération : L'incinération, selon Desachy (2001), est une méthode de traitement des déchets ménagers par combustion dans des fours adaptés. Elle réduit leur volume de 80 à 90 % (Balet, 2005). Un contrôle strict de la combustion et un traitement des fumées sont nécessaires pour éviter toute pollution. Les résidus peuvent être valorisés, notamment en énergie ou en construction routière (mâchefers) [1].

Mise en décharge : La mise en décharge, bien que plus simple, économique et ancienne que les autres méthodes de traitement des déchets, engendrent des impacts environnementaux. Elle reste largement utilisée dans les pays en développement, tandis que dans les pays ayant une gestion avancée des déchets, cette pratique est en déclin [1].

Enfouissement : L'enfouissement consiste à enterrer les déchets dans des centres techniques adaptés, aménagés de manière à réduire les risques de pollution grâce à des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques spécifiques. On distingue trois catégories de CET : la classe I pour les déchets dangereux, la classe II pour les déchets ménagers et non dangereux, et la classe III pour les déchets inertes [1].

I.2.4. Stratégies de traitement des déchets

Les méthodes de gestion des déchets sont basées sur deux principes essentiels.

- Prendre en compte de manière simultanée les dimensions de la matière, de l'énergie, de l'environnement et de l'économie : Cela signifie que toute stratégie de gestion des déchets doit évaluer l'impact global en intégrant ces quatre aspects de façon indissociable.
- S'inspirer des lois naturelles qui régissent le fonctionnement des milieux naturels : Les stratégies doivent respecter les cycles biogéochimiques (circulation des éléments chimiques à travers l'eau, l'air, le sol, les végétaux et les animaux) pour permettre un retour harmonieux des déchets dans l'environnement.

À partir de ces deux principes, la gestion des déchets peut s'appuyer sur cinq stratégies différentes [7].

I.2.4.1. Arrêt de la production du déchet ou du produit générateur de déchet

Les problèmes, souvent liés aux impacts sur l'environnement ou à la santé publique, peuvent entraîner la nécessité d'interrompre l'activité à l'origine de la production de certains déchets [7].

I.2.4.2. Optimisation et innovation technologique

Réduire la quantité de déchets ou leur impact environnemental relève des technologies et des produits propres. Cela se fait progressivement, d'abord par la dépollution pour minimiser les rejets, puis par l'optimisation des matières premières et de l'énergie. À terme, la non-pollution peut résulter de l'amélioration ou du changement de procédés [7].

I.2.4.3. Mise en œuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets de la production et de la consommation

C'est dans ce domaine que se trouvent la plupart des possibilités de gestion et de traitement des déchets [7].

I.2.4.4. Rejet « éco compatible » des déchets

Cette notion est cruciale. Lorsque les trois premières stratégies ne sont pas possibles, il est essentiel d'assurer un retour « acceptable » des déchets dans l'environnement, sans perturber les cycles biogéochimiques. Cela peut être réalisé par valorisation, transformation chimique ou conditionnement [7].

I.2.4.5. Stockage

Il arrive, notamment pour les déchets ultimes, que le stockage sécurisé, dans ou sous terre, reste la solution incontournable. C'est toute la stratégie de l'enfouissement technique qui constitue, en raison de son impact sur l'environnement, un aspect clé de la gestion des déchets. C'est également le domaine qui suscite principalement les réticences psychosociologiques [7].

I.2.5. Utilisation des matériaux recyclés

Les granulats recyclés sont principalement utilisés dans la construction, notamment pour les remblais, sous-fondations, bétons maigres, et parfois pour les concassés de béton et enrobés dans les fondations routières. En Europe, plusieurs cahiers des charges ont été ajustés pour intégrer ces produits recyclés. En France, une certification des granulats recyclés sera bientôt disponible pour les centres en faisant la demande, une fois le projet de prescriptions techniques du CRIC-certification adopté. Actuellement, seule la production des matériaux recyclés peut obtenir une certification (COPRO) [7].

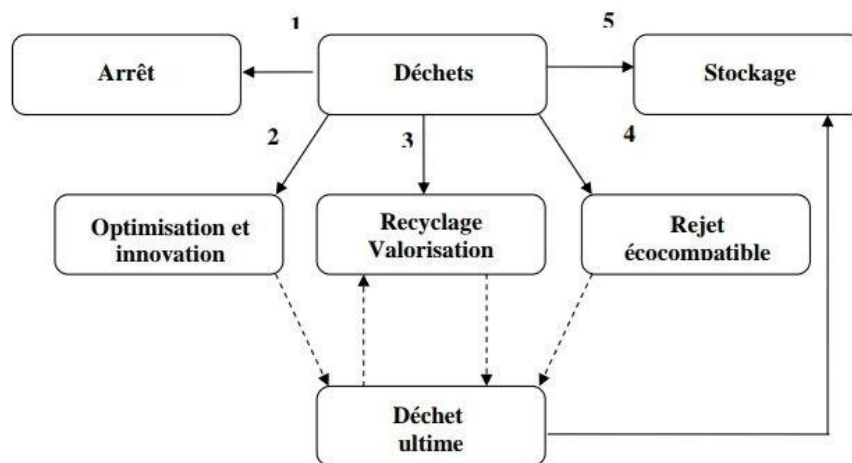


Figure I.12. Stratégies de gestion des déchets [7].

I.3. Recyclage des bétons de démolition et de granulats de céramique

I.3.1. Généralités sur le béton et le recyclage de granulats de béton

I.3.1.1. Définition

Le béton est un matériau composé d'un mortier (ciment, sable, eau) auquel on ajoute des gravillons ou des pierres. Ce mélange permet d'obtenir une structure compacte, résistante et économique. La fabrication se fait en une seule étape en dosant les composants avec précision, tout en tenant compte de l'humidité des granulats.

Le durcissement du béton se fait par la prise du liant (chaux ou ciment), qui lie les granulats inertes à la pâte. Pour assurer une bonne adhérence entre liant et granulats, plusieurs conditions sont nécessaires : grains propres, hydrophiles, bien mouillés et uniformément enrobés par la pâte de ciment. La présence de fines particules facilite cet enrobage, surtout pour les gros grains.

Enfin, la quantité d'eau ajoutée influence l'ouvrabilité du béton et dépend de plusieurs facteurs, comme le dosage du ciment, la granulométrie et les moyens de serrage, ce qui rend le rapport eau/ciment très important [1][12].

I.3.1.2. Les différentes catégories de béton

Selon la norme P 18-301, les bétons de construction se divisent en trois grandes catégories selon leur usage [1] :

- Type A : Bétons à très haute résistance mécanique, utilisés dans les structures en béton armé (colonnes, fondations, ponts).
- Type B : Bétons à faible perméabilité à l'eau, adaptés aux ouvrages nécessitant une forte étanchéité (barrages, réservoirs).
- Type C : Bétons peu ou non armés, utilisés dans les fondations massives ou ouvrages peu sollicités.

En plus de cette classification, les bétons sont aussi classés selon leur densité :

- Bétons ordinaires (2100–2400 kg/m³) : les plus courants, utilisés dans les structures armées, ouvrages d'infrastructure, voiries et éléments préfabriqués.
- Bétons légers (600–1800 kg/m³) : utilisés pour alléger les structures et améliorer l'isolation. On distingue :
 - Bétons caverneux (sans sable), Bétons cellulaires (avec bulles de gaz), Bétons à granulats légers (argile, laitier, schiste expansés).
 - Bétons lourds (3500–4500 kg/m³) : destinés à la protection contre les radiations, réalisés avec des granulats très denses comme la barytine ou les minerais de fer.

I.3.1.3. Les propriétés du béton

À l'état frais

La principale propriété du béton frais est son ouvrabilité, c'est-à-dire sa capacité à remplir facilement les coffrages et le ferrailage. Pour garantir cette qualité, il est crucial de bien mélanger les composants. L'ouvrabilité dépend de plusieurs facteurs : le dosage, la qualité des matériaux, la

granulométrie, le type de granulats, le volume d'air et, surtout, la quantité d'eau ajoutée. Un excès d'eau peut entraîner des phénomènes indésirables, tels que: Le ressuage, où une partie de l'eau remonte à la surface.

Une augmentation de la porosité et du retrait, réduisant la résistance du béton.

Un risque de ségrégation, où les granulats se déposent au fond et les liants remontent à la surface.

Ainsi, il est essentiel de contrôler soigneusement la quantité d'eau pour éviter ces effets négatifs [13].

À l'état durci

La porosité : La porosité est un facteur clé pour la durabilité du béton. Réduire les vides améliore la résistance aux agents agressifs et diminue le risque de corrosion des armatures. Cela passe par un bon choix du type de ciment et un dosage adapté.

Les résistances mécaniques : Elles dépendent principalement du type et du dosage de ciment, du rapport eau/liant et de la porosité.

Compression : entre 30 et 45 MPa à 28 jours.

Traction : environ 8 à 12 % de la résistance en compression.

Cisaillement : environ 5 % de la résistance en compression.

Résistance aux cycles gel/dégel: Déterminée par le rapport eau/liant, la quantité d'air entraîné (4 à 8 %), et la durée de séchage avant exposition. Les adjuvants entraîneurs d'air sont essentiels pour augmenter cette résistance, surtout pour les bétons à hautes performances.

La perméabilité : Étroitement liée à la porosité. Un béton moins perméable résiste mieux aux agents extérieurs, ce qui améliore sa durabilité globale.

Les retraits : Hydrauliques : dus à l'évaporation ou à l'absorption, peuvent atteindre 1 L/m² en une heure.

Thermiques : causés par une baisse rapide de température, de l'ordre de 200 à 300 µm/m.

L'humidification des éléments pendant la prise permet de limiter ces retraits

Module d'élasticité : Sous charges instantanées, le béton se comporte de manière élastique. Plus sa résistance est élevée, plus son module est important. Il varie entre 30 000 et 35 000 MPa [14].

I.3.1.4. Le recyclage des granulats de béton

Le recyclage des granulats de béton issus de la démolition d'infrastructures urbaines s'inscrit dans une démarche à la fois économique et écologique, particulièrement adaptée aux milieux urbains. Ces matériaux recyclés sont principalement réutilisés dans la fabrication de béton hydraulique ou pour les travaux de pose de canalisations.

Cette pratique contribue à préserver les ressources minérales naturelles, qui sont limitées et non renouvelables.

Elle donne une seconde vie aux matériaux de démolition, en les réintégrant dans des projets de travaux publics ou d'aménagement urbain, notamment dans la fabrication de béton non structurel.

Leur traitement et leur réutilisation locale permettent de limiter les besoins en transport, réduisant ainsi l'empreinte carbone liée à la logistique [15].

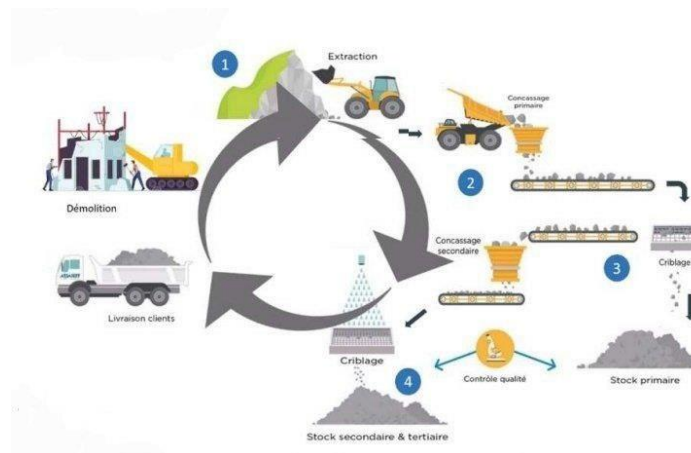


Figure I.13. Économie circulaire dans le domaine de la construction [36].

Intérêt du recyclage dans le génie civil

Actuellement, les granulats disponibles sur le marché proviennent en grande majorité de sources naturelles, telles que les carrières ou l'extraction dans les lits de rivières et fonds marins. Ces matériaux présentent l'avantage d'une qualité globalement stable et d'une disponibilité constante. Le recours aux déchets recyclés comme granulats dans les travaux routiers ou de construction offre de nombreux bénéfices :

Une préservation des ressources naturelles

Une diminution du transport de matériaux, ce qui réduit la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre

Une exécution plus rapide des chantiers, réduisant les nuisances pour les riverains

Une limitation des volumes de déchets envoyés en décharge. Sur le plan environnemental, le recyclage intégral du béton permet de réduire l’empreinte carbone. Dans les grandes villes, l’usage de granulats recyclés diminue les émissions de CO₂ liées au transport ; de plus, le béton concassé a la capacité de capter le CO₂ par carbonatation

La valorisation des fines, qui après traitement, peuvent être utilisées dans la fabrication de nouveaux ciments ou liants hydrauliques, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂ des cimenteries [15].

Description d’un granulats de béton recyclé

Le terme « granulats recyclés » désigne un granulats issu du recyclage de déchets de béton provenant de démolition, par opposition aux « granulats naturels » extraits de carrières ou de sablières.

Ces granulats recyclés sont constitués d’un granulats d’origine naturelle auquel reste attaché un mortier résiduel. Ainsi, ils doivent être considérés comme un système à deux phases distinctes : le mortier et le granulats d’origine.

La quantité de mortier résiduel présente sur le granulats a une influence majeure sur les propriétés du granulats recyclés de béton (GRB). Cette teneur en mortier résiduel constitue un critère essentiel pour évaluer la qualité du GRB.

Parmi les effets de la présence de mortier résiduel, on note la création d’une zone de transition entre le granulats d’origine et le mortier résiduel, en plus de la zone de transition qui se forme entre le granulats recyclés et la nouvelle pâte de ciment [15].

Caractéristiques des granulats recyclés de béton

L’utilisation de granulats recyclés (GR) à la place des granulats naturels (GN) modifie plusieurs propriétés du béton. Les effets varient selon le type et le taux de substitution, ainsi que la qualité des GR.

- **À l’état frais**

Ouvrabilité : Les GBR absorbent davantage d'eau, réduisant ainsi l'ouvrabilité du béton. Pour compenser, il est recommandé d'augmenter l'eau de gâchage (+5 % si seuls les gravillons sont remplacés, +15 % si gravillons et sable le sont). L'état de saturation des GBR influence aussi fortement l'affaissement au fil du temps.

Retrait : Le retrait global (plastique, endogène, de dessiccation, etc.) augmente avec le taux de GBR, jusqu'à +60 % pour une substitution totale. Ce phénomène est lié à la plus forte teneur en eau et en mortier des bétons de GBR. Des plastifiants ou certaines méthodes de formulation (comme celle de Fathifazl) permettent de limiter ces effets [16].

- **À l'état durci**

Résistance à la compression : En général, elle diminue avec les GBR, parfois jusqu'à -75 %, selon la qualité du granulat et la formulation.

Module d'élasticité : Il est également réduit (jusqu'à -18,5 %), en raison de la porosité plus élevée des GBR et de la teneur accrue en mortier.

Densité, porosité, absorption : Les bétons avec GBR sont moins denses (2000–2200 kg/m³ contre 2500 kg/m³ pour les GN) et plus poreux. L'absorption d'eau peut presque doubler (de 5 % à 9 % selon le taux de substitution) [17].

I.3.1.5. Domaine d'utilisation des granulats recyclés de béton

Les déchets de béton recyclés, une fois qu'ils répondent aux critères nécessaires, peuvent être utilisés dans divers domaines de construction. Par exemple, ils servent dans la production de nouveaux bétons pour des routes, parkings, trottoirs, chemins piétonniers, ainsi que dans des travaux de drainage ou comme matériau de remblai pour les canalisations et l'installation de câbles. Ils peuvent également être privilégiés dans les travaux de construction d'infrastructures, la réalisation d'installations sportives et de loisirs, ainsi que dans d'autres projets de remblayage et d'aménagement récréatif.

Du béton perméable est également utilisé dans le système d'égouts pour les routes, parkings et trottoirs afin de réduire l'écoulement des eaux de pluie et favoriser la recharge des nappes phréatiques. Le béton concassé peut être utilisé à certains endroits pour ces systèmes. Grâce à un procédé appelé fraisage, l'ancien revêtement en béton peut être brisé sur place et réutilisé comme sous-couche pour les routes et autoroutes. Ces tranchées civiles, généralement remplies de sable pour faciliter le drainage, peuvent également être remplies de béton recyclé. Le béton recyclé peut

également remplacer les granulats naturels dans les nouvelles formulations de béton, à la place du sable, avec du béton broyé. Le béton concassé est aussi utilisé pour lutter contre l'érosion le long des berges, des littoraux, des récifs coralliens ou dans les canyons sensibles. Enfin, une fois broyé et trié correctement, il peut remplacer les graviers ou sables utilisés comme paillis ou revêtement de sol, et les gabions remplis de béton concassé peuvent servir à créer des murs de protection ou des éléments décoratifs [18].

I.3.2. Généralités sur la céramique et recyclage de granulats de céramique

I.3.2.1. Définition

La céramique est un matériau inorganique durci par cuisson, incluant aujourd'hui des produits avec ou sans argile. Elle est caractérisée par une grande résistance mécanique, chimique et thermique, ce qui la rend durable et utilisable même en milieux agressifs.

Les déchets céramiques issus du BTP (comme les briques et carreaux) représentent une part importante des déchets mondiaux. Faute de normes et de connaissances, ils sont souvent mis en décharge. Cependant, des recherches en Europe ont montré que ces déchets peuvent être valorisés en les intégrant dans divers types de béton, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles [19].

I.3.2.2. Classification des céramiques

Céramiques traditionnelles

Fabriquées à partir de matières naturelles comme l'argile et le kaolin, elles sont façonnées à l'état plastique puis cuites.

Elles contiennent deux types de matières premières :

- Plastiques :

Argiles : apportent la plasticité ; peuvent être rouges, grésantes ou réfractaires.

Kaolin : argile pure utilisée notamment pour la porcelaine.

- Non plastiques :

Dégraissants (ex. : silice, chamotte) : réduisent la déformation.

Fondants (ex. : feldspaths, talc) : facilitent la vitrification lors de la cuisson [20].

Céramiques techniques

Utilisées dans les secteurs avancés (électronique, médical, nucléaire...), elles sont fabriquées avec des matériaux contrôlés et purs.

À base d'oxydes (ex. : alumine, zircone) : très stables à haute température.

Non oxydes (ex. : carbures, nitrures, borures) : très résistantes et dures, idéales pour les outils et milieux extrêmes [20].

I.3.2.3. Sources et classification des déchets de céramique

Industrie céramique

Déchets de production : Pièces défectueuses (fissures, défauts d'émaillage), représentant 5 à 15 % de la production. Exemple : 500 tonnes de rebuts/an pour 10 000 tonnes produites. Boues céramiques : Résidus humides issus du polissage ou de l'émaillage, contenant 20 à 40 % d'eau et des particules fines (<50 µm). Poussières : Générées lors de la coupe, cuisson ou polissage (ex. poussières de silice) [21].

Construction et démolition

Carrelages et tuiles : Source principale (60-80 % des déchets dans ce secteur). Exemple : 1 à 2 tonnes de carrelage/100 m² démolis. Sanitaires : Lavabos, toilettes, souvent en porcelaine, difficiles à broyer. Briques réfractaires : Issues des fours industriels. Problème : mélange avec ciment, plâtre, métaux → tri nécessaire [21].

Usage domestique

Vaisselle cassée et objets décoratifs (faïence, porcelaine) en petites quantités (<5 %), souvent jetés avec les ordures ménagères [21].

Céramiques techniques

Composants électroniques, prothèses dentaires, filtres, avec des compositions complexes (métaux précieux, polymères). Faibles volumes, mais traitement spécifique requis. Quantification mondiale En 2020 : 10 à 15 millions de tonnes de déchets céramiques générés, dont 50 % issus de la construction/démolition. Principaux pays producteurs : Chine (40 %), Italie, Espagne, Inde [21].

I.3.2.4. Composition chimique et minéralogique de déchet de céramique

Les déchets de céramique sont principalement constitués d'argiles cuites (kaolinite, illite, montmorillonite) transformées en phases cristallines (nullité, cristobalite) et d'oxydes métalliques (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , Fe_2O_3). Ils peuvent inclure des matériaux réfractaires (ZrO_2 , SiC , Cr_2O_3) selon leur usage [35].

Types

Faïence : Silice, argile, feldspaths, émaux au plomb ou étain.

Porcelaine : Kaolin, quartz, feldspaths.

Grès cérame : Argiles, quartz, feldspaths.

Céramiques techniques : Nitrures, céramiques piézoélectriques.

Additifs : Métaux lourds (plomb, cadmium, cobalt) et pigments décoratifs.

Variabilité : Selon les régions (plus de kaolin en Chine, plus de carbonate en Méditerranée) [35].

Propriétés physiques

Dureté : Très élevée (Mohs 6–9), nécessite des équipements robustes pour le broyage. Densité : $2,0\text{--}3,5\text{ g/cm}^3$; poids important pour le transport.

Porosité : Varie selon le type ; influence la fragmentation et la rétention de polluants.

Granulométrie : De la poussière fine aux pièces volumineuses.

Résistance thermique : Jusqu'à $2\ 000\text{ °C}$; incinération inefficace. Résistance mécanique : Très bonne compression et forte abrasivité [35].

Propriétés chimiques

Inertie chimique : Stabilité dans des conditions normales.

Contamination possible : Métaux lourds lixiviables en milieu acide.

Non biodégradable : Persistance dans l'environnement.

Décharges : Pas de gaz ou lixiviats toxiques, sauf présence d'émaux contenant des métaux [35].

I.4. Amélioration de la qualité des granulats recyclés issus des déchets de béton de démolition

Les granulats recyclés issus du béton de démolition présentent généralement une porosité élevée et une absorption d'eau importante en raison de la présence de pâte cimentaire résiduelle. Cela affecte négativement leurs propriétés mécaniques et leur utilisation dans le béton. Pour améliorer leur qualité, plusieurs méthodes ont été développées.

I.4.1. Le traitement thermique

Le traitement thermique des granulats recyclés est une technique visant à chauffer les granulats à des températures élevées, généralement entre 300 et 800 °C, pour fragiliser et détacher la pâte de ciment résiduelle adhérant aux granulats. Ce procédé améliore les propriétés physiques des granulats, telles que la densité, la porosité et la résistance mécanique, en éliminant les impuretés et en restaurant partiellement les caractéristiques des granulats naturels. Cependant, il présente des défis majeurs, notamment une consommation énergétique élevée, ce qui peut augmenter les coûts et l'empreinte carbone du processus. De plus, des températures excessives peuvent altérer la composition minérale des granulats, entraînant des modifications de leur structure cristalline ou une perte de performance. Des études précédentes ont exploré l'efficacité de ce traitement. Par exemple, une recherche menée par Tam et al. (2016) a montré que le chauffage à 500 °C permet de détacher efficacement la pâte de ciment sans dégrader significativement les granulats, améliorant ainsi leur aptitude à être utilisés dans des bétons de haute performance. Une autre étude, réalisée par Zhang et al. (2018), a mis en évidence que le traitement thermique combiné à un broyage mécanique post-chauffage augmente la qualité des granulats recyclés, mais souligne l'importance de contrôler la température pour éviter la formation de microfissures. De plus, des travaux récents (Li et al., 2020) ont proposé des approches combinées, intégrant le traitement thermique à des procédés chimiques, pour optimiser la récupération des granulats tout en réduisant la consommation énergétique. Ces études soulignent le potentiel du traitement thermique, mais insistent sur la nécessité de développer des stratégies plus durables, comme l'utilisation de sources d'énergie renouvelables ou des fours à haute efficacité énergétique, pour rendre ce procédé viable à grande échelle [22] [26].

I.4.2. Le traitement mécanique

Est l'une des méthodes les plus utilisées pour améliorer la qualité des granulats recyclés issus du béton de démolition. Il consiste principalement en des opérations de concassage, de broyage ou d'impact, permettant de fragmenter les grains et de réduire la quantité de mortier de ciment adhérent à leur surface. Cette technique vise à produire des granulats avec une forme plus régulière, une surface plus propre et des propriétés mécaniques proches de celles des granulats naturels. Selon Katz (2003), le traitement mécanique peut réduire jusqu'à 30 % la quantité de pâte de ciment résiduelle, ce qui améliore significativement la densité et la résistance des granulats. Tam et al. (2007) ont également montré que l'utilisation de broyeurs à impact à grande vitesse permettait de détacher plus efficacement la pâte de ciment, en comparaison avec les concasseurs traditionnels. Par ailleurs, Xiao et al. (2012) soulignent que l'amélioration de la forme des grains, obtenue grâce au concassage, favorise une meilleure compacité du béton recyclé. Cependant, l'efficacité du traitement mécanique est fortement influencée par la qualité initiale du béton de démolition. Lorsque la couche de pâte de ciment est fortement adhérente ou très épaisse, les simples opérations de concassage ne suffisent pas à l'éliminer complètement. De plus, une fragmentation excessive peut générer une quantité importante de fines, ce qui peut affecter négativement la granulométrie et la maniabilité du béton recyclé. Malgré ces limites, le traitement mécanique reste une méthode économique, facilement applicable à grande échelle, et compatible avec les équipements déjà présents dans les installations de recyclage. Il peut également être combiné à d'autres techniques, telles que le traitement thermique ou chimique, pour améliorer davantage l'efficacité du nettoyage des granulats [23] [27].

I.4.3. Le traitement chimique

Consiste à utiliser des solutions acides (comme l'acide chlorhydrique ou sulfurique) ou alcalines (comme la soude) pour dissoudre la pâte de ciment adhérent aux granulats, permettant ainsi de récupérer des granulats propres proches de leurs propriétés initiales. Cette méthode est particulièrement efficace pour éliminer les résidus cimentaires, améliorant la qualité des granulats recyclés pour une réutilisation dans le béton. Cependant, elle présente des défis majeurs : le coût élevé des produits chimiques, la complexité des procédés et la nécessité de gérer les effluents chimiques, qui peuvent poser des risques environnementaux si mal traités. Des études antérieures, telles que celles de Tam et al. (2007), ont démontré que l'utilisation d'acides dilués permet de restaurer les propriétés mécaniques des granulats, mais au prix d'une consommation énergétique élevée et d'émissions liées au traitement des résidus. De plus, des recherches récentes (Kim et al.,

2020) ont exploré des solutions plus durables, comme l'emploi de sous-produits industriels (acides issus de déchets) pour réduire les coûts et l'impact environnemental. Cependant, la mise à l'échelle industrielle reste limitée par la nécessité d'infrastructures spécialisées pour la neutralisation et le recyclage des solutions chimiques. Enfin, des travaux en cours (Wang et al., 2023) investiguent des approches combinées, intégrant des traitements chimiques à des procédés mécaniques ou thermiques, pour optimiser l'efficacité tout en minimisant les impacts environnementaux et économiques. Ces avancées soulignent le potentiel du traitement chimique, mais aussi la nécessité de développer des solutions plus durables et économiquement viables pour une adoption à grande échelle [24].

I.4.4. Le traitement électrique

Utilise des champs électriques ou des décharges à haute tension pour fragiliser l'interface entre la pâte de ciment et les granulats, facilitant leur séparation. Cette méthode, appelée électro fragmentation ou électrodynamique, repose sur la différence de conductivité électrique entre les constituants du béton. En appliquant une décharge électrique, souvent via des impulsions à haute tension (10 à 50 kV), des microfissures se forment préférentiellement à l'interface pâte-granulats, permettant de détacher la pâte cimentaire sans endommager les granulats naturels. Ce procédé est particulièrement efficace pour les bétons à forte adhérence, où les méthodes mécaniques traditionnelles, comme le broyage, entraînent souvent une dégradation des granulats ou une contamination par la pâte. Des études antérieures, notamment celles menées par le Fraunhofer Institute en Allemagne et des recherches japonaises dans les années 2000, ont démontré que l'électro fragmentation peut atteindre un taux de récupération des granulats naturels supérieur à 90 %, avec une pureté élevée. Ces travaux ont aussi montré que les granulats ainsi récupérés conservent des propriétés physiques proches de celles des granulats vierges, ce qui favorise leur réutilisation dans de nouveaux bétons. Par exemple, une étude de 2015 publiée dans "Construction and Building Materials" a comparé les performances de bétons formulés avec des granulats recyclés électro fragmentés à celles de bétons conventionnels, notant une perte de résistance mécanique inférieure à 5 %. Malgré ces avantages, le déploiement à grande échelle reste limité. Les équipements nécessaires, comme les générateurs d'impulsions à haute tension, sont coûteux et complexes à maintenir. De plus, la consommation énergétique, bien que moindre comparée au broyage intensif, reste un frein, surtout pour les installations à faible rendement. Des recherches récentes, notamment dans le cadre du projet européen C2CA (2011-2015), ont exploré des optimisations, comme l'ajustement des paramètres d'impulsion pour réduire la consommation

énergétique tout en maintenant l'efficacité. Ces avancées suggèrent un potentiel pour des applications industrielles, à condition de résoudre les contraintes économiques et logistiques [33] [34].

I.4.5. La méthode de colmatage

Vise à améliorer les propriétés des granulats issus de bétons recyclés, souvent caractérisés par une porosité élevée et une forte absorption d'eau. Cette technique consiste à remplir les pores des granulats à l'aide de suspensions cimentaires, de polymères ou de matériaux nanostructures, comme des nano silices ou des nano carbonates. Elle permet de réduire l'absorption d'eau, d'améliorer la durabilité et de renforcer la compatibilité des granulats avec les nouveaux bétons. De plus, elle favorise la capture du CO₂ par carbonatation, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone des matériaux. Des études précédentes ont montré l'efficacité de cette méthode. Par exemple, des recherches menées par Zhang et al. (2015) ont démontré que l'utilisation de suspensions cimentaires enrichies en laitier de haut-fourneau permet de réduire l'absorption d'eau des granulats recyclés de 20 à 30 %, tout en augmentant leur résistance mécanique. D'autres travaux, comme ceux de Li et al. (2018), ont exploré l'incorporation de polymères, tels que les résines époxy, pour colmater les pores, améliorant la cohésion entre les granulats et la matrice cimentaire. Plus récemment, des études (Wang et al., 2022) ont mis en évidence le potentiel des matériaux nanostructures, notamment les nanoparticules de silice, qui non seulement colmatent les pores, mais favorisent aussi la formation de produits d'hydratation denses. En outre, des recherches sur la carbonatation accélérée (Tam et al., 2020) ont montré que ce procédé peut piéger jusqu'à 10 kg de CO₂ par tonne de granulats traités, renforçant l'aspect écologique de la méthode. Ces avancées confirment le potentiel du colmatage pour valoriser les granulats recyclés dans des applications structurelles, tout en répondant aux enjeux de durabilité [25].

I.5. Traitement chimique des granulats recyclés

I.5.1. Traitement avec bactérie

Définition

Le traitement chimique des granulats recyclés par l'utilisation de bactéries, aussi appelé bio précipitation ou bio cimentation, constitue une avancée innovante dans le domaine du recyclage des matériaux de construction. Il s'agit d'une technique biologique qui vise à améliorer la qualité des granulats issus du béton de démolition, en utilisant les capacités métaboliques de certains micro-organismes. Ces derniers, comme *Sporosarcina pasteurii* ou *Bacillus subtilis*, sont capables

de provoquer la formation de carbonate de calcium (CaCO_3) grâce à un processus biochimique naturel. Cette méthode s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets, permettant de réutiliser les granulats recyclés dans des applications à haute valeur ajoutée, en particulier dans le secteur du béton structurel [28].

Mécanisme de fonctionnement

Le principe du traitement repose sur la précipitation induite par les microbes (MICP). Dans ce processus, les bactéries sont introduites dans un milieu contenant de l'urée et des ions calcium. À travers leur activité enzymatique, elles hydrolysent l'urée, produisant de l'ammoniac et du dioxyde de carbone. Ce dernier réagit avec les ions calcium pour former du carbonate de calcium (CaCO_3), un minéral naturellement présent dans la nature (comme dans les coquilles ou les calcaires). Le CaCO_3 ainsi précipité vient de déposer dans les pores, microfissures et surfaces des granulats recyclés. Cela permet de réduire leur porosité, d'augmenter leur densité, et d'améliorer leur résistance mécanique. Par ailleurs, cette couche de carbonate de calcium agit comme une barrière protectrice contre les agents chimiques, tout en favorisant une meilleure interaction avec la pâte de ciment lorsqu'ils sont intégrés dans un nouveau béton [28].

Avantages

L'un des principaux atouts du traitement bactérien est son caractère écologique. Contrairement aux méthodes chimiques classiques, qui nécessitent souvent des substances agressives ou des processus énergivores (comme la carbonatation forcée ou les traitements thermiques), ce procédé repose sur des mécanismes biologiques naturels. Les bactéries utilisées sont non pathogènes, facilement cultivables, et issues de sources durables. En outre, le processus favorise la séquestration du dioxyde de carbone, en intégrant le CO_2 dans la structure du carbonate de calcium formé, ce qui réduit l'impact environnemental global. Cette approche s'inscrit parfaitement dans une logique d'économie circulaire, en revalorisant les déchets tout en contribuant aux objectifs de développement durable [28].

Études futures et défis

Malgré ses promesses, le traitement bactérien des granulats recyclés présente encore des limitations pour une adoption à grande échelle. Le coût de production des bactéries et des nutriments nécessaires (comme l'urée ou les sels de calcium) reste élevé, freinant son application industrielle. De plus, l'efficacité du procédé dépend fortement de paramètres environnementaux

comme le pH, la température ou la disponibilité en oxygène, qui doivent être finement contrôlés. La profondeur de pénétration du carbonate de calcium constitue aussi un défi, car une précipitation en surface peut bloquer les pores et limiter l'action en profondeur. Pour surmonter ces obstacles, la recherche s'oriente vers l'optimisation des souches bactériennes (plus efficaces ou résistantes), l'utilisation de sous-produits industriels (comme les eaux usées riches en calcium), ou encore le développement de techniques hybrides, associant le traitement bactérien à d'autres méthodes physiques ou chimiques. Ces efforts visent à rendre ce procédé plus rentable, plus robuste et plus compétitif face aux solutions traditionnelles [28].

I.5.2. Traitement par produits chimiques

Définition

Le traitement chimique des granulats recyclés est une technique d'amélioration des propriétés des granulats issus du béton de démolition par l'application de substances chimiques. Cette méthode vise à réduire les défauts liés à la présence de pâte de ciment résiduelle, à la porosité élevée et à la faible densité des granulats recyclés. Elle intervient généralement après le concassage et le tri, et avant leur réintégration dans une nouvelle matrice cimentaire [29].

Mécanisme et procédés utilisés

L'action chimique repose sur des réactions entre les produits appliqués et les composants du ciment hydraté ou partiellement hydraté présents à la surface des granulats. Les acides (comme l'acide citrique, l'acide phosphorique ou l'acide chlorhydrique) sont capables de dissoudre les phases hydratées du ciment, réduisant ainsi la rugosité et la porosité. D'autres agents, tels que les silicates de sodium ou des polymères, agissent comme des agents de colmatage en pénétrant dans les pores et en formant des gels ou des couches protectrices. L'objectif est de modifier la microstructure pour la rendre plus dense, moins absorbante et plus compatible avec la nouvelle pâte de ciment [30].

Avantages du traitement chimique

Ce traitement présente plusieurs bénéfices. Il permet d'améliorer la compacité, réduire l'absorption d'eau, augmenter la résistance à la compression du béton contenant des granulats recyclés, et d'accroître la durabilité des matériaux. En réduisant les défauts en surface des granulats, il favorise une meilleure adhésion avec la matrice cimentaire, ce qui est crucial pour les

performances mécaniques du béton recyclé. De plus, certains traitements permettent d'ajuster le pH ou de limiter la réaction alcali-silice, rendant les granulats plus stables chimiquement [31].

Recherches et perspectives futures

Les recherches actuelles se concentrent sur l'optimisation des types de produits chimiques utilisés, leur concentration, leur temps d'application et leur impact environnemental. Plusieurs études visent à remplacer les produits acides traditionnels par des solutions plus respectueuses de l'environnement, comme des extraits végétaux ou des agents biochimiques. D'autres recherches portent sur la combinaison du traitement chimique avec d'autres méthodes (traitement thermique, mécanique ou biologique) pour en potentialiser les effets. À long terme, l'objectif est de développer des procédés efficaces, économiques et durables, capables d'être appliqués à grande échelle dans l'industrie du béton recyclé [32].

I.6. Conclusion

Face aux défis environnementaux et économiques croissants, il devient essentiel d'adopter une gestion durable des déchets de construction et de démolition. Le passage de l'enfouissement à la valorisation et au recyclage ne contribue pas seulement à la préservation des ressources naturelles, mais permet également de réduire l'impact environnemental des déchets. L'amélioration des techniques de tri et de traitement, ainsi que la mise en place de politiques efficaces pour la collecte des déchets, constituent des éléments clés de cette transition. En soutenant la recherche scientifique et le développement de solutions innovantes, il est possible de favoriser l'intégration des matériaux recyclés dans les projets de construction, ouvrant ainsi la voie à une économie circulaire plus efficace et durable dans le secteur du BTP.

Chapitre II

Matériaux et procédures expérimentales

II.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude des matériaux utilisés dans le cadre du projet visant à améliorer la qualité des granulats recyclés issus des déchets de béton et de céramique. L'accent a été mis sur la caractérisation de ces matériaux en déterminant leur origine et en étudiant leurs propriétés initiales, ainsi que sur l'explication détaillée des méthodes de préparation utilisées en laboratoire. Une série d'expériences physiques de base ont également été réalisées pour évaluer les propriétés mécaniques et granulométriques de ces matériaux avant toute application de traitement chimique. Ce chapitre a pour objectif de fournir une base de connaissances précise sur le comportement de ces matériaux dans leur état brut, permettant ainsi une meilleure compréhension de l'effet des traitements proposés.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Description des matériaux utilisés (Granulats recyclés (GR))

Deux types principaux de granulats recyclés ont été utilisés.

Granulats de béton recyclé (GBR)

- **Source :** Les déchets de béton utilisés dans cette étude proviennent du laboratoire des travaux publics "Nizolab", où ils ont été récupérés à partir d'échantillons de structures en béton ayant été préalablement testées ou démantelées.
- **Forme :** Elles se présentent sous forme de blocs de béton aux formes irrégulières, incorporant des éprouvettes d'essai telles que des cubiques et des cylindres. Certaines montrent des signes de fissuration ainsi que des ruptures partielles ou totales, tandis que d'autres conservent une intégrité structurelle relative. Ces éprouvettes varient en dimensions et en degré de cohésion.
- **État initial :** Elle contient souvent des résidus de mortier de ciment adhérents, se caractérise par une porosité élevée et la présence d'impuretés en proportions variables provenant de l'environnement d'essai.
- **La fraction granulométrique ciblée :** Deux fractions granulométriques ont été ciblées à partir des déchets de béton recyclé : la première entre 0,08 et 5 mm, et la deuxième entre 5 et 10 mm.

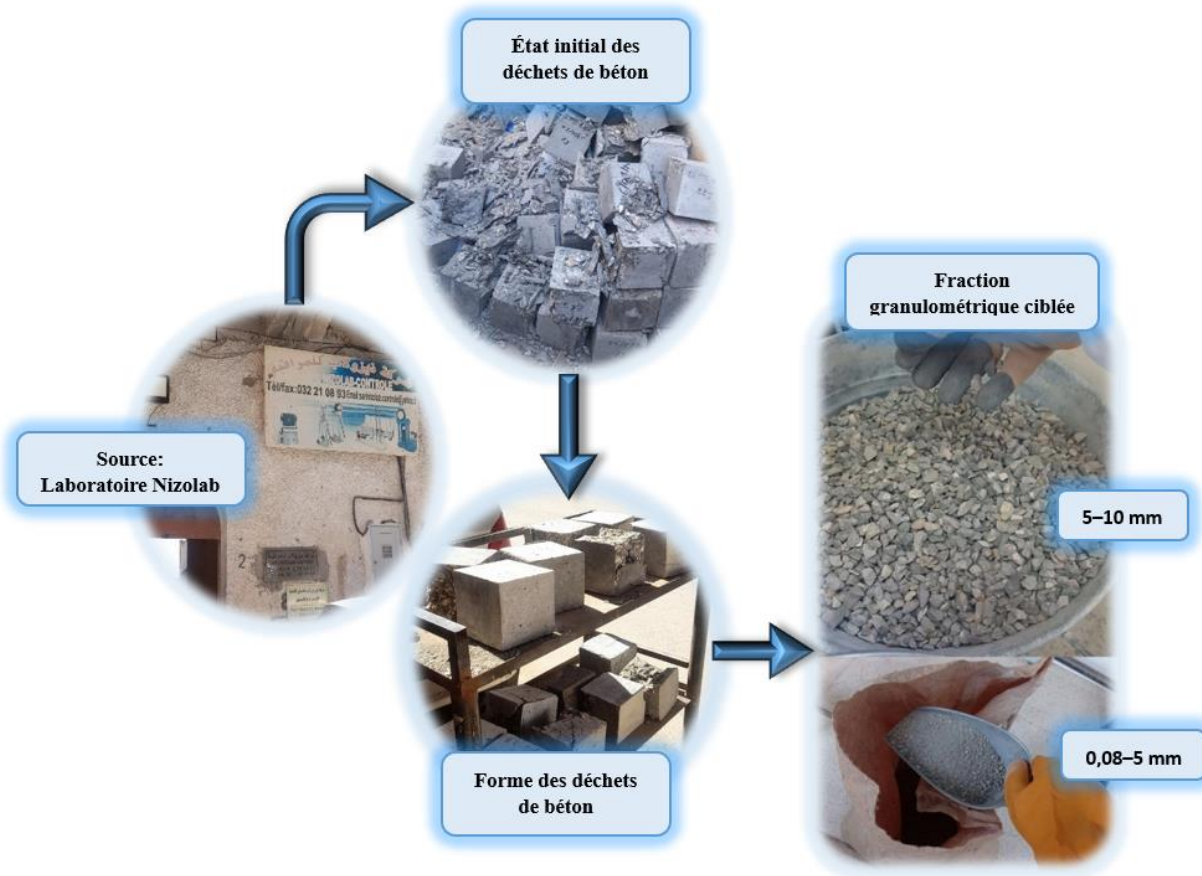


Figure II.1. Détails des granulats de béton recyclé utilisés dans l'étude : source, forme, état initial et fractions granulométriques ciblées.

Granulats de céramique recyclé (GCR)

- **Source :** Les déchets de céramique utilisés dans cette étude proviennent de rebuts industriels issus de la production de carreaux de faïence pour murs dans l'usine locale "Lacheheb". Il s'agit principalement de carreaux de faïence cassés, ébréchés ou non conformes aux normes de fabrication, mis de côté avant la commercialisation.
- **Forme :** Ces déchets se présentent sous forme de fragments anguleux de tailles et formes variées, provenant de carreaux plats. Certains morceaux conservent des bords nets tandis que d'autres présentent des cassures irrégulières dues au processus de concassage ou de manipulation. Leur couleur est principalement rouge.
- **État initial :** À l'état initial, les déchets de céramique sont durs, compacts, non poreux et exempts de liants hydrauliques. Ils ne présentent généralement pas de traces de mortier ou de

contaminants visibles, ce qui facilite leur recyclage en tant qu'agrégats durs dans différents mélanges.

- **La fraction granulométrique ciblée :** Deux fractions granulométriques ont été extraites après concassage et tamisage des déchets céramiques : la première entre 0,08 et 5 mm, et la deuxième entre 5 et 10 mm.

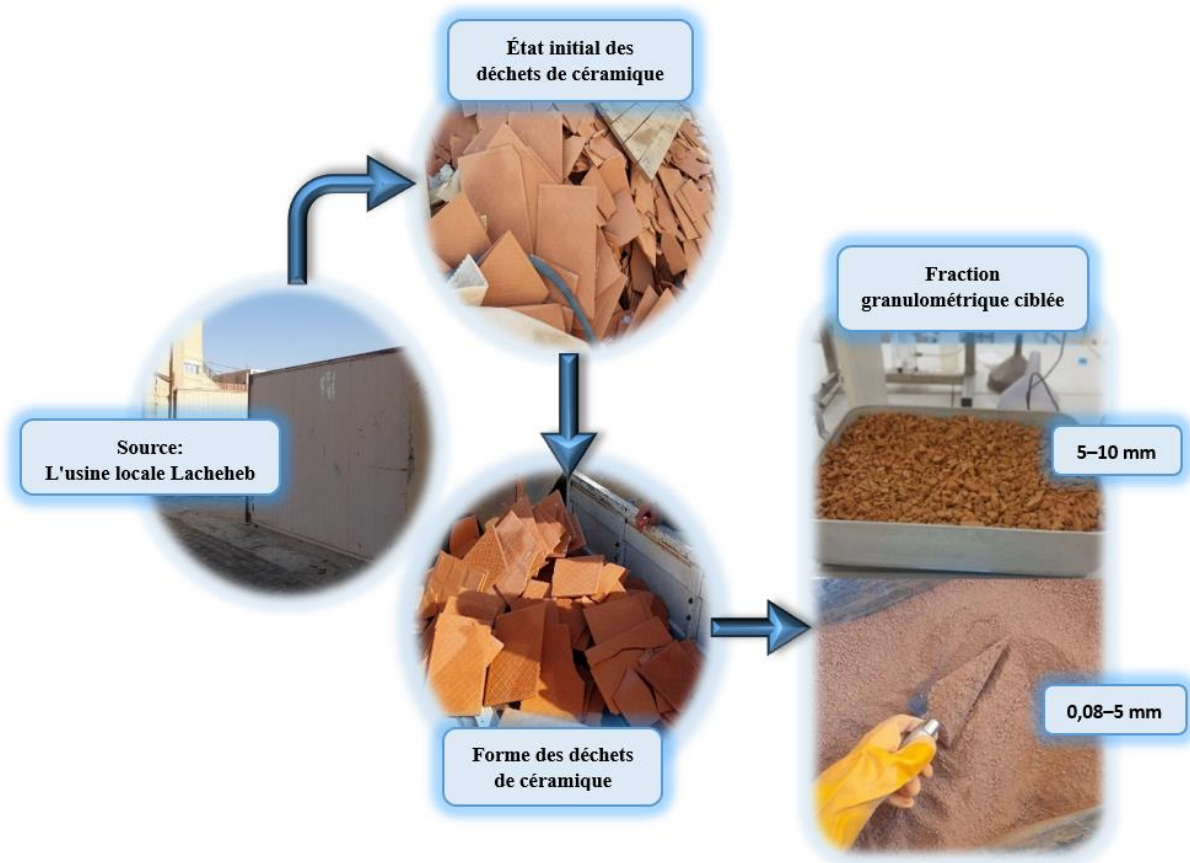


Figure II.2. Détails des granulats de céramique recyclé utilisés dans l'étude : source, forme, état initial et fractions granulométriques ciblées.

II.2.2. Préparation des matériaux

Avant toute caractérisation physique ou traitement chimique, les granulats recyclés doivent subir une série d'étapes de préparation afin de garantir la fiabilité des résultats d'essai. Les étapes de préparation se présentent comme suit :

Collecte de matières brute

Les matériaux de base ont été collectés à partir de sources fiables représentant la réalité des déchets recyclés. Les déchets de béton ont été obtenus du laboratoire de travaux publics "Nizolab",

sous forme de restes de béton issus d'essais ou de travaux antérieurs. Quant aux déchets céramiques, ils ont été récupérés auprès d'une usine locale "Lacheheb", comprenant des pièces cassées ou rejetées de la production.

Tri et élimination des brutes

Les déchets de béton et de céramique sont d'abord triés manuellement pour éliminer les éléments indésirables tels que le bois, les matières plastiques, etc.

Concassage

Les matériaux collectés sont ensuite broyés mécaniquement à l'aide d'un concasseur spécial pour obtenir des fragments de dimensions adaptées aux expériences en laboratoire.

Tamissage

Après le concassage, une opération de tamissage a été effectuée afin de séparer les granulats selon leur taille : granulats fins (0,08–5 mm) et granulats grossiers (5–10 mm). Cette étape vise à faciliter l'étude de l'effet des traitements sur chaque fraction granulométrique séparément.

Lavage

L'agrégat a été lavé à l'eau pour éliminer les particules fines, la poussière résiduelle et améliorer la propreté de la surface de l'agrégat, afin d'éviter toute réaction future.

Séchage

Les matériaux lavés ont été séchés au four à 70°C pendant 24 heures jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids constant, afin d'éliminer toute trace d'humidité et de garantir des résultats précis lors des tests de la masse volumique, de porosité et d'absorption.

Stockage

Les échantillons préparés ont été stockés dans des sacs hermétiques dans un environnement sec, à l'abri de toute contamination jusqu'à leur utilisation.



Figure II.3. Préparation des matériaux recyclés.

II.3. Méthode expérimentales (caractérisation physique)

Afin d'évaluer la qualité des granulats recyclés issus de déchets de béton et de céramique, plusieurs essais de caractérisation physique ont été réalisés. Ces essais permettent de mieux comprendre les propriétés des matériaux avant et après traitement.

II.3.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)

- Définition l'analyse granulométrique

Est Il s'agit d'une mesure de la taille des particules solides primaires de l'agrégat. La taille des particules est déterminée par leur capacité à passer à travers différents tamis à mailles.

- **But**

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions des grains de même dimension.
- En déduire le Module de finesse (M_f).

- **Matériaux et matériels utilisés**

Une balance (5kg), précision (1g) - Série de tamis de maillage métallique (Sable : 0.08- 0.160- 0.315- 0.360- 1.25- 2.5- 5 mm) et (Gravier : 10 ; 8 ; 6.3; 5 ; 4 ; 2.5; 1.25), avec un fond et un couvercle - Échantillon de granulats secs (GBR, GCR, SBR, SCR).

- **Mode opératoire**

- Poids d'un échantillon en séché de granulats.
- Installons l'arbre du tamis du plus grand au plus petit et n'oublions par le couvercle et le fond du tamis.
- Nous plaçons l'échantillon dans le tamis, puis fermons la colonne avec le couvercle, puis allumons le tamis et le laissons trembler pendant un moment.
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille, puis calculer M_f :

$$M_f = \frac{1}{100} \times \sum \text{Refus cumulés en \% de tamis (0,16; 0,315; 0,63; 1,25; 2,50; 5)} \quad (II.1)$$

Tableau II.1. Module de la finesse de sable.

Quantités du sable	Module de la finesse
Gros	> 2,5
Moyen	2 à 2,5
Fin	1,5 à 2
Très fin	1 à 1,5



Figure II.4. Essai de granulométrie.

Courbe granulométrique

La présente norme a pour objet de définir les caractéristiques des granulats et de préciser la méthode à suivre pour l'analyse et la détermination de la courbe granulométrique, cette étude a été réalisée conformément à la norme NF EN 933-1 (AFNOR, septembre 1997 [39]).

a) Sable de béton recyclé (SBR) : 0,08 / 5 mm

Poids total = 1000 g

Tableau II.2. Analyse granulométrique du sable de béton recyclé.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g) R	Refus cumulé (%) $R\% = \frac{R}{M} \times 100$	Tamisât cumulé (%) $T\% = 100 - R\%$
5	0	0	0	100
2.5	155	155	15.5	84.5
1.25	273	428	42.8	57.2
0.63	198	626	62.6	37.4
0.315	229	855	85.5	14.5
0.16	91	946	94.6	5.4
0.08	51	997	99.7	0.3
F	3	1000	100	0

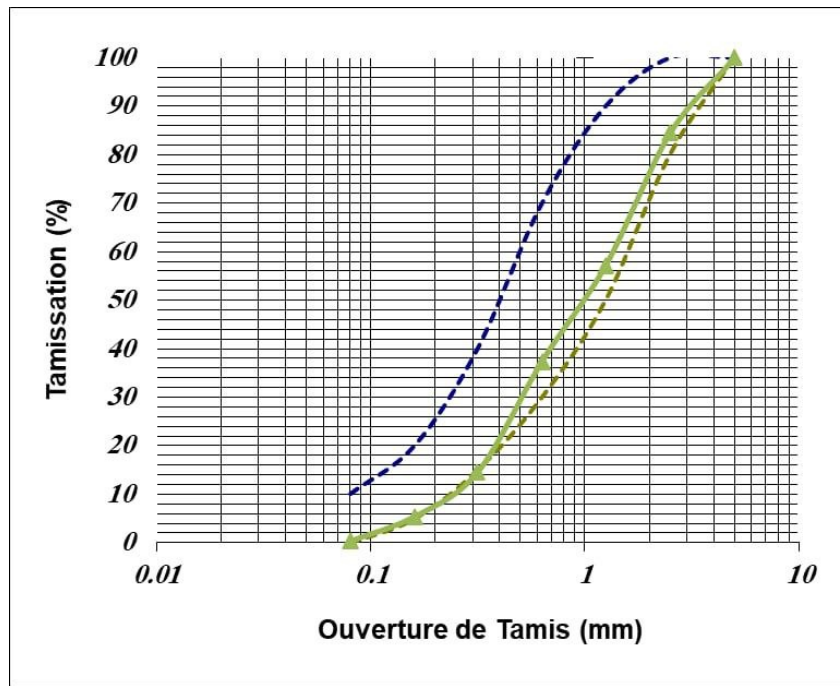


Figure II.5. Courbe granulométrique du sable de béton recyclé.

b) Sable de céramique recyclé (SCR) : 0,08 / 5 mm

Poids total = 1000 g

Tableau II.3. Analyse granulométrique du sable de céramique recyclé.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g) R	Refus cumulé (%) $R\% = \frac{R}{M} \times 100$	Tamisât cumulé (%) $T\% = 100 - R\%$
5	0	0	0	100
2.5	99	99	9.9	90.1
1.25	327	426	42.6	57.4
0.63	196	622	62.2	37.8
0.315	223	845	84.5	15.5
0.16	145	990	99	1
0.08	10	1000	100	0

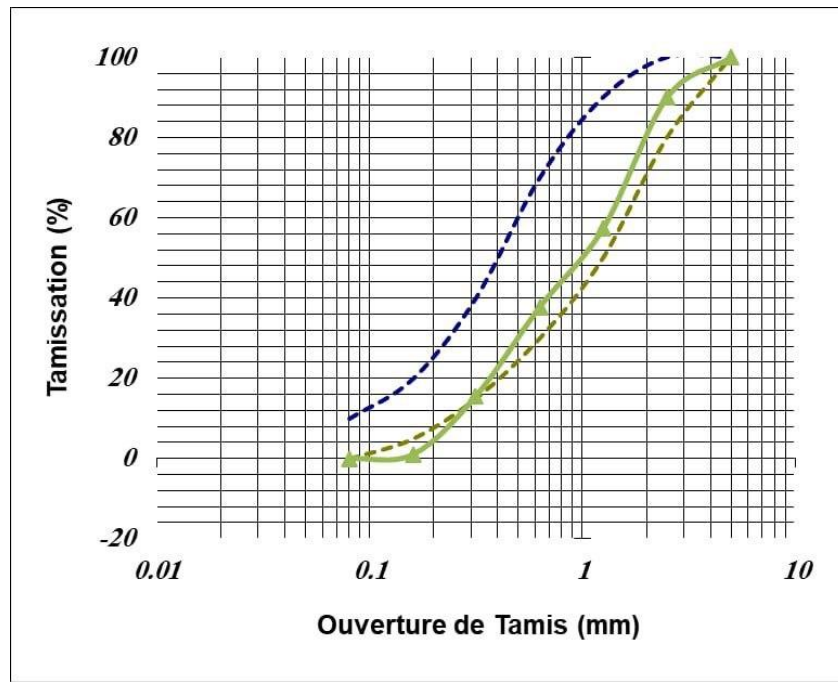


Figure II.6. Courbe granulométrique du Sable de céramique recyclé.

c) Gravier de béton recyclé (SBR) : 5 /10 mm

Poids total = 2000 g

Tableau II.4. Analyse granulométrique du gravier de béton recyclé.

Diamètre (mm)	Refus 01 (g)	Refus 02 (g)	Moyenne	Refus cumulé (g) R	Refus cumulé (%) $R\% = \frac{R}{M} \times 100$	Tamisât cumulé (%) $T\% = 100 - R\%$
10	28	26	27	27	1.35	98.65
8	648	720	684	711	35.55	64.45
6.3	602	705	653.5	1364.5	68.225	31.775
5	553	425	489	1853.5	92.675	7.325
4	139	95	117	1970.5	98.525	1.475
2.5	12	11	11.5	1982	99.1	0.9
1.25	4	3	3.5	1985.5	99.275	0.725
F	11	10	10.5	1996	99.8	0.2

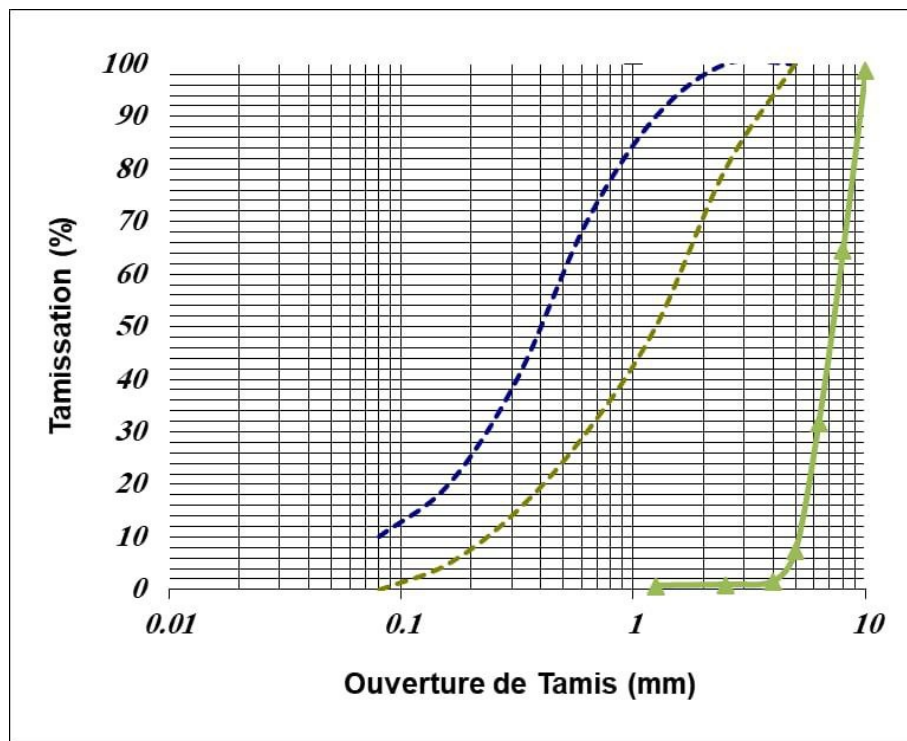


Figure II.7. Courbe granulométrique du gravier de béton recyclé.

d) Gravier de céramique recyclé (SCR) : 5 /10 mm

Poids total = 2000 g

Tableau II.5. Analyse granulométrique du gravier de céramique recyclé.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g) R	Refus cumulé (%) $R\% = \frac{R}{M} \times 100$	Tamisât cumulé (%) $T\% = 100 - R\%$
10	25	25	1.25	98.75
8	760	785	39.25	60.75
6.3	725	1510	75.5	24.5
5	333	1843	92.15	7.85
4	139	1982	99.65	0.9
2.5	11	1993	99.65	0.35
1.25	1	1994	99.7	0.3
F	6	2000	100	0

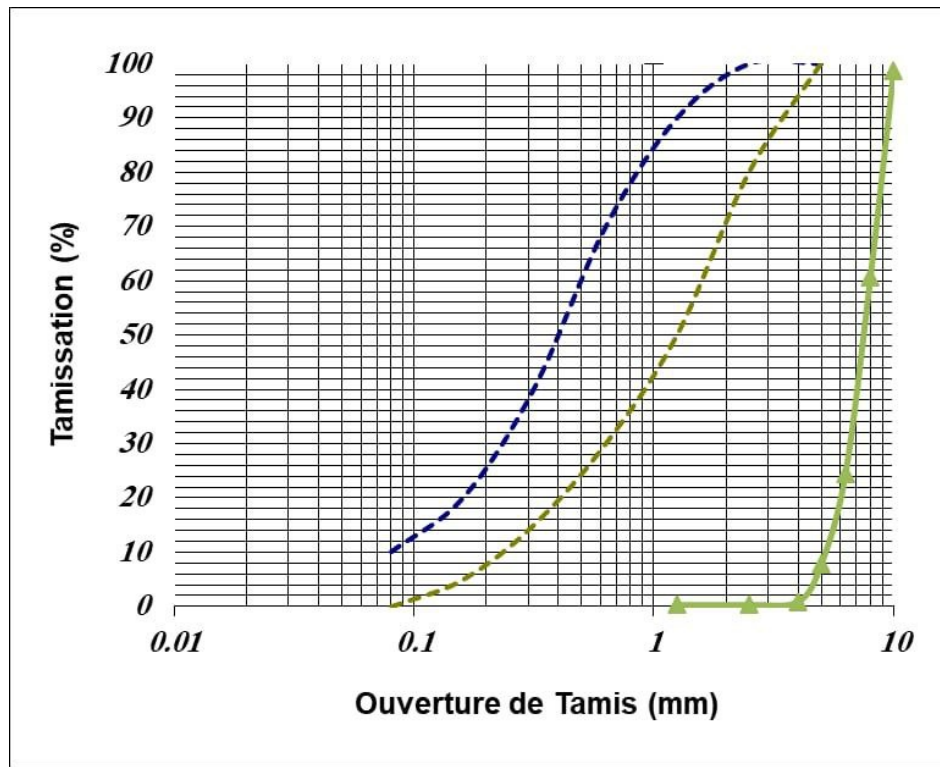


Figure II.8. Courbe granulométrique du gravier de céramique recyclé.

Module de finesse

Le module de finesse d'un granulat correspond au centième de la somme des pourcentages de refus mesurés sur les tamis de la série suivante : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80 mm.

Le module de finesse étant principalement utilisé pour l'analyse des sables, les tamis généralement employés sont : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 mm.

Le module de finesse est principalement utilisé pour caractériser les sables, dont il constitue un paramètre essentiel.

a) Sable de béton recyclé (SBR) : 0,08 / 5 mm

Refus cumulé sur le tamis

$$\left. \begin{array}{l}
 D = 0,16 = 94,6\% \\
 D = 0,315 = 85,5\% \\
 D = 0,63 = 62,6\% \\
 D = 2,5 = 42,8\% \\
 D = 0,16 = 15,5\% \\
 D = 5 = 0\%
 \end{array} \right\} \text{Total: } 301$$

$$M_f = \text{Module de finesse} = 1/100 \times 301 = 3.01 \quad (\text{II.2})$$

b) Sable de céramique recyclé (SCR) : 0,08 / 5 mm

Refus cumulé sur le tamis

$$\left. \begin{array}{l} D = 0.16 = 99\% \\ D = 0,315 = 84.5 \% \\ D = 0,63 = 62.2 \% \\ D = 2,5 = 42.6\% \\ D = 0.16 = 9.9\% \\ D = 5 = 0 \% \end{array} \right\} \text{Total: 298.2}$$

$$M_f = \text{Module de finesse} = 1/100 \times 298.2 = 2.982$$

D'après le tableau de classification, le module de finesse du sable de béton recyclé (3,01) et celui du sable de céramique recyclé (2,982) les classe dans la catégorie des sables grossiers (>2,5). Cela indique une granulométrie relativement grossière, ce qui peut avoir un effet positif sur la résistance du béton et réduire la demande en eau, nécessitant cependant un ajustement des composants du mélange, comme le rapport eau/liant ou l'ajout de fines, afin d'assurer une bonne ouvrabilité.

II.3.2. La masse volumique (EN 1097-6)

Définition La masse volumique d'un granulat

Est le rapport entre sa masse et son volume suivant cette relation :

$$m = \rho \times v \quad (\text{II.3})$$

But

Détermination la masse volumique apparente (y compris les vides) et la masse volumique absolue (sans tenir compte des vides) des granulats étudiés.

Matériaux et matériels utilisés

- Une règle à araser, Main écopée, Un récipient, Entonnoir spécial, Balance électronique, Eprouvette graduée.
- Échantillon de granulats secs (GBR, GCR, SBR, SCR).

a. La masse volumique apparente

- **Définition**

Est la masse par unité de volume d'un matériau (y compris les vides).

- **Mode opératoire**

- Déterminer le volume $v = 377.5\text{cm}^3$ et la masse $M_0 = 44\text{g}$ du récipient vide.
- Nous remplissons le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 10 cm.
- Arasement de la couche supérieure du récipient à l'aide d'une réglette, par un mouvement de "va-et-vient".
- Peser le récipient plein M_1 .
- Calculer la masse volumique apparente de matériau :

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (II.4)$$

Où :

ρ_{app} : La masse volumique apparente.

M_0 : La masse du récipient de mesure vide.

M_1 : La masse du récipient avec l'échantillon.

V : Le volume du récipient de mesure.



Figure II.9. Masse volumique apparente.

b. La masse volumique absolues

- **Définition**

Est la masse par unité de volume d'un matériau (sans tenir compte des vides entre les grains).

- **Mode opératoire**

- Remplir l'éprouvette graduée d'un volume $V_1 = 500\text{cm}^3$ (gravier) et $V_1 = 300\text{cm}^3$ (sable) d'eau.
- Peser un échantillon sec de granulat $M = 300\text{g}$.
- Introduire échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air en frappant légèrement cette éprouvette contre la paume de la main.
- Lisant le nouveau volume V_2 .
- La masse volumique absolue est donné par :

$$\rho_s = \frac{M}{V_1 - V_2} \quad (II.5)$$

Où :

ρ_s : Masse volumique absolue.

M : Masse des grains solides

V_1 : Volume de l'eau

V_2 : Volume total (grains solides+ eau).



Figure II.10. Masse volumique absolue.

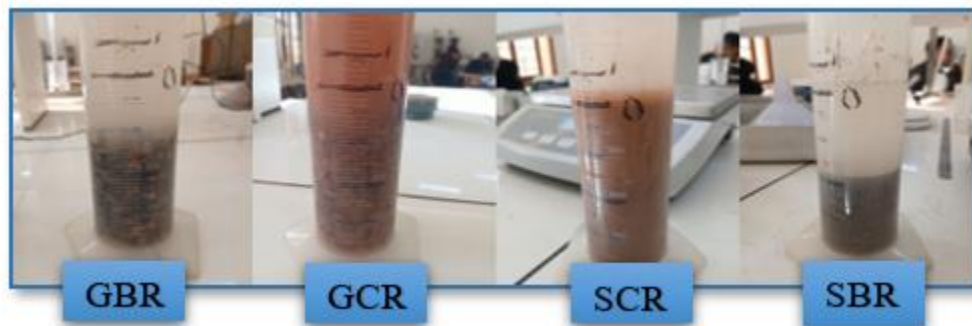


Figure II.11. Échantillons de masse volumique absolue après stabilisation.

Masse volumique des granulats utilisés

Les masses volumiques (en absolue, apparente) des différents granulats utilisés sont calculées d'après la norme EN 1097-6 (CEN, July 2013) [37] et les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.6. Masse volumique des granulats utilisés.

Masse volumique	GBR	GCR	SBR	SCR
Apparente (g/cm^3)	1.14	0.87	1.31	0.95
Absolues (g/cm^3)	2.5	2.14	2.45	2.35

Compacité, Porosité et L'indice des vides des granulats

La compacité (C) représente le rapport entre la masse volumique apparente (ρ_{app}) et la masse volumique absolues (ρ_{ab}) des granulats. Par contre la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité (C) $n = 100 - C$. L'indice des vides (e) représente le rapport entre le volume des vides et le volume des grains solides. L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-555 (AFNOR, décembre 1990) [38] et consiste à mettre en évidence le pourcentage de porosité des granulats utilisés. Le tableau suivant résume les résultats trouvés par l'essai :

Tableau II.7. Compacité, Porosité et L'indice des vides des granulats utilisés.

	GBR	GCR	SBR	SCR
Compacité(%) $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{ab}}$	45.6	40.7	53.5	40.4
Porosité(%) $n = 100 - C$	54.4	59.3	46.5	59.6
Indice des vides(%) $e = 100 \times \frac{\rho_{ab} - \rho_{app}}{\rho_{app}}$	119.3	146	87	147.4

II.3.3. Equivalent de sable (EN 933-8)

Définition

Est un indicateur caractérisant la propreté d'un sable ou d'une grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

But

Déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui.

Matériaux et matériels utilisés

- Balance.
- Un agitateur mécanique.
- Entonnoir.
- Chronomètre.
- Règle.
- Eprouvettes en plastiques avec de bouchons.
- Solution lavante.
- Tube laveur, prolongeant le tube souple métallique.
- Piston.
- Échantillon de granulats secs (SBR, SCR).

Mode opératoire

- Remplissage éprouvettes avec la solution lavant, jusqu'au premier trait.
- Verser la quantité de sable, et éliminant les bulles d'air.
- Laissant reposer 10 min.
- Boucher éprouvettes, et agiter à l'aide d'une machine agitatrice électrique (mouvement rectiligne, hors 90 aller et retours en 30 s).
- Laver le sable avec une solution lavant, et remplir avec le tube plongeur, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 min.
- Mesurer à Vue les hauteurs h_1 et h_2 .
- La mesure de h_2 , n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise (ES).
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer h'_2 .

Les trois hauteurs h_1 , h_2 , h'_2 permettent de calculer l'équivalent de sable visuel (ESV) et l'équivalent de sable au piston (ES) :

$$ESV = \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \times 100\% \quad (II.6)$$

$$ESP = \left(\frac{h'_2}{h_2} \right) \times 100\% \quad (II.7)$$

Où :

ESV : Équivalent de Sable Visualisé.

ESP : Équivalent de Sable Piston.

h_1 : hauteur sable propre + éléments fins.

h_2 : hauteur sable propre seulement.

h'_2 : Hauteur ajustée (sable + fines après ajustement).

Le but de cet essai est de mettre en évidence la propreté du sable. L'essai a été fait conformément à la norme EN 933-8 (AFNOR, décembre 1999) [40] et les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau suivant :



Figure II.12. Processus d'essai d'équivalent de sable.

- **Sable de béton recyclé (SBR)**

Tableau II.8. Equivalent de sable de béton recyclé.

	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h'_2 (cm)
Essai 1	10	11.8	9.5
Essai 2	10	11.5	9.5
Mayenne	10	11.65	9.5

- **Sable de céramique recyclé (SCR)**

Tableau II.9. Equivalent de sable de céramique recyclé.

	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h'_2 (cm)
Essai 1	12.5	14.7	12.9
Essai 2	12.4	14.5	13.1
Mayenne	12.45	14.6	13

Tableau II.10. Valeur de Equivalent de sable.

	ESV visuel (%)	ES piston (%)
SBR	86	82
SCR	85	89
Critère de la norme	≥ 85	≥ 80

Les deux sables sont donc très propres ; la très faible teneur en fines argileuses peut entraîner un défaut de plasticité qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.3.4. Porosité des granulats (EN 1097-6) [41]

Définition

Est le volume des vides contenus dans l'unité de volume de matière. Elle représente la capacité d'un granulat à contenir de l'air ou de l'eau dans ses pores. Elle est généralement exprimée en pourcentage.

But

Déterminer la porosité des granulats recyclés (provenant de déchets de béton et de céramique).

Matériaux et matériels utilisés

- Un récipient résistant à la chaleur, utilisé pour faire bouillir les granulats dans l'eau afin de saturer leurs pores.
- Une plaque chauffante (résistance électrique) pour assurer une montée en température contrôlée.
- Des chiffons absorbants et des éponges, servant à sécher superficiellement les granulats après immersion.
- Balance électronique.
- Sèche-cheveux : utilisé pour le séchage superficiel du sable afin d'atteindre l'état saturé surface sèche sans surchauffe.
- Une spatule (spatule de laboratoire) pour manipuler les échantillons de manière hygiénique et précise.
- Échantillon de granulats secs (SBR, SCR, GBR, GCR).

Mode opératoire

- Préparation des échantillons pour la mesure de la porosité :

Les échantillons secs ont été préparés avec des masses initiales de $M_0 = 1000$ g pour les granulats et $M_0 = 500$ g pour le sable, pour chaque type de matériau étudié (SBR, SCR, GBR, GCR).

- Les échantillons ont été immergés dans de l'eau froide puis portés à ébullition pendant deux heures, afin d'éliminer l'air contenu dans les pores.
- Après ébullition, ils sont laissés à refroidir dans la même eau pour permettre à l'eau de pénétrer dans les pores.
- Une fois refroidis, les échantillons sont retirés de l'eau et séchés en surface :
 - Les granulats sont essuyés délicatement à l'aide d'un chiffon ou d'une éponge.
 - Le sable est séché à l'aide d'un sèche-cheveux jusqu'à ce que sa surface soit sèche.
- Ensuite, les échantillons sont pesés à nouveau pour obtenir la masse après saturation (M_1), ce qui permet ensuite de calculer la porosité à partir de la différence entre M_0 et M_1 :

$$P\% = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times \rho_s \times 100 \quad (II.8)$$

Où :

$P\%$: Pourcentage de porosité.

M_0 : Masse initiale des granulats secs.

M_1 : Masse des granulats après saturation.

ρ_s : la masse volumique absolue.

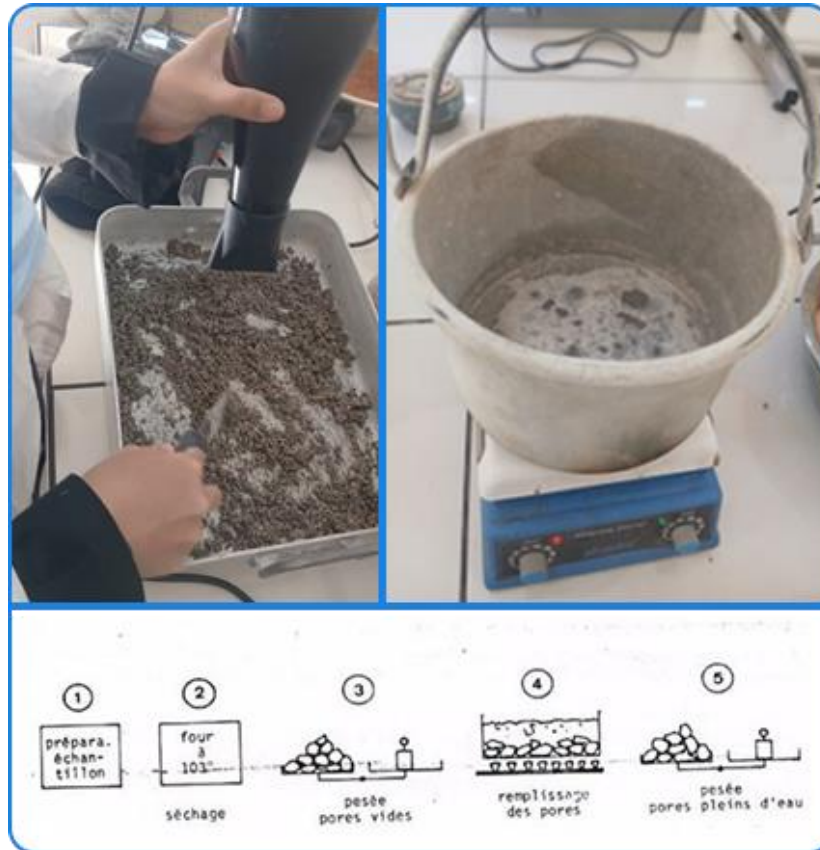


Figure II.13. Processus de mesure de la porosité.

II.3.5. L'absorption par immersion des granulats (EN 1097-6) [41]

Définition

Est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par immersion dans l'eau pendant un certain temps par rapport sa masse sèche.

But

Déterminer le coefficient d'absorption (A_b) d'un échantillon de granulats (SBR, SCR, GBR, GCR).

Matériaux et matériels utilisés

- Conteneurs en plastique : utilisés pour l'immersion des granulats dans l'eau.

- Balance électronique
- Chiffons et éponges absorbants : servant à sécher superficiellement les granulats grossiers après l'immersion, sans altérer leur teneur en eau interne.
- Sèche-cheveux : utilisé pour le séchage superficiel du sable afin d'atteindre l'état saturé surface sèche sans surchauffe.
- Spatule (spatule de laboratoire) : pour le transfert et la manipulation précise des échantillons.
- Échantillon de granulats secs (SBR, SCR, GBR, GCR).

Mode opératoire

- Préparation des échantillons pour la mesure de l'absorption :

Les échantillons secs ont été préparés avec des masses initiales de $M_0 = 1000$ g pour les granulats et $M_0 = 500$ g pour le sable, pour chaque type de matériau étudié (SBR, SCR, GBR, GCR).

- Les immerger dans l'eau pendant 24h à température ambiante.
- Égoutter et essuyer la surface.
- Peser l'échantillon, On détermine la masse M_1 .
- Calculer l'absorption :

$$P\% = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (II.9)$$

Où :

$P\%$: Pourcentage d'absorption.

M_0 : Masse initiale des granulats secs.

M_1 : Masse des granulats après saturation.



Figure II.14. Processus de mesure de l'absorption.

II.4. Amélioration des granulats recyclés par traitement chimique

II.4.1. Méthodologie du traitement chimique

Les produits chimiques utilisés

Un traitement chimique a été réalisé pour améliorer la qualité des matières premières recyclées, basé sur la réaction entre l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (chaux) et le bicarbonate de sodium (NaHCO_3). Ces deux réactifs ont été sélectionnés pour leur capacité à produire du carbonate de calcium (CaCO_3) par précipitation, dans le but de réduire la porosité et d'améliorer la surface des agrégats. Il s'agit d'un matériau solide qui comble les pores et les fissures, améliorant ainsi la cohésion et la durabilité de l'agrégat.



Figure II.15. Produits chimiques : NaHCO_3 et la chaux.

Rapports de mélange

Des solutions chimiques ont été préparées avec différentes proportions de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de NaHCO_3 , à savoir : 2/2, 2/4, 2/6, 4/2, 4/4, 4/6, 6/2, 6/4, 6/6

(Où le premier chiffre représente la masse d'hydroxyde de calcium et le second celle de bicarbonate de sodium, en grammes).

Temps de réaction chimique

Pour évaluer l'effet de la durée de réaction, deux temps ont été retenus : 24 heures et 48 heures, étudier l'évolution des réactions chimiques au cours du temps.

Conditions de traitement

Les granulats ont été complètement immergés dans les solutions, dans des récipients hermétiques, à température ambiante, avec une agitation manuelle régulière pour assurer une distribution homogène des réactifs sur la surface.

II.4.2. Préparation des granulats traités

Étapes de traitement

La préparation des granulats traités a suivi une méthodologie rigoureuse visant à garantir la reproductibilité et l'efficacité du traitement. Quatre types de matériaux recyclés ont été utilisés : GBR, GSR, SBR, et SSR. Chacun a été soumis à neuf combinaisons de traitement chimique selon les proportions molaires suivantes : 2/2, 2/4, 2/6, 4/2, 4/4, 4/6, 6/2, 6/4, 6/6 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ / NaHCO_3), avec deux durées de traitement : 24 heures et 48 heures.

Dans un premier temps, des récipients en plastique ont été préparés et étiquetés selon le type de matériau, la durée de traitement et la proportion chimique. Le lait de chaux a été préparé en pesant d'abord l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et en le mélangeant avec l'eau conformément à chaque proportion. Après quelques minutes de repos, le bicarbonate de sodium (NaHCO_3) est ajouté au mélange.

Le granulat recyclé, préalablement pesé, est ensuite réparti selon les proportions prévues et mélangé avec la solution préparée. Chaque échantillon est laissé au repos pendant 24 ou 48 heures pour permettre la réaction chimique. Afin de favoriser une bonne homogénéité du traitement, les mélanges sont remués régulièrement. En tout, 72 échantillons ont été traités : 36 pour chaque durée.



Figure II.16. *Traitement des matériaux à l'aide de produits chimiques pour améliorer leurs propriétés.*

Séchage et reconditionnement

À la fin du temps de traitement, les granulats sont filtrés pour éliminer l'excès de solution, puis soigneusement lavés à l'eau claire afin d'enlever les résidus chimiques. Chaque lot est ensuite placé dans un récipient résistant à la chaleur, préalablement étiqueté avec le type de matériau, la proportion et le temps de traitement.

Les granulats sont ensuite séchés dans un four à 70 °C pendant au moins 24 heures pour éliminer toute humidité résiduelle. Une fois secs, ils sont stockés dans des sacs hermétiques, étiquetés de manière précise, et conservés dans un environnement sec afin de préserver leurs nouvelles propriétés.

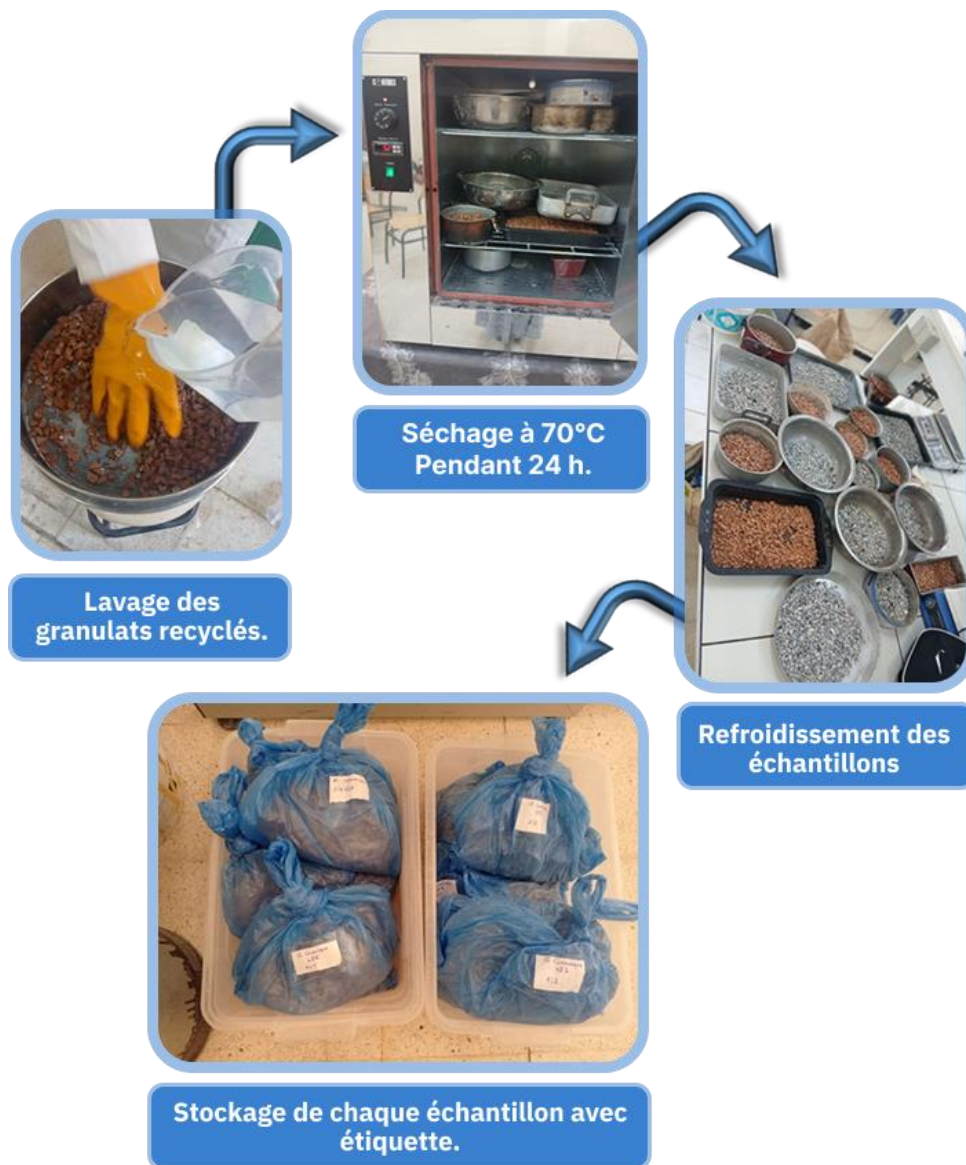


Figure II.17. Étapes de préparation des matériaux traités : du lavage au stockage.

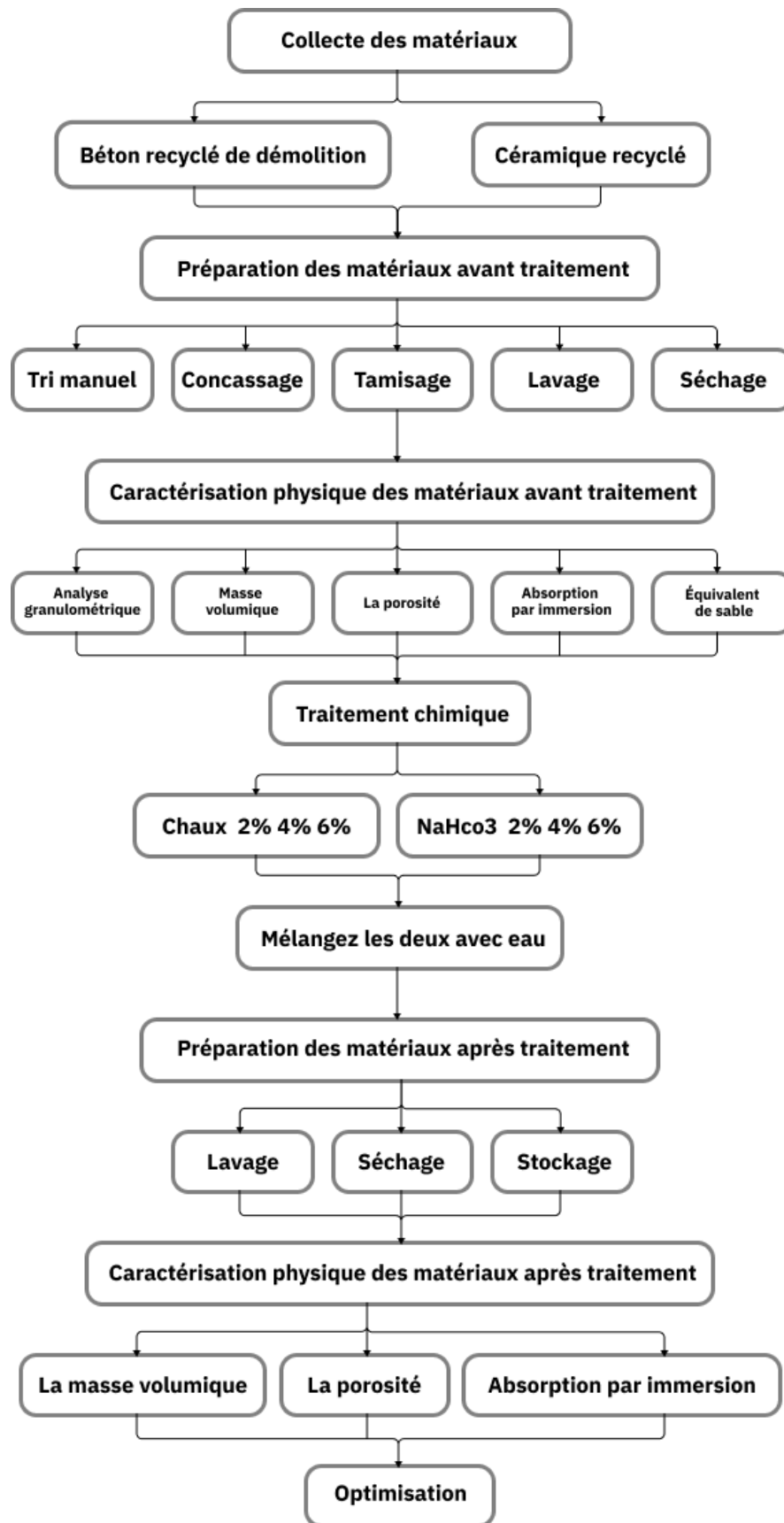


Figure II.18. Étapes de préparation des matériaux traités : du lavage au stockage.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté les matériaux utilisés et les méthodes d'analyse nécessaires pour évaluer leurs propriétés. Il a également étudié les déchets de béton et de céramique pour évaluer leur réutilisation. Ces analyses sont essentielles pour améliorer la qualité du béton recyclé et réduire son impact environnemental, contribuant ainsi à une construction durable.

Chapitre III

Résultats et discussion optimisations

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons, analysons et discutons les résultats obtenus suite aux différentes méthodes appliquées aux matériaux recyclés issus du béton démolé et des déchets céramiques, en les comparant également aux données rapportées dans la littérature précédente. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité des traitements et des méthodes de traitement. Les résultats seront interprétés à travers une comparaison des performances, dans le cadre de l'optimisation de leur utilisation dans le domaine du génie civil.

III.2. Analyse des résultats expérimentaux des propriétés physiques des échantillons

III.2.1. Sable de céramique recyclé (SCR)

La masse volumique apparente

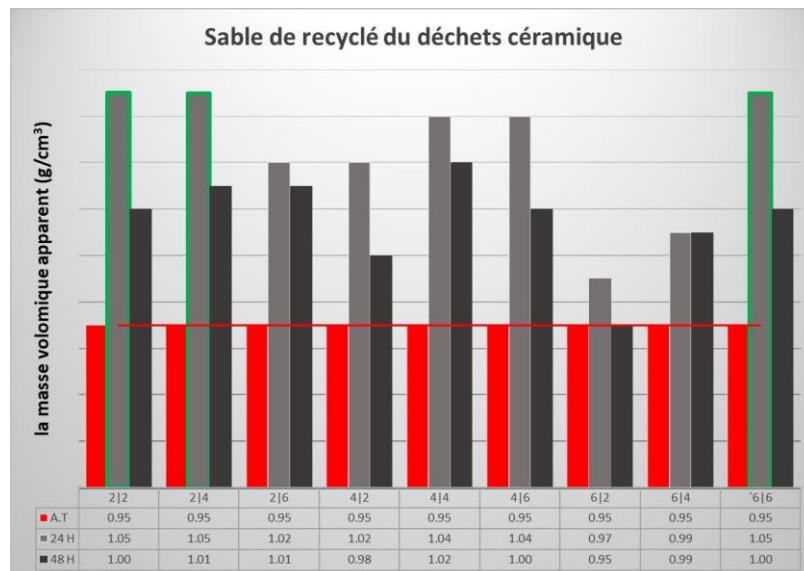


Figure III.1. Évolution du taux de la masse volumique apparente du SCR après traitement chimique.

Les résultats de la masse volumique apparente, illustrés dans la figure (Fig.III.1), constituent une évaluation de l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur les propriétés du sable céramique recyclé, à travers deux durées de traitement distinctes (24 et 48 heures). Une amélioration significative des valeurs a été observée après traitement, ce qui reflète l'efficacité du traitement alcalin dans l'amélioration de la structure physique du matériau. Certaines formulations ont présenté des augmentations de la densité apparente dépassant 10 %.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a enregistré une masse volumique apparente de 0,95 g/cm³. En revanche, les échantillons traités avec les proportions (2/2/24), (2/4/24) et (6/6/24) ont tous atteint une valeur de 1,05 g/cm³, soit une augmentation de 10,5 % par rapport à l'échantillon de référence. Cette amélioration indique l'efficacité du traitement dans la réduction des vides inter granulaires et l'augmentation de la densité du matériau, ce qui traduit le dépôt de composés tels que le carbonate de calcium (CaCO₃) au sein de la structure poreuse, renforçant ainsi la cohésion interne.

Ces résultats illustrent le rôle de la réaction entre la chaux Ca(OH)₂ et le NaHCO₃ dans l'amélioration de la microstructure du matériau. Les produits issus de cette réaction comblent les pores fins et réduisent les espaces vides, ce qui se traduit directement par une augmentation de la masse volumique apparente. Il est à noter que cette amélioration n'est pas uniquement liée à des proportions élevées des réactifs, mais peut également être observée avec de faibles taux tels que 2 %, soulignant l'importance d'un équilibre optimal entre les proportions et la durée de traitement.

Ces observations sont en accord avec les conclusions de l'étude de Gupta et al. (2019), qui ont démontré que le traitement chimique des granulats céramiques à l'aide de matériaux alcalins permet d'améliorer la densité apparente de 8 % à 12 %, grâce à la précipitation de composés tels que le CaCO₃ dans la structure poreuse, contribuant ainsi à renforcer les granulats et à améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques [42].

L'absorption par immersion

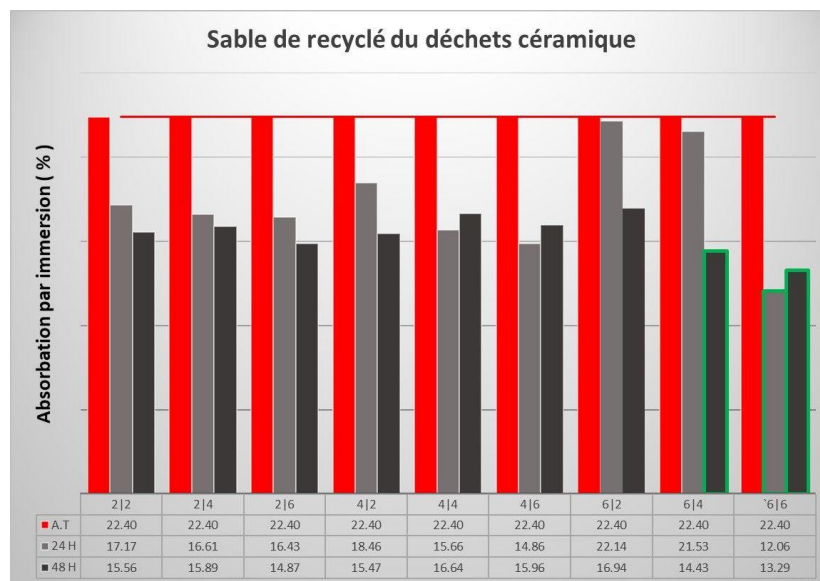


Figure III.2. Évolution du taux d'absorption par immersion du SCR après traitement chimique.

Les résultats du test d'absorption par immersion, illustrés dans la figure (Fig.III.2), évaluent l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur les propriétés des sables céramiques recyclés, à travers deux durées de traitement (24 et 48 heures). Une diminution significative des taux d'absorption a été observée après traitement, ce qui reflète l'efficacité du traitement chimique alcalin dans l'amélioration de la qualité du matériau, certaines éprouvettes ayant enregistré des taux d'absorption inférieurs à 15 %.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a présenté un taux d'absorption de 22,40 %, tandis que ce taux a chuté à 12,06 % pour l'échantillon (6/6/24), à 13,29 % pour l'échantillon (6/6/48), et à 14,43 % pour l'échantillon (6/4/48). Cela correspond à une amélioration de la fermeture de la porosité de 46,16 %, 40,66 % et 35,58 % respectivement par rapport à l'état initial. Ces résultats indiquent que la proportion équilibrée de 6 % de chaux et 6 % de NaHCO_3 avec une durée de traitement de 24 heures est la plus optimale, atteignant la meilleure amélioration (46,16 %) en termes de réduction de la perméabilité et de résistance à l'absorption d'eau. Ils montrent également que la durée de traitement optimale ne dépend pas uniquement du temps, mais de l'efficacité de l'interaction entre les deux réactifs.

Ces améliorations sont dues à la réaction entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaHCO_3 , qui conduit à la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3) à l'intérieur des pores fins du sable recyclé, contribuant ainsi à leur colmatage, à la réduction des vides et donc à la diminution de l'absorption d'eau. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Liu et al. (2020), qui ont démontré l'efficacité du traitement alcalin utilisant $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaHCO_3 pour améliorer les propriétés des granulats céramiques recyclés. Les auteurs ont observé une réduction de l'absorption de l'ordre de 30 % à 50 %, attribuée à la précipitation de CaCO_3 dans les pores et à la réduction de la perméabilité [43].

La porosité

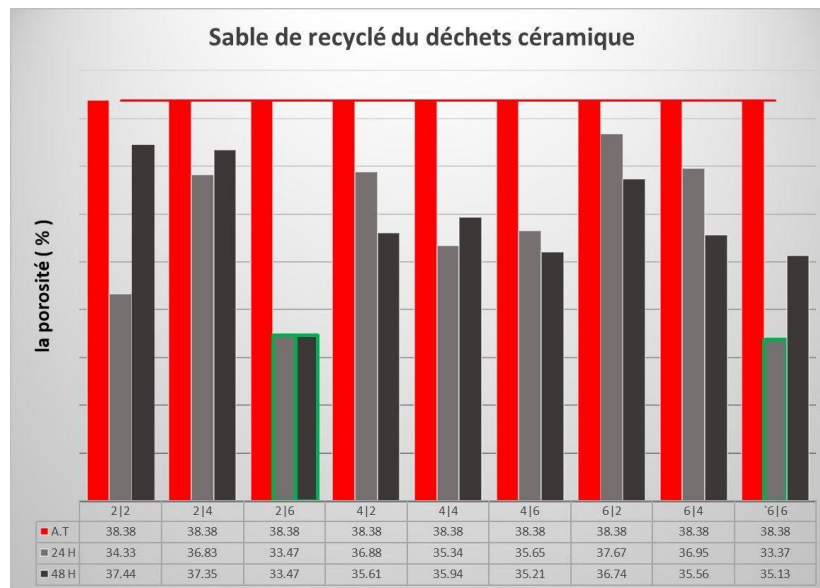


Figure III.3. Évolution du taux de porosité du SCR après traitement chimique.

Les résultats des tests de porosité, présentés dans la figure (Fig.III.3), permettent d'évaluer l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur la structure du sable céramique recyclé, après deux durées de traitement distinctes (24 et 48 heures). Les résultats ont montré une diminution notable du taux de porosité après traitement, ce qui reflète l'efficacité de la modification alcaline dans l'amélioration de la structure interne du matériau par la réduction des vides fins entre les grains.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a enregistré une porosité de 38,38 %, tandis que cette valeur a diminué à 33,37 % pour les échantillons (2/6/24) et (2/6/48), et à 33,47 % pour l'échantillon (6/6/24), soit une réduction respective de 13,06 % et 12,79 % par rapport à l'état initial. Ces résultats reflètent la capacité de la réaction chimique entre le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le NaHCO_3 à former du carbonate de calcium (CaCO_3), qui se dépose dans les pores fins et contribue à leur colmatage, renforçant ainsi la structure du granulat et réduisant sa perméabilité.

Il est à noter que les formulations contenant 6 % de NaHCO_3 avec des doses faibles ou modérées de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (2 %), notamment avec un temps de traitement court (24 heures), ont montré une efficacité remarquable dans la réduction de la porosité. Cela indique qu'un bon rendement ne nécessite pas nécessairement une longue durée de traitement, mais dépend plutôt de l'équilibre entre les proportions des réactifs et le temps de réaction.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par l'étude de Zhang et al. (2019), qui a montré que le traitement chimique à l'aide de substances alcalines permet de réduire la porosité globale des granulats céramiques recyclés de 10 % à 20 %, en raison de la formation de composés insolubles dans la structure poreuse, améliorant ainsi la résistance à l'absorption et augmentant la densité apparente [44].

III.2.2. Gravier de céramique recyclé (GCR)

La masse volumique apparente

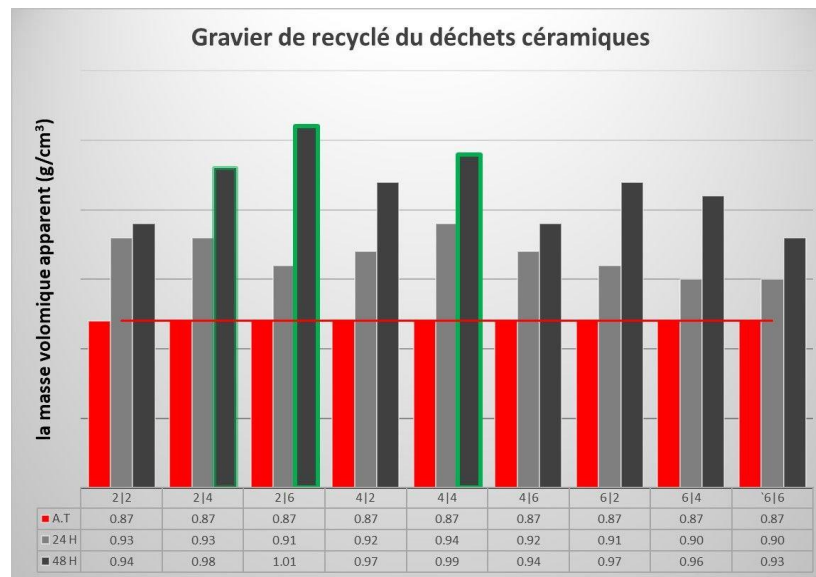


Figure III.4. Évolution du taux de la masse volumique apparente du GCR après traitement chimique.

Les résultats de la densité apparente, illustrés dans la figure (Fig.III.4), permettent d'évaluer l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur les propriétés physiques des graviers de céramique recyclée, après des durées de traitement de 24 et 48 heures. Une amélioration notable de la densité apparente a été observée après traitement, ce qui reflète l'efficacité de la réaction chimique alcaline dans l'amélioration de la qualité du matériau, certaines éprouvettes ayant dépassé une densité de $1,00 \text{ g/cm}^3$, soit une augmentation estimée à environ 15 % par rapport à l'échantillon non traité.

Par exemple, la densité apparente de l'échantillon non traité (0/0/0) était de $0,87 \text{ g/cm}^3$, tandis que cette valeur a atteint $1,01 \text{ g/cm}^3$ pour l'échantillon (2/6/48), $0,99 \text{ g/cm}^3$ pour l'échantillon (4/4/48), et $0,98 \text{ g/cm}^3$ pour l'échantillon (2/4/48). Cela correspond à des augmentations relatives de 16,09 %, 13,79 % et 12,64 % respectivement, traduisant une amélioration de la densité des

grains due à la réduction des vides internes et à l'augmentation de la masse sans changement significatif du volume global.

Ces résultats indiquent que la combinaison (2 % de chaux et 6 % de NaHCO_3) avec un traitement de 48 heures est la plus efficace pour obtenir la densité apparente la plus élevée, grâce à la réaction chimique produisant du carbonate de calcium (CaCO_3), qui se dépose dans les micropores, renforçant ainsi la structure et réduisant la porosité.

Ces observations sont cohérentes avec l'étude de Kikuchi et Kawai (2007), qui a montré que le traitement alcalin à l'aide de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ peut entraîner une augmentation de la densité apparente des granulats de céramique recyclée comprise entre 10 % et 18 %, en raison des réactions de durcissement et de précipitation dans les pores. L'étude souligne également que l'équilibre entre les proportions des matériaux de traitement et le temps de réaction constitue un facteur clé pour l'amélioration de la structure interne des granulats [45].

L'absorption par immersion

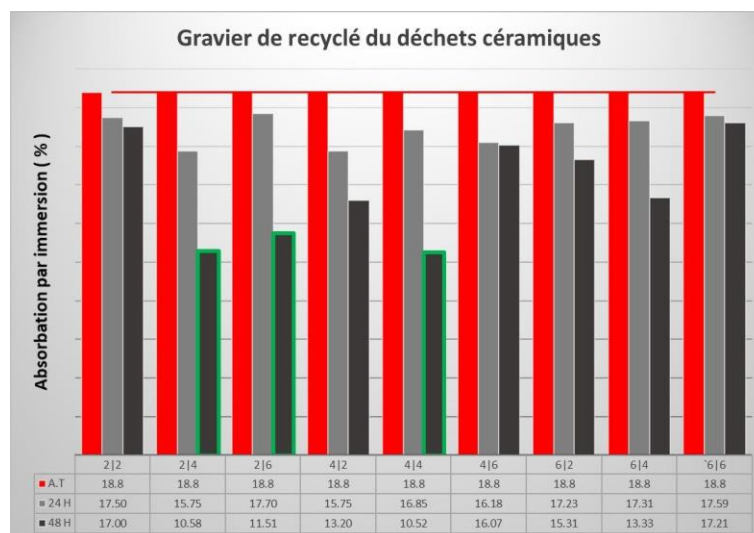


Figure III.5. Évolution du taux d'absorption par immersion du GCR après traitement chimique.

Les résultats de l'absorption par immersion, présentés dans la figure (Fig.III.5), évaluent l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur le comportement physique des graviers de céramique recyclée, et ce après des durées de traitement de 24 et 48 heures. Les données montrent une diminution progressive et significative des taux d'absorption après traitement, indiquant une amélioration de la densité de surface et une réduction de la porosité effective des graviers. Il est également observé que certaines formulations

ont enregistré des taux d'absorption inférieurs à 11 %, ce qui représente une amélioration importante par rapport à la valeur initiale non traitée.

Par exemple, le taux d'absorption initial (A.T) pour tous les échantillons non traités était de 18,8 %. Ce taux a nettement diminué dans plusieurs échantillons, notamment l'échantillon (48/4/4) avec un taux de 10,52 %, l'échantillon (48/2/4) avec 10,58 % et l'échantillon (48/2/6) avec 11,51 %. Ces résultats représentent une amélioration relative de 44,04 %, 43,72 % et 38,72 % respectivement, par rapport à la valeur initiale, ce qui reflète l'effet du traitement chimique entre la chaux et le NaHCO_3 . Cette réaction favorise la précipitation des produits de réaction dans les pores, principalement le carbonate de calcium (CaCO_3), qui comble les vides et réduit la capacité d'absorption d'eau des graviers.

Ces résultats indiquent que la formulation optimale est de 4 % de chaux et 4 % de bicarbonate, avec une durée de traitement de 48 heures, permettant d'atteindre un taux d'absorption minimal de 10,52 %, soit une amélioration relative de 44,04 %. Cette efficacité est attribuée à un bon équilibre entre l'alcalinité et la quantité de réactif, ce qui permet la formation d'une couche de précipitation efficace sans provoquer d'accumulation en surface ou de réaction excessive qui pourrait bloquer la pénétration dans les pores.

Ces résultats sont en accord avec l'étude de Poon et Chan (2006), qui ont montré que l'utilisation de matériaux alcalins comme le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ peut contribuer à réduire l'absorption d'eau dans les matériaux recyclés de 30 % à 45 %, grâce à l'amélioration de la structure de surface et à la réduction des capillarités. Ainsi, les résultats actuels confirment l'efficacité du traitement chimique par NaHCO_3 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ comme solution viable pour améliorer la qualité des granulats céramiques recyclés, notamment lorsque des proportions équilibrées des deux composés sont utilisées [46].

La porosité

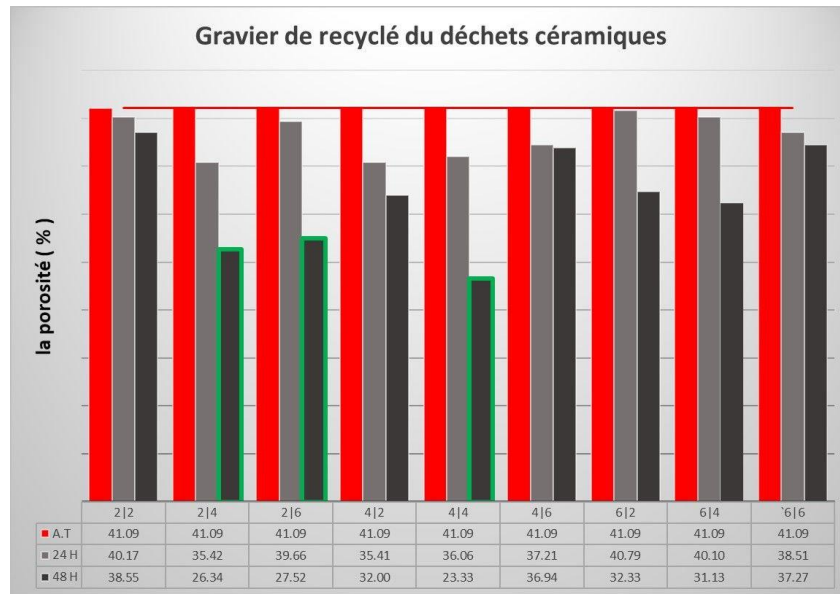


Figure III.6. Évolution du taux de porosité du GCR après traitement chimique.

Les résultats de la porosité, présentés dans la figure (Fig.III.6), évaluent l'effet du traitement chimique utilisant la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le bicarbonate de sodium NaHCO_3 sur la structure du gravier céramique recyclé. Les données ont montré une diminution significative des taux de porosité totale après traitement, que ce soit après 24 ou 48 heures, reflétant l'efficacité de la réaction chimique dans la réduction des vides internes et l'amélioration de la microstructure du gravier.

Par exemple, le taux de porosité initial non traité (A.T) était constant pour tous les échantillons à 41,09 %. Après traitement, une diminution notable a été observée pour certaines compositions, notamment l'échantillon (48/4/4) dont la porosité est descendue à 23,33 %, suivi des échantillons (48/4/2) avec 26,34 % et (48/6/2) avec 27,52 %. Ces valeurs représentent une amélioration relative de 43,26 %, 35,89 % et 33,04 % respectivement par rapport à la valeur initiale, indiquant une réduction efficace des vides grâce à la précipitation de carbonate de calcium (CaCO_3) à l'intérieur des pores capillaires.

Ces résultats indiquent que la composition optimale est 4 % de chaux et 4 % de bicarbonate de sodium avec un temps de traitement de 48 heures, permettant d'atteindre la plus faible porosité enregistrée, soit 23,33 %, avec une amélioration de 43,26 %. Cette réduction est attribuée à la formation de dépôts denses qui colmatent les vides tout en améliorant la cohésion entre les particules, sans provoquer d'accumulations superficielles susceptibles d'entraver la perméabilité.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Li et al. (2019), qui ont étudié le granulat recyclé traité avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaHCO_3 , et ont observé une diminution de la porosité de l'ordre de 38 % à 42 %. Ils ont également confirmé que la composition optimale pour obtenir cette amélioration était l'utilisation de 4 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et 4 % de NaHCO_3 pendant 48 heures, en raison de la précipitation de CaCO_3 dans les pores, réduisant ainsi les microcavités-ce qui est en parfaite concordance avec les résultats de la présente étude [47].

III.2.3. Sable de béton recyclé (SBR)

La masse volumique apparente

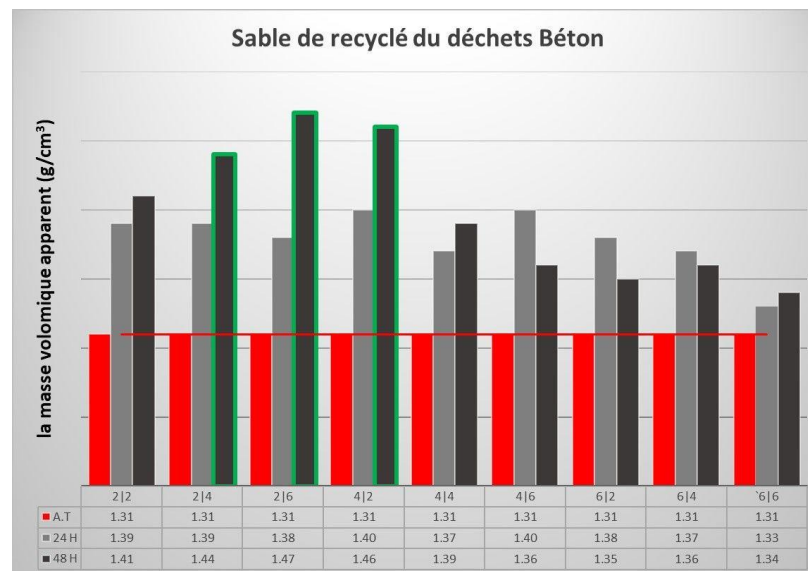


Figure III.7. Évolution du taux de la masse volumique apparente du SBR après traitement chimique.

Les résultats de la masse volumique apparente, illustrés dans la figure (Fig.III.7), représentent une évaluation de l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur les propriétés du sable de béton recyclé, après un temps de traitement de 48 heures. Une amélioration notable a été enregistrée après traitement, ce qui reflète l'efficacité de la modification alcaline dans l'amélioration de la structure physique du granulat fin, certaines valeurs ayant montré une augmentation supérieure à 12 % par rapport à l'échantillon non traité.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a affiché une masse volumique apparente de 1,31 g/cm^3 . En revanche, les échantillons traités avec les proportions (2/6/48), (4/2/48) et (2/4/48) ont enregistré des valeurs respectives de 1,47, 1,46 et 1,44 g/cm^3 , soit des augmentations de 12,2 %, 12,2 %, et 10,6 %.

11,5 % et 9,9 % par rapport à l'échantillon initial. Cette amélioration indique que le traitement alcalin a efficacement réduit les vides intergranulaires et amélioré la cohésion interne, par la précipitation de composés tels que le carbonate de calcium (CaCO_3), résultant de la réaction entre la chaux et le bicarbonate de sodium.

Ces résultats indiquent que la proportion équilibrée (2 % de chaux et 6 % de NaHCO_3) avec un temps de traitement de 48 heures est la plus appropriée pour atteindre une masse volumique maximale, l'échantillon correspondant ayant atteint une valeur de $1,47 \text{ g/cm}^3$. Cette amélioration est attribuée à l'efficacité de la réaction entre les deux composés, entraînant la précipitation de CaCO_3 dans les pores fins, ce qui renforce la structure granulaire du matériau et réduit les chemins de perméabilité. Cela reflète le rôle du traitement chimique comme une méthode efficace pour améliorer la qualité du granulat recyclé et le rendre plus adapté à une utilisation dans le béton structurel.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Silva et al. (2014), qui ont démontré que le traitement chimique des granulats recyclés permet d'améliorer la masse volumique apparente de 10 à 15 %, grâce à la précipitation de composés minéraux dans la structure poreuse, contribuant ainsi à renforcer les propriétés physiques du granulat, le rendant comparable à un granulat naturel de haute qualité [48].

L'absorption par immersion

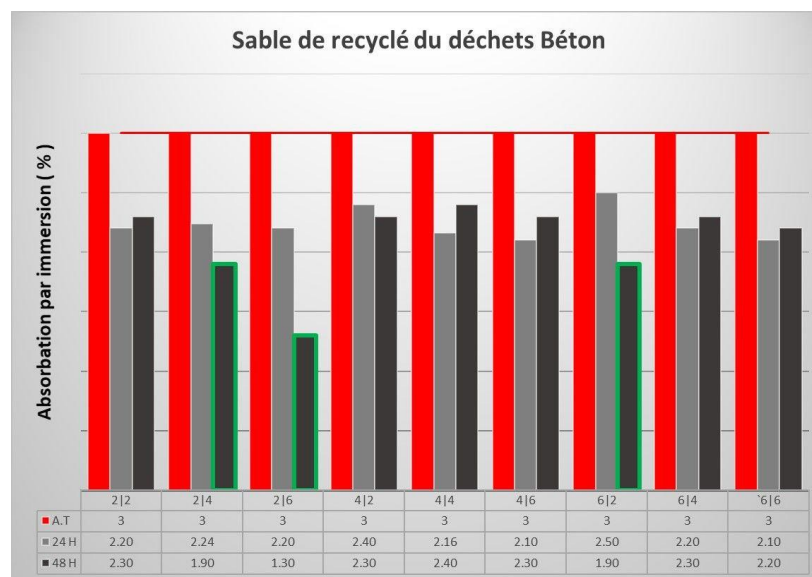


Figure III.8. Évolution d'absorption par immersion du taux du SBR après traitement chimique.

Les résultats d'absorption présentés dans la figure (Fig.III.8) évaluent l'effet du traitement chimique utilisant la chaux Ca(OH)_2 et le bicarbonate de sodium NaHCO_3 sur les propriétés du granulats recyclé, en particulier sa capacité à absorber l'eau. Les données enregistrées montrent une diminution notable des taux d'absorption après traitement, que ce soit après 24 ou 48 heures, ce qui reflète une amélioration de la microstructure et une réduction de la porosité ouverte du granulats traité.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a présenté un taux d'absorption de 3,00 %. Après traitement, certaines compositions améliorées ont montré une baisse significative, notamment l'échantillon (2/6/48) qui a enregistré la plus faible valeur d'absorption à 1,30 %, suivi des échantillons (6/2/48) et (2/4/48) avec des valeurs de 1,90 % chacun. Ces résultats représentent une amélioration respective de 56,7 %, 36,7 % et 36,7 %, traduisant l'effet du dépôt chimique dans les pores capillaires pour réduire la capacité d'absorption d'eau du granulats.

Ces résultats indiquent que la composition optimale est 2 % de Ca(OH)_2 et 6 % de NaHCO_3 avec un temps de traitement de 48 heures, car elle permet d'atteindre le plus faible taux d'absorption. Cette réduction est due à la précipitation de composés tels que le carbonate de calcium (CaCO_3) dans les pores fins, contribuant ainsi à obstruer les canaux capillaires et à empêcher la pénétration de l'eau dans les particules, ce qui améliore la durabilité du béton et sa résistance à la dégradation dans les environnements humides.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par l'étude de Poon et al. (2004), qui a montré que le traitement des granulats recyclés avec des agents alcalins tels que la chaux et le NaHCO_3 permet de réduire le taux d'absorption d'environ 35 % à 60 %, grâce à la précipitation de matières insolubles dans la structure poreuse, ce qui diminue la perméabilité et améliore la performance du béton produit à partir de ces granulats [49].

La porosité

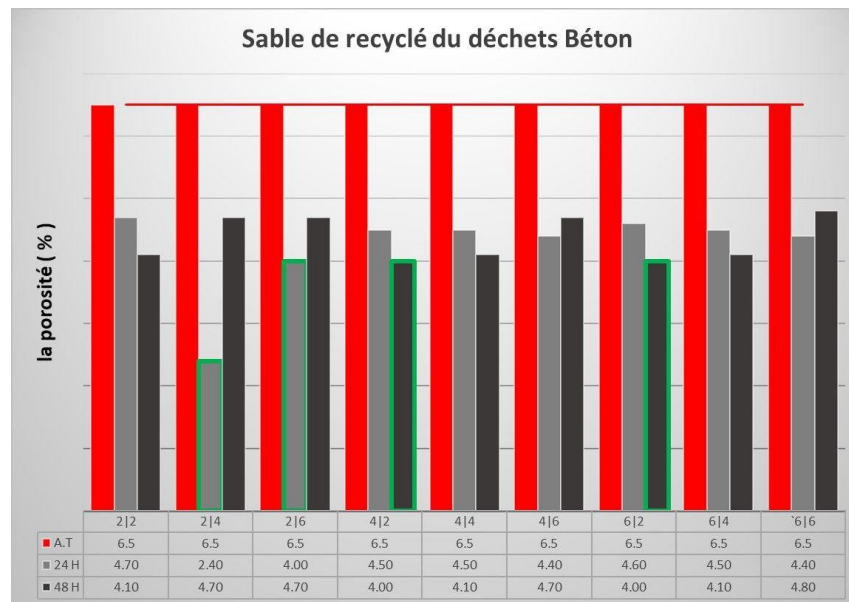


Figure III.9. Évolution de la porosité du taux du SBR après traitement chimique.

Les résultats de la porosité, illustrés dans la figure (Fig.III.9), évaluent l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) et de durées de traitement variables (24 et 48 heures) sur les propriétés physiques du sable de béton recyclé. Les résultats montrent une diminution claire de la porosité après traitement, ce qui reflète l'efficacité du traitement alcalin pour réduire les vides internes et améliorer la cohésion des grains.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a enregistré une porosité de 6,5 %, la plus élevée parmi tous les échantillons. En revanche, l'échantillon traité avec les proportions (2/4/24) a présenté une porosité faible de seulement 2,4 %, soit une réduction de 63,1 % par rapport à l'échantillon d'origine, ce qui reflète la formation de dépôts à l'intérieur des pores dus à la réaction entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaHCO_3 . D'autres échantillons, tels que (2/6/24), (4/2/48) et (2/6/48), ont enregistré une porosité uniforme de 4 %, représentant une diminution de 38,5 %, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle l'efficacité du traitement ne dépend pas seulement de l'augmentation de la concentration, mais aussi de l'équilibre entre les composants et la durée de la réaction.

Les résultats montrent que la proportion optimale pour obtenir la porosité la plus faible était dans l'échantillon (2/4/24), où la diminution a atteint 63,1 % par rapport à l'échantillon non traité, avec une porosité de seulement 2,4 %. Cette performance est attribuée à un équilibre efficace entre les concentrations de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaHCO_3 et la durée du traitement, permettant la précipitation régulière et efficace de carbonate de calcium à l'intérieur des pores. Cette formulation est

considérée comme optimale dans les conditions expérimentales, combinant efficacité dans la réduction des vides et amélioration de la structure microscopique sans accumulation ou saturation hétérogène.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Zhang et al. (2021), qui ont confirmé que le traitement chimique du granulât de béton avec des solutions alcalines et carbonatées entraîne une réduction de la porosité pouvant atteindre 50 %, due à la précipitation des produits de réaction dans les vides poreux, ce qui améliore les propriétés structurelles du matériau et accroît son efficacité dans les applications béton [50].

III.2.4. Gravier de béton recyclé (GBR)

La masse volumique apparente

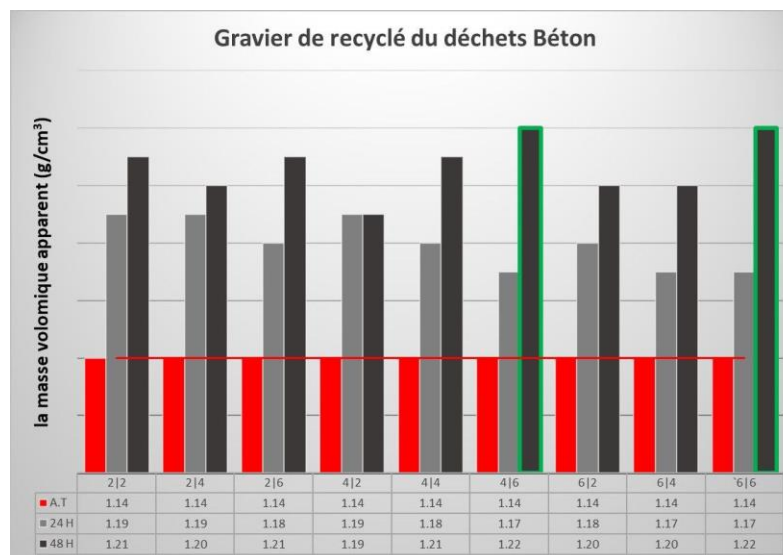


Figure III.10. Évolution de la masse volumique apparente du taux du GBR après traitement chimique.

Les résultats de la masse volumique apparente, illustrés dans la figure (Fig.III.10), évaluent l'effet de différentes proportions de matériaux de traitement (chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et bicarbonate de sodium NaHCO_3) sur les propriétés des graviers recyclés issus de déchets de béton, après des durées de traitement de 24 et 48 heures. Une amélioration notable des valeurs a été enregistrée après traitement, ce qui reflète l'efficacité de la modification alcaline dans l'amélioration de la structure physique des granulats grossiers. Certaines formulations ont montré une augmentation de plus de 7 % par rapport à l'échantillon non traité.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a présenté une masse volumique apparente de 1,14 g/cm³. En comparaison, les échantillons traités avec les proportions (6/6/48) et (4/6/48) ont enregistré une valeur maximale égale de 1,22 g/cm³, soit une augmentation de 7 % par rapport à l'échantillon d'origine. Cette amélioration est attribuée à la réaction chimique entre le Ca(OH)₂ et le NaHCO₃, conduisant à la précipitation du carbonate de calcium (CaCO₃) dans les pores, ce qui renforce la cohésion interne et augmente la masse volumique apparente du granulat.

Ces résultats indiquent que la combinaison de proportions élevées de chaux et de NaHCO₃, avec une durée de traitement prolongée de 48 heures, est la plus appropriée pour atteindre une masse volumique optimale. Cela reflète l'effet d'une réaction chimique complète qui réduit les vides ouverts à l'intérieur des graviers, améliorant ainsi leurs propriétés mécaniques et les rendant plus adaptés à une utilisation dans des formulations de béton.

Ces conclusions sont cohérentes avec celles de l'étude de Silva et al. (2014), qui ont montré que le traitement chimique des granulats recyclés peut entraîner une augmentation de la masse volumique apparente de 10 à 15 %, grâce à la précipitation de composés insolubles dans la structure poreuse, améliorant ainsi la qualité des granulats et les rapprochant des caractéristiques des granulats naturels [48].

L'absorption par immersion

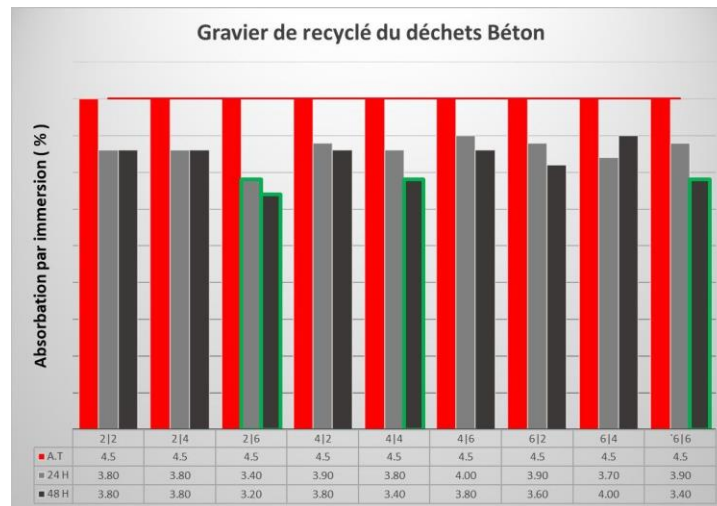


Figure III.11. Évolution d'absorption par immersion du taux du GBR après traitement chimique.

Les résultats d'absorption illustrés dans la figure (Fig.III.11) évaluent l'effet du traitement chimique utilisant la chaux Ca(OH)₂ et le bicarbonate de sodium NaHCO₃ sur les propriétés des

graviers recyclés issus de déchets de béton, en particulier leur capacité à absorber l'eau. Les résultats ont montré une diminution significative des taux d'absorption après traitement, que ce soit après 24 ou 48 heures, ce qui indique une amélioration de la structure microscopique et une réduction de la porosité ouverte à l'intérieur des grains.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a enregistré le taux d'absorption le plus élevé, atteignant 4,5 %. Après traitement, les échantillons ont montré une amélioration variable : l'échantillon 2/6/48 a présenté le taux d'absorption le plus faible, avec une valeur de 3,20 %, soit une réduction de 28,9 % par rapport à l'échantillon de référence. Trois autres échantillons (2/6/24, 4/4/48 et 6/6/48) ont affiché des performances similaires, avec un taux d'absorption de 3,40 %, représentant une réduction d'environ 24,4 %.

Ces résultats indiquent que la formulation optimale dans les conditions de cette expérience est 2 % de Ca(OH)_2 et 6 % de NaHCO_3 avec une durée de traitement de 48 heures, car elle permet d'obtenir les meilleures performances en matière de réduction de l'absorption. Cette amélioration est attribuée à la précipitation de composés insolubles tels que le carbonate de calcium (CaCO_3) dans les pores capillaires, ce qui réduit la capacité du gravier à absorber l'eau en obstruant les micro-canaux et en empêchant la pénétration de l'humidité dans les grains. Cette amélioration constitue un facteur clé dans l'augmentation de la durabilité du béton fabriqué à partir de ces matériaux traités, notamment dans les environnements humides ou exposés en permanence à l'eau.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par l'étude de Poon et al. (2004), qui ont montré que le traitement des granulats recyclés à l'aide de composés alcalins tels que Ca(OH)_2 et NaHCO_3 entraîne une réduction du taux d'absorption comprise entre 35 % et 60 %, grâce à la précipitation des produits de réaction dans les pores, réduisant ainsi la perméabilité et améliorant les performances des granulats dans les mélanges de béton [49].

La porosité

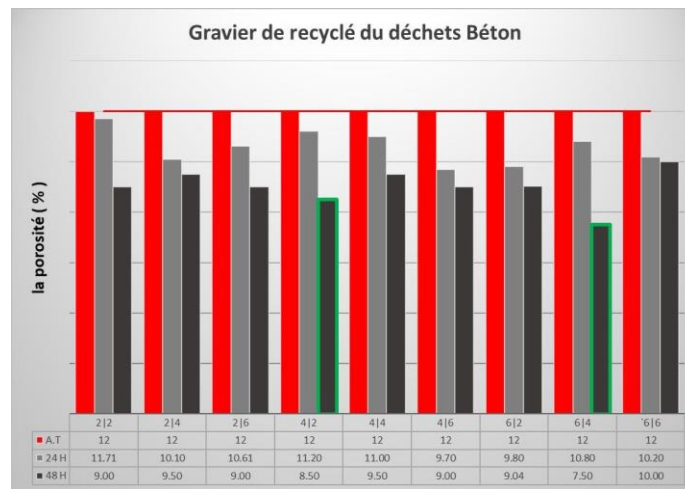


Figure III.12. Évolution de la porosité du taux du GBR après traitement chimique.

Les résultats de porosité présentés dans la figure (Fig.III.12) évaluent l'effet du traitement chimique à base de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de bicarbonate de sodium NaHCO_3 , appliqué pendant deux durées différentes (24 et 48 heures), sur les propriétés des graviers recyclés issus de déchets de béton. Les résultats ont montré une diminution significative de la porosité après traitement, ce qui indique l'efficacité de la modification alcaline dans l'amélioration de la densité structurelle et la réduction des vides internes dans les graviers.

Par exemple, l'échantillon non traité (0/0/0) a présenté la porosité la plus élevée, avec une valeur de 12 %, tandis que l'échantillon traité avec une proportion de (4/2/48) a affiché une porosité de 9 %, soit une réduction de 25 % par rapport à l'échantillon initial. L'échantillon (6/4/48) a montré des performances encore meilleures, avec une porosité de seulement 7,5 %, ce qui représente une diminution de 37,5 %. Cette amélioration est attribuée à l'interaction accrue entre la chaux et le bicarbonate de sodium, qui favorise la précipitation de carbonate de calcium à l'intérieur des pores, renforçant ainsi la cohésion entre les particules et réduisant la perméabilité.

Les résultats montrent que la formulation optimale pour atteindre la porosité la plus faible chez les graviers recyclés est celle de l'échantillon (6/4/48), avec une porosité de seulement 7,5 %, soit une réduction de 37,5 % par rapport à l'échantillon non traité. Cette performance est due à l'équilibre efficace entre les concentrations de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de NaHCO_3 ainsi qu'à la durée de traitement prolongée à 48 heures, permettant une précipitation uniforme du carbonate de calcium dans les vides intergranulaires. Cette réaction chimique a contribué à renforcer les liaisons entre les particules et à réduire efficacement la porosité, sans nuire à la granulométrie ni entraîner

d'agglomération excessive. Cette composition s'est révélée la plus adaptée parmi les essais réalisés sur les granulats, combinant l'efficacité du traitement chimique à une amélioration homogène et stable des propriétés physiques.

Ces résultats sont cohérents avec ceux d'une étude antérieure de Wang et al. (2020), qui a montré que le traitement chimique des granulats de béton à l'aide de solutions alcalines et de composés carbonatés permettait la précipitation de produits de réaction dans les pores, réduisant la porosité jusqu'à 40 % et améliorant ainsi les propriétés des matériaux recyclés, les rendant plus adaptés aux nouvelles formulations de béton [51].

III.3. Étude de l'optimisation des propriétés des échantillons traités

L'étude utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) avec le programme Design Expert pour optimiser les propriétés de quatre matériaux de construction recyclés : sable de béton de démolition, sable de céramique, gravier de béton de démolition et gravier de céramique. Ces matériaux sont traités chimiquement avec de la chaux (facteur A), du bicarbonate de sodium (NaHCO_3) (facteur B), et une durée d'immersion (facteur C, 24 ou 48 heures). Les réponses mesurées sont la masse volumique apparente (à maximiser), la porosité (à minimiser) et l'absorption par immersion (à minimiser). Voici un récapitulatif global et une synthèse des résultats basés sur l'analyse ANOVA et les solutions d'optimisation fournies.

III.3.1. Sable de céramique

III.3.1.1. Modèle et facteurs significatifs

$$\text{Masse volumique apparente} = +1,04 - 0,0278A + 0,0172B + 0,0397C + 0,0422AB + 0,0075AC + 0,0025BC - 0,0206A^2 - 0,0206B^2 - 0,0731C^2. \quad \text{(III.1)}$$

$$\text{Porosité} = +36,26 + 0,1646A - 1,70B + 0,0156C. \quad \text{(III.2)}$$

$$\text{Absorption par immersion} = +17,76 + 2,18A - 1,41B - 5,55C - 3,46AB - 1,79AC + 2,64BC + 0,5288A^2 - 1,56B^2 + 3,50C^2. \quad \text{(III.3)}$$

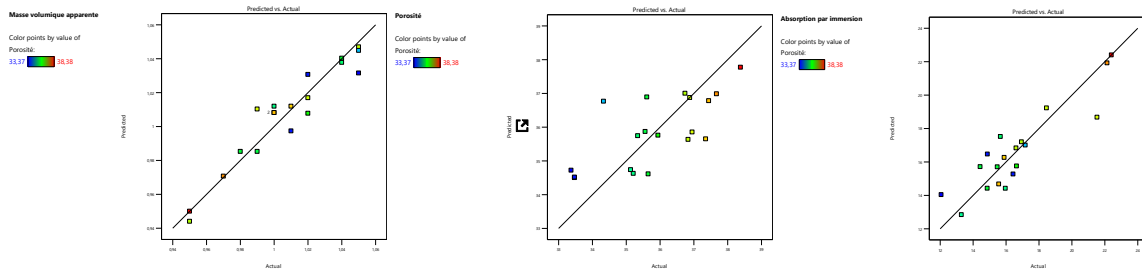
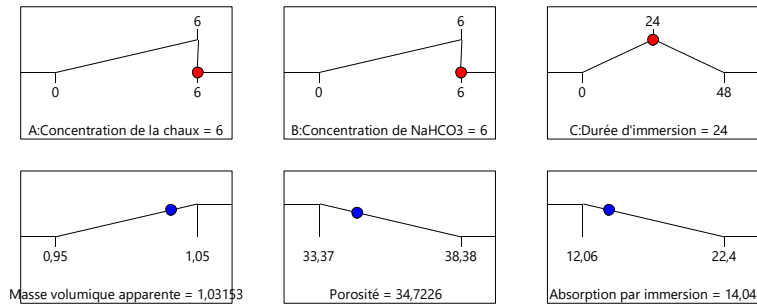


Figure III.13. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du sable céramique recyclé et traité chimiquement.

III.3.1.2. Coefficient de corrélation

	R^2	Adjusté R^2
Masse volumique apparente	0.9093	0.8186
Porosité	0.4886	0.3864
Absorption par immersion	0.8102	0.6204



Desirability = 0,960
Solution 1 out of 10

Figure III.14. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du sable de céramique recyclé et traité chimiquement.

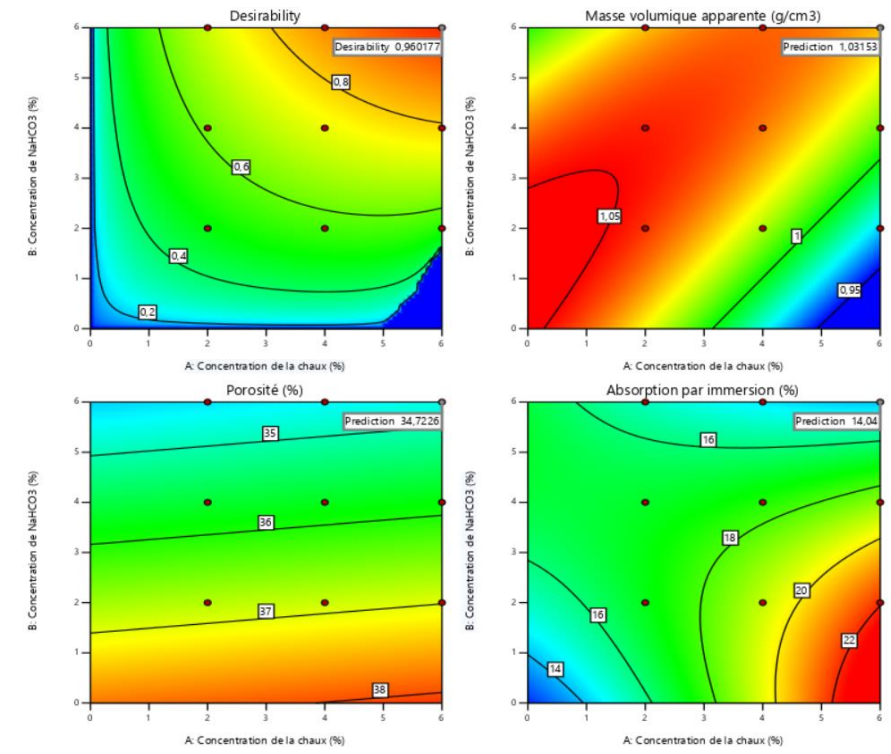


Figure III.15. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du sable céramique recyclé et traité chimiquement.

III.3.1.3. Données

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A: Concentration de la chaux	is target = 6	0	6	1	1	5
B: Concentration de NaHCO3	is target = 6	0	6	1	1	5
C: Durée d'immersion	is target = 24	0	48	1	1	5
Masse volumique apparente	maximize	0,95	1,05	1	1	1
Porosité	minimize	33,37	38,38	1	1	1
Absorption par immersion	minimize	12,06	22,4	1	1	1

III.3.1.4. Solutions

10 Solutions found

Number	Concentration de la chaux	Concentration de NaHCO ₃	Durée d'immersion	Masse volumique apparente	Porosité	Absorption par immersion	Desirability	
1	6,000	6,000	24,000	1,032	34,723	14,040	0,960	Selected

Solution optimale (Solution 1, désirabilité = 0,950) :

A = 6% chaux, B = 6% NaHCO₃, C = 24h.

Masse volumique = 1,032 g/cm³, Porosité = 34,723%, Absorption = 14,040%.

La masse volumique est proche du maximum (1,05), mais la porosité reste élevée (proche de la moyenne).

III.3.2. Sable du béton de démolition

III.3.2.1. Modèle et facteurs significatifs

Masse volumique apparente = $+1,40 - 0,0346A - 0,00468 + 0,01570 - 0,0289AB - 0,0224AC + 0,0026BC$. (III.4)

Porosité = $+4,27 + 0,0069A - 0,080680,10020 + 0,4714AB - 0,1920AC + 0,5705BC$. (III.5)

Absorption par immersion = $2,20 + 0,0630A - 0,24458 - 0,0816C + 0,2263AB + 0,0746AC - 0,0179BC$. (III.6)

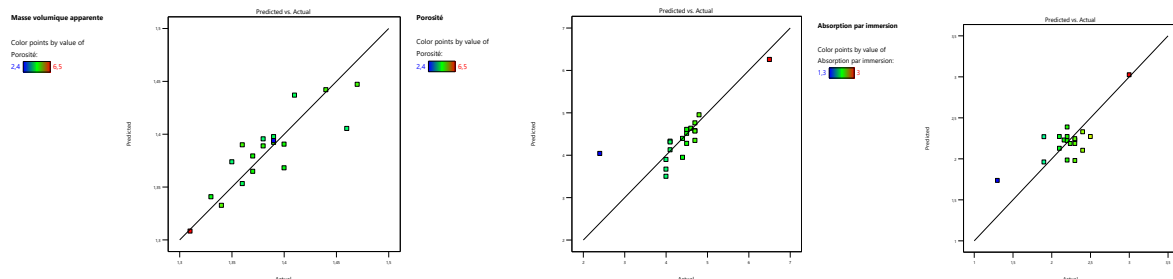


Figure III.16. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du sable béton de démolition et traité chimiquement.

III.3.2.2. Coefficient de corrélation

	R^2	Adjusté R^2
Masse volumique apparente	0,7544	0,6316
Porosité	0,6242	0,4363
Absorption par immersion	0,6104	0,4156

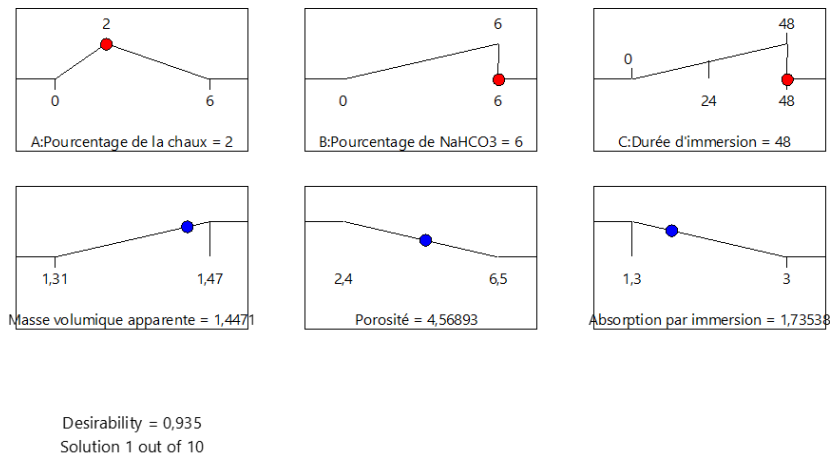


Figure III.17. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du sable béton de démolition et traité chimiquement.

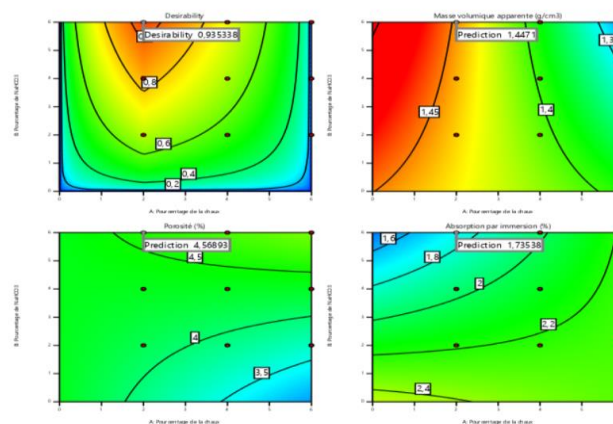


Figure III.18. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du sable béton de démolition et traité chimiquement.

III.3.2.3. Données

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A: Pourcentage de la chaux	is target = 2	0	6	1	1	5
B: Pourcentage de NaHCO ₃	is target = 6	0	6	1	1	5
C:Durée d'immersion	is target = 48	0	48	1	1	5
Masse volumique apparente	maximize	1,31	1,47	1	1	1
Porosité	minimize	2,4	6,5	1	1	1
Absorption par immersion	minimize	1,3	3	1	1	1

III.3.2.4. Solutions

10 Solutions found

Number	Pourcentage de la chaux	Pourcentage de NaHCO ₃	Durée d'immersion	Masse volumique apparente	Porosité	Absorption par immersion	Desirability	
1	2,000	6,000	48,000	1,447	4,569	1,735	0,935	Selected

Solution optimale (Solution 1, désirabilité = 0,935) :

A = 2% chaux, B = 6% NaHCO₃, C = 48h.

Masse volumique = 1,447 g/cm³, Porosité = 4,569%, Absorption = 1,735%.

La masse volumique est proche du maximum (1,47), la porosité et l'absorption sont bien minimisées.

III.3.3. Gravier de céramique

III.3.3.1. Modèle et facteurs significatifs

Masse volumique apparente = $+0,9435 + 0,0044A + 0,02448 + 0,0231C - 0,0281AB - 0,0012AC + 0,0038BC - 0,0169A - 0,028182 + 0,0100C^2$. (III.7)

Porosité : $+36,30 - 3,01A - 8,058 - 3,38C + 3,99AB + 0,5212AC - 0,0200BC + 4,85A2 + 9,67824,0502$. (III.8)

Absorption par immersion : $+15,05 + 0,9609A + 0,00228 - 1,53C$. (III.9)

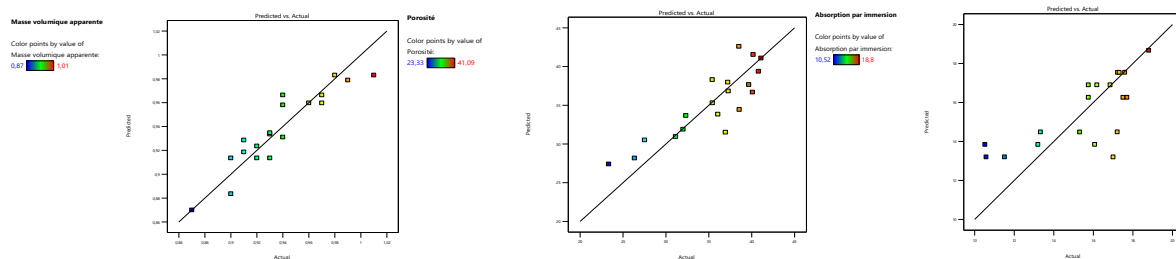


Figure III.19. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.

III.3.3.2. Coefficient de corrélation

	R^2	Adjusté R^2
Masse volumique apparente	0,8503	0,7006
Porosité	0,7359	0,4718
Absorption par immersion	0,5061	0,4073

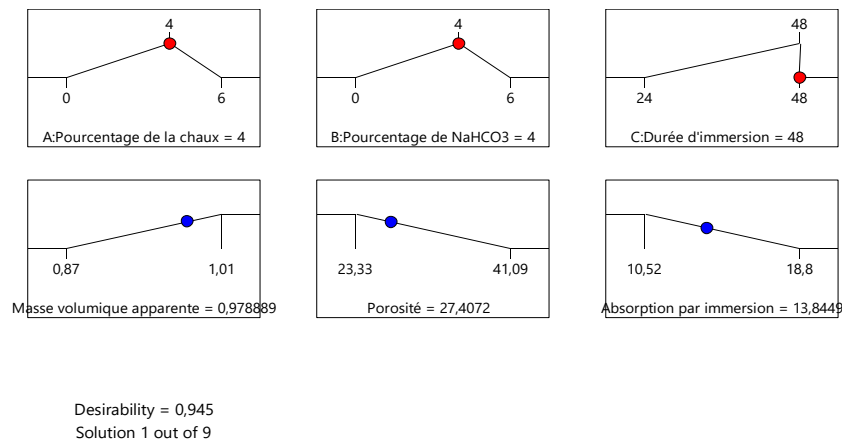


Figure III.20. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.

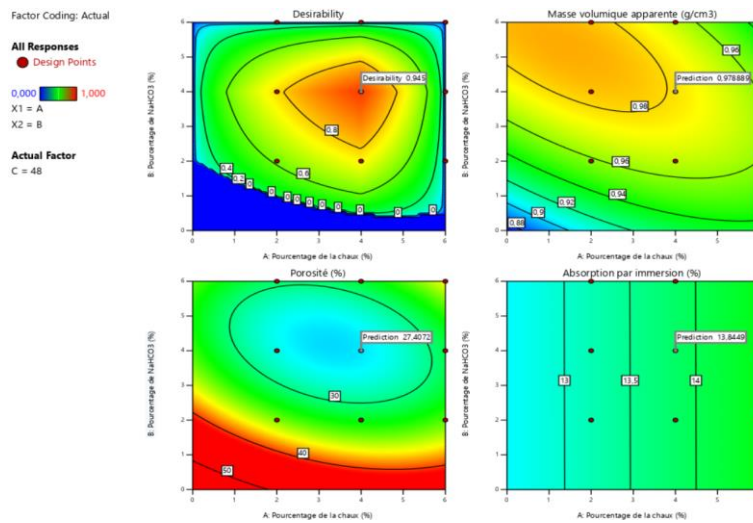


Figure III.21. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du gravier céramique recyclé et traité chimiquement.

III.3.3.3. Données

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A : Pourcentage de la chaux	is target = 4	0	6	1	1	5
B: Pourcentage de NaHCO ₃	is target = 4	0	6	1	1	5
C: Durée d'immersion	is target = 48	0	48	1	1	5
Masse volumique apparente	maximize	0,87	1,01	1	1	1
Porosité	minimize	23,33	41,09	1	1	1
Absorption par immersion	minimize	10,52	18,8	1	1	1

III.3.3.4. Solutions

9 Solutions found

Number	Pourcentage de la chaux	Pourcentage de NaHCO ₃	Durée d'immersion	Masse volumique apparente	Porosité	Absorption par immersion	Desirability	
1	4,000	4,000	48,000	0,979	27,407	13,845	0,945	Selected

Solution optimale (Solution 1, désirabilité = 0,945) :

A = 4% chaux, B = 4% NaHCO₃, C = 48h.

Masse volumique = 0,979 g/cm³, Porosité = 27,407%, Absorption = 13,845 %.

Bonne maximisation de la masse volumique, mais la porosité reste élevée.

III.3.4. Gravier du béton de démolition

III.3.4.1. Modèle et facteurs significatifs

Masse volumique apparente : $+1,21 - 0,0069A - 0,0044B + 0,0079C + 0,0056AB + 0,0050AC + 0,0113BC + 0,0000A^2 + 0,0056B^2 - 0,0127C^2$. **(III.10)**

Porosité : $+10,51 - 0,4856A - 0,4431B - 0,9622C + 0,6919AB + 0,0825AC + 0,4575BC - 0,1013A^2 + 0,1800B^2 - 0,5242C^2$. **(III.11)**

Absorption par immersion : $+3,78 - 0,0167A - 0,2417B - 0,0756C + 0,2776AB - 0,0024AC - 0,0274BC$. **(III.12)**

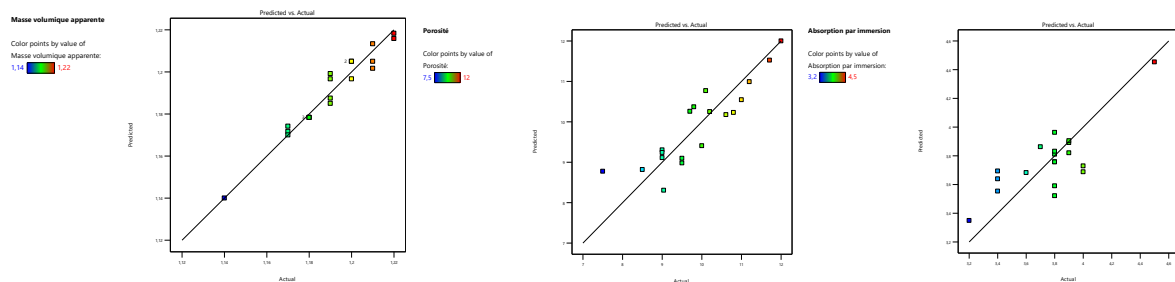


Figure III.22. Résultats actuel et prédictif de la masse volumique, de la porosité et de l'absorption du gravier béton de démolition et traité chimiquement.

III.3.4.2. Coefficient de corrélation

	R^2	Adjusté R^2
Masse volumique apparente	0,9486	0,8972
Porosité	0,7810	0,5621
Absorption par immersion	0,6213	0,4319

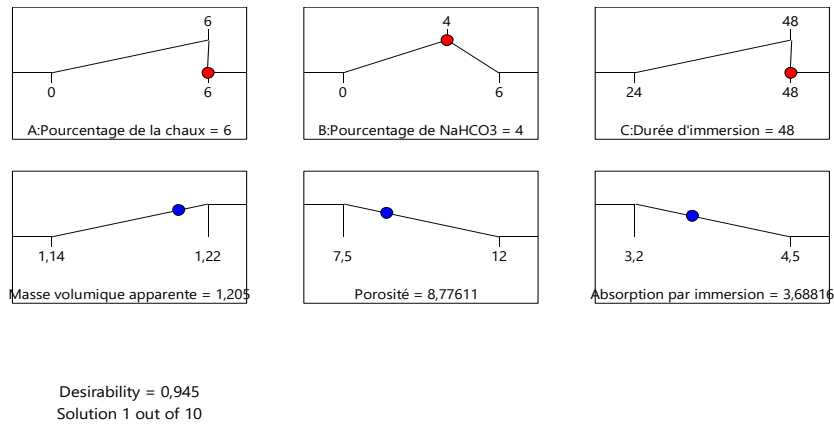


Figure III.23. Meilleure solution d'optimisation par RSM des propriétés physiques du gravier béton de démolition et traité chimiquement.

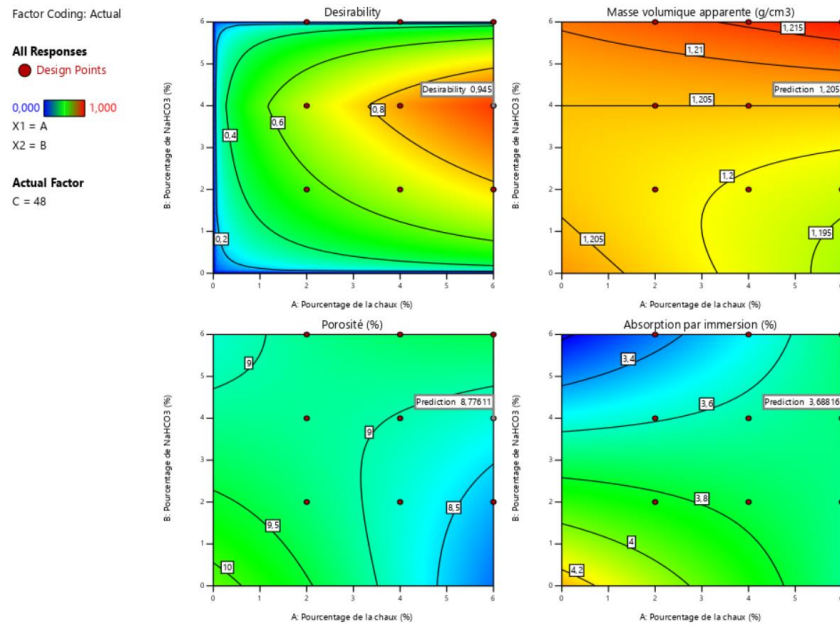


Figure III.24. Courbes de désirabilité et des propriétés physiques optimisées (masse volumique apparente, porosité et absorption par immersion) du du gravier béton de démolition et traité chimiquement.

III.3.4.3. Données

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A: Pourcentage de la chaux	is target = 6	0	6	1	1	5
B: Pourcentage de NaHCO ₃	is target = 4	0	6	1	1	5
C: Durée d'immersion	is target = 48	0	48	1	1	5
Masse volumique apparente	maximize	1,14	1,22	1	1	1
Porosité	minimize	7,5	12	1	1	1
Absorption par immersion	minimize	3,2	4,5	1	1	1

III.3.4.4. Solutions

10 Solutions found

Number	Pourcentage de la chaux	Pourcentage de NaHCO ₃	Durée d'immersion	Masse volumique apparente	Porosité	Absorption par immersion	Desirability	
1	6,000	4,000	48,000	1,205	8,776	3,688	0,945	Selected

Solution optimale (Solution 1, désirabilité = 0,945) :

A = 6% chaux, B = 4% NaHCO₃, C = 48h.

Masse volumique = 1,205 g/cm³, Porosité 8,776%, Absorption = 3,688%,

Bonne maximisation de la masse volumique et minimisation de la porosité et de l'absorption.

III.3.5. Synthèse globale

III.3.5.1. Facteurs clés

Chaux (A) : Significative pour la masse volumique dans le sable et le gravier de béton de démolition, mais moins pour les matériaux céramiques.

NaHCO₃ (B) : Impact fort sur la porosité (sable et gravier céramique, gravier béton) et parfois sur l'absorption.

Durée d'immersion (C) : Cruciale pour la masse volumique (gravier céramique, sable béton) et l'absorption (gravier céramique), 48h est souvent préférable à 24h, sauf pour le sable céramique (24h optimal).

Interactions : AB et AC sont souvent significatives, indiquant des effets combinés entre chaux et NaHCO₃ ou durée.

III.3.5.2. Optimisation

Sable céramique : Bonne masse volumique, mais porosité élevée (34,7%) avec 6% chaux, 6% NaHCO₃, 24h.

Gravier béton : Excellents résultats avec 6% chaux, 4% NaHCO₃, 48h (faible porosité/absorption).

Gravier céramique : Masse volumique correcte, mais porosité élevée (27,4%) avec 4% feu, 4% NaHCO₃, 48h.

III.3.5.3. Synthèse

Sable de céramique : Le NaHCO₃ influence fortement la porosité, et l'interaction chaux-NaHCO₃ est clé pour la masse volumique et l'absorption. Une durée de 24h semble suffisante pour optimiser les propriétés.

Sable de béton de démolition : Le traitement avec 2% de chaux et 6% de NaHCO₃ pendant 48h optimise les propriétés, avec la chaux et la durée d'immersion jouant un rôle clé pour la masse

volumique. Les modèles pour porosité et absorption montrent une significativité limitée, suggérant une possible réduction de modèle.

Gravier de céramique : La durée d'immersion (48h) est le facteur dominant pour la masse volumique et l'absorption, tandis que le NaHCO_3 influence fortement la porosité. Les modèles quadratiques capturent bien les effets non linéaires.

Gravier de béton de démolition : Le NaHCO_3 et la chaux, avec une immersion de 48h, optimisent les propriétés. Le modèle quadratique pour la masse volumique est robuste, mais les modèles pour porosité et absorption pourraient bénéficier d'une réduction.

En conclusion, le traitement chimique avec chaux et NaHCO_3 améliore significativement les propriétés des matériaux recyclés, avec des conditions optimales variant selon le matériau. Le gravier de béton de démolition offre les meilleures performances, tandis que les matériaux céramiques nécessitent des ajustements pour réduire la porosité.

III.4. Conclusion

L'étude a permis de montrer l'efficacité des différentes méthodes de traitement des granulats recyclés. La méthode de colmatage a amélioré la résistance et la densité des agrégats, tandis que les traitements chimiques ont contribué à améliorer la durabilité et l'adhérence. Les résultats montrent qu'il est important d'affiner et d'optimiser ces traitements pour obtenir de meilleures performances, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace et durable des déchets de construction dans les projets de génie civil.



Conclusion

Généralités



Conclusion Générale

Le secteur de la construction connaît une évolution rapide qui impose de nouveaux défis liés à la disponibilité des matériaux et à la réduction de l'impact environnemental résultant de l'exploitation des ressources naturelles et de l'accumulation des déchets de démolition. Dans cette optique, le recyclage des matériaux de construction représente une stratégie durable, permettant de redonner une seconde vie à des déchets inertes tels que le béton et la céramique, en les intégrant comme matériaux alternatifs dans les projets modernes.

Ce travail s'est inscrit dans cette démarche en étudiant les méthodes d'amélioration de la qualité des granulats recyclés issus de déchets de béton et de céramique. L'objectif principal était de surmonter les limitations de ces granulats, notamment leur forte porosité, leur capacité élevée d'absorption et leur faible masse volumique, qui les rendent moins performants que les granulats naturels.

Les résultats expérimentaux ont montré que certaines techniques de traitement, en particulier la méthode de colmatage et le traitement chimique, ont permis une amélioration significative des propriétés physiques des granulats. À titre d'exemple, Sable béton : Meilleure performance globale (masse volumique élevée, faible porosité/absorption) avec 2% chaux, 6% NaHCO_3 , 48h.

Sable céramique : Bonne masse volumique, mais porosité élevée (34,7%) avec 6% chaux, 6% NaHCO_3 , 24h.

Gravier béton : Excellents résultats avec 6% chaux, 4% NaHCO_3 , 48h (faible porosité/absorption).

Gravier céramique : Masse volumique correcte, mais porosité élevée (27,4%) avec 4% feu, 4% NaHCO_3 , 48h.

À la lumière de ces résultats, nous encourageons les futurs chercheurs à poursuivre dans cette voie, en explorant d'autres techniques de traitement telles que le traitement thermique ou l'utilisation de matériaux réactifs chimiques, tout en maintenant la rigueur expérimentale adoptée dans ce travail. Il serait également pertinent d'évaluer les performances de ces granulats dans des formulations de béton réelles afin de confirmer leur aptitude à l'emploi.

Ainsi, ce mémoire met en valeur l'importance de la valorisation des matériaux recyclés en tant que ressource alternative viable, et constitue une contribution concrète vers un secteur de la construction plus durable, basé sur l'innovation et la réutilisation raisonnée des ressources.



Références

- [1]. HIOUN MOHAMED ANIS. (Octobre 2020). Recherche bibliographique sur la durabilité du béton à base de verre (Mémoire de Mastère, l'Université de Guelma).
- [2]. Bensafi boucif et Belkacem oussama Soufyane. (2017/2018). Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température (Mémoire de Mastère, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent).
- [3]. ATCHI Sofiane et BOUYAHIA Mohammed. (Juin 2006). RECYCLAGE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION (diplôme d'ingénieur d'état en génie civil, Ecole Nationale Polytechnique).
- [4]. Cours de Dr. MS Ammari, Cours de Matériaux Recyclés, Université Echahid Hamma Lakhdar, 2024/2025.
- [5]. GUIRAUD, Patrick. La méthanisation [en ligne]. Infociments, mai 2017. Disponible à l'adresse : <https://www.infociments.fr/ouvrages-au-service-des-energies-renouvelables/la-methanisation>
- [6]. Pr. MOUSSACEB. Karim "GÉNÉRALITÉS SUR LA VALORISATION ET LE RECYCLAGE DES MATERIAUX" CHAPITRE II, Université de Béjaïa, 2017.
- [7]. ATCHI Sofiane et BOUYAHIA Mohammed. (Juin 2006). RECYCLAGE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION (diplôme d'ingénieur d'état en génie civil, Ecole Nationale Polytechnique).
- [8]. Dazeley, P. (2021). Le b.a.-ba du tri des déchets [photographie]. Radio France. https://www.radiofrance.fr/s3/cruiser-production/2021/03/3c8224cb-ecdf-4876-a618-f483d4c02a12/860_06-04-21_poubelle_peter_dazeley_gettyimages-1138822598.jpg
- [9]. Écominéro. (Sans date). Reprise des déchets inertes : Écominéro édite un guide pratique. Actu-Environnement. <https://www.actu-environnement.com>
- [10]. BS Environnement. (Sans date). Camion de pompage des déchets non dangereux. Récupéré de https://www.bsenvironnement.fr/dyn/dechets/bonneval_0282.jpg
- [11]. Ouladkaddour, L., & Zian, H. (2018). Récupération & traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques [Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. DSpace Tlemcen. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/13002>
- [12]. Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons (4^e éd.). Éditions Eyrolles.
- [13]. Ollivier, J.-P. (2012). Propriétés physiques du béton et de ses constituants. Paris : Eyrolles.
- [14]. Nigri, G. (2020). Technologie du béton – Cours. Université 8 Mai 1945 Guelma, Département de Génie Civil.
- [15]. Bourdot, A., & Remond, S. (2005). Recyclage du béton : état de l'art. Techniques de l'Ingénieur, C7420.
- [16]. Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research, 34(1), 31–36.
- [17]. Gómez-Soberón, J. M. V. (2004). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. Cement and Concrete Research, 32(8), 1301–1311.

- [18]. Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., & Narikawa, M. (2007). Application des granulats recyclés grossiers mélangés dans la construction en béton. *Construction and Building Materials*.
- [19]. Abadou, Y. (2018). Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune (Thèse de doctorat). École Nationale Polytechnique.
- [20]. Vincenzini, P. (1991). *Ceramic Materials : Science and Engineering*. Elsevier Applied Science.
- [21]. Petit, S., Decarreau, A., & Bouchet, A. (1999). Properties and applications of smectites in the ceramic industry. *Applied Clay Science*, 15(1–2), 49–56.
- [22]. Shima, H., Tateyashiki, H., & Yoshida, Y. (2005). Thermal stresses are generated which results in gradual loosening and removal of attached mortar interface due to dehydration.
- [23]. Guerzou, A., Abdelkader, B., & Gomes, M. (2018). The water absorption rate of recycled concrete aggregate is influenced by various factors such as larger size aggregates.
- [24]. Guneyisi, E., Gesoglu, M., & Ozturan, T. (2014). The effects of various acid concentrations and treatment times on the characteristics of aggregate and concrete.
- [25]. Vengadesh, M. R., & Ramasamy, V. (2020). Different treatment methods including carbonation and wrapping, cement treatment, mineral additives, modified mixer, and mineral admixtures.
- [26]. Tam, V. W. Y., GAO, X. F., & Tam, C. M. (2016). Improving the properties of recycled concrete aggregates through thermal treatment.
- [27]. Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.
- [28]. Wang, J., Pang, S., Zhan, X., Wei, W., Li, X., Wang, L., Huang, X., & Zhang, L. (2025). Improving recycling concrete aggregate performance via microbial-induced calcium carbonate precipitation: Effect of bacterial strains and mineralisation conditions. *Building*, 15(5), 825.
- [29]. Delaforge, P.-L. (2019). Traitement des granulats de béton recyclés pour améliorer leurs propriétés (Mémoire de fin d'études). Université de Liège.
- [30]. Bastien, M.-J. (2016). Valorisation des granulats de béton recyclé et des granulats de verre dans le béton (Mémoire de maîtrise). Université de Sherbrooke.
- [31]. Cerema. (2016). Guide technique : Graves non traitées recyclées.
- [32]. Martinez Hernandez, H. (2022). Amélioration de granulats de béton recyclé par bioprécipitation (Thèse de doctorat). Université Gustave Eiffel.
- [33]. Bru, K., Touzé, S., Bourgeois, F., Lippiatt, N., & Ménard, Y. (2015). Assessment of a selective fragmentation technique for recycling concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 307–315.
- [34]. C2CA project. (2011–2015). Advanced technologies for the production of cement and clean aggregates from construction and demolition waste (EU FP7 Project).
- [35]. World Health Organization. (2005). Bentonite, kaolin, and selected clay minerals (Environmental Health Criteria 231). Geneva : World Health Organization.

- [36]. Cerema. (S.d.). Économie circulaire dans le domaine de la construction [Image]. Cerema. <https://www.cerema.fr>
- [37]. European Committee for Standardization (CEN). (2013, July). EN 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption. Brussels : CEN.
- [38]. AFNOR. (1990, décembre). Mesures des masses volumiques, coefficients d'absorption et teneur en eau des sables. Paris : AFNOR.
- [39]. AFNOR. (1997, septembre). NF EN 933-1 : Essai pour déterminer les caractéristiques des granulats – Partie 1 : Méthode de détermination de la courbe granulométrique. AFNOR.
- [40]. AFNOR. (1999, décembre). NF EN 933-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques des granulats – Partie 8 : Évaluation de la forme des grains – Coefficient d'aplatissement. AFNOR.
- [41]. AFNOR. (2013, août). NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique et de l'absorption d'eau. AFNOR.
- [42]. Gupta, T., Siddique, S., & Sharma, R. K. (2019). Influence of chemical treatment on the physical properties of recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 211, 964–973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.272>
- [43]. Liu, X., Zhang, Y., & Wang, J. (2020). Improvement of recycled ceramic aggregate properties using alkaline treatment. *Construction and Building Materials*, 254, 119248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119248>
- [44]. Zhang, Y., Li, H., Wang, K., & Chen, Y. (2019). Effect of alkaline treatment on the physical properties of recycled ceramic aggregates. *Journal of Building Materials Research*, 23(4), 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.jbmres.2019.04.003>
- [45]. Kikuchi, R., & Kawai, K. (2007). The utilization of waste ceramic materials as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 27(12), 1705–1710. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.002>
- [46]. Poon, C.S., & Chan, D. (2006). Effect of waste glass addition on the properties of concrete. *Waste Management*, 26(8), 866–872.
- [47]. Li, X., Sun, Z., & Zhang, Y. (2019). Enhancement of recycled concrete aggregate properties through chemical treatment with lime and sodium bicarbonate. *Construction and Building Materials*, 215, 592–601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.165>
- [48]. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- [49]. Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- [50]. Zhang, X., Li, Y., Wang, J., & Chen, H. (2021). Chemical treatment of recycled concrete aggregates: Effects on porosity and mechanical properties. *Journal of Cleaner Production*, 280, 123456. <https://doi.org/10.xxxx/jclepro.xxxxxxx>

[51]. Wang, L., Chen, X., & Zhang, Y. (2020). Enhancement of recycled concrete aggregate properties by chemical treatment: Effects on porosity and strength. *Construction and Building Materials*, 250, 118850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118850>

[52]. Aquaportail. (Sans date). Composteur en bois [Photographie]. Aquaportail <https://www.aquaportail.com/pictures1707/composteur-bois-pas-cher.jpg>