



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Spécialité** : Travaux Publics  
**Option** : Géotechniques

Présenté par :  
Mlle KHEDIM HADJER

Mlle BECHEDDAD FERIEL

*Sujet du mémoire*

**Influence des taux de remplacement des granulats recyclés  
sur les propriétés mécaniques des bétons recyclés**

*Soutenu publiquement le 25 /06/2025 devant le jury composé de :*

Mr H. BEKKI	Président
Mlle Z. RENNAK	Encadrante
Mr B. SERBAH	Examineur
Mme A. DRAOUI	Examinatrice

**PROMOTION : 2024/2025**

## Remerciements

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah, qui nous a guidés et accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement Mademoiselle Z. RENNAK, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement rigoureux tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son encadrement a été pour nous d'une grande richesse, tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Nous adressons également nos remerciements les plus respectueux aux membres du jury, Monsieur H. BEKKI, Monsieur B. SERBAH et Madame A. DRAOUI, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leur soutien tout au long de notre parcours universitaire.

Nous exprimons également notre reconnaissance aux ingénieurs et techniciens du laboratoire de génie civil, pour leur aide précieuse et leur collaboration durant la phase expérimentale.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles et nos proches, et en particulier nos parents, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur encouragement permanent, qui ont été essentiels à notre

## Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience, leur soutien indéfectible et leur présence constante à mes côtés tout au long de ces longues années d'études.

À mes sœurs Atika et Hadjer, pour leur affection, leurs encouragements et leur confiance en moi.

À toute ma famille, pour leur bienveillance et leurs prières silencieuses.

À mes amies et mes camarades, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, de solidarité, de fatigue mais aussi de réussite.

À ma professeure encadrante, pour ses conseils éclairés, son accompagnement rigoureux et son soutien tout au long de ce travail.

À mon binôme, pour sa collaboration précieuse, son implication, et les efforts partagés tout au long de cette aventure.

Et enfin, à toutes celles et ceux qui aiment le travail bien fait, et qui ne reculent jamais face aux défis de la vie.

*Feriel*

## Dédicace

Je souhaite dédier ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mes frères Mohamed et Ilyes, et à mes sœurs Bouchra et Yasmine, pour leur présence constante, leur affection et leurs encouragements.

À ma grand-mère, dont les prières et la tendresse m'ont toujours accompagnée.

À mes chères amies Feriel et Fariha, pour leur amitié sincère, leur écoute et leur soutien moral.

À ma professeure encadrante, pour ses conseils précieux, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de ce travail.

Et enfin, à toute ma famille, pour l'amour et la confiance qu'ils m'ont toujours accordés.

*Hadjer*

## Résumé

Face à la pression croissante exercée sur les ressources naturelles et aux exigences environnementales dictées par les principes du développement durable, la réutilisation et la valorisation des déchets issus de la construction et de la démolition s'imposent aujourd'hui comme une alternative prometteuse. Dans le domaine du génie civil, ces démarches s'inscrivent pleinement dans une logique d'économie circulaire visant à limiter l'exploitation des granulats naturels tout en réduisant l'impact environnemental des matériaux de construction.

Ce travail s'inscrit dans cette perspective en étudiant les propriétés physico-mécaniques des bétons fabriqués avec des granulats recyclés, plus précisément du gravier recyclé (GR) en substitution partielle du gravier naturel (GN). Des mélanges ont été formulés avec des taux de substitution en GR de 0 %, 25 %, 50 % et 75 %. Afin de limiter l'effet de l'absorption d'eau des GR sur l'ouvrabilité du béton, deux méthodes ont été considérées : la pré-saturation des granulats recyclés et l'ajustement de l'eau de gâchage en fonction de l'eau absorbée après 24 heures.

Des essais mécaniques ont été menés, notamment des tests de résistance à la compression et à la traction par flexion, dans le but d'évaluer les performances mécaniques des bétons produits. Les résultats obtenus permettent d'apprécier l'influence du taux de substitution sur les caractéristiques du béton, et apportent des éléments de réflexion quant à la faisabilité technique de l'intégration des granulats recyclés dans les bétons de structure.

**Mots-clés** : Béton de granulats recyclés, valorisation, déchets de démolition, granulats recyclés, performances mécaniques.

## **Abstract**

In response to the growing pressure on natural resources and the environmental requirements dictated by sustainable development principles, the reuse and valorization of construction and demolition waste have emerged as promising alternatives. In the field of civil engineering, these approaches are part of a broader circular economy strategy aimed at limiting the exploitation of natural aggregates while reducing the environmental impact of construction materials.

This study aligns with this perspective by investigating the physico-mechanical properties of concrete incorporating recycled aggregates, specifically recycled gravel (RA) as a partial replacement for natural gravel (NA). Concrete mixtures were prepared with substitution rates of 0%, 25%, 50%, and 75%. To mitigate the effect of water absorption by RA on the workability of the concrete, two methods were adopted: pre-saturation of the recycled aggregates and adjustment of the mixing water based on the quantity absorbed after 24 hours.

Mechanical tests were carried out, including compressive strength and flexural tensile strength tests, to assess the mechanical performance of the produced concretes. The results provide insight into the influence of substitution rates on concrete characteristics and offer valuable guidance on the technical feasibility of using recycled aggregates in structural concrete.

**Keywords** : Recycled aggregate concrete, valorization, demolition waste, recycled aggregates, mechanical performance.

## الملخص

في ظل الضغط المتزايد على الموارد الطبيعية والمتطلبات البيئية التي تفرضها مبادئ التنمية المستدامة، أصبحت إعادة استخدام وتثمين النفايات الناتجة عن الهدم والبناء خيارًا واعدًا. ويُعد هذا النهج في قطاع الهندسة المدنية جزءًا من منطق الاقتصاد الدائري الذي يهدف إلى الحد من استنزاف الركام الطبيعي وتقليل الأثر البيئي لمواد البناء.

يُدرج هذا العمل ضمن هذا الإطار، حيث يهدف إلى دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المصنّعة باستعمال حصى معاد تدويره، وخاصة الحصى المعاد تدويره (GR) كبديل جزئي عن الحصى الطبيعي (GN). تم تحضير خلطات خرسانية بنسب تعويض مختلفة للحصى المعاد تدويره: 0%، 25%، 50% و75%. وللتقليل من تأثير امتصاص الماء على سيولة الخرسانة، تم اعتماد طريقتين: التشبع المسبق للحصى المعاد تدويره وتعديل كمية ماء الخلط بناءً على كمية الماء الممتصة خلال 24 ساعة.

أُجريت اختبارات ميكانيكية، خاصة مقاومة الضغط والانحناء، لتقييم أداء الخرسانة الناتجة. وقد أظهرت النتائج تأثير نسبة التعويض على خصائص الخرسانة، ووقّرت مؤشرات مهمّة حول الجدوى التقنية لاستخدام الحصى المعاد تدويره في خرسانة الهياكل.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة الركام المعاد تدويره، تثمين النفايات، نفايات الهدم، ركام معاد تدويره، الأداء الميكانيكي.

## Table de matière

<i>Remerciements</i> .....	I
<i>Dédicace</i> .....	II
<i>Résumé</i> .....	IV
<i>Table de matier</i> .....	VII
<i>Liste des figures</i> .....	VII
<i>Liste des tableaux</i> .....	XII
<i>Liste d'abréviation</i> .....	XIV
<i>Introduction générale</i> .....	1

### Chapitre 1

#### Granulats recyclés

<i>1.1 Introduction</i> .....	5
<i>1.2 Définition</i> .....	6
<i>1.3 Description des granulats recyclés</i> .....	6
<i>1.4 Sources des granulats recyclés</i> .....	7
<i>1.5 Définition des déchets de chantier</i> .....	8
<i>1.6 Déchets de construction/ déconstruction (C&amp;D)</i> .....	9
<i>1.7 Procédé de recyclage</i> .....	13
<i>1. 8 Intérêt du recyclage dans le génie civil</i> .....	15
<i>1.9 Production des granulats recyclés</i> .....	16
<i>1.9.1 Concassage et déferailage</i> .....	16
<i>1.9.2-Tri par flottaison</i> .....	16
<i>1.9.3 Concassage secondaire</i> .....	16
<i>1.10 Composition du granulat recyclé</i> .....	17
<i>1.10.1 Mortier attaché aux granulats recyclés</i> .....	18
<i>1.11 Classification des granulats recyclés</i> .....	19
<i>1.12 Les classes principales des granulats recyclés</i> .....	20
<i>1.13. Les Propriétés des granulats</i> .....	22
<i>1.13.1 Propriétés physiques des granulats recyclés</i> .....	22
<i>a) Taille des granulats recyclés</i> .....	23
<i>b) Masse volumique</i> .....	24
<i>et recyclés</i> .....	24
<i>c) Absorption d'eau</i> .....	24
<i>d) Porosité</i> .....	26
<i>1.13.2 Propriétés mécaniques des granulats recyclés</i> .....	26
<i>a) Résistance à la fragmentation</i> .....	27
<i>1.14 Utilisation Des Granulat Recyclé</i> .....	28
<i>1.15 Les Avantages de l'emploi des granulats recyclés</i> .....	28
<i>1.16 Conclusion</i> .....	29

### Chapitre 2

#### *les propriétés physico- mécaniques des bétons recyclés à base des granulats recyclés.*

<i>2.1 Introduction</i> .....	31
<i>2.2 Définition</i> .....	31
<i>2.3 Pourcentage optimal du granulat recyclé</i> .....	32
<i>2.4 Propriétés physiques du béton recyclé</i> .....	32
<i>2.4.1 Propriétés à l'état frais</i> .....	32

a) Affaissement et maniabilité.....	32
b) Masse volumique.....	33
2.4.2 Propriétés à l'état durci.....	34
a) Porosité.....	34
b) Absorption d'eau.....	36
c) Masse volumique.....	37
d) Perméabilité.....	38
2.5 Propriétés mécaniques du béton recyclé.....	38
2.5.1 Résistance à la compression.....	38
2.5.2 Résistance à la traction par flexion.....	41
2.5.3 Résistance par fendage.....	42
2.5.4 Module d'élasticité.....	43
2.6 Durabilité du béton recyclé.....	45
2.6.1 Absorption d'eau.....	45
2.6.2 Perméabilité.....	45
2.7 Conclusion.....	45

### Chapitre 3

#### Matériaux utilisés

3.1.Introduction.....	48
3.2.Matériaux utilisés.....	48
3.2.1. Le ciment.....	48
3.2.2. Les granulats.....	49
a) Sable naturel.....	49
b) Sable de carrière.....	50
c) Sable corrigé.....	51
d) Gravier.....	51
1. Gravier naturel.....	52
2. Gravier recyclé.....	52
3.2.3. Eau de gâchage.....	53
3.3.1 Analyse granulométrique [NF P 18-540].....	53
3.3.2 Module de finesse [NFP 18-540].....	54
3.3.3 La masse volumique apparente des matériaux [la norme NF P 18-554].....	54
3.3.4. La masse volumique absolue [NF P 18-555].....	56
3.3.5 Equivalent de sable [NF P 18-598].....	57
3.3.6 Coefficient d'Absorption d'Eau [NF P 18-554].....	59
3.4.Essais mécaniques :.....	60
3.4.1 Essai de dureté des graviers (coefficient los Angeles LA) [NF P 18-573].....	60
3.4.2 Essai de Micro Deval [NF P 18.572].....	62
3.5.Formulations Adoptées.....	64
a) Critère de maniabilité.....	64
b) Critère de résistance.....	64
c) Choix du ciment.....	65
d) Détermination du rapport C/E.....	65
e) Détermination de C.....	65
3.6.Préparation des éprouvettes :.....	67
3.7. Malaxage de béton [NF P 18 404] :.....	67
3.8. Essai Sur Béton Frais.....	70
3.8.1. Affaissement au cône d'Abrams [NF EN 12350-2].....	70
3.8.2.Masse volumique à l'état frais.....	71

3.9. Essai Sur Béton à l'état durci : .....	71
3.9.1. La masse volumique [NF EN 12390] .....	71
3.9.2. Essai de compression [NF EN 18-455] .....	72
3.9.3. Essai de traction par flexion .....	73
3.10. Conclusion .....	74

## *Chapitre 4*

### *Résultats et interprétations*

4.1 Introduction.....	78
4.2. Résultat des essais physiques .....	78
4.2.1. Analyse granulométrique .....	78
a) Gravier naturel.....	78
b) Gravier recyclé.....	79
c) Sable carrière : .....	81
d) Sable corrigé : .....	82
4.2.2. Equivalent de sable .....	86
a) Sable fin.....	86
b) Sable corrigé.....	87
4.2.3. La masse volumique .....	87
4.2.4. Le Coefficient d'Absorption d'Eau.....	89
4.3. Résultats mécanique .....	90
4.3.1. Essais Los Angles.....	90
4.3.2. Essais Micro-Deval .....	91
4.4 Formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse .....	91
4.4. Résultats des essais du béton à l'état frais .....	92
4.4.1. Affaissement au cône d'Abrams .....	92
4.4.2. La masse volumique .....	93
4.5. Résultats des essais du béton à l'état durci : .....	95
4.5.1. La masse volumique .....	95
4.5.2. Essai de compression .....	97
4.5.3. Essai de traction par flexion .....	99
4.6. Conclusion .....	101
Conclusion générale et perspectives .....	102
Références bibliographiques .....	106
Annexes .....	

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure 1.1 : Granulats recyclé [Vinci, King Matériaux].	6
Figure 1.2: types des granulats recyclés.	7
Figure 1.3 : Le cycle de recyclage.	8
Figure 1.4 : Déchets de chantier.	9
Figure 1.5: les déchets de construction et de démolition [24].	10
Figure 1.6 : Déchets inertes [ hubency ].	12
Figure1.7 : Déchets non dangereux	12
Figure1.8 : Déchets dangereux	12
Figure 1.9 : Répartition volumique (en %) des déchets du BTP [27].	13
Figure 1.10:Représentation schématique du processus de recyclage ordinaire	15
Figure 1.11 :Production des granulats recyclés	17
Figure1.12 : Mortier attaché [ResearchGate].	19
Figure 1.13 :Types de granulat en fonction du mortier attaché.	19
Figure 1.14: A- granulat de béton de démolition.	21
Figure 1.15 : B- granulat de maçonnerie.	21
Figure 1.16 : C-granulat de débris hydrocarbonés.	22
Figure 1.17: D-granulat de débris mixtes.	22
Figure 1. 18 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés[60].	25
Figure 1- 19: Coefficients Los Angeles (LA) pour les granulats recyclés et naturels, en fonction de nombre de tours.	27

### Chapitre 2

Figure 2.1:Béton recyclé [Jungheinrich Profishop].	31
Figure 2.2 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams [MonCoffrage.com].	33
Figure 2.3 :Masse volumique à l'état frais du béton en fonction de différents pourcentages et types de granulat recyclé [78].	34
Figure 2.4: Porosité accessible à l'eau pour des bétons à différents taux de substitution après 90 jours de cure dans l'eau (BR : béton de référence, S30G30 : 30 % de substitution, G100 : 100 % de substitution) (donnée en vert : E/L)[16].	35
Figure 2.5: Absorption d'eau de béton recyclé [83].	37
Figure 2.6 :Masse volumique (à l'état frais et durci) des bétons suivant les taux de substitution [84].	38
Figure 2.7: Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR [88].	39
Figure 2.8 : Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution des granulats recyclés (BR : béton de référence, S30G30 : béton avec 30 % de sable, 30 % de gravillons substitués, G100 : béton avec 100 % de gravillons substitués) (donnée en vert : E/L) [16].	40
Figure 2.9 :Résultats de résistance à la traction par flexion [97].	42
Figure 2.10:Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR [97].	43
Figure 2.11:Module d'élasticité des BGR en fonction du taux de GR [87].	44

### Chapitre 3

Figure 3.1 : Sac de ciment Awted. ....	49
Figure3.2 : Sable fin. ....	50
Figure 3.3 : Sable de carrière. ....	50
Figure3.4 : Sable corrigé.....	51
Figure3.5 : Gravier naturel. ....	52
Figure 3.6 : Gravier recyclé.....	53
Figure 3.7 : Procédé d'analyse granulométrique des granulats. ....	54
Figure 3.8 : Masse volumique apparente de : sable (a), de gravier naturel et recyclé (b) et ciment (c). ....	56
Figure 3.9: Masse volumique absolue du sable et gravier. ....	57
Figure 3.10 : Essai d'équivalent de sable. ....	59
Figure 3.11 : L'absorption d'eau d'un gravier recyclé. ....	60
Figure 3.12 : Essai Los Angeles sur (a) gravier naturel, (b) gravier recyclé. ....	62
Figure 3.13: Essai de Micro- Deval sur (a) gravier naturel, (b) gravier recyclé. ....	64
Figure 3.14 : Eprouvettes (cylindriques 16x32cm <sup>2</sup> et prismatique 10x10x40 cm <sup>3</sup> ). ....	67
Figure 3.15 : Malaxage de béton. ....	68
Figure 3.16 : Vibration de béton.....	69
Figure 3.17: Démoulage et conservation des éprouvettes dans l'eau. ....	69
Figure 3.18 : Affaissement au cône d'Abrams. ....	70
Figure 3.19: Détermination de la masse volumique à l'état frais.....	71
Figure 3.20 : Détermination de la masse volumique à l'état durci.....	72
Figure 3.21 : Essais de compression des éprouvettes cylindriques (16x32) cm <sup>2</sup> .....	73
Figure 3.22 : Essai de traction par flexion.....	74

### Chapitre 4

Figure 4 .1 :Sable corrigé obtenu par mélange de sable de carrière et sable fin. ....	83
Figure 4 .2 : Etude granulométrique du sable fin, sable de carrière et sable corrigé.....	84
Figure 4 .3 : Courbe granulométrique du sable corrigé, gravier naturel et recyclé. ....	85
Figure 4 .4 : Evolution de la masse volumique absolue du sable corrigé, gravier naturel et recyclé. ....	88
Figure 4 .5 : Evolution de la masse volumique apparente du sable corrigé, gravier naturel et recyclé. ....	88
Figure 4.6 : Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps des GN et GR.....	89
Figure 4.7 : Granulométrie du sable corrigé, gravier naturel et la courbe braisée.....	91
Figure 4.8 :Affaissement au cône d'Abrams des bétons (BO, BR25%, BR50% et BR75%)..	93
Figure 4.9 :Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état frais en fonction des taux de remplacement des GR. ....	94
Figure4.10:Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état durci en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge (éprouvettes cylindres). ....	96
Figure 4.11 : Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état durci en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge (éprouvettes prismatiques). ....	97
Figure 4.12: Variation de la résistance à la compression des BO et BR en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge. ....	98
Figure 4.13 : Variation de la résistance à la traction par flexion des BO et BR en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge. ....	100

## Liste des tableaux

### *Chapitre 1*

Tableau 1.1 : Composition des différents types de déchets du BTP [26].	11
Tableau 1.2 : Classification québécoise des MR/NQ 2560-600 [47]	20
Tableau 1.3: Composition de granulats recyclés de classe MR-2 [47].	20
Tableau : 1.4 – Granulométrie et proportion d'ancien mortier suivant la qualité du béton d'origine [50].	23
Tableau 1.5 : Tableau comparatif des masses volumiques de granulats naturels	24
Tableau 1.6 : comparaison de l'absorption d'eau des granulats naturels et recyclés selon les classes granulométriques.	25
Tableau 1.7 : Valeurs de la porosité en fonction des granulats.	26
Tableau 1.8 : Coefficient de Los Angeles (LA) et de Micro Deval (MDE) des granulats naturels et recyclés :	28

### *Chapitre 2*

Tableau 2.1 :- Absorption de l'eau pour bétons contenant les granulats recyclés[81].	36
Tableau 2.2 : Variation de la résistance à la compression des BGR à 28 jours.	40

### *Chapitre 3*

Tableau 3.1 : Coefficient $K_S$ et $K_P$ pour le calcul de $K$ .	66
Tableau 3.2 : Les valeurs convenables des granulats.	67

### *Chapitre 4*

Tableau 4.1 : Analyse granulométrique du gravier naturel.	78
Tableau 4.2 : Analyse granulométrique du gravier recyclé.	79
Tableau 4.3 : Analyse granulométrique du sable fin.	79
Tableau 4.4 : Analyse granulométrique de la sable carrière.	81
Tableau 4.5 : Analyse granulométrique du sable corrigé.	83
Tableau 4.6 : Valeurs d'ESV et ESP du sable fin.	86
Tableau 4.7 : Valeurs d'ESV et ESP du sable corrigé.	87
Tableau 4.8 : Masse volumique des matériaux absolue et apparent.	87
Tableau 4.9 : Les valeurs des variations des quantités d'eau absorbées par les granulats recyclés.	89
Tableau 4.10: Détermination du coefficient Los Angeles (LA) pour les graviers naturel et recyclé.	90
Tableau 4.11 : Détermination du coefficient MDE pour les graviers naturel et recyclé.	91
Tableau 4.12: Les volumes absolus des constituants du béton.	92
Tableau 4.13 : L'affaissement au cône d'Abrams des différents bétons.	92
Tableau 4.14 : Masse volumique du béton à l'état frais.	94
Tableau 4.15 : Masse volumique des bétons (Eprouvettes cylindriques).	95

Tableau 4.16 : Masse volumique des bétons (Eprouvettes prismatiques). .....	96
Tableau 4.17 : Résistance à la compression des bétons. ....	98
Tableau 4.18 : Résistance à la traction par flexion des BO et BR. ....	100

## Liste d'abréviation

*C&D : Construction et de démolition*

*GBR : Granulats de béton recyclé*

*GN : Granulats naturels*

*GR : Granulats recyclés*

*GGN : Gros granulats de béton naturel*

*GGR : Gros granulats de béton recyclé*

*BTP : Bâtiment et Travaux publics*

*BO : Béton ordinaire*

*BGN : Béton à base des granulats naturels*

*BGR : Béton à base des granulats recyclés*

*B.C : Béton de ciment*

---

## *Introduction générale*

---

## **Introduction générale**

Le béton demeure, de loin, le matériau de construction le plus utilisé à l'échelle mondiale, en raison de sa grande disponibilité, de sa facilité de mise en œuvre et de ses performances mécaniques adaptées à une large variété d'ouvrages. Que ce soit pour les infrastructures, les bâtiments résidentiels ou les ouvrages d'art, son usage est omniprésent dans le domaine du génie civil. Toutefois, cette consommation massive s'accompagne d'une exploitation intensive des ressources naturelles, notamment les granulats, qui représentent environ 60 à 75 % du volume total du béton.. La production mondiale annuelle de béton varie selon les sources entre 13 milliards[1] et 21 milliards de tonnes [2].. Dixit et al.[3] ont souligné que 49 % de la pierre brute, du gravier et du sable, 25 % du bois vierge et 16 % de l'eau sont consommés par le secteur de la construction. L'énorme demande concrète dans le secteur de la construction entraîne un énorme besoin d'agrégats. Le marché mondial des agrégats liés à la construction est d'environ 48,3 milliards de tonnes en 2015 [4]. Oikonomou [5] a prédit que la demande d'agrégats doublera au cours des deux prochaines décennies si le taux actuel de consommation de granulats et de béton se maintenait. Ainsi, la disponibilité des agrégats naturels. D'autre part, une grande quantité de déchets de construction et de démolition (C & D) est générée dans le monde entier, devenant une menace croissante pour l'environnement. La production annuelle de déchets C&D est d'environ 850 millions de tonnes dans l'UE [6]. En Chine, près de 50% des déchets solides municipaux sont occupés par des déchets C&D [7], environ 200 millions de tonnes de déchets de béton sont produites chaque année.

En raison de problèmes environnementaux liés à la gestion des déchets provenant de différentes industries au cours des dernières années, il devient de plus en plus nécessaire de rechercher des nouvelles techniques permettant l'inclusion de matériaux anciens dans la fabrication de nouveaux éléments, en cherchant à avoir une performance similaire à celle obtenue par le matériau original.

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde, après l'eau. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre, afin d'adopter des méthodes s'inscrivant dans un contexte de développement durable [8].

Dans le cadre de la réutilisation des matériaux, l'inclusion des déchets de construction dans la conception de nouvelles formulations de béton apparaît comme une alternative prometteuse pour aider à atténuer les problèmes associés aux effets suivants :

- a) le recyclage des matériaux de démolition d'anciennes structures civiles ;
- b) la manque des granulats naturels pour béton dans les grands centres urbains ;
- c) l'empreinte écologique associée aux travaux de construction et la production de granulats naturels dans les carrières ;
- d) la possible réduction de coûts de construction liés à la production des bétons avec de nouvelles matières premières ;
- e) la disposition de résidus et débris provenant de l'industrie de la construction dans les sites d'enfouissement [9] .

Pour diminuer ces effets, il faut passer d'une économie linéaire à une économie circulaire basée sur le concept des « 3 R (recycler, réutiliser et récupérer) » en considérant les déchets comme une source des produits lucratifs.

Les déchets inertes à base du béton peuvent ainsi être utilisés pour produire après tri, concassage et criblage des granulats de béton recyclé (GBR). Ces granulats sont, en général, utilisés dans les structures routières comme matériau lié ou non lié. Toutefois, dans l'objectif d'améliorer la circularité du béton, de valoriser de façon plus noble les GBR et de rapprocher la ressource (les sites de démolition urbains) des sites de construction, on cherche à développer depuis quelque temps le recyclage des GBR dans la fabrication de nouveaux bétons, en remplacement plus ou moins important des granulats naturels [10].

Ainsi, les propriétés du béton incorporant des granulats recyclés ont été évaluées tant à l'état frais qu'à l'état durci dans cette recherche. Cette analyse vise à vérifier la conformité de ces bétons aux exigences réglementaires en vigueur dans le domaine de la construction. Les formulations proposées cherchent à réduire de manière significative l'utilisation de granulats naturels, tout en maintenant les performances mécaniques du béton dans des niveaux acceptables pour une utilisation structurelle.

Les principaux paramètres étudiés dans ce travail sont le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés (0 %, 25 %, 50 % et 75 %) pouvant influencer fortement les caractéristiques du matériau final. Les essais portent principalement sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction, etc.) des bétons recyclés, comparées à celles d'un béton ordinaire de référence fabriqué exclusivement avec des granulats naturels. Une caractérisation approfondie des matériaux constituant granulats naturels, granulats recyclés, ciment, eau est également réalisée afin de mieux comprendre leur influence sur les performances globales du béton.

L'objectif spécifique de cette étude est de développer une formulation optimale de béton recyclé. Cette formulation devra présenter des propriétés physiques à l'état frais et durci comparables à celles du béton témoin, tout en intégrant un pourcentage maximal de granulats recyclés. Le critère principal retenu pour identifier cette formulation optimale repose sur l'évaluation conjointe de l'ouvrabilité, de la compacité et des performances mécaniques à court et moyen terme.

Ce mémoire est structuré en deux parties principales. La première, de nature théorique, prend la forme d'une synthèse bibliographique articulée autour de deux chapitres. Le premier chapitre aborde la problématique des déchets de construction et de démolition, leur gestion ainsi que leur valorisation par le recyclage, en insistant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés. Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés du béton recyclé, aussi bien à l'état frais (ouvrabilité, consistance, densité) qu'à l'état durci (densité, résistance mécanique).

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude expérimentale, structurée en deux chapitres. Le troisième chapitre présente en détail les matériaux utilisés pour la fabrication des différentes formulations de béton, ainsi que les méthodes d'essai adoptées, conformément aux normes internationales en vigueur. Le quatrième chapitre, quant à lui, est dédié à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux. Il vise à mettre en évidence l'influence du taux de substitution du gravier naturel (GN) par le gravier recyclé (GR) sur les propriétés physico-mécaniques des bétons étudiés.

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale qui vise à synthétiser les principaux renseignements tirés de l'ensemble du mémoire.

---

*Chapitre 1*  
*Granulats recyclés*

---

## **1.1 Introduction**

Notre objectif, dans ce premier chapitre, est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les granulats qui ont fait l'objet de recherche comme substitut de granulats naturels. Cette synthèse met en avant l'origine de ces granulats et aussi présente les performances des bétons confectionnés avec ces granulats recyclés.

L'activité du bâtiment requiert des quantités de matériaux (gravier, sable...) provenant principalement de sources naturelles et génère une importante quantité de déchets. Les préoccupations environnementales croissantes ; la saturation des sites d'enfouissement couplée aux coûts d'enfouissement des déchets ; l'épuisement rapide des granulats naturels dans certains pays

développés, ainsi que la limitation des installations de stockage des déchets, incitent à la réduction de l'empreinte écologique du traitement des déchets et encouragent le recyclage des déchets de béton issus de la démolition pour faire de nouveaux bétons [11]. Ces flux importants de déchets solides trouvent alors des applications dans la construction durable [12].

Les granulats recyclés sont des matériaux alternatifs aux matériaux naturels extraits des carrières de roches massives ou meubles pour le secteur de la construction. Ce sont des matériaux fabriqués à partir de déchets inertes, eux-mêmes issus de chantiers de construction et de déconstruction par un processus industriel de concassage et criblage sur des plateformes spécifiques de recyclage

L'extraction abusive de granulats naturels a été mise en évidence au niveau international, du fait de l'épuisement de la quantité de ressources primaires, dans un contexte de développement durable [13].

Le domaine de la construction est responsable d'importants flux de déchets, ainsi que de consommations de matières et d'énergie[14].

Le béton de granulats recyclés de démolition peut résoudre ce problème de pénurie et réduire la pollution et l'empreinte écologique associées à la construction [15].

En effet, lors de leur recyclage, les GR acquièrent des propriétés faibles par comparaison avec les granulats naturels, notamment une forte porosité et un fort coefficient d'absorption d'eau, ces propriétés étant affectées par l'ancien mortier attaché qui est très poreux. Ces faibles propriétés affectent lors de leur réutilisation dans les bétons, la résistance mécanique et la durabilité[16].

Face aux besoins toujours croissants de ressources matérielles et aux exigences de la préservation de l'environnement, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de récupération des déchets et sous-produits industriels dans le domaine du génie civil[1].

## 1.2 Définition

Le granulats recyclé est un matériau provenant du recyclage de débris de démolition, qui est le résultat du concassage du béton d'anciennes structures civiles. Le granulats recyclé est formé à partir du granulats d'origine et d'une couche de mortier résiduel qui est autour du granulats d'origine. L'interaction entre ces deux phases joue un rôle très important dans la qualité du béton formé à partir de granulats recyclés[9].



Figure 1.1 : Granulats recyclés [Vinci, King Matériaux].

## 1.3 Description des granulats recyclés

Selon la taille, les gros granulats de béton recyclé (GGR) peuvent être composés d'un ou plusieurs gros granulats naturels (GGN), entourés entièrement ou partiellement par une couche de pâte de ciment ou du mortier résiduel

(Figure 1.2). Les GGR peuvent aussi apparaître essentiellement comme un fragment de mortier résiduel, avec des proportions variables de petits granulats naturels (figure 1.3) Une approche de classification selon la forme structurale a été adaptée par (Akbarnezhad et coll)[17].

\*Type I, contient une ou plusieurs particules des GN entourés totalement ou partiellement par du mortier résiduel (a) et (b).

\*Type II, contient presque en totalité du mortier résiduel (c).

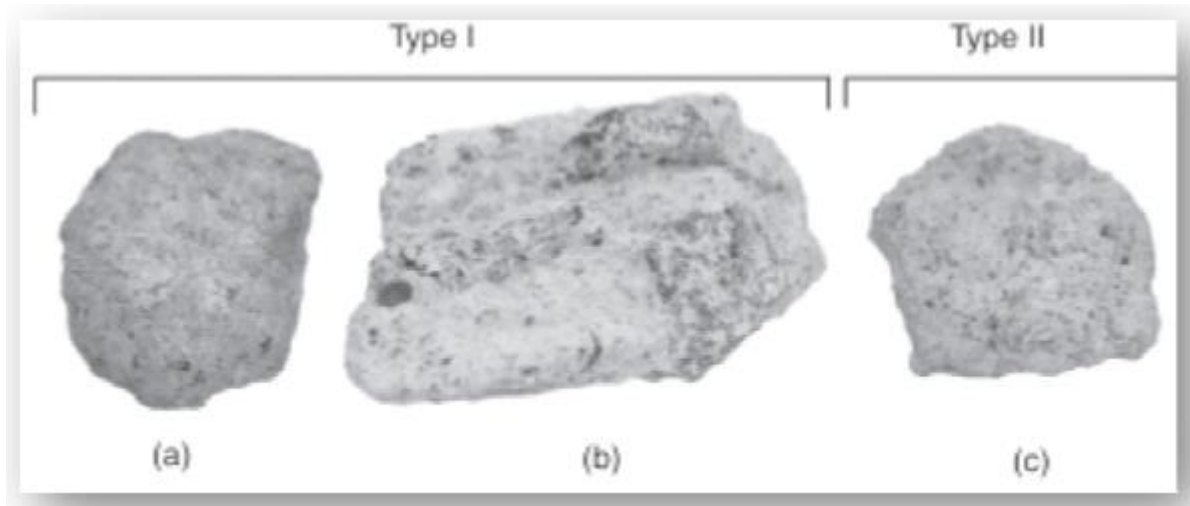


Figure 1.2: types des granulats recyclés.

#### **1.4 Sources des granulats recyclés**

La production de granulats recyclés à partir de déchets (auparavant mis en décharge) pour la fabrication du béton est innovante et répond aux exigences de durabilité du secteur de la construction. Cependant, les chercheurs se heurtent à une difficulté majeure quant à la comparabilité des propriétés des granulats recyclés et des granulats naturels conventionnels. L'un des facteurs permettant de réaliser cette évaluation est d'évaluer les différentes sources de granulats recyclés utilisés dans la production du béton.

Parallèlement, alors que les nouveaux chantiers de construction disponibles continuent de diminuer à l'échelle mondiale en raison de la hausse de la demande de logements résidentiels et commerciaux, conséquence de la croissance démographique mondiale et de la croissance économique parallèle, le taux de démolition des anciennes structures a également explosé. Par conséquent, une quantité importante de déchets de construction et de démolition (C&D) est produite chaque année dans le monde. Outre les déchets issus de la démolition des anciennes structures, on trouve également des déchets issus des nouveaux chantiers, provenant des matériaux résiduels et du béton prêt à l'emploi. Les déchets de C&D constituent la plus grande forme de déchets solides à l'échelle mondiale. À l'heure actuelle, le secteur européen de la construction produit 820 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition par an, soit environ 46 % de la quantité totale de déchets solides générés. On estime que la production totale de déchets de construction et de démolition dans une quarantaine de pays a dépassé les 3 milliards de tonnes par an, et cette tendance n'a cessé d'augmenter [18]. Le problème associé à ces problèmes est que les déchets de construction et de démolition sont

éliminés de manière inefficace dans les décharges, ce qui entraîne un épuisement des terres et un gaspillage de ressources financières et matérielles [19]. De plus, Gálvez-Martos et al... [20] ont observé que, selon la nature du projet de construction, les déchets de béton peuvent représenter jusqu'à 85 % du total des déchets générés par les déchets de construction et de démolition. Toutes ces activités sont néfastes pour l'environnement, compte tenu du volume important de déchets solides impliqués[21].



Figure 1.3 : Le cycle de recyclage.

### 1.5 Définition des déchets de chantier

Le secteur du bâtiment génère environ 40 millions de tonnes de déchets par an, dont 90% proviennent des chantiers de réhabilitation ou de démolition, soit plus que la production d'ordures ménagères. 66 % de ces déchets proviennent de la démolition, 28 % de la réhabilitation des ouvrages et 7% de la construction neuve.

L'élimination des déchets de chantier est réglementée depuis 1975. Cette réglementation a été modifiée en 1992 par un renforcement du contrôle des décharges et la limitation des déchets acceptés en décharge, en 1994 par l'obligation de valoriser les emballages, puis en 1997 par le classement des déchets, modifié en avril 2002. La nouvelle directive cadre "déchets" du 19 novembre 2008 renforce les objectifs de valorisation des flux de déchets afin de réduire l'enfouissement et l'incinération de ceux-ci. Un objectif de réemploi/recyclage est fixé pour les flux de déchets inertes issus de la construction : il doit atteindre 70 % [22].



Figure 1.4 : Déchets de chantier.

### **1.6 Déchets de construction/ déconstruction (C&D)**

La composition des déchets de construction et de démolition peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que les techniques architecturales, les matières premières et les procédés de construction/démolition. Néanmoins, le béton, le mortier et la céramique rouge sont les principaux composants des déchets de construction et de démolition, représentant plus de 70 % de leur poids[23].

La figure 1.5 montre un tas de déchets de construction et de démolition et des déchets de béton provenant de la construction et de la démolition à l'usine de recyclage Reciclax de Ribeirão Preto, au Brésil.

.En 2002, le CONAMA (Conseil national brésilien de l'environnement) a publié la résolution n° 307 [21] classant les déchets de construction et de démolition comme suit :

- Classe A : briques, carrelages, planches de plancher, mortier et béton.

- Classe B : plastique, verre, carton, papier, bois et métal.
- Classe C : matériaux dont le recyclage n'est pas économiquement viable (par exemple, le gypse).
- Classe D : déchets dangereux (par exemple, solvants, huiles, peintures et matériaux contenant de l'amiante).

Aux États-Unis, la classification des déchets de construction inclut les matériaux mentionnés ci-dessus, ainsi que les éléments de construction récupérés (par exemple, portes, fenêtres et plomberie), la terre et les roches provenant de sites de déblaiement [24].

Néanmoins, le béton et la maçonnerie concassés constituent les principaux déchets de construction pouvant être transformés en différents types de granulats recyclés, comme décrit ci-dessous [25] :



Figure 1.5: les déchets de construction et de démolition [24].

On dénombre au moins trois principaux types de déchets de C&D suivant leurs sources :

Tableau 1.1 : Composition des différents types de déchets du BTP [26].

	Bâtiment	Travaux publics
<b>Déchets inertes</b>	-Matériaux minéraux de démolition (gravats non pollués). -Bétons, briques, tuiles, céramiques. Carrelages. -Laines minérales.	-Terre, pierres naturelles et matériaux de terrassement non pollués. -Mortiers et bétons. -Bétons bitumineux et asphaltes coulés (sans goudrons).
<b>Déchets non dangereux</b>	-Cartons, emballage -Métaux, bois non traités -verre, plâtre, textile, caoutchouc	-Cables, ferrailles, fils électriques, poteaux, béton, panneaux usagers tuyaux, plastiques, polystyrène
<b>Déchets dangereux</b>	-Peintures, vernis, huiles, solvants -Acides de décapage, produits chimiques divers, amiante et matériaux de construction à base d'amiante	-Hydrocarbures, goudrons, enduits ou béton bitumineux avec goudron. -Sols mélangés avec du goudron colles, résines, adjuvants. -Sols pollués.



Figure 1.6 : Déchets inertes [ hubency ].



Figure1.7 : Déchets non dangereux [Wikipédia].



Figure1.8 : Déchets dangereux [Séché Environnement].

- Les déchets de la route : ce sont essentiellement des déchets provenant de la démolition d'anciennes chaussées, des excédents de déblais, d'enrobés bitumineux ou de bétons. Ils sont facilement réutilisables comme couche d'assise dans le domaine des chaussées et par conséquent recyclables.
- Les déchets de démolition des ouvrages d'art : ce sont des déchets issus de la démolition des structures en béton armé. Le recyclage de ces déchets pose souvent des difficultés liées à la

séparation du béton de l'acier. Néanmoins, ils sont bien prisés sur certaines plates-formes de recyclage destinées à la fabrication des granulats recyclés.

En effet, du fait des bonnes performances de ces bétons, ils engendrent après recyclage des granulats recyclés dont les propriétés physiques et mécaniques sont nettement au-dessus de celles des granulats recyclés issus des autres sources.

- Les déchets de construction, de rénovation ou de déconstruction des bâtiments (maçonnerie) : ces derniers constituent une grande partie des déchets de C&D et contiennent des impuretés de divers sources (ferraille, verre, bois,...).

Les déchets cimentaires représentent une portion importante des déchets de C&D.

Selon leurs origines, ces déchets commencent par être réutilisés comme couche d'assise dans les matériaux de chaussée, ou encore comme granulats recyclés pour ceux provenant des chantiers de démolition des ouvrages d'art. Cependant, le taux de recyclage de ces déchets de C&D reste encore tributaire de la méconnaissance du comportement à long terme des bétons à base de granulats recyclés (BGR) ainsi que des décisions des pouvoirs publics [27].

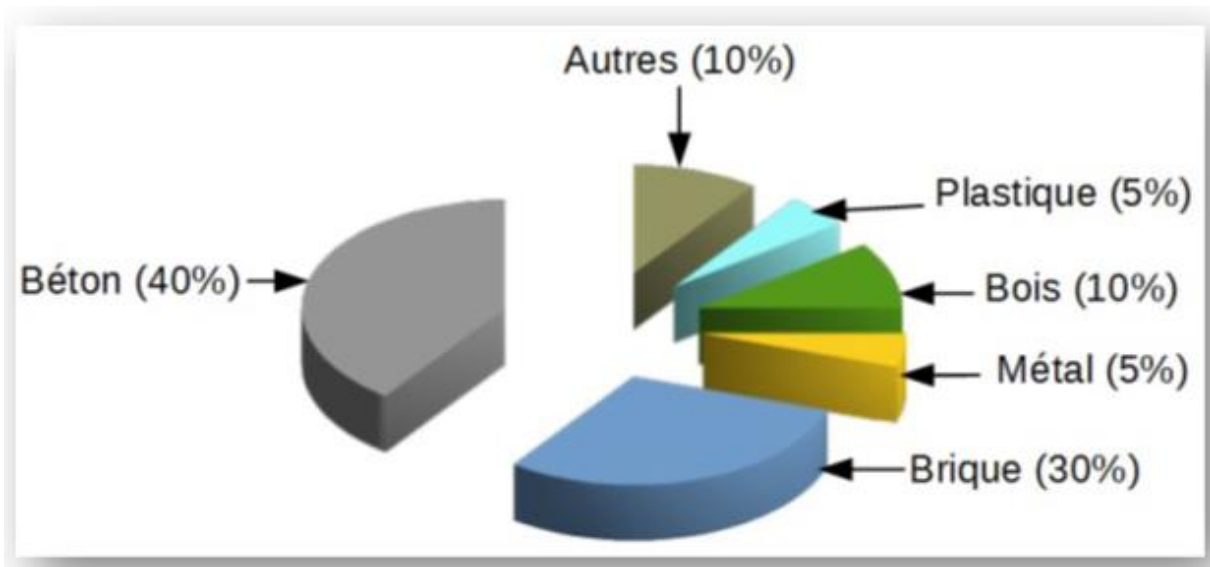


Figure 1.9 : Répartition volumique (en %) des déchets du BTP [27].

### 1.7 Procédé de recyclage

L'idée de recyclage des matériaux de démolition était envisagée depuis la seconde guerre mondiale où les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient réemployés en Grande Bretagne et en Allemagne pour la reconstruction de différents ouvrages, les granulats obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de brique

compte tenu de la nature des constructions à cette époque.

Les travaux de recherche qui ont fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolé et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton, connaissent actuellement une large application sur le terrain dans divers pays du monde [28].

Le procédé de recyclage des déchets de construction et de démolition transforme les matériaux démolis en fractions plus fines dans des installations de recyclage mobiles ou fixes[29]. Le nombre d'étapes de recyclage et les différents types de concassage influencent les caractéristiques des granulats recyclés. Grâce aux effets de collision et de décollement, le procédé de recyclage améliore également la forme des granulats, produisant des particules plus rondes et moins coupantes [25, 30, 31]. Dans ce procédé de broyage mécanique, un engrenage excentrique rotatif à grande vitesse provoque un effet de vibration de roulement qui pulvérise le mortier collé [32]. Différentes méthodes de recyclage peuvent être appliquées en fonction de la granulométrie maximale et de la qualité finale souhaitée.

Le procédé de recyclage ordinaire comprend différentes étapes de concassage, de criblage et de tri pour éliminer les contaminants tels que les barres d'armature, le plastique et le verre, par exemple. Dans ce procédé, les déchets de construction et de démolition passent par un concasseur primaire, puis par un concasseur à mâchoires, capable de traiter les barres d'armature résiduelles et les gros morceaux de béton. Les ferrailles sont ensuite éliminées à l'aide d'un séparateur magnétique, et le matériau restant passe à travers des tamis. Ainsi, les particules de plus de 20 mm sont à nouveau concassées dans un concasseur secondaire, tel qu'un concasseur à percussion ou un concasseur rotatif. Le concassage secondaire peut être répété si nécessaire. Une représentation schématique du « processus de recyclage ordinaire » [33].

Néanmoins, d'autres méthodes mécaniques permettent d'obtenir des granulats recyclés de meilleure qualité, présentant des caractéristiques similaires aux granulats conventionnels.

Dans ces méthodes, le concasseur à percussion ou le concasseur rotatif est remplacé par un rotor excentrique, un concasseur à vis ou un concasseur à mâchoires amélioré[34].

Cette méthode mécanique plus complexe permet un meilleur traitement du matériau entrant, en éliminant le mortier adhérent et en réduisant la taille des granulats par frottement continu entre eux.

Outre le broyage mécanique, il est également possible de chauffer les granulats recyclés, ce qui fragilise le mortier adhérent. La température élevée pendant le processus thermique génère des fissures dans le mortier collé, ce qui entraîne une diminution de la résistance mécanique et facilite le retrait des granulats de la surface d'origine. La méthode de chauffage et de tri, par exemple, produit des granulats recyclés contenant seulement 2 % de mortier collé après un traitement thermique jusqu'à 700 °C dans un four rotatif [35]. En 2005, une méthode appelée chauffage et frottement a été présentée par Shima., H et al. [36] Dans cette procédure, des morceaux de béton grossièrement concassés de moins de 40 mm sont d'abord chauffés à environ 300 °C dans un four à kérosène pendant 40 à 60 minutes, puis concassés et frottés dans un broyeur tubulaire.



Figure 1.10: Représentation schématique du processus de recyclage ordinaire [37].

## 1. 8 Intérêt du recyclage dans le génie civil

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Recycler des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet :

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

- la réduction des quantités de matériaux mis en décharge. Au niveau environnemental, Le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO<sub>2</sub> du fait que pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO<sub>2</sub> attribuée au transport de granulats ; le béton concassé est susceptible de piéger le CO<sub>2</sub> en se carbonatant [38].

## 1.9 Production des granulats recyclés

Les granulats de démolition ou granulats recyclés sont obtenus par recyclage des déchets C&D. Dans la pratique, ces déchets sont acheminés depuis les chantiers jusqu'aux plates-formes de recyclage où ils suivent différentes étapes bien établies.

**1.9.1 Concassage et déferailage :** ce processus consiste à soumettre les gros blocs de béton aux chocs mécaniques, les réduisant ainsi en des granulats relativement petits (entre 30 et 40mm de diamètre). Ce processus est souvent réalisé à l'aide des concasseurs à mâchoire ou à percussion disponibles sur les plates-formes de concassage. Au terme de ce premier processus, l'acier (pour ce qui est des bétons armés) peut être séparé du béton à l'aide d'un système magnétique.

**1.9.2-Tri par flottaison :** cette étape s'effectue lors du lavage des granulats obtenus lors du premier concassage et permet de récupérer les impuretés comme le bois ou les plastiques.

En effet, du fait de leur faible densité (comparée à celles des granulats naturels), ces impuretés remontent à la surface de l'eau une fois les granulats immergés, ce qui permet de les séparer facilement du béton.

**1.9.3 Concassage secondaire :** il permet de réduire la granulométrie des débris de bétons obtenus lors de la première étape. Ainsi, selon le type de concasseur on obtient à part les fines (sables recyclés) de tailles (0/4 mm), des granulats recyclés (4/12, 12/20 mm ou plus). Au terme de ce dernier processus, on obtient du sable et des granulats recyclés réutilisable comme granulats dans la fabrication de nouveaux bétons [39].



Figure 1.11 : Production des granulats recyclés [39].

### 1.10 Composition du granulats recyclé

Un granulats de béton recyclé (GR) est un matériau composite constitué de deux phases distinctes, la première phase est constituée d'un granulats naturel (GN), et la deuxième est constituée d'une pâte cimentaire généralement adhérente au granulats naturel (GN), tel que cette pâte cimentaire peut enrober le granulats naturel (GN) totalement ou partiellement, alors le taux de chaque phase est en fonction de la composition du béton initial.

La différence entre un granulats naturel (GN) et un granulats recyclé (GR) se présente au niveau de la pâte cimentaire, le granulats naturel (GN) est monophasique, tandis que le granulats recyclé (GR) est bi phasique, les propriétés physiques et mécaniques des (GBR) dépendent essentiellement des propriétés des deux phases (GN) et pâte cimentaire qui constitue le (GBR), la pâte cimentaire adhérente présente une porosité élevée, ce qui modifie les caractéristiques des GBR et les rend différentes de celles des (GN) [40].

### **1.10.1 Mortier attaché aux granulats recyclés**

Lorsque le béton est concassé, un mortier reste attaché autour des granulats parents. La pâte de ciment adhère aux granulats naturels beaucoup plus poreux. Par conséquent, la qualité et la quantité du mortier attaché ont un effet néfaste sur les propriétés du BGR comparativement aux granulats naturels, qui sont: une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée, une abrasion de Los Angeles plus élevée et une teneur plus élevée en sulfate[41]. Le mortier attaché au GR est inclus dans le mortier total, le rapport de mortier total du BGR dans la conception du mélange conventionnel est supérieur à celui du mélange de béton avec granulat naturel [42]Selon Hansen et Narud [43] la quantité de mortier attaché au GR varie de 30 à 60 % (en volume de GR) selon la taille des granulats. La figure 2.3 montre les composants qui peuvent être trouvés dans un GR [44].

La quantité de mortier attaché dépend de plusieurs facteurs :

- Granulométrie des granulats: la quantité de mortier résiduel est inversement proportionnelle à la taille des granulats ;
- Qualité du béton parent: le taux de mortier attaché aux GR augmente avec la résistance du béton original ;
- Type de concasseur utilisé pour le recyclage : le concasseur à mâchoire élimine mieux la gangue d'ancien mortier que le concasseur à percussion.
- Cycle de recyclage : un concassage secondaire contribue à une réduction considérable de la quantité de mortier résiduel [45].

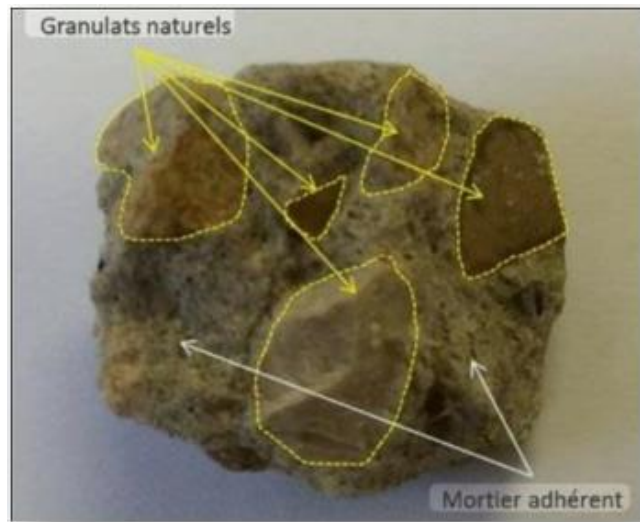


Figure 1.12 : Mortier attaché [ResearchGate].

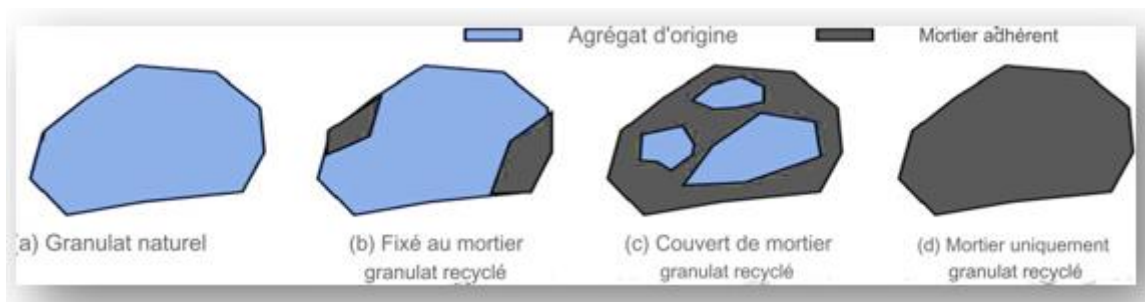


Figure 1.13 : Types de granulat en fonction du mortier attaché [43]

### 1.11 Classification des granulats recyclés

Les granulats recyclés sont très variables dépendamment de la source et la nature du béton de démolition. En Europe et en Amérique du Nord, il existe plusieurs méthodes de classification. Cette classification a pour but d'améliorer la compréhension de la valorisation des matériaux. Au Québec, la classification est régie par la norme NQ 2560-600[46], qui la subdivise en sept catégories distinctes. Le Tableau 1 montre la classification des granulats recyclés selon cette norme. Ce tableau indique les proportions et les limites sur les quantités relatives des différentes catégories de matériaux composés de granulats recyclés, où de bétons de ciment (B.C), d'enrobés bitumineux (béton bitumineux, « B.B ») et des granulats naturels (G.N), à respecter pour chaque classe de granulats recyclés [47].

Tableau 1.2 : Classification québécoise des MR/NQ 2560-600 [47].

Classe	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
<b>%B.C</b>	≤50%	> 50%	≤30%	>30%	<65%	<50%	<15%
<b>%B.B</b>	≤15%	≤15%	15-35%	15-35%	30-35%	50-85%	>85%
<b>%G.N</b>	≥35%	<50%	35-85%	35-85%	<65%	<50%	<15%

Les matériaux de type MR-2 sont constitués généralement de béton de ciment supérieur à 50 % et jusqu'à 15 % béton bitumineux. Ces types des granulats recyclés en provenance des bétons de ciment, tandis que ceux du type MR-7 sont composés majoritairement de bétons bitumineux Moniz et al.[48].

Tableau 1.3: Composition de granulat recyclé de classe MR-2 [47].

Proportion des constituants (%)						
<b>Matériaux composés MR-2</b>	MR-2/NQ 2560-600	Pellerin, 2000	Moniz, 2013	Boulay, 2014	Bastien, 2016	Turcanu, 2017
<b>Résidus d'enrobés (EB)</b>	≤15	15	12,5	5	2	9
<b>Résidus de béton(BC)</b>	>50	85	80	74	80	88
<b>Granulats naturels(GN)</b>	<50	10	7,5	21	18	3

### 1.12 Les classes principales des granulats recyclés

D'une manière générale, il y a quatre classes des granulats recyclés.

- 1- Granulats de débris de béton proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou béton armé) (A).



Figure 1.14: A- granulats de béton de démolition.

2-Granulats de débris de maçonnerie proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments (B).

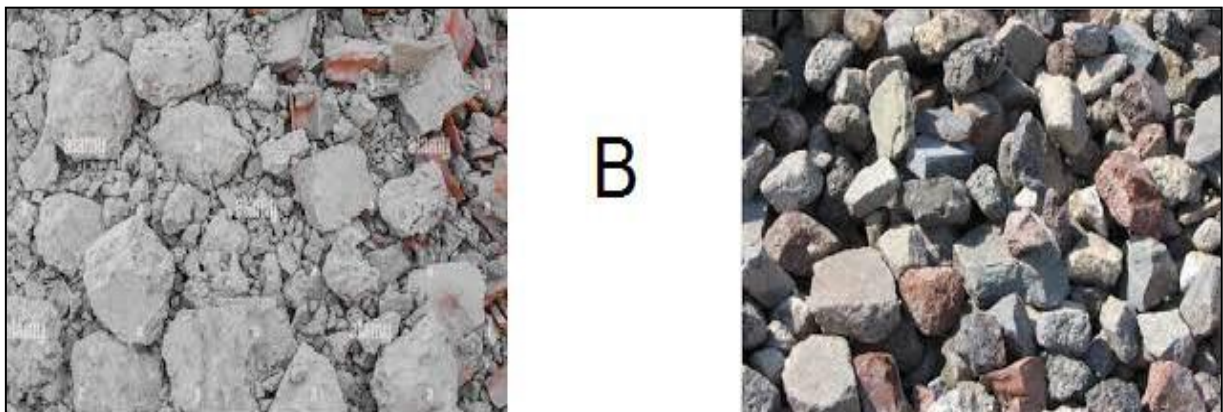


Figure 1.15 : B- granulats de maçonnerie.

3-Granulats de débris hydrocarbonés proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes...) de la démolition de parkings.... (C).

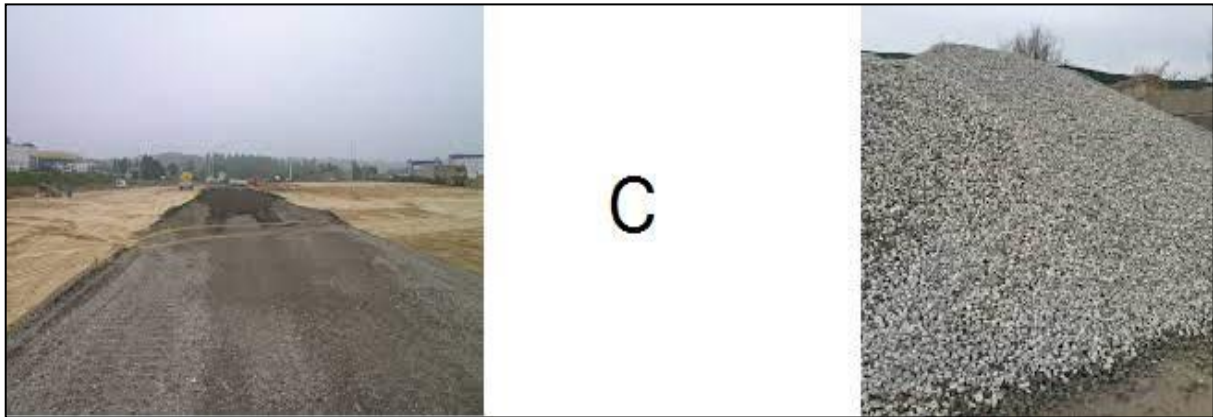


Figure 1.16 : C-granulat de débris hydrocarbonés.

4- Granulats de débris mixtes proviennent de la construction/ rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles...)(D) [49].

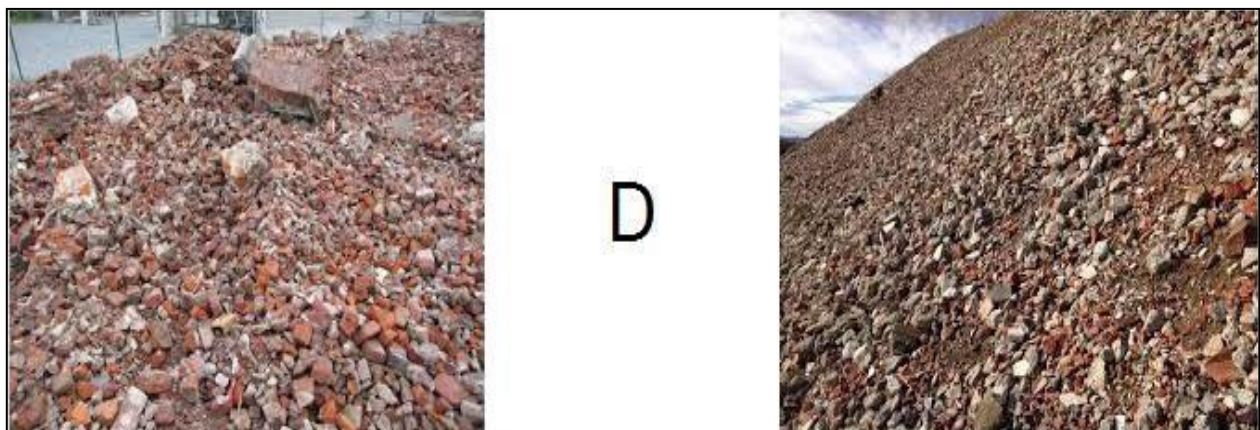


Figure 1.17: D-granulat de débris mixtes.

## 1.13. Les Propriétés des granulats

### 1.13.1 Propriétés physiques des granulats recyclés

Un granulat recyclé est constitué d'un ou plusieurs granulats naturels ( ou granulat(s) d'origine) entouré(s) partiellement ou totalement d'un mortier issu du béton d'origine appelé ancien mortier ou mortier attaché.

Du fait de la nature composite des granulats recyclés, leurs propriétés aussi bien physiques que mécaniques diffèrent des granulats naturels. Cette différence est principalement

due aux propriétés de l'ancien mortier ainsi qu'aux caractéristiques de l'ancienne zone d'interface.

**a) Taille des granulats recyclés**

Elle dépend non seulement de la qualité du béton d'origine (d'où sont extraits les granulats recyclés) mais aussi de la technique de concassage. En effet, plus le béton d'origine est de faible qualité, plus on assiste à une augmentation du taux de fines ou sable recyclé avec des tailles moyennes de grains comprises entre quelques micromètre et 4mm (0/4 mm). Ce phénomène s'explique par la nature dégradée des liaisons granulats-mortier (au sein du béton d'origine) surtout pour de grands rapports eau/ ciment. Toutefois, sur les plates-formes de recyclage, il existe des procédés de tamisage qui permettent d'obtenir différentes granulométries de granulats recyclés 0/4mm (fines) ; des gravillons 4/12mm ou 4/8mm, 12/20mm,... selon les modes de traitement.

Hansen[50] présente un tableau récapitulatif (Tableau 1.4) permettant de faire le lien entre la qualité du béton d'origine et le pourcentage volumique de vieux mortier contenu dans le granulat recyclé (GR). En effet, pour des rapports *e/c* de plus en plus élevés, la quantité d'ancien mortier diminue autour des gravillons (8/16mm) et granulats (16/32mm). La proportion de pâte de ciment autour des fines varie plus faiblement. Ce phénomène s'explique par la nature poreuse (donc moins résistante) des liaisons entre gravillons et granulats et ancien mortier pour de grands rapports E/C .

Tableau : 1.4 – Granulométrie et proportion d'ancien mortier suivant la qualité du béton d'origine [50].

Rapport <i>E/C</i> du béton d'origine	Granulométrie des granulats recyclés (mm)	Pourcentage volumique de mortier attaché (%)
E/C=0,4	4/8	58
	8/16	38
	16/32	35
E/C=0,6	4/8	64
	8/16	39
	16/32	28
E/C=1,2	4/8	61
	8/16	39
	16/32	25

**b) Masse volumique**

Les granulats recyclés possèdent une masse volumique plus faible que les granulats naturels. Cette propriété est liée à la présence de l’ancien mortier qui est un milieu très poreux donc moins dense que le granulats d’origine. Le tableau 1.5 présente un résumé comparatif des résultats de masse volumique entre les granulats naturels et recyclés suivant les différentes granulométries. Hansen[50] montre que, de façon générale, les granulats recyclés ont une masse volumique qui varie entre 2340 kg/m<sup>3</sup> pour les 4/8 mm à 2490 kg/m<sup>3</sup> pour les 16 /32 mm. De plus ces valeurs sont indépendantes de la classe de résistance des bétons d’origine.

Tableau 1.5 : Tableau comparatif des masses volumiques de granulats naturels et recyclés[51].

Granulométries (mm)		Granulats naturels			Granulats recyclés			Référence
		0/4	4/12	12/20	0/4	4/12	12/20	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		-	2790	-	-	2415	-	[52]
		2680	2680	2680	-	2410	-	[53]
		2500	2480	2480	2250	2300	2300	[54]

**c) Absorption d’eau**

Les études présentée par De Juan et al [44] mentionne que l'absorption d'eau des GBR est directement liée à leur teneur en mortier. Cette dernière est responsable de leur grande capacité d'absorption comparée aux granulats naturels. Xuan et al [55] ont trouvé dans leur étude que l’absorption d’eau des GBR de taille 5-10 mm est de 7,2 % alors que celle des granulats naturels (granite) de même taille est de 1,5 % (4,8 fois plus). De Juan et al [44] ont étudié la relation entre la quantité de l’ancien mortier attaché à la surface des granulats naturels dans les granulats recyclés et l’absorption de ces derniers. Ils ont observé que l'absorption d'eau augmente linéairement avec la quantité de mortier fixé. Bai et al [56] ont également décrit une relation linéaire entre la teneur en mortier attaché et le coefficient d’absorption d’eau. Comme les valeurs d'absorption, le temps de saturation varie d'un granulats recyclé à l'autre et dépend de la taille des granulats (Figure 1.16) et de la quantité de mortier attaché [57]. Ce temps peut être supérieur à 24 heures[58] voire même atteindre 10 jours pour

une saturation complète [59]. Lors de l'adaptation des méthodes expérimentales pour évaluer l'absorption des granulats recyclés, ce paramètre doit être pris en compte. La cinétique d'absorption des granulats recyclés dépend également du type de granulat et elle est influencée par les propriétés de la pâte attachée ou de la gangue de mortier [60].

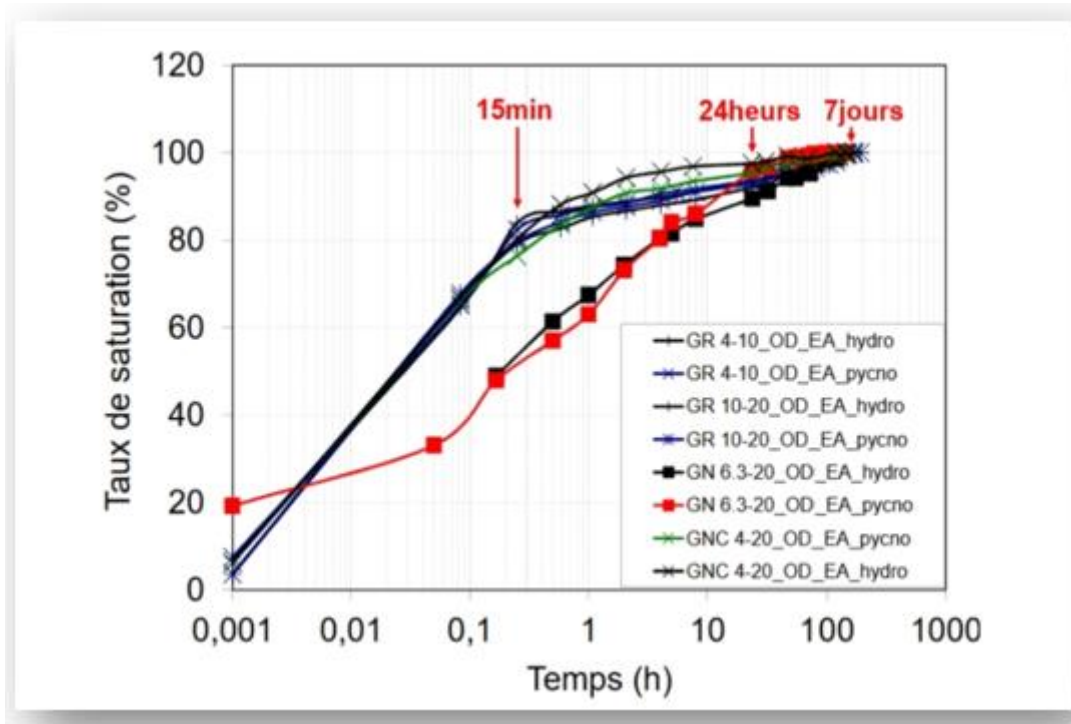


Figure 1. 18 : Cinétique d'absorption des granulats recyclés[60].

Comparés aux granulats naturels, les granulats recyclés absorbent plus d'eau du fait de la nature du mortier attaché. Ce dernier, très poreux, modifie le coefficient d'absorption d'eau de tout le granulat recyclé. Des essais menés par Liu et al.[52] montrent un facteur de 4 à 8 entre le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat recyclé et celui d'un granulat naturel. Et la même tendance est confirmée pour la porosité de ces granulats comme le montre le tableau 1.6.

Tableau 1.6 : comparaison de l'absorption d'eau des granulats naturels et recyclés selon les classes granulométriques.

Granulométries (mm)	Granulats naturels			Granulats recyclés			Référence
	0/4	4/12	12/20	0/4	4/12	12/20	
Absorption d'eau (%)	0,4	-	-	6,9	-	-	[52]
	-	3,7	1,8	-	8,5	5	[50]

**d) Porosité**

La porosité, propriété intrinsèque des GR, est dépendante de la nature et de la qualité de mortier attaché et donc de la taille des GR (Tableau 1.5) [61]. Le tableau 1.5 présente les valeurs de la porosité en fonction des granulats. Après le concassage du béton, la porosité des GR augmente, par rapport aux granulats naturels. La porosité du béton parent influe également sur la porosité des GR. En effet, pour un béton parent qui a un E/C très élevé ou qui va contenir des granulats calcaires de forte porosité, la porosité engendrée pour les GR est plus élevée, que pour des GR dont le béton parent a un E/C plus faible ou contient des granulats siliceux qui sont moins poreux [62].

La porosité va à son tour influencer sur l'augmentation du coefficient d'absorption d'eau. Ce coefficient est plus important pour les GR et, comme pour la porosité, est en lien avec la teneur en mortier attaché [63-65].

Tableau 1.7 : Valeurs de la porosité en fonction des granulats.

Type de granulats	Fraction des granulats	Porosité (%)	Sources
<b>GN</b>	5-12 mm	2,8	Gómez-Soberón et al. [66]
	12-20 mm	2,7	
<b>GR</b>	5-10 mm	14,9	
	10-20 mm	13,4	
<b>GN</b>		2,4	Abbas et al. [51]
<b>GR</b>		8,1 et 12,3	

**1.13.2 Propriétés mécaniques des granulats recyclés**

**a) Résistance à la fragmentation**

Concernant les propriétés mécaniques des granulats, le test de Los Angeles est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d'un gravier [67]. Un coefficient LA élevé est le signe d'un granulat à faible résistance. La Figure montre la variation comparative du coefficient de Los Angeles des granulats naturels et des granulats de béton recyclés en fonction de la classe granulaire [68]. Ces résultats montrent que la résistance à la fragmentation décrite par le coefficient de Los Angeles augmente pour les GBR par rapport aux granulats naturels.

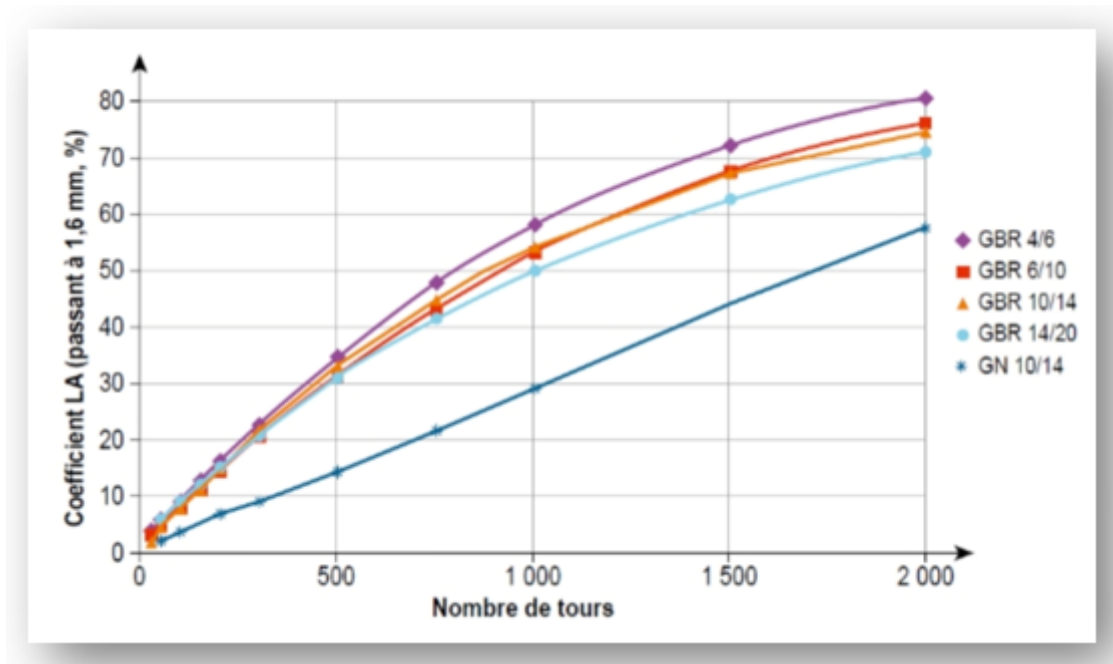


Figure 1- 19: Coefficients Los Angeles (LA) pour les granulats recyclés et naturels, en fonction de nombre de tours [68].

Tout comme les autres propriétés, la résistance à la fragmentation des granulats recyclés est plus élevée que celle des granulats naturels. Elle témoigne de la fragilité des granulats recyclés notamment à cause de la présence de l'ancien mortier (très poreux et donc peu résistant). Cette caractéristique est traduite par le coefficient de Los Angeles (LA). Quant à la résistance à l'usure, elle est caractérisée par le coefficient de Micro Deval (MDE) comme résumé dans le tableau (1.6). Plus les coefficients LA et MDE sont élevés, moins le granulat est résistant [50].

Tableau 1.8 : Coefficient de Los Angeles (LA) et de Micro Deval (MDE) des granulats naturels et recyclés :

Granulométries (mm)	Granulats naturels			Granulats recyclés			Référence
	0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16	
<b>Fragmentation : LA</b> (%)	-	25,9	22,7	-	30,1	28,7	[50]
<b>Usure : MDE (%)</b>	-	22	-	-	25	-	[54]

### La Norme De Granulats Recyclés

La norme NF EN 206/CN [69] autorise l'utilisation de granulats recyclés issus de la déconstruction pour la formulation des bétons en précisant les conditions et les limites d'utilisation. Les granulats recyclés doivent être obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction et être conformes aux normes relatives aux granulats (NF EN 12620+A1 et NF P 18-545) [70]; qui spécifient les caractéristiques et les propriétés des granulats recyclés.

#### 1.14 Utilisation Des Granulat Recyclé

Les domaines d'emploi des granulats recyclé sont diversifiés dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment etc. Cette application se fait tout en respectant certaine norme.

Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, l'étude bibliographique réalisée montre que les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels. Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués des gravillons de bétons recyclés[71].

#### 1.15 Les Avantages de l'emploi des granulats recyclés

La valorisation des matériaux de construction, comme le ciment, présente de nombreux atouts en termes de préservation des ressources naturelles. En effet, la valorisation d'une tonne de ciment peut permettre d'économiser jusqu'à 1360 galles d'eau et 900 kg de CO<sub>2</sub>, tout en réduisant le besoin d'extraction de nouvelles matières premières.

De plus, la valorisation des matériaux de construction peut diminuer la pollution liée au transport des déchets vers les décharges, tout en réduisant les coûts de transport des matériaux et des déchets. Cela peut également permettre de libérer de l'espace dans les décharges, dont les volumes et l'utilisation sont voués à se restreindre.

La valorisation des matériaux de construction peut répondre à une large palette d'applications, allant des simples remblais aux assises de chaussées supportant un trafic lourd, en utilisant des matériaux "locaux" nécessitant moins de transport. En somme, la valorisation des matériaux de construction peut apporter des avantages économiques, environnementaux et sociétaux significatifs [72].

## **1.16 Conclusion**

Les propriétés physiques et mécaniques de base des GR résumées à partir de la littérature disponible, font ressortir que ces caractéristiques ont un impact sur la proportion et les caractéristiques du béton. Les caractéristiques de base, comme la densité spécifique, la densité apparente, le volume des pores, l'absorption, le coefficient de Los Angeles et le coefficient MDE sont généralement réduites par rapport aux GN en raison de la présence de pâte/mortier de ciment résiduel et d'impuretés. L'ampleur des effets varie selon la nature et la quantité de pâte/mortier de ciment récupéré qui est présent dans les GR. Il est impossible d'estimer avec précision la résistance à la compression du béton si on ignore ces propriétés, comprendre la relation entre la qualité de GR et les propriétés concrètes peut favoriser une utilisation efficace de GR.

---

***Chapitre 2***  
***les propriétés physico- mécaniques des bétons recyclés***  
***à base des granulats recyclés.***

---

## 2.1 Introduction

L'utilisation des granulats issus de la déconstruction des structures de génie civil est un enjeu essentiel du développement durable et apparaît comme la solution d'avenir pour préserver les ressources naturelles et limiter les zones de stockage. Néanmoins, les granulats recyclés possèdent des propriétés différentes de celles des granulats naturels à cause de la présence du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui restent attachés aux grains naturels après le processus de production. Les caractéristiques des granulats recyclés influent directement sur la performance du béton à court et à long terme et les explications les plus communes sont associées à la présence du mortier attaché, à la porosité plus élevée aussi bien qu'au module d'élasticité plus faible des bétons à base des granulats recyclés [73].

## 2.2 Définition

Le béton recyclé est une alternative écologique et durable à l'utilisation de béton traditionnel. Alors que la déconstruction de bâtiments et de structures génère une quantité importante de déchets béton, ces déchets peuvent être recyclés pour produire un nouveau matériau. Le béton recyclé offre une empreinte écologique réduite et une durabilité accrue. En outre, les bétons recyclés s'intègrent parfaitement dans le concept d'économie circulaire. Cette dernière visant à valoriser de manière optimale les ressources et à réduire les déchets.



Figure 2.1: Béton recyclé [Jungheinrich Profishop].

## **2.3 Pourcentage optimal du granulats recyclé**

Le pourcentage de remplacement optimal du granulats recyclé est celui qui permet de maintenir à un niveau acceptable les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Ce pourcentage varie beaucoup dans les études consultées. Cependant, quelques chercheurs proposent une plage de valeurs pour les pourcentages optimaux. D'un côté, mentionnent que les proportions optimales de GR sont d'environ 25 à 40% et 50 à 70%, lors de l'utilisation d'une séquence de malaxage en deux étapes pour la préparation du béton. En effet, l'utilisation d'une séquence de malaxage spécifique lors de la gâchée permet d'obtenir un pourcentage optimal de granulats recyclé plus élevé, par rapport aux méthodes conventionnels de malaxage [74]. D'un autre côté affirme que, selon plusieurs recherches, cette plage est entre 20 et 50 % de remplacement de granulats naturels par des granulats [75]. De plus, dans la plupart des études il est clair que l'augmentation progressive du pourcentage de granulats recyclés diminue de manière progressive les propriétés physiques et mécaniques du béton [76].

## **2.4 Propriétés physiques du béton recyclé**

### **2.4.1 Propriétés à l'état frais**

#### **a) Affaissement et maniabilité**

D'une manière générale, la plupart des études rapportent que l'utilisation de granulats recyclés diminue l'affaissement du béton, par rapport au béton avec granulats naturels. Dans leur étude Boulay, V et al. [76] ont rapporté qu'il est nécessaire d'augmenter le rapport effectif E/L alors que la proportion de granulats recyclés augmente. Cependant, cette augmentation n'est pas identique dans toutes les familles de mélanges avec le granulats recyclés. Ils ont conclu que la forme et la composition des différents granulats recyclés influencent la maniabilité des mélanges. Tel qu'indiqué par Brito, J.d., et al. [77], Bravo, M., et al. [78] la forme plus rugueuse du granulats recyclés, par rapport à la forme du granulats naturels, peut contribuer à ce changement de maniabilité.

Par contre Fonseca, N et al. [79] ont mesuré une valeur d'affaissement similaire pour un béton avec granulats recyclés, par rapport au béton avec granulats conventionnels. Dans ce cas, l'absorption plus élevée des granulats recyclés était compensé par la conception initiale du mélange, dans lequel l'humidité initiale et l'absorption ont été pris en considération pour empêcher leurs effets négatifs sur une telle propriété physique importante.



**Figure 2.2 :** Essai d'affaissement au cône d'Abrams [MonCoffrage.com].

#### **b) Masse volumique**

Diverses études montrent une diminution de la masse volumique du béton à l'état frais avec une augmentation du pourcentage de granulats recyclés utilisés Thomas et al., [80] Bravo et al., [78] ont montré que la masse volumique du béton à l'état frais diminue à mesure que la quantité de granulat recyclé dans le béton augmente (Figure 2.3). Selon cette recherche, ceci est justifié par la masse volumique plus faible des particules de granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Les chiffres montrent également que cette réduction varie en fonction du type de granulat recyclé spécifique utilisé, car cela dépend de la composition du granulat des différentes usines de production.

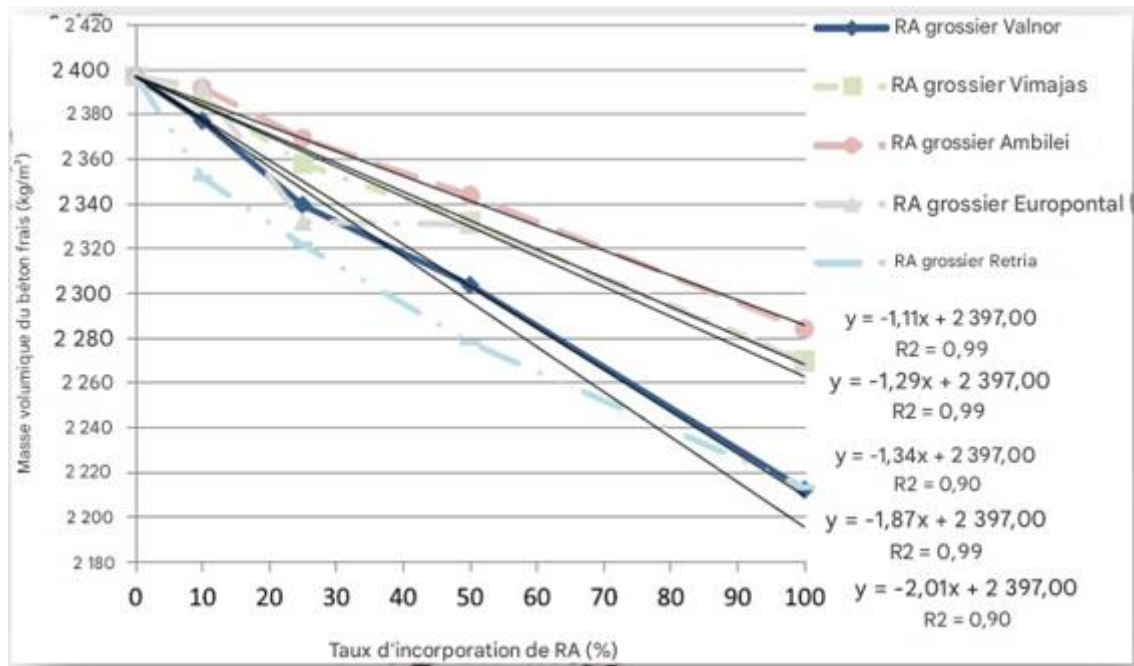


Figure 2.3 :Masse volumique à l'état frais du béton en fonction de différents pourcentages et types de granulat recyclé [78].

## 2.4.2 Propriétés à l'état durci

### a) Porosité

La porosité des BGR est plus grande que celle des bétons de granulats naturels, du fait de la présence des GR qui affecte la compacité de la pâte de ciment. L'incorporation des GR entraîne une augmentation de la porosité des BGR.

La Figure montre les résultats de la porosité accessible à l'eau pour des trois classes de bétons à des taux différents de substitution.

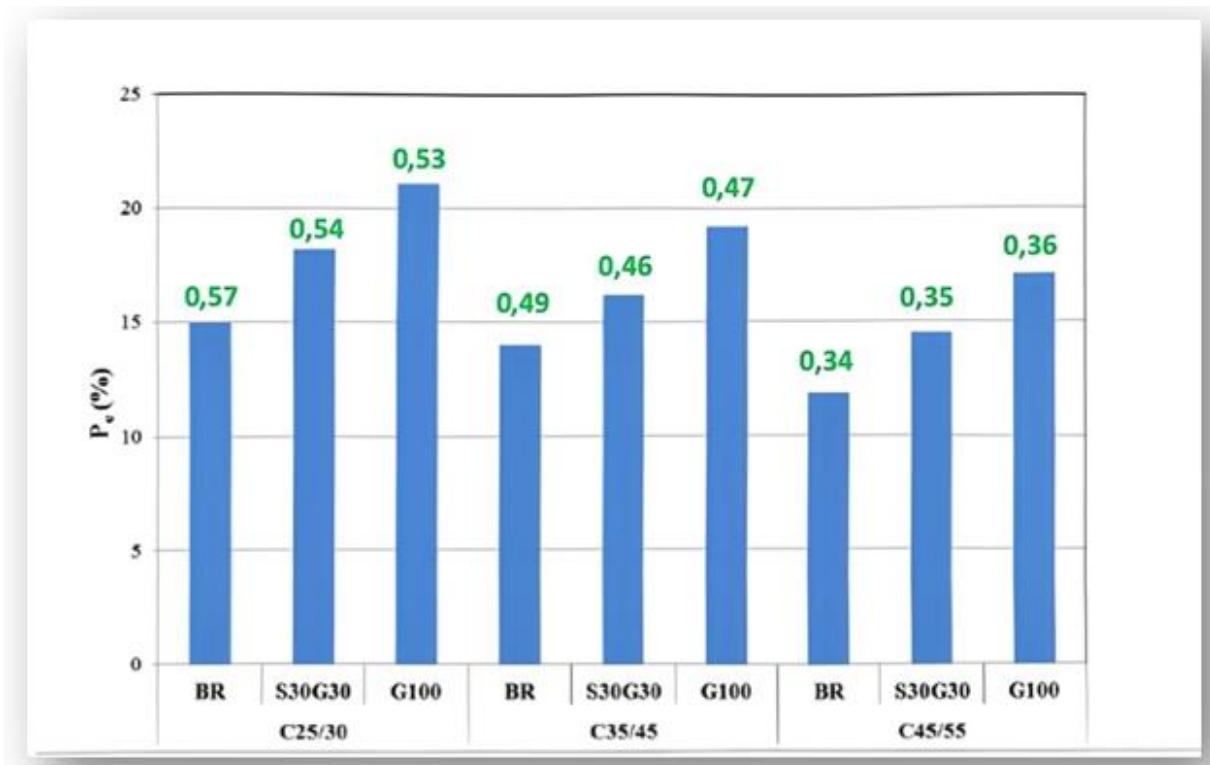


Figure 2.4: Porosité accessible à l'eau pour des bétons à différents taux de substitution après 90 jours de cure dans l'eau (BR : béton de référence, S30G30 : 30 % de substitution, G100 : 100 % de substitution) (donnée en vert : E/L)[16].

La Figure 2.4 montre aussi une augmentation de la porosité des BGR pour l'ensemble des classes, les BGR possédant le taux maximal de substitution G100, ont des valeurs de porosité maximales. Le taux de substitution de 30 % de GR augmente la porosité entre 16 et 22 % lors de la substitution totale par 100 % de GR, l'augmentation de la porosité est comprise entre 38 et 44 %. La substitution maximale par des gravillons de plus grande fraction granulaire entraîne donc une augmentation significative de la porosité.

La porosité des BGR est affectée par la porosité des GR, qui elle-même est influencée par la teneur en mortier attaché.

On constate sur la Figure 2.4 que la porosité accessible à l'eau du béton S30G30 de la classe C45/55 est égale à celle de la porosité des BR des classes C25/30 et C35/45. Il est donc possible de limiter l'augmentation de la porosité en diminuant le rapport E/L.

L'augmentation de la porosité augmente le taux d'absorption d'eau des bétons [16].

## b) Absorption d'eau

Dans le béton contenant des granulats recyclés, il y a une forte croissance de l'absorption de l'eau. Le Tableau 2.1 présente les résultats d'absorption d'eau obtenus par César Medina et al. [81] dans différents types de béton. Les mélanges témoins avec granulats naturels sont ceux marqués avec RC et RCS. Les valeurs d'absorption ont augmenté avec le pourcentage de granulats recyclés mixtes, et plus fortement dans les bétons contenant des granulats recyclés mélangés avec des particules flottantes. Ce comportement a été principalement attribuable aux différences dans l'absorption d'eau de granulats recyclés et granulats naturels [82].

Tableau 2.1 :- Absorption de l'eau pour bétons contenant les granulats recyclés[81].

Béton	Absorption d'eau total (% en poids)	% d'augmentation
RC	3.64± 0.084	0.00
RCF-25	4.13± 0.030	13.39
RC-50	4.65± 0.008	27.63
RC-25	3.94± 0.010	8.27
RC-50	4.53± 0.086	26.18
RCS	2.91± 0.147	0.00
RCFS-50	3.96± 0.025	36.19
RCS-50	3.80± 0.137	30.82

L'absorption d'eau pour le béton recyclé (GR) est plus élevée que celle du béton ordinaire, le pourcentage d'absorption augmente quand le pourcentage de substitution en granulats recyclés (GR) augmente, les valeurs élevées d'absorption d'eau sont une indication propre de la porosité et de la perméabilité élevée de ce type de béton et par conséquent, de l'effet négatif de l'emploi de ces granulats sur la durabilité des bétons [83].

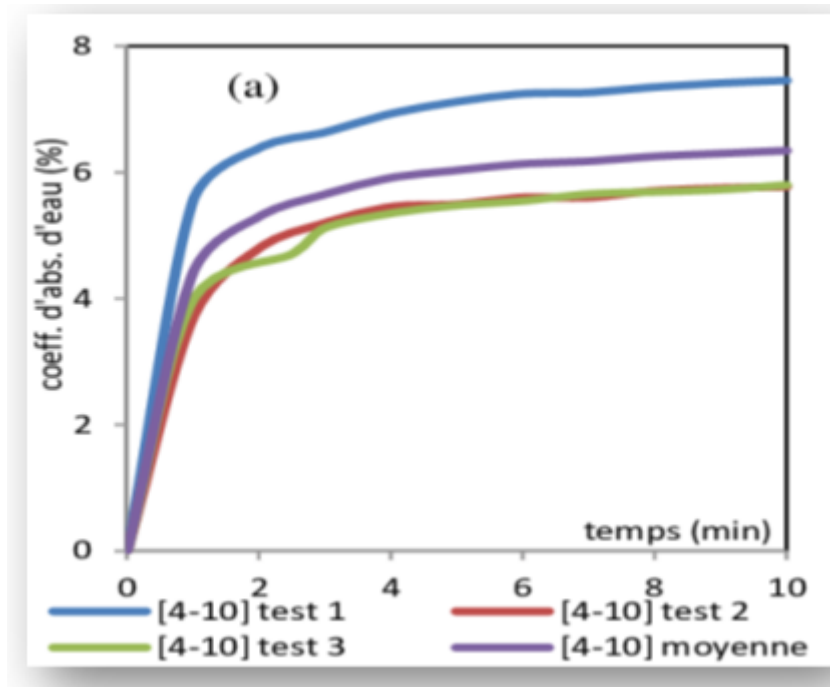


Figure 2.5: Absorption d'eau de béton recyclé [83].

### c) Masse volumique

Elle traduit la masse du béton par unité de volume. Adessina,A[84] a évalué à l'état frais et à l'état durci (28 jours). Les résultats présentés sur la figure 2.6 montrent que le béton à l'état frais est plus dense qu'une fois durcie et ce comportement ne dépend pas du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés. Ce phénomène s'explique par la perte d'eau lors du séchage du béton (dûe en partie aux échanges avec le milieu extérieur). Par ailleurs, la masse volumique diminue aussi avec les taux de substitution et cette tendance se vérifie à l'état frais comme à l'état durcie. Ce phénomène est lié à la faible densité des GR comparé à celle des GN .(Le remplacement des granulats denses (GN) par les moins denses (GR) diminue donc la densité des bétons qui en sont issus.

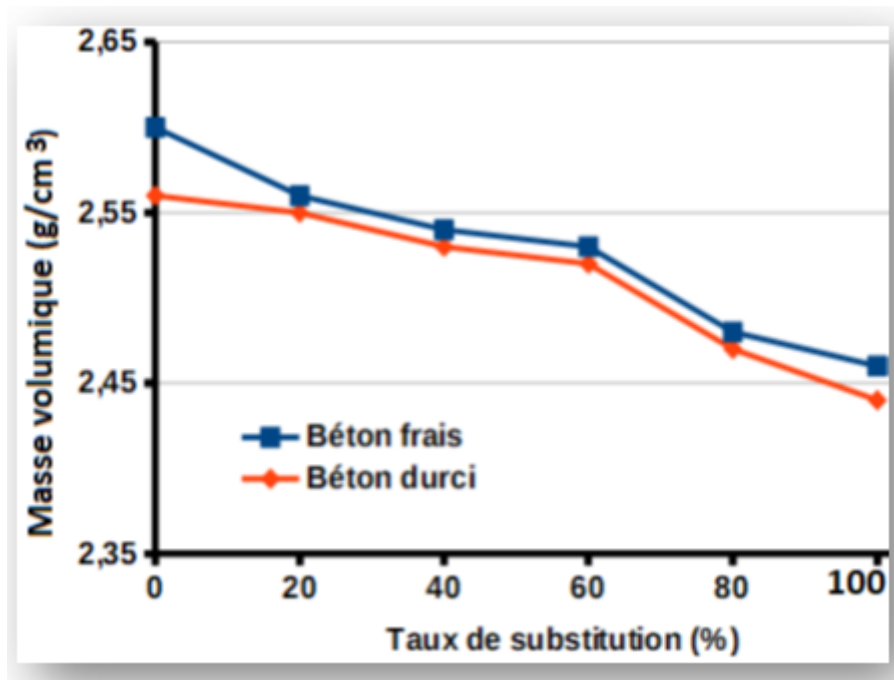


Figure 2.6 :Masse volumique (à l'état frais et durci) des bétons suivant les taux de substitution [84].

#### d) Perméabilité

Selon Braymand,S., [85] lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55 la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons ordinaires.

## 2.5 Propriétés mécaniques du béton recyclé

### 2.5.1 Résistance à la compression

En général, les chercheurs ont trouvé une diminution de la résistance à la compression du béton avec l'augmentation progressive du pourcentage de granulats recyclés. Pourtant, le pourcentage à partir duquel la résistance commence à diminuer de manière significative n'est pas encore clair. Selon diverses études consultées, les valeurs de résistance dépendent de plusieurs facteurs associés à chaque mélange, à chaque type de granulat recyclé et à chaque condition d'essai [76].

Abdelhakamet *al* .[86]ont aussi trouvé que la résistance à la compression du béton n'est pas affectée jusqu'à 25 % de GR. Cependant, l'augmentation de la teneur en GR au-delà de cette limite a un effet négatif sur la résistance à la compression du BGR. La réduction de la

résistance à la compression après 28 jours est de 3.0 %, 7.1 %, 11.6 % et 16.2 % pour le béton avec 25%, 50%, 75% et 100% de GR par rapport au BGN, respectivement.

Limbachiya *et al.* [87] a montré que le GR n'a pas d'effet sur la résistance à la compression du béton jusqu'au 30 % de remplacement de GR, mais au-dessus de 30 %, la résistance diminue progressivement à mesure que la teneur en gravier recyclé augmente. Ayob *et al.* [88] ont constaté que la teneur en GR affecte considérablement la résistance à la compression du BGR (Figure 2.7). La figure 2.6 montre qu'au-dessous de 50 % de GR, la résistance à la compression est légèrement affectée. Pour 100 % de GR, une diminution importante de la résistance est enregistrée.

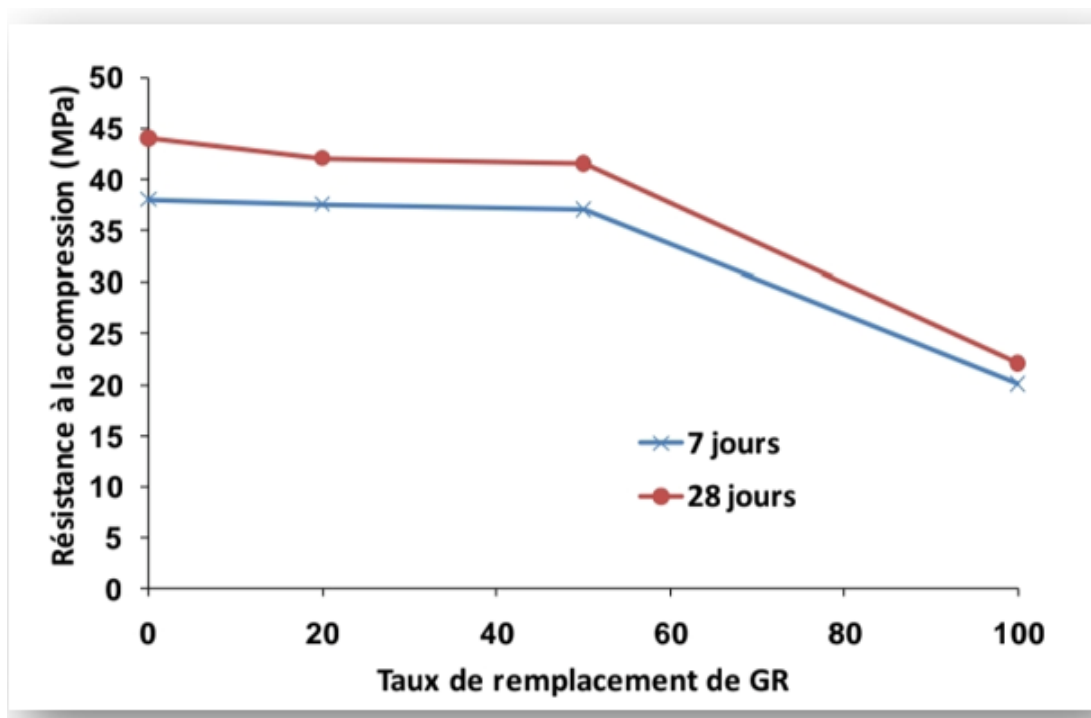


Figure 2.7: Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR [88].

La résistance à la compression RC des BGR est influencée par de nombreux paramètres, notamment le taux de substitution des GR et le rapport E/C. La Figure 2.7 présente la résistance à la compression en fonction du taux de substitution [16].

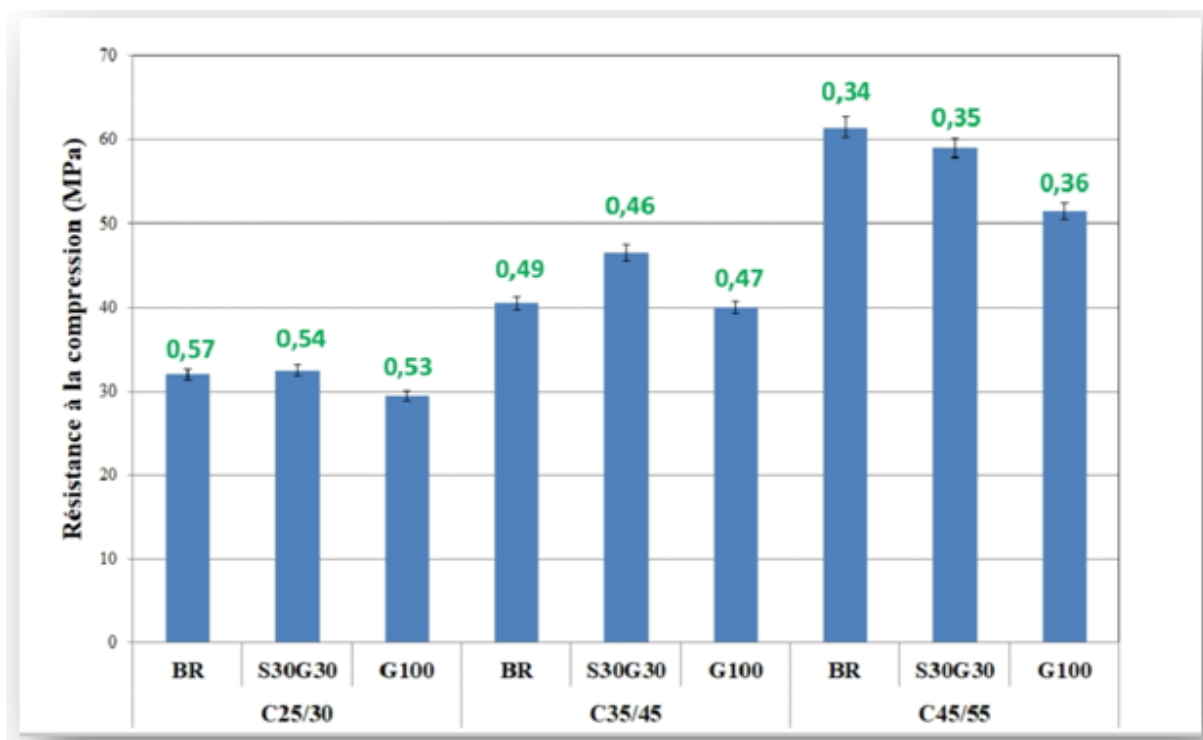


Figure 2.8 : Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution des granulats recyclés (BR : béton de référence, S30G30 : béton avec 30 % de sable, 30 % de gravillons substitués, G100 : béton avec 100 % de gravillons substitués) (donnée en vert : E/L) [16].

Le tableau 2.2 présente les résultats de différentes études concernant la variation de la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés (BGR) à 28 jours, en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés (GR) par des granulats naturels (GN).

Tableau 2.2 : Variation de la résistance à la compression des BGR à 28 jours.

Auteurs	Taux de remplacement du GR (%)	Variation de la résistance à la compression du BGR par rapport au BGN (%)
Alam et al. [89]	25	15
	50	14.7
AbdElhakam et al. [86]	25	3
	50	7.1
	75	11.6
	100	11.2

### 2.5.2 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion du béton est un autre facteur affectant les performances structurelles du béton. Il a été observé que la résistance à la flexion du BGR diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du GR. Une étude de Katz [90] a indiqué que la résistance à la flexion du BGR est inférieure de 10 % à celle du BGN. La diminution de la résistance à la flexion BGR était importante lorsque des GR étaient utilisés saturés [91]. Ceci est attribué à la mauvaise qualité de la liaison interraciale développée entre l'ancien mortier attaché au GR et le nouveau mortier. Alors que, les études de Limbachiya *et al.* [87] Beltrán *et al.* [92] et Sri Ravindrarajah et Tam [93] ont indiqué que le GR n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la flexion du béton. Parthiban et Saravana Raja Mohan [94] ont étudié l'influence des GR sur les propriétés mécaniques des BGR. Ils ont trouvé des résistances à la flexion à 28 jours de 4.84, 5.29, 5.28, 5.18 et 4.51 MPa pour 0, 25, 50, 75 et 100 % de taux de remplacement des granulats naturels respectivement. La résistance à la flexion pour 25, 50 et 75 % de GR est supérieure à celle du BGN. Cette amélioration est due principalement à la forme angulaire du GR utilisé, ce qui produit une bonne adhérence entre les granulats donnant lieu à une meilleure résistance à la flexion des BGR. Gesoglu [95] ont trouvé à 56 jours une réduction de 16.3 à 23.7% de la résistance à la flexion pour un taux de 100 % de GR. Barra et Vasquez [96] ont constaté que l'utilisation des GR saturées impliquait une réduction sensible de la résistance à la traction par flexion du BGR par rapport au béton conventionnel, car à des niveaux de saturation plus élevés, la liaison mécanique entre la pâte de ciment et les granulats recyclés s'affaiblit. Un meilleur comportement a été constaté en utilisant des GR semi-saturés.

Huothet *al.* [97] ont étudié l'effet de la fumée de silice sur les propriétés du BGR. Ils ont trouvé que la résistance à la flexion du BGR à 28 jours est de 12 % inférieure à celle du BGN, en utilisant une substitution de 10 % de fumée de silice. Ils ont conclu que la résistance à la flexion a été augmentée de 6 % avec une addition de 10 % de fumée de silice qui semble être le pourcentage de remplacement optimal par rapport au BGN (Figure Les résultats indiquent que l'inclusion de la fumée de silice améliore les propriétés du BGR et permet son utilisation dans les applications structurelles.

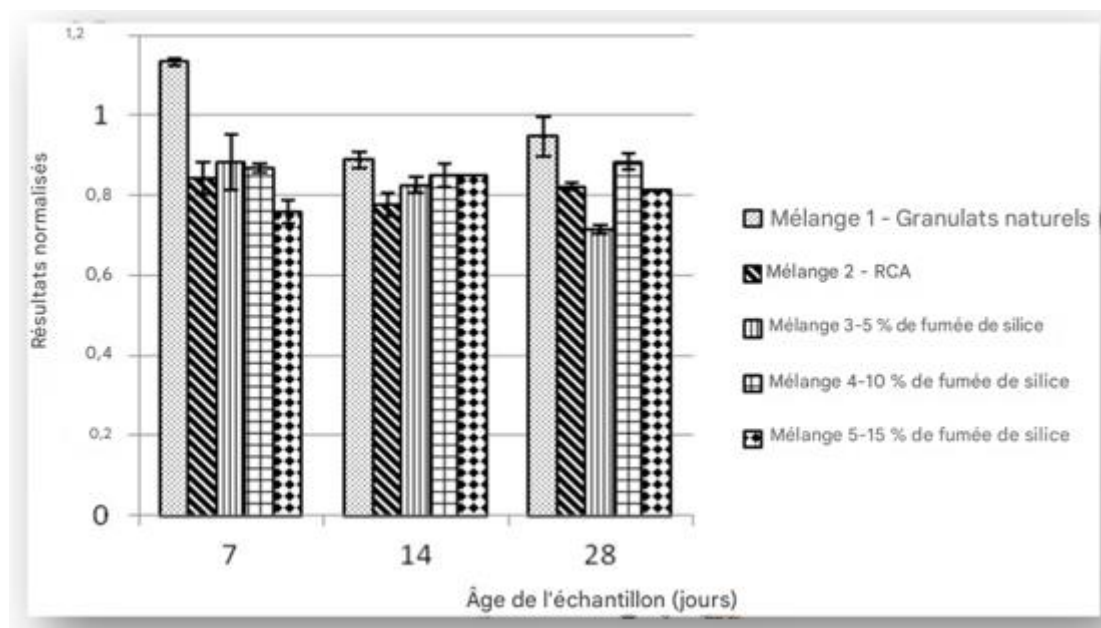


Figure 2.9 :Résultats de résistance à la traction par flexion [97].

### 2.5.3 Résistance par fendage

Comme pour la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage des bétons à base de granulats recyclés est inférieure à celle du béton de granulats naturels et elle diminue lorsque la quantité des granulats recyclés augmente.

Folinoet *al.* [98] ont trouvé une réduction de la résistance par fendage à 28 jours de l'ordre 4 %, 3 % et 18 % lorsque le béton contient de 30 %, 60 % et 100 % de graviers recyclés, respectivement.

Thomas *et al.* [80] ont trouvé une diminution de la résistance par fendage à 28 jours de l'ordre 10 %, 15 % et 20 % pour des taux de GR de 20 %, 50 % et 100 %, respectivement. De même, Gesoglu[95] ont trouvé à 56 jours une réduction de 7.4 à 17.6 % de la résistance par fendage pour un taux de 100 % de GR. Etxeberriaet *al.* [75]ont trouvé que la résistance par fendage des BGR est supérieure à celle des bétons ordinaire, sauf pour le béton avec 100 % de BGR. Kou et Poon [97] ont constaté des améliorations de la résistance à la traction par fendage des bétons de granulats recyclés après 5 ans de durcissement et qui dépassent parfois la résistance à la traction des bétons de granulats naturels, due à l'amélioration de la microstructure de la zone de transition inter faciale et donc une augmentation de l'adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et les GR, comme le montre la figure 2.10. A 1 an, la résistance au fendage des bétons préparés avec 100 % de GR étaient supérieures à celles du béton de GN. Après 5 ans, le béton avec 100 % de GR avait un gain de 42 % à 65 % par rapport au béton de granulats naturels.

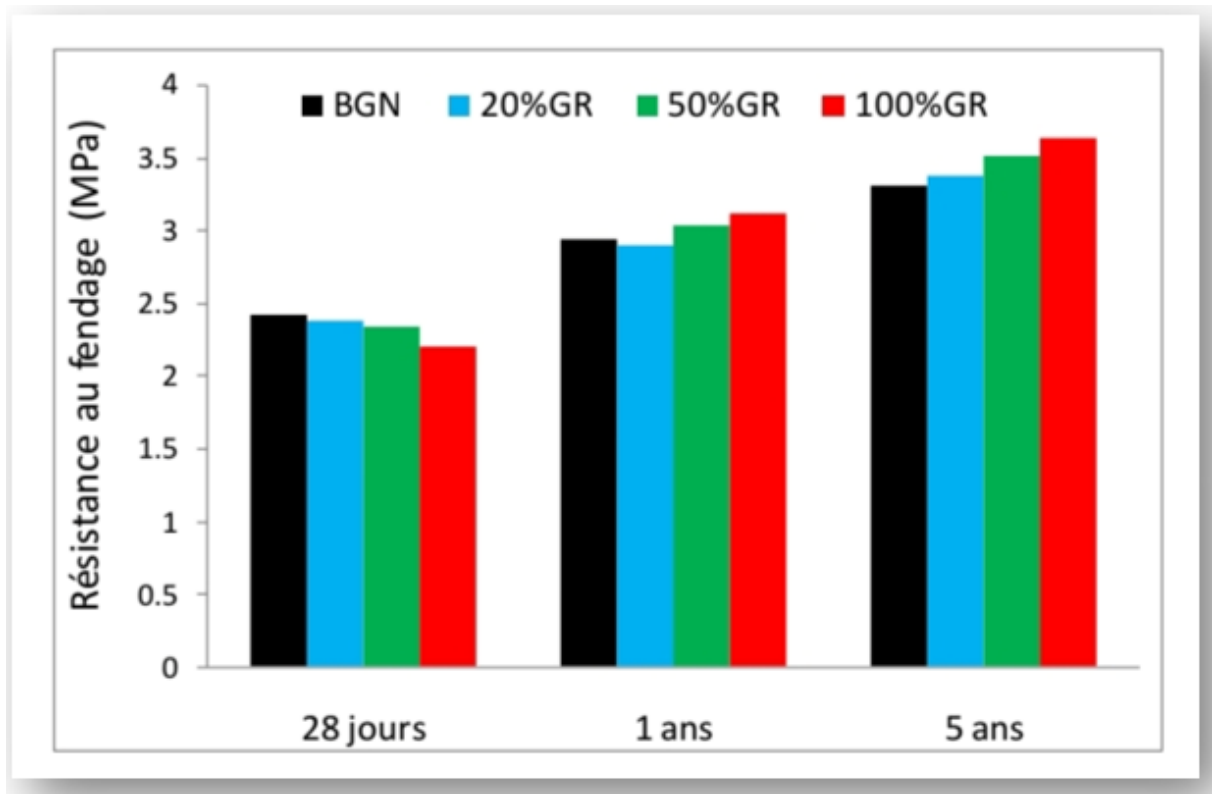


Figure 2.10: Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR [97].

### 2.5.3 Module d'élasticité

Plusieurs études ont indiqué que le béton contenant du GR a un module d'élasticité inférieur à ceux contenant du GN, et la réduction est proportionnelle à l'augmentation du taux de GR utilisée [99]. Généralement, la diminution du module d'élasticité du BGR est due à la grande quantité du mortier attaché au granulats d'origine avec un module d'élasticité relativement faible du GR par rapport au GN, du fait que le module d'élasticité du béton dépend principalement du module d'élasticité des granulats [100].

Hansen [101] a trouvé que la valeur du module d'élasticité pour le béton à base de BGR était de 10 à 33 % inférieure par rapport à celle du BGN.

Xiao *et al.*[102] Ont indiqué que pour un béton à base de 100 % de GR, le module d'élasticité du béton diminue d'environ 45 %. Kouet *al.*[99] ont conclu que le module d'élasticité du BGR diminue à mesure que le pourcentage de remplacement du GR augmente et que le module d'élasticité du BGR avec 100 % de GR est environ 40 % inférieur à celui du BGN.

Kouet *al.* [75] également constaté que le module d'élasticité du BGR diminue à mesure que le pourcentage de remplacement du GR augmente et que le module d'élasticité du BGR avec 100 % de GR est environ 40 % inférieur à celui du BGN.

Ettxeberria *et al.* [75] Ont également constaté que le module d'élasticité des BGR diminue lorsque le taux de GR augmente. Le module d'élasticité du béton avec 100 % de GR est inférieur de 15 % à celui du BGN.

La variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage de remplacement du GR dans le béton rapportée par plusieurs chercheurs est présentée à la figure 3.10. D'après cette figure 2.11 le module d'élasticité diminue jusqu'à 20 % pour un taux de remplacement de 100 % de GR. Cependant, sur la base des données de la littérature, la variation du module d'élasticité est plus faible (bande de 95 %) [87].

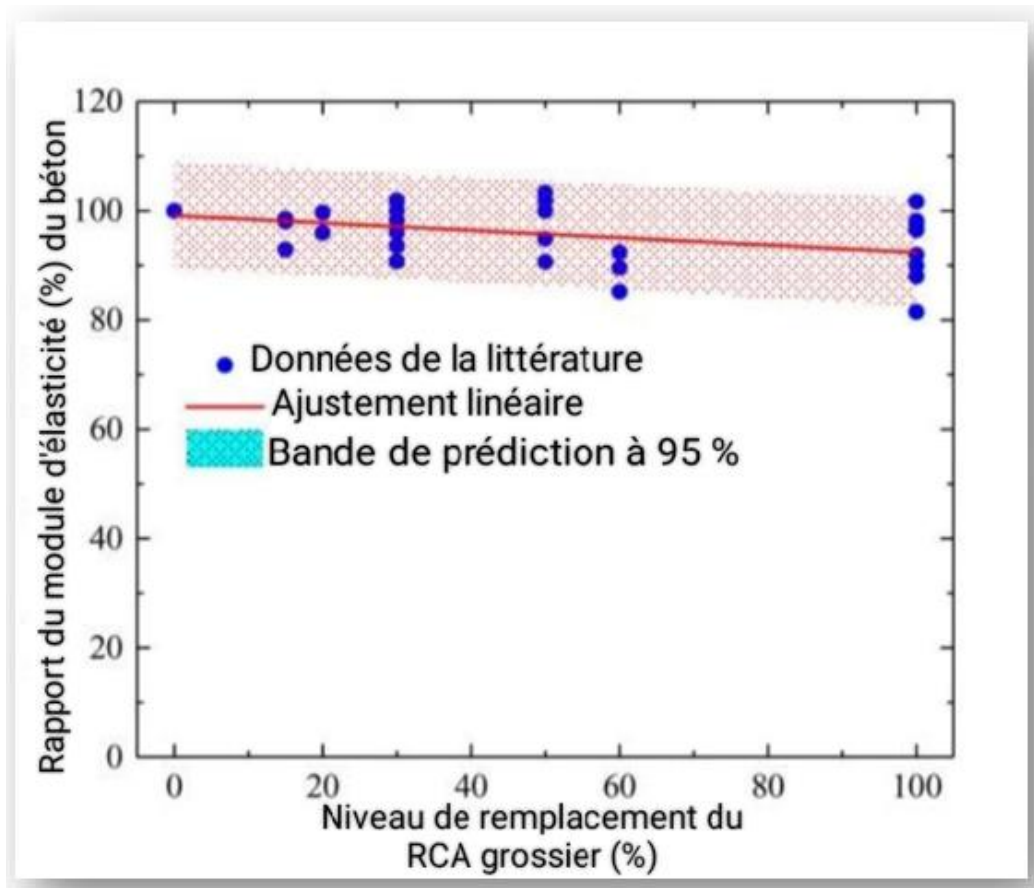


Figure 2.11: Module d'élasticité des BGR en fonction du taux de GR [87].

Sri R, Tam *et al.* [24] ont montré que la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression pour le béton à base de granulats recyclés est différente de celle pour le béton ordinaire.

## **2.6 Durabilité du béton recyclé**

La durabilité du béton est sa capacité à résister à divers types de dommages, en maintenant sa résistance et son intégrité durant sa période d'exposition à un milieu environnant. La durabilité du BGR est généralement affectée par le mortier attaché au GR. plus la quantité de mortier attaché au GR est élevée, plus la porosité et l'absorption d'eau sont élevées, conduisant à des performances de durabilité plus faibles du BGR[103].

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier la durabilité du béton contenant des granulats recyclés. En préliminaire, il faut signaler qu'il existe plusieurs façons de générer une formule de béton recyclé par rapport à une formule témoin, selon le choix du paramètre gardé constant ; ce choix influe bien entendu sur le résultat de la comparaison.

### **2.6.1 Absorption d'eau**

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires [104-106] .

### **2.6.2 Perméabilité**

Selon Rasheeduzzafar A.Khan[107] lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celle des bétons ordinaires.

## **2.7 Conclusion**

Le béton avec granulats recyclés (BGR) représente une alternative durable et écologique au béton traditionnel. L'utilisation de granulats issus de la démolition et du recyclage permet de réduire l'exploitation des ressources naturelles, de diminuer l'empreinte carbone du secteur de la construction et de favoriser l'économie circulaire.

Cependant, la qualité du BGR dépend de plusieurs facteurs, notamment les propriétés des granulats recyclés, leur taux de substitution et le traitement préalable des matériaux. Des ajustements sont souvent nécessaires pour optimiser sa maniabilité, sa résistance mécanique et sa durabilité. Les études montrent que, bien conçu, le BGR peut atteindre des performances comparables au béton conventionnel tout en offrant des avantages environnementaux significatifs.

— *Chapitre 2: les propriétés physico- mécaniques des bétons recyclés à base des granulats recyclés.*

Ainsi, le développement et l'utilisation du béton avec granulats recyclés sont essentiels pour une construction plus responsable et durable, nécessitant des recherches continues pour améliorer ses propriétés et élargir son application.

---

*Chapitre 3*  
*Matériaux utilisés*

---

### 3.1. Introduction

Dans le but d'évaluer l'impact de l'incorporation de granulats recyclés sur les performances du béton, une étude expérimentale a été menée à travers la préparation et la caractérisation de différentes formulations de béton. Cette démarche vise à analyser l'effet de la substitution partielle du gravier naturel par du gravier recyclé sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau. Quatre formulations distinctes ont été élaborées à cet effet :

Un béton ordinaire de référence fabriqué exclusivement avec du gravier naturel (0 % de remplacement) et trois bétons recyclés comportant respectivement 25 %, 50 % et 75 % de gravier recyclé, en remplacement du gravier naturel.

Ces mélanges ont été conçus de manière à garantir une comparabilité entre les différents bétons, en maintenant constantes les autres variables (rapport E/C, dosage en liant).

L'objectif de cette partie est de mesurer et comparer les propriétés à l'état frais (ouvrabilité, masse volumique) et à l'état durci (résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion trois points) de chacun des bétons formulés afin de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de granulats recyclés peut affecter, positivement ou négativement, la qualité du béton. Le chapitre présente successivement les matériaux utilisés, les méthodes d'essai adoptées conformément aux normes en vigueur, dans le chapitre qui suit l'analyse des résultats obtenus est détaillée.

La réalisation de l'étude expérimentale repose sur l'utilisation de matériaux couramment employés dans la formulation des bétons, auxquels s'ajoutent des granulats recyclés provenant de déchets de construction. Cette section décrit les caractéristiques des constituants principaux : ciment, eau de gâchage, granulats naturels (sable et gravier) et granulats recyclés.

### 3.2. Matériaux utilisés

#### 3.2.1. Le ciment

Un ciment CPA-CEM II 42.5 nommé « Awted » fabriqué par l'usine Amouda El Beïdha, située dans la wilaya de Laghouat figure 3.1. Le liant est certifié et conforme à la norme algérienne (NA442) et européenne (EN CE 197-1).



Figure 3.1 : Sac de ciment Awted.

### 3.2.2. Les granulats

Quatre types de granulats ont été utilisés pour la formulation des différents mélanges de béton. Ces granulats se distinguent par leur nature (naturelle ou recyclée) ainsi que par leur granulométrie (sable ou gravier).

#### a) Sable naturel

On a utilisé un sable qui se trouve sur le marché de Gueltat Wilaya de Laghouat. Ce sable présente une forme arrondie figure 3.2, ce qui contribue à améliorer l'ouvrabilité du béton. Il est conforme à la norme EN 12620,



Figure3.2 : Sable fin.

**b) Sable de carrière**

Le sable de carrière utilisé est issu de la carrière de Gueltat Wilaya de Laghouat. D'origine calcaire, ce sable est obtenu par concassage de roches massives. Il présente des grains anguleux et rugueux, ce qui peut améliorer l'adhérence à la pâte cimentaire mais aussi réduire légèrement l'ouvrabilité du mélange figure 3.3. Il est utilisé en complément du sable naturel pour équilibrer la courbe granulométrique et renforcer la cohésion de la matrice.



Figure 3.3 : Sable de carrière.

**c) Sable corrigé**

Dans le cadre de cette étude, un sable corrigé a été élaboré à partir d'un mélange proportionné de sable fin naturel et de sable de carrière concassé, dans le but d'obtenir une granulométrie optimisée répondant aux exigences de la formulation du béton. Le sable fin, généralement d'une granulométrie inférieure à 2 mm mais il présente souvent un module de finesse trop bas, pouvant nuire à la stabilité et à la maniabilité du béton. À l'inverse, le sable de carrière, issu du concassage avec un module de finesse plus élevé, mais peut contenir une proportion excessive de fines ou de particules grossières. En associant ces deux matériaux dans des proportions judicieusement choisies, on parvient à corriger la courbe granulométrique globale du sable et à obtenir un sable de module de finesse intermédiaire, plus adapté aux exigences de résistance, de compacité et d'ouvrabilité du béton. Ce sable corrigé figure 3.4 contribue ainsi à la maîtrise de la consistance du béton frais et à l'optimisation des performances mécaniques à l'état durci.



Figure3.4 : Sable corrigé.

**d) Gravier**

Deux types de granulats grossiers ont été utilisés afin d'évaluer l'influence de la nature du granulat sur les propriétés du béton : un gravier naturel et un gravier recyclé.

### 1. Gravier naturel

Les graviers naturels sont des matériaux granulaires obtenus par l'altération naturelle des roches, ou par le concassage de celles-ci. Notre gravier provient de la carrière RECHAÏGA de TIARET figure 3.5.



Figure3.5 : Gravier naturel.

### 2 .Gavier recyclé

Le gravier recyclé figure 3.6, quant à lui, provient du concassage de déchets de béton de démolition préparés en laboratoire. Ce granulat se caractérise par une hétérogénéité marquée, des grains anguleux à arêtes vives, une surface très rugueuse, ainsi qu'un enrobage important de mortier résiduel, hérité du matériau d'origine.

L'utilisation conjointe de ces deux types de graviers permet d'étudier de manière comparative leur impact sur les performances physico-mécaniques du béton, tout en intégrant une approche durable de valorisation des matériaux recyclés.



Figure 3.6 : Gravier recyclé.

### 3.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage est incorporée au mélange de liant et de granulats afin de déclencher les réactions d'hydratation et de conférer au béton sa plasticité, condition essentielle à son ouvrabilité. La qualité de cette eau doit être conforme aux exigences de la norme NF P 18-303, garantissant qu'elle ne contient pas d'éléments susceptibles d'altérer les propriétés du béton ou d'interférer avec le processus de prise.

## Essais physiques

### 3.3.1 Analyse granulométrique [NF P 18-540]

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes figure 3.7. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de graphique.



Figure 3.7 : Procédé d'analyse granulométrique des granulats.

### 3.3.2 Module de finesse [NFP 18-540]

Le module de finesse est égal au 1/100ème de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm

### 3.3.3 La masse volumique apparente des matériaux [la norme NF P 18-554]

La masse volumique apparente est définie comme le rapport entre la masse d'un matériau pris en vrac, incluant les vides inter granulaires, et le volume total qu'il occupe. Le principe de la détermination consiste à remplir un récipient de volume connu avec le matériau, puis à mesurer la masse totale obtenue, ce qui permet de calculer la masse volumique apparente figure 3.8. Si :

**M** : masse de l'échantillon de granulats (g) ;

**V** : volume du récipient utilisé pour la masse (cm<sup>3</sup>) ;

La masse volumique  $M_{app}$  (g/cm<sup>3</sup>) est :

$$M_{app} = \frac{M}{V} = \frac{M_t - M_{moule}}{V} \text{ Eq (3.1)}$$



(a)



(b)



(c)

Figure 3.8 : Masse volumique apparente de : sable (a), de gravier naturel et recyclé (b) et ciment (c).

### 3.3.4. La masse volumique absolue [NF P 18-555]

La masse volumique absolue d'un granulat correspond à la masse par unité de volume de la matière solide, en excluant tous les vides internes ou inter granulaires. Elle représente le volume réel occupé par la substance, aussi appelé volume absolu. Pour la déterminer, on utilise une éprouvette graduée remplie d'un liquide inerte vis-à-vis de l'échantillon. Le principe consiste à remplir l'éprouvette jusqu'à un premier niveau  $V_1$ , puis à y introduire une masse sèche connue  $M$  du matériau. Le nouveau niveau du liquide est noté  $V_2$ . Le volume déplacé ( $V_2 - V_1$ ) correspond alors au volume absolu du matériau figure 3.9. La masse volumique absolue est calculée à l'aide de la formule :

$$M_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad \text{Eq (3.2)}$$



Figure 3.9: Masse volumique absolue du sable et gravier.

### 3.5 Equivalent de sable [NF P 18-598]

L'essai d'équivalent de sable a pour objectif de quantifier la teneur en fines (essentiellement argileuses) présentes dans un sable ou un granulat fin, en les séparant des particules plus grossières par suspension dans une solution flocculant (généralement une solution d'hexamétaphosphate de sodium). Le mélange est agité, laissé au repos, puis les hauteurs des dépôts sont mesurées dans une éprouvette graduée figure 3.10.

Deux hauteurs sont relevées :

Hauteur de la suspension d'argile ( $H_1$ ) : hauteur du liquide coloré au-dessus du sable,

Hauteur du sable décanté ( $H_2$ ) : hauteur du dépôt de sable propre. L'équivalent de sable est exprimé par la formule suivante :

$$ES_V = \frac{H_2}{H_1} \text{Eq (3.3)}$$

L'équivalent de sable par piston ( $ES_P$ ) est défini par :

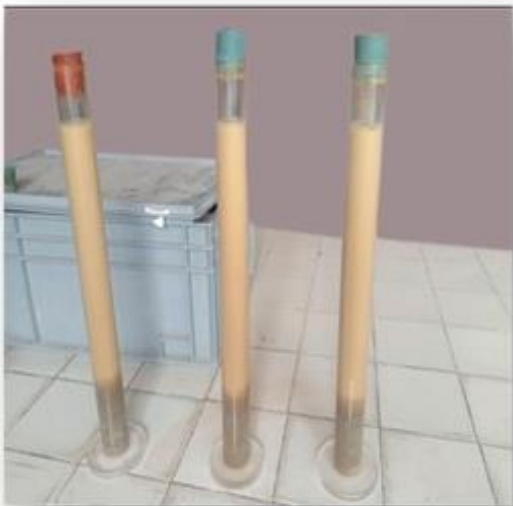
$$ES_P = \frac{H'_2}{H_1} \text{Eq (3.4)}$$



Mise en place de l'échantillon de sable dans l'éprouvette



10 minutes de repos après remplissage de l'éprouvette



Agitation et lavage avec le tube laveur



Sédimentation durant 20 minutes



Présentation des résultats visuels (ESV)

Présentation des résultats par piston (ESP)

Figure 3.10 : Essai d'équivalent de sable.

### 3.3.6 Coefficient d'Absorption d'Eau [NF P 18-554]

Le coefficient d'absorption d'eau permet de quantifier la capacité d'un granulat sec à absorber l'eau, en particulier dans ses pores accessibles. Cet essai est essentiel pour ajuster la quantité d'eau de gâchage dans la formulation des bétons, notamment lorsque des granulats recyclés ou très poreux sont utilisés. Le principe de l'essai repose sur la comparaison de deux états du granulat :

État sec : le granulat est séché à l'étuve à une température comprise entre 105 °C et 110 °C jusqu'à masse constante ;

État saturé et essuyé : le granulat est immergé dans l'eau pendant 24 heures, puis égoutté et essuyé à l'aide d'un chiffon absorbant, de manière à saturer ses pores internes sans laisser d'eau libre en surface M2 et celle à l'état sec M1 figure 3.11.

$$A_b = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad \text{Eq (3.5)}$$

Un coefficient élevé indique un granulat très poreux, ce qui peut influencer l'ouvrabilité, le rapport E/C effectif et la durabilité du béton.



Figure 3.11 : L'absorption d'eau d'un gravier recyclé.

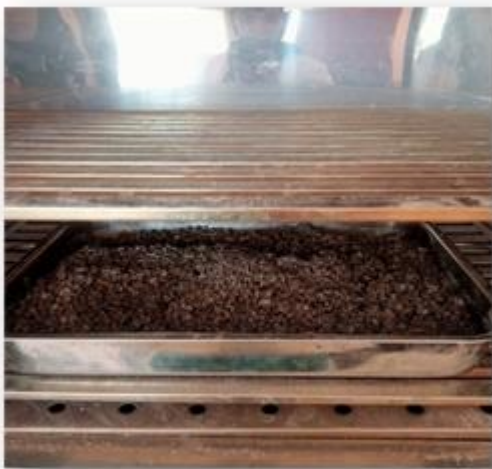
### 3.4. Essais mécaniques :

#### 3.4.1 Essai de dureté des graviers (coefficient los Angeles LA) [NF P 18-573]

La détermination de la résistance à la fragmentation des graviers effectuée par mesure de la quantité des éléments inférieurs à 1.6 mm produit en soumettant les granulats aux chocs de boules normalisées dans la machine Los Angeles figure 3.12.

La résistance combinée à la fragmentation par choc et à l'usure par frottement réciproque s'exprime par la quantité :

$$LA = 100 \times \frac{M - m}{M} \quad \text{Eq (3.6)}$$



(a)



(b)

Figure 3.12 : Essai Los Angeles sur (a) gravier naturel, (b) gravier recyclé.

### 3.4.2 Essai de Micro Deval [NF P 18.572]

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

La détermination de la résistance à l'usure effectuée par une mesure de la quantité des éléments inférieurs à 1.6 mm produit en soumettant les granulats aux frottements réciproques dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies, l'échantillon soumis à l'essai en présence de l'eau mais l'essai peut également être effectué à sec figure 3.13.

Le coefficient Micro-Deval est par définition égal au rapport :

$$MDE = 100 \times \frac{M-m}{M} \quad \text{Eq (3.7)}$$



(a)



(b)

Figure 3.13: Essai de Micro- Deval sur (a) gravier naturel, (b) gravier recyclé.

### 3.5. Formulations Adoptées

Le béton est formulé par la méthode de DREUX GORISSE qui repose sur les abaques et sur un choix préalable à fixer à l'avance.

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

#### a) Critère de maniabilité

L'affaissement de classe **S3** (béton plastique avec **Aff =7 cm**).

#### b) Critère de résistance

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % de la résistance minimale en compression  $f_{c28}$  nécessaire à la stabilité de l'ouvrage. La résistance à la compression de **35MPa** à 28 jour.

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28} \quad \text{Eq (3.8)}$$

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times 35$$

$$\sigma'_{28} = 40.25 \text{ MPa.}$$

**c) Choix du ciment**

Dénomination normalisée : **42.5 MPa.**

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie  $\sigma'_c$ .

La Classe vraie  $\sigma'_c$  est : **45 à 55 MPa.**

$$\sigma'_c = 55 \text{ MPa.}$$

**d) Détermination du rapport C/E**

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_c \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \mathbf{Eq(3.9)}$$

$\sigma'_{28}$  = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa.

$\sigma'_c$  = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m<sup>3</sup> de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m<sup>3</sup> de béton

$G'$  = Coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

D'après (Annexe F tableau2) du coefficient granulaire  $G'$  en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats  $D_{\max}$ .

$$G' = 0.5$$

**e) Détermination de C**

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 1 (Annexe F) en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

$$C/E = 1.96$$

On a fixé le rapport **E/C** à **1.96**, le dosage en ciment **C** à **400 kg/m<sup>3</sup>**, la résistance à la compression de **35 MPa** à 28 jours, l'affaissement de classe **S3** (béton plastique avec **Aff=7cm**) et le diamètre maximal **Dmax=16 mm**.

Pour la détermination des pourcentages des différentes classes granulaires entrant dans la formulation du squelette du béton avec un minimum de vides, on a tracé :

Les courbes granulométriques des différents granulats (Gravier et Sable corrigé)

-La droite de référence de Dreux Gorisse est définie par son abscisse X et son ordonnée Y :

$$D_{max} \leq 20\text{mm}$$

$$X = \frac{D_{max}}{2} \quad \text{Eq (3.10)}$$

$$X = 8$$

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 D_{max}} + K' \quad \text{Eq (3.11)} \quad \text{Avec :} \quad K' = K + K_s + K_p \quad \text{Eq (3.12)}$$

Tableau 3.1 : Coefficient  $K_s$  et  $K_p$  pour le calcul de K.

<b>K</b>	<b>Dosage de ciment 400, granulats concassé et vibration normale</b>	<b>0</b>
<b>K<sub>s</sub></b>	6Mf-15	-0.42
<b>K<sub>p</sub></b>	Plastique	7

$$K' = 0 + 8 - 0.42 = 7.58$$

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 \times 20} + 7.58$$

$$Y = 51.58$$

On détermine la compacité :

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 \quad \text{Eq (3.13)}$$

Tableau 3. 2 : Les valeurs convenables des granulats.

<b>C<sub>0</sub></b>	<b>Béton plastique avec vibration normal</b>	<b>0.825</b>
<b>C<sub>1</sub></b>	Sable et gravier concassé	-0.03
<b>C<sub>2</sub></b>	Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c	-0.03
<b>C<sub>3</sub></b>	Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant : $C_3 = (C-350/500)$	0.01

$$C=0.825-0.03-0.03+0.01=0.775$$

### 3.6. Préparation des éprouvettes :

Pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé des moules cylindrique (16×32) cm<sup>3</sup> pour les essais de compression, et des moules prismatiques (10× 10 × 40) cm<sup>3</sup> pour les essais de traction trois points figure 3.14.



Figure 3.14 : Epreuves (cylindriques 16x32cm<sup>2</sup> et prismatique 10x10x40 cm<sup>3</sup>).

### 3.7. Malaxage de béton [NF P 18 404] :

Le malaxage est réalisé à l'aide d'une bétonnière de type classique, selon un protocole précis visant à assurer une homogénéité optimale du mélange. Dans un premier temps, l'ensemble des granulats (sable, gravier naturel et gravier recyclé) est introduit dans le malaxeur, puis mélangé à sec pendant environ 2 minutes afin de garantir une répartition uniforme des particules solides. Ensuite, l'eau de gâchage est ajoutée progressivement tout en

poursuivant le malaxage pendant environ 3 minutes figure3.15, afin de permettre une bonne dispersion de l'humidité et d'obtenir une pâte homogène et cohésive.



Figure 3.15 : Malaxage de béton.

Après le malaxage, Le béton frais est ensuite versé dans des moules normalisés (prismes, cylindres ou cubes) en deux ou trois couches successives. Chaque couche est vibrée sur une table vibrante figure 3.16.



Figure 3.16 : Vibration de béton.

Après remplissage, les moules sont recouverts et laissés au repos pendant 24 heures à température ambiante. À l'issue de ce délai, les éprouvettes sont démoulées puis placées dans un bac d'eau à température constante de  $20 \pm 2$  °C figure 3.17, conformément aux exigences de la norme EN 12390-2, jusqu'à la date prévue des essais (7, 21 et 28 jours).



Figure 3.17: Démoulage et conservation des éprouvettes dans l'eau.

### 3.8. Essai Sur Béton Frais

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton à l'état frais

#### 3.8.1. Affaissement au cône d'Abrams [NF EN 12350-2]

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, conforme à la norme NF EN 12350-2, est utilisé pour évaluer la consistance du béton frais, c'est-à-dire sa capacité à s'écouler sous son propre poids. Le principe consiste à remplir un moule tronconique métallique (hauteur : 300 mm, diamètre inférieur : 200 mm, diamètre supérieur : 100 mm) en trois couches de béton tassées chacune à l'aide de 25 coups de tige. Une fois le cône rempli, il est retiré verticalement, et l'on mesure la hauteur de l'affaissement du béton par rapport à la hauteur initiale du moule figure 3.18. Cette valeur, exprimée en millimètres, permet de qualifier l'ouvrabilité du béton : plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. Cet essai est particulièrement adapté aux bétons de consistance plastique ou fluide.



Figure 3.18 : Affaissement au cône d'Abrams.

### 3.8.2. Masse volumique à l'état frais

Pour déterminer la masse volumique d'un béton frais, il faut suivre les étapes suivantes :

- Remplir en béton frais un récipient de volume  $V_r$  et de masse  $M_r$ . Le remplissage est exécuté en deux couches.
- Araser le haut du récipient.
- Peser le récipient rempli du béton, soit  $M_t$  figure 3.19.

La masse volumique du béton frais  $f$  est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{M_t - M_r}{V_r} \text{ Eq (3.14)}$$



Figure 3.19: Détermination de la masse volumique à l'état frais.

### 3.9. Essai Sur Béton à l'état durci :

#### 3.9.1. La masse volumique [NF EN 12390]

La masse volumique est la masse d'un matériau par unité de volume figure 3.20. Pour le béton, elle est exprimée en kilogrammes par mètre cube ( $\text{kg/m}^3$ ).

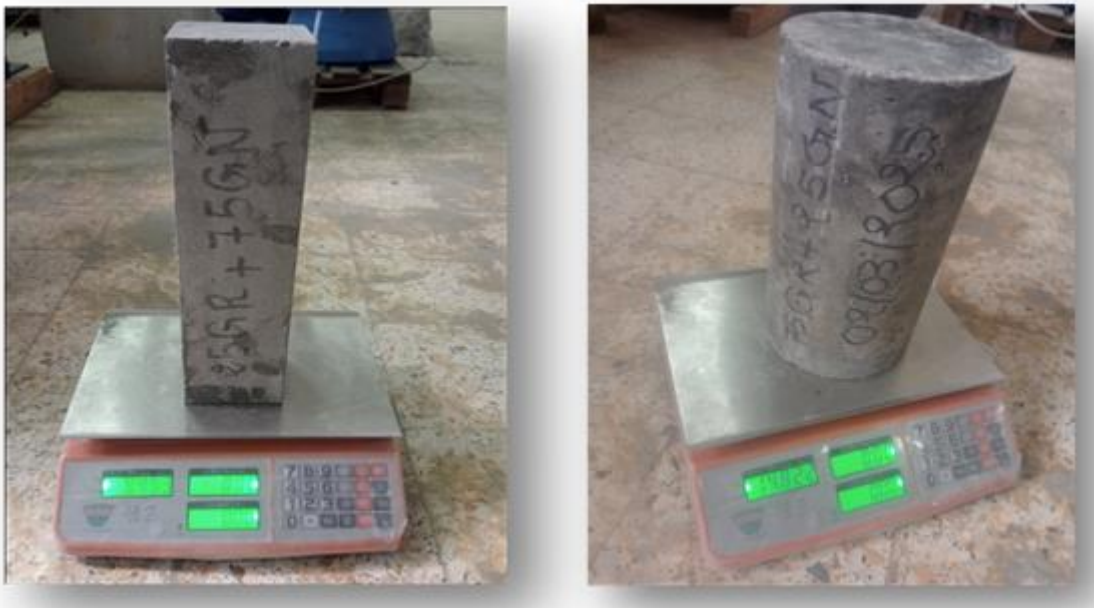


Figure 3.20 : Détermination de la masse volumique à l'état durci.

### 3.9.2. Essai de compression [NF EN 18-455]

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique ou cubique à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci. Le but est de déterminer la résistance à la compression.

L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante. Pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical est enregistrée, et ce jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette qui se traduit par l'arrêt de la presse, qui signifie l'achèvement de l'essai de compression figure 3.21. À ce moment la force et la contrainte ont subi par l'éprouvette sont affichés sur l'écran de la presse.

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire.



Figure 3.21 : Essais de compression des éprouvettes cylindriques (16x32) cm<sup>2</sup>.

### 3.9.3. Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques selon la norme NF P.18-407, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique figure 3.22.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1.8.P}{2.a^2} \quad \text{Eq (3.15)}$$

$\sigma_t$ : résistance à la traction par flexion en (MPa).

P : la charge appliquée à la rupture en (N).

a : le coté de la section carrée de l'éprouvette.



Figure 3.22 : Essai de traction par flexion.

### 3.10. Conclusion

Dans ce chapitre, l'ensemble des matériaux constituant les différents types de bétons étudiés a été présenté, en distinguant d'une part les composants des bétons ordinaires à base de granulats naturels, et d'autre part ceux des bétons à base de graviers recyclés. Chaque matériau a fait l'objet d'une description détaillée, mettant en évidence ses caractéristiques

physiques et sa contribution au comportement global du béton. Par la suite, les formulations des différentes compositions de béton ont été établies à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse, reconnue pour sa pertinence dans le dimensionnement des mélanges en fonction des propriétés recherchées (ouvrabilité, résistance, etc.). Cette méthode a permis de déterminer avec précision les dosages en liant, en granulats et en eau, en tenant compte des propriétés spécifiques des graviers recyclés, notamment leur porosité et leur capacité d'absorption d'eau.

---

*Chapitre 4*  
*Résultats et interprétations*

---

## 4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de notre recherche. Il vise à mettre en évidence l'effet de la substitution partielle des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés du béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Pour cela, plusieurs formulations ont été étudiées, avec des taux de remplacement de 25 %, 50 % et 75 %. Les résultats obtenus ont permis de comparer ces bétons recyclés au béton de référence (0 % de remplacement), en termes de consistance, masse volumique, résistance à la compression et à la traction, ainsi que d'autres paramètres pertinents. Une interprétation critique des données expérimentales est proposée, afin de mieux comprendre l'influence des granulats recyclés sur le comportement global du béton et d'évaluer la faisabilité de leur intégration dans des applications structurales.

## 4.2. Résultat des essais physiques

### 4.2.1. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus des différents granulats sont présentés dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3, et 4.4 ci-dessous :

#### a) Gravier naturel

Tableau 4.1 : Analyse granulométrique du gravier naturel.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage Passant (%)
16	637	637	19.9	80.1
12.5	1092	1729	54.03	45.97
10	765	2494	77.94	22.06
8	286	2780	86.87	13.13
6.3	224	3004	93.87	6.13
5	107	3111	97.22	2.78
4	66	3177	99.3	0.7
2	19	3196	99.87	0.13
Fond	2	3198	99.94	0.06

b) Gravier recyclé

Tableau 4.2 : Analyse granulométrique du gravier recyclé.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage Refus(%)	Pourcentage Passant(%)
<b>12.5</b>	178	178	7,12	92,88
<b>10</b>	466	644	25,76	74,24
<b>8</b>	541	1158	47,4	52,6
<b>6.3</b>	616	1801	72,04	27,96
<b>5</b>	363	2164	86,56	13,44
<b>4</b>	204	2368	94,72	5,28
<b>2</b>	120	2488	99,52	0,48
<b>Fond</b>	11	2499	99,96	0.04

Sable fin :

Tableau 4.3 : Analyse granulométrique du sable fin.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés(g)	Pourcentage Refus(%)	Pourcentage Passant(%)
<b>5</b>	0	0	0	100
<b>2.5</b>	19	19	1.9	98.1
<b>1.25</b>	36	55	5.5	94.5
<b>0.63</b>	85	140	14	86
<b>0.315</b>	370	510	51	49
<b>0.16</b>	392	902	90.2	9.8
<b>0.08</b>	86	988	98.8	1.2
<b>Fond</b>	12	1000	100	0



c) **Sable carrière :**

Tableau 4.4 : Analyse granulométrique de la sable carrière.

Tamis (mm)	Refus(g)	Refus cumulé(g)	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage Passant (%)
5	13	13	1.3	98.7
2.5	292	305	30.5	69.5
1.25	270	575	57.5	42.5
0.63	181	756	75.6	24.4
0.315	114	870	87	13
0.16	62	932	93.2	6.8
0.08	41	973	97.3	2.7
Fond	27	1000	100	0

Module de finesse :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5)}$$

Eq (4.1)

• **Sable fin :**

$$M_f = \frac{0+1.9+5.5+14+51+90.2}{100} = 1.63$$

$Mf = 1,63$  donc c'est un sable fin.

• **Sable de carrière :**

$$Mf = \frac{1.3+30.5+57.5+75.6+87+93.2}{100} = 3.45$$

$Mf = 3.45$  donc le sable est gros.

L'analyse granulométrique figure 4.2 a montré que la courbe du sable fin utilisé dans cette étude ne se situe pas à l'intérieur du fuseau granulométrique privilégié, tel que défini par les normes en vigueur. Une telle non-conformité peut avoir des conséquences sur la granulométrie globale du béton, et donc sur sa compacité, son ouvrabilité et ses performances

mécaniques. Pour corriger cette déficience, un mélange de sables a été réalisé en associant le sable fin avec un sable de carrière plus grossier, en appliquant la méthode du module de finesse. Plus précisément, le sable de carrière (SC) utilisé présente un module de finesse élevé  $Mf_1 = 3.45$  tandis que le sable fin présente un module de finesse faible  $Mf_2 = 1.63$ . L'objectif était d'obtenir un sable corrigé ayant un module de finesse ciblé, compris dans la plage recommandée (généralement entre 2,3 et 2,9), permettant d'assurer un bon empilement granulaire et une ouvrabilité optimale du béton figure 4.2.

Le calcul des proportions a été effectué en utilisant la formule de pondération des modules de finesse, afin de déterminer les pourcentages optimaux de chaque sable à introduire pour atteindre le module de finesse souhaité. Cette correction granulométrique permet ainsi d'obtenir un mélange de sables conforme, adapté à la formulation de bétons performants et homogènes figure 4.3.  $Mf = 2.5$  Les proportions des deux sables sont les suivantes :

$$S_C = \frac{(Mf - Mf_2)}{(Mf_1 - Mf_2)} \quad \text{Eq (4.2)}$$

$$S_C = \frac{2.5 - 1.63}{3.45 - 1.63} = 0.48 = 48\%$$

$$S_M = \frac{(Mf_1 - Mf)}{(Mf_1 - Mf_2)} \quad \text{Eq (4.3)}$$

$$S_M = \frac{3.45 - 2.5}{3.45 - 1.63} = 0.52 = 52\%$$

**d) Sable corrigé :**

Le sable corrigé est composé de 52% de sable fin et 48% de sable carrière figure 4.1.



Figure 4 .1 : Sable corrigé obtenu par mélange de sable de carrière et sable fin.

Tableau 4.5 : Analyse granulométrique du sable corrigé.

Tamis (mm)	Refus	Refus cumulé	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage Passant (%)
5	4	4	0.4	99.6
2.5	154	158	15.8	84.2
1.25	149	307	30.7	69.3
0.630	122	429	42.9	57.1
0.315	211	640	64	36
0.16	248	888	88.8	11.2
0.08	91	979	97.9	2.1
Fond	21	1000	100	0

$$M_f = \frac{0.4+15.8+30.7+42.9+64+88.8}{100} = 2.43$$

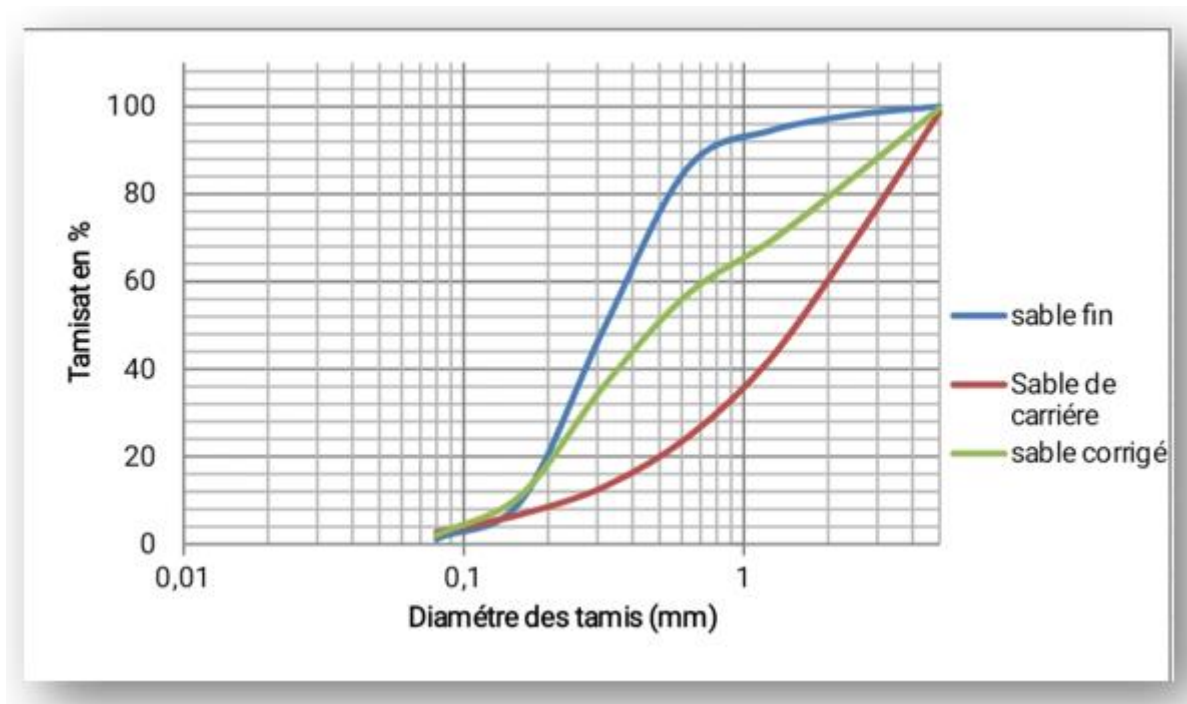


Figure 4 .2 : Etude granulométrique du sable fin, sable de carrière et sable corrigé.

Après avoir procédé à la correction du sable, en vue d'obtenir une granulométrie conforme aux exigences normatives pour la formulation des bétons, l'étape suivante consiste à établir les courbes granulométriques des trois matériaux principaux utilisés dans cette étude : le sable corrigé, le gravier naturel et le gravier recyclé. Cette analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme NF P 18-540, permet de caractériser la répartition des dimensions des particules pour chacun des matériaux, et d'évaluer leur aptitude à être intégrés dans un béton homogène, compact et performant. Les résultats obtenus constituent une base essentielle pour le dimensionnement des formulations et l'interprétation du comportement mécanique du béton.

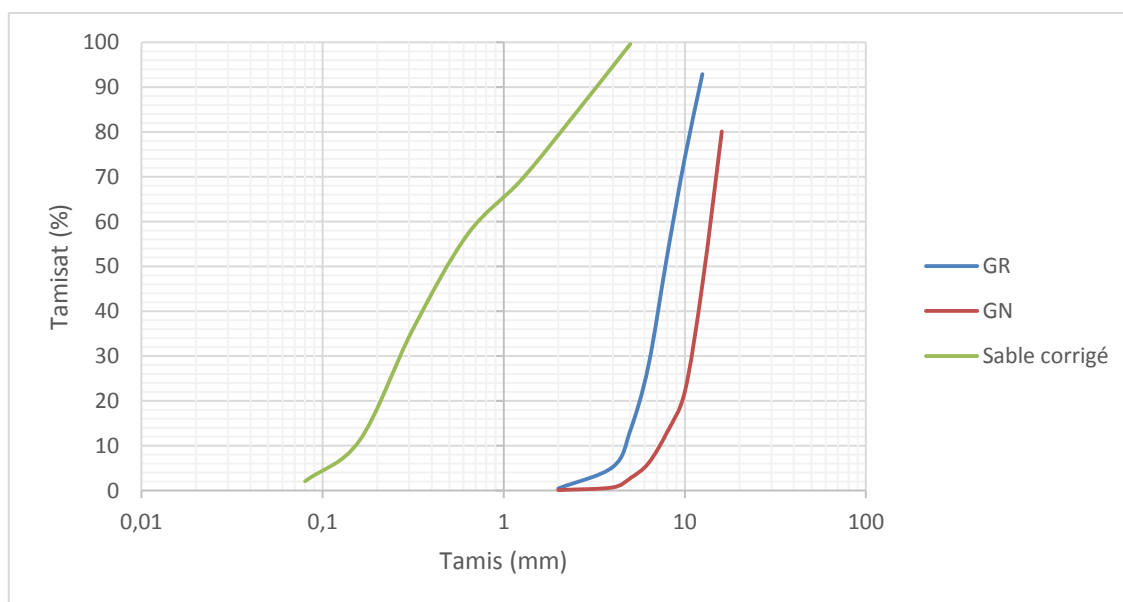


Figure 4.3 : Courbe granulométrique du sable corrigé, gravier naturel et recyclé.

On se basant sur la figure 4.3 on remarque que la courbe du sable corrigé montre une distribution continue et régulière des particules, sans discontinuités majeures. Elle se situe dans le fuseau granulométrique recommandé par la norme NF P 18-540, ce qui indique que le sable a été bien corrigé (par mélange de sable fin et sable de carrière) pour atteindre une granulométrie optimale.

Également, la courbe du gravier naturel présente une granulométrie bien répartie, caractéristique des granulats de carrière. Elle est continue et ascendante, sans plages manquantes, ce qui indique une bonne gradation. Le gravier naturel respecte les exigences de la norme pour une classe granulométrique (3/15). Il assure une bonne résistance mécanique et une faible porosité du béton. Il est idéal comme référence pour comparer les performances du gravier recyclé.

De même, la courbe granulométrique du gravier recyclé obtenu dans cette étude présente une distribution continue et bien étalée sans discontinuité marquée. Cela indique que, malgré son origine issue de béton déjà préparé, le granulats recyclé utilisé possède une gradation acceptable, répondant aux exigences de la norme NF P 18-540 pour les granulats destinés au béton. Cette continuité dans la courbe est un atout technique car elle reflète une bonne homogénéité de la distribution des particules, ce qui est favorable à la compacité du béton et à l'optimisation de l'empilement granulaire.

Cependant, bien que la courbe soit conforme d'un point de vue granulométrique, les granulats recyclés conservent certaines spécificités physiques, telles qu'une plus grande

porosité, une forme plus anguleuse et une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les granulats naturels. Ces caractéristiques doivent être prises en compte lors de la formulation, notamment pour l'ajustement du rapport eau/liant et la maîtrise de l'ouvrabilité.

#### 4.2.2. Equivalent de sable

##### a) Sable fin

Tableau 4.6 : Valeurs d'ESV et ESP du sable fin.

	Essai 01	Essai 02	Essai 03
<b>h<sub>1</sub></b>	10.25	10.4	10.4
<b>h<sub>2</sub></b>	9.5	9.9	9.8
<b>h'<sub>2</sub></b>	8.8	9	8.75
<b>ESV % (h<sub>2</sub>/ h<sub>1</sub>×100)</b>	92.68	95.19	94.23
<b>ESV moyen =94.03%</b>			
<b>ESP % (h'<sub>2</sub>/ h<sub>1</sub>×100)</b>	85.85	86.54	84.13
<b>ESP moyen =85.51%</b>			

Bien que le sable fin utilisé dans cette étude présente une très bonne propreté comme en témoignent ses valeurs élevées d'équivalent de sable visuel (ESV = 94,03 %) et d'équivalent de sable au piston (ESP = 85,51 %), conformes aux exigences de la norme NF P 18-598 pour les bétons structuraux, L'étude granulométrique du sable montre une non-conformité par rapport au fuseau granulométrique recommandé, malgré sa pureté. Pour corriger cette lacune granulométrique, une opération de mélange correctif a été effectuée en associant le sable fin à un sable de carrière plus grossier, dans le but d'obtenir un sable corrigé présentant une courbe granulométrique équilibrée, tout en conservant une propreté acceptable pour une utilisation dans le béton.

**b) Sable corrigé**

Tableau 4.7 : Valeurs d'ESV et ESP du sable corrigé.

	Essai 01	Essai 02	Essai 03
<b>h<sub>1</sub></b>	10.8	10	10.5
<b>h<sub>2</sub></b>	9.1	8.5	9
<b>h'<sub>2</sub></b>	8.6	7.9	8
<b>ESV % (h<sub>2</sub>/ h<sub>1</sub>×100)</b>	84.25	85	85.71
<b>ESV moyen =84.98%</b>			
<b>ESP% (h'<sub>2</sub>/ h<sub>1</sub>×100)</b>	79.63	79	76.92
<b>ESP moyen =78.51%</b>			

Le sable corrigé, obtenu par le mélange du sable fin avec un sable de carrière plus grossier, présente un équivalent de sable visuel (ESV) moyen de 84,98 % et un équivalent de sable au piston (ESP) moyen de 78,51 %. Ces valeurs traduisent une propreté satisfaisante, conforme aux exigences des normes en vigueur ce qui rend ce sable approprié pour la fabrication de bétons de qualité.

**4.2.3. La masse volumique**

Le tableau 4.8 suivant présente les valeurs de la masse volumique absolue et de la masse volumique apparente des différents granulats étudiés, à savoir le sable corrigé, le gravier naturel et le gravier recyclé.

Tableau 4 .8 : Masse volumique des matériaux absolue et apparent.

Matériaux	La masse volumique absolue kg/m <sup>3</sup>	La masse volumique apparente kg/m <sup>3</sup>
<b>Gravier naturel</b>	2.53	1.45
<b>Gravier recyclé</b>	2.5	1.44
<b>Sable corrigé</b>	2.5	1.4

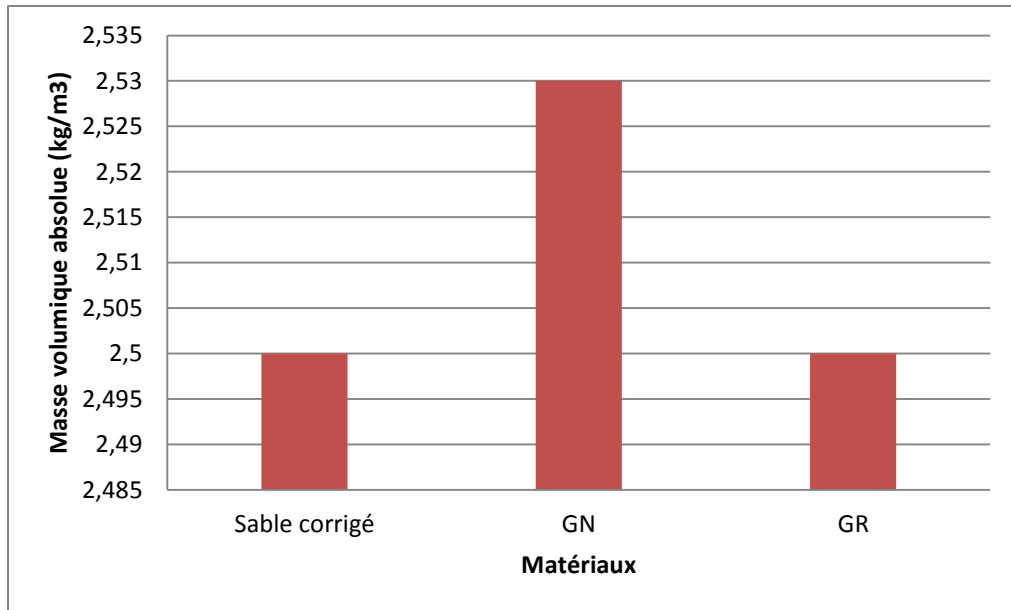


Figure 4 .4 : Evolution de la masse volumique absolue du sable corrigé, gravier naturel et recyclé.

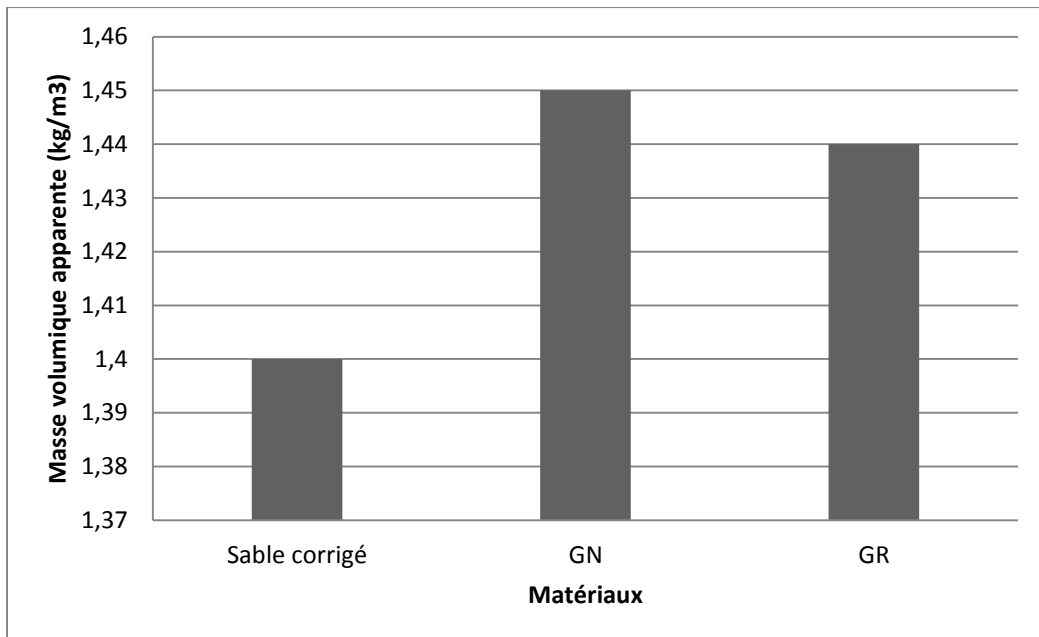


Figure 4 .5 : Evolution de la masse volumique apparente du sable corrigé, gravier naturel et recyclé.

Les résultats obtenus illustrés dans les figures 4.4 et 4.5 mettent en évidence des différences entre les granulats naturels et recyclés : le gravier recyclé présente des valeurs de masse volumique légèrement inférieures, ce qui s'explique par la présence de mortier

résiduel, la porosité accrue et la moindre densité de ses grains. Ces caractéristiques influencent directement la formulation du béton, notamment le rapport eau/liant, le dosage en granulats, ainsi que la masse volumique globale du béton frais et durci.

#### 4.2.4. Le Coefficient d’Absorption d’Eau

Tableau 4.9 : Les valeurs des variations des quantités d’eau absorbées par les granulats recyclés.

Absorption d’eau (%)						
Temps (h)	0	1	2	17	22	24
GN	0	0.8	0.9	0.98	1.01	1.02
GR	0	1,9	2	2,4	2,56	2,6

L’absorption d’eau est un paramètre fondamental dans la caractérisation des granulats, car elle renseigne sur la porosité ouverte et l’aptitude du matériau à absorber l’eau, ce qui influence directement le rapport eau/liant, l’ouvrabilité et les performances mécaniques du béton.

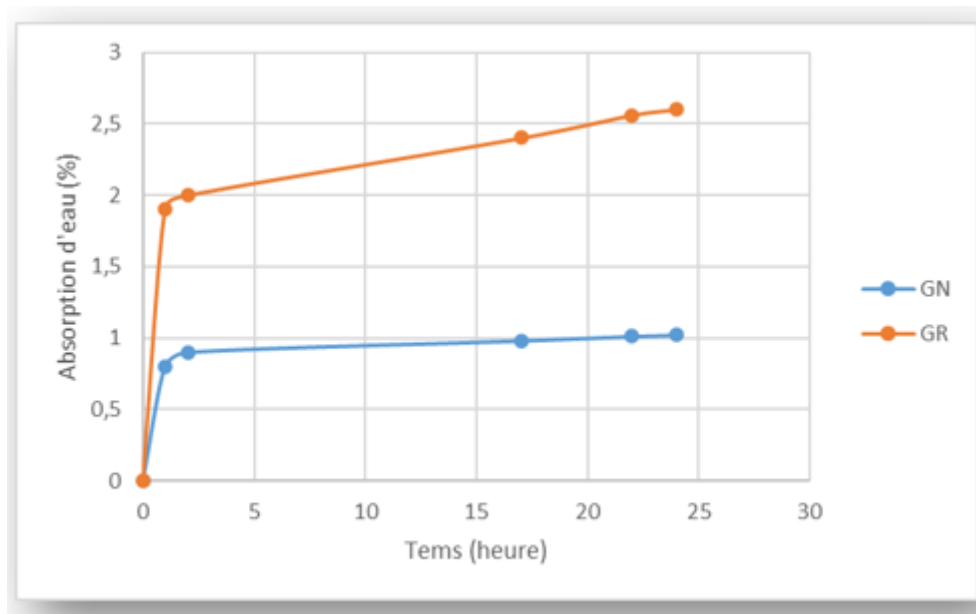


Figure 4.6 : Variation de l’absorption d’eau en fonction du temps des GN et GR.

La figure 4.6 a permis de comparer l’absorption d’eau en fonction du temps du granulat naturel (GN) et du granulat recyclé (GR). Les résultats obtenus montrent que le GN présente un faible capacité d’absorption, atteignant un maximum de 1,02 % après 24 heures,

ce qui témoigne de sa porosité réduite et de sa structure dense, caractéristiques attendues pour un granulats de bonne qualité utilisé dans le béton. En revanche, le GR affiche une absorption d'eau nettement plus élevée, avec une valeur maximale de 2,6 % après 24 heures, traduisant une porosité plus importante due à la présence de mortier résiduel et de microfissures générées lors du concassage. Dès la première heure, le GR absorbe déjà 1,9 % d'eau, ce qui indique une absorption rapide et significative, susceptible d'affecter le rapport eau/liant effectif dans le mélange. Par conséquent, l'utilisation de granulats recyclés dans la formulation du béton nécessite soit une pré-saturation préalable, soit un ajustement de l'eau de gâchage, afin de garantir une ouvrabilité homogène et des performances mécaniques satisfaisantes.

### 4.3. Résultats mécanique

#### 4.3.1. Essais Los Angeles

Tableau 4.10: Détermination du coefficient Los Angeles (LA) pour les graviers naturel et recyclé.

Matériaux	La masse totale M(g)	Masse Refus de tamis m(g)	$LA=100 \times \left(\frac{M-m}{M}\right)$
Gravier naturel	5000	4082	18.36
Gravier recyclé	5000	3830	23.4

#### Commentaire

Gravier naturel présente un **LA < 20** donc les granulats sont très dures.

Gravier recyclé présente un **LA** compris entre : **20 < LA < 25** donc les granulats sont dure.

### 4.3.2. Essais Micro-Deval

Tableau 4.11 : Détermination du coefficient MDE pour les graviers naturel et recyclé.

Matériaux	La masse totale M (g)	Masse refus de tamis m(g)	MDE=100× $\frac{M-m}{M}$
Gravier naturel	500	456	8.8
Gravier recyclé	500	405	19

#### Commentaire

Gravier naturel est de très bonne qualité  $\leq 10$ .

Gravier recyclé est de qualité moyenne  $16 < MDE < 20$ .

### 4.4 Formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse

La formulation du béton a été réalisée en suivant la méthode de Dreux-Gorisse, (section 3.5) largement utilisée pour le dimensionnement rationnel des bétons courants. Les ajustements liés à l'absorption d'eau des granulats recyclés ont également été pris en compte pour corriger la quantité d'eau de gâchage, conformément aux recommandations de la méthode. Ainsi, plusieurs compositions ont été établies avec différents taux de substitution en granulats recyclés, tout en conservant une consistance homogène et des propriétés mécaniques comparables au béton de référence.

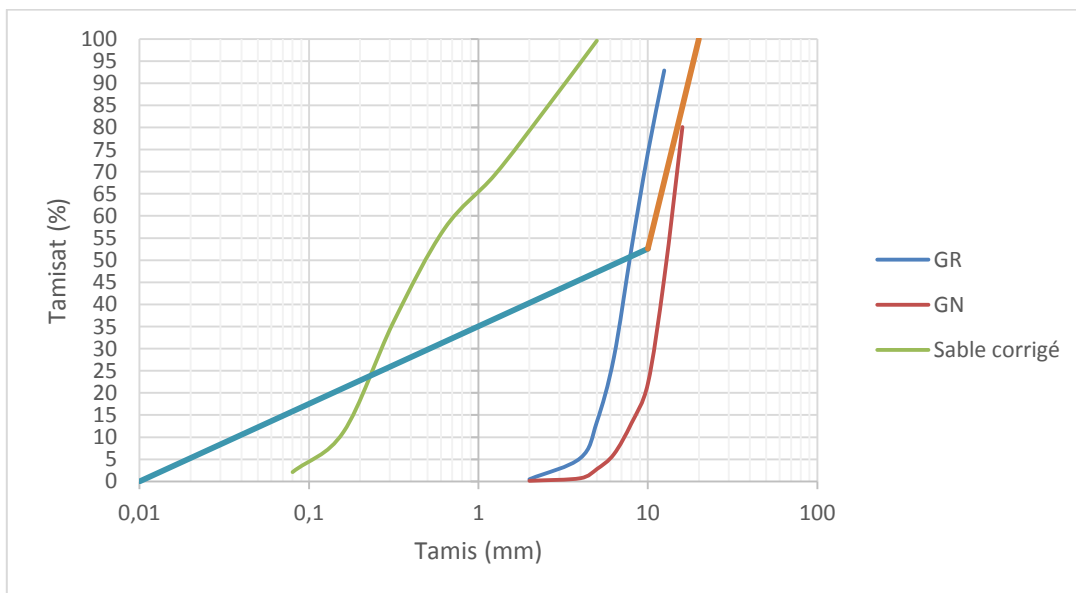


Figure 4.7 : Granulométrie du sable corrigé, gravier naturel et la courbe braisée.

A partir des pourcentages établis on détermine les volumes absolus des constituants du béton puis leurs masses (Tableau 3.13)

% du sable= 38 %

% du gravier= 62 %

Tableau 4 .12: Les masses absolues des constituants du béton.

Constituants	Ciment	Eau	Sable	Gravier	E/C
<b>Volume pour 1m<sup>3</sup> (kg)</b>	400	204.08	Fin (38%) Gros (62%) <hr/> 613,7	1013, 32	0.05

#### 4.4. Résultats des essais du béton à l'état frais

##### 4.4.1. Affaissement au cône d'Abrams

Des essais d'affaissement au cône d'Abrams ont été réalisés afin d'évaluer la consistance à l'état frais des différents bétons formulés. L'étude porte sur un béton ordinaire de référence (0 % de substitution) et sur trois formulations contenant respectivement 25 %, 50 % et 75 % de gravier recyclé (GR) en substitution du gravier naturel (GN).

Tableau 4.13 : L'affaissement au cône d'Abrams des différents bétons.

	BO	BR 25%	BR 50%	BR 75 %
<b>Affaissement (cm)</b>	7.2	6.5	6	5.1

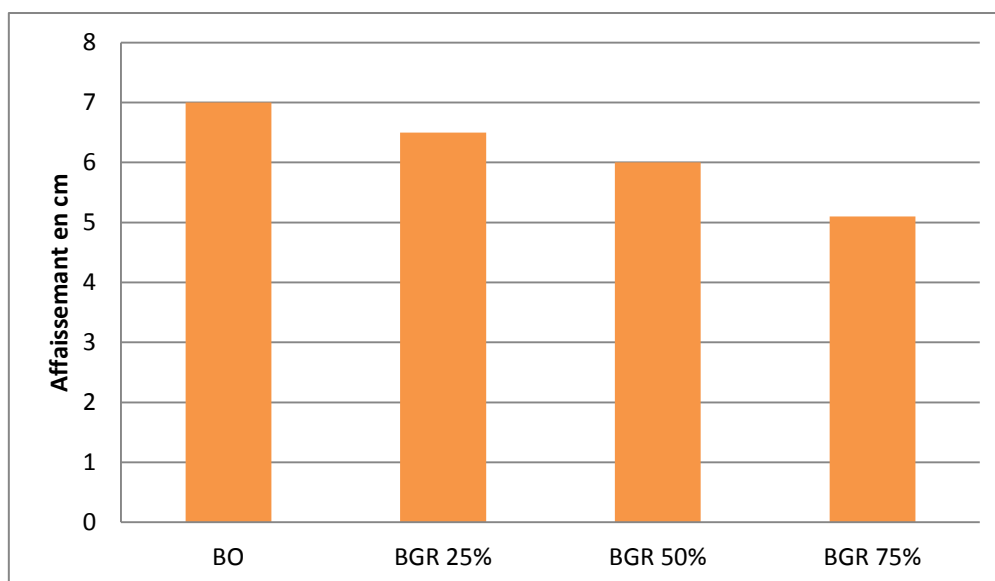


Figure 4.8 : Affaissement au cône d'Abrams des bétons (BO, BR25%, BR50% et BR75%).

Les résultats montrent une réduction progressive de l'affaissement à mesure que le taux de substitution en GR augmente figure 4.6. Cette diminution de l'ouvrabilité s'explique par les caractéristiques physiques du granulat recyclé, notamment sa porosité élevée, sa capacité d'absorption d'eau importante, ainsi que sa forme plus anguleuse par rapport au granulat naturel, ce qui limite la mobilité du mélange. En l'absence d'adjuvant, cette perte de fluidité devient d'autant plus marquée aux taux de substitution élevés (notamment à 75 %). Néanmoins, les affaissements mesurés restent compatibles avec les exigences des bétons courants, sous réserve d'un contrôle rigoureux de l'eau de gâchage et d'une bonne maîtrise du malaxage.

#### 4.4.2. La masse volumique

La masse volumique du béton frais a été déterminée pour chaque formulation, afin d'évaluer l'effet du remplacement progressif du gravier naturel (GN) par du gravier recyclé (GR) sur cette propriété. Ainsi, des mesures ont été effectuées sur quatre bétons contenant respectivement 0 %, 25 %, 50 % et 75 % de GR, afin de mettre en évidence les variations de masse volumique en fonction du taux de substitution, le tableau 4.15 regroupe les valeurs de la masse volumique des BO et BR.

Tableau 4.14 : Masse volumique du béton à l'état frais.

	BO	BR 25%	BR50%	BR75%
<b>La masse volumique kg/m<sup>3</sup></b>	2344	2328	2320	2306

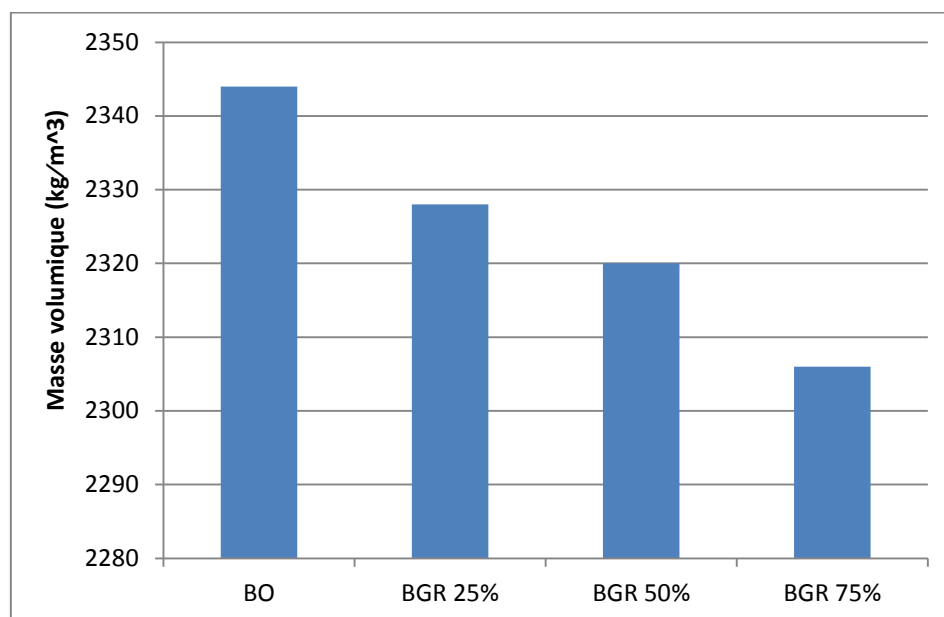


Figure 4.9 : Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état frais en fonction des taux de remplacement des GR.

Les résultats mentionnés dans la figure 4.7 montrent une diminution progressive de la masse volumique du béton frais à mesure que le taux de substitution du gravier naturel (GN) par le gravier recyclé (GR) augmente. Cette variation est principalement liée aux caractéristiques physiques du GR, notamment sa porosité plus élevée, sa densité intrinsèque plus faible et la présence de résidus de mortier sur les grains, qui réduisent la compacité du squelette granulaire. Ainsi, par rapport au béton de référence (0% de GR), les bétons contenant 25%, 50% et 75% de GR affichent une baisse progressive de leur masse volumique, traduisant une réduction de la densité globale du mélange. Cette tendance confirme que l'intégration de granulats recyclés modifie l'équilibre du mélange à l'état frais et peut avoir des répercussions sur les performances mécaniques du béton durci si aucune adaptation n'est apportée à la formulation. Toutefois, pour des taux modérés (jusqu'à 50%),

les valeurs mesurées restent dans une plage acceptable pour des bétons courants, ce qui laisse entrevoir la possibilité d'un usage raisonné des GR dans une logique de durabilité et de valorisation des matériaux.

#### 4.5. Résultats des essais du béton à l'état durci :

##### 4.5.1. La masse volumique

La masse volumique à l'état durci a été évaluée dans le but de caractériser la densité finale des différents bétons formulés. Quatre types de béton ont ainsi été évalués, contenant respectivement 0 %, 25 %, 50 % et 75 % de GR. Cette mesure permet d'apprécier la compacité et la densité finale du matériau, directement influencées par la nature des granulats utilisés. En effet, la masse volumique du béton durci dépend notamment de la porosité des constituants, de la qualité du compactage et de la teneur en pâte. Les tableaux 4.16 et 4.17 présentent les valeurs de masse volumique mesurées sur les éprouvettes cylindriques et prismatiques, pour les bétons ordinaires (BO) et les bétons recyclés (BR).

Tableau 4.15 : Masse volumique des bétons (Eprouvettes cylindriques).

		BO	BR 25%	BR 50%	BR 75%
<b>La masse volumique</b> <b>kg/m<sup>3</sup></b> <b>(cylindrique)</b>	7 j	2344	2346.0	2337.2	2314.4
	21 j	2363.1	2355.5	2344.0	2329.6
	28 j	2370.7	2362.7	2346.5	2341.8

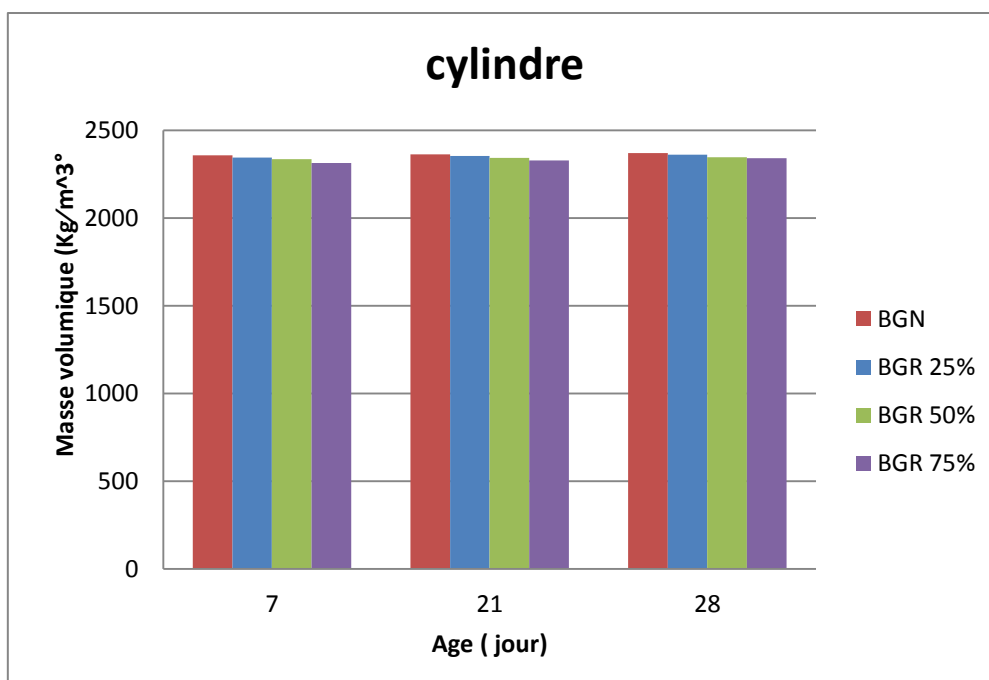


Figure 4.10: Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état durci en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge (échantillons cylindres).

Tableau 4 .16 : Masse volumique des bétons (Echantillons prismatiques).

		BO	BR 25%	BR 50%	BR 75%
<b>La masse volumique</b> <b>kg/m<sup>3</sup></b>	7 j	2390.75	2363.5	2353.75	2338
	21 j	2409.5	2370.75	2360.5	2342.25
	28 j	2493.5	2392	2383.25	2393.75
<b>Echantillons</b> <b>(Prismatique)</b>					

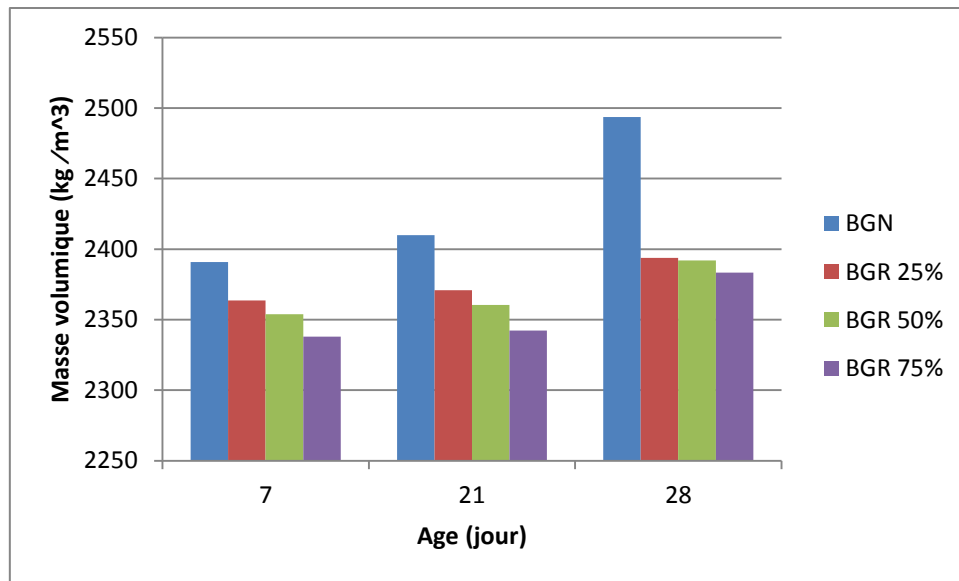


Figure 4.11 : Variation de la masse volumique des bétons ordinaires et recyclés à l'état durci en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge (éprouvettes prismatiques).

L'analyse des résultats met en évidence une baisse progressive de la masse volumique du béton durci avec l'augmentation du taux de substitution du gravier naturel (GN) par le gravier recyclé (GR). Cette variation s'explique principalement par la nature moins dense et plus poreuse du granulats recyclés, liée à la présence de résidus de mortier issus du concassage d'anciens bétons. Ces caractéristiques altèrent la compacité globale du béton, ce qui se traduit par une diminution de sa densité à l'état durci. La réduction reste toutefois modérée à 25 % de substitution, suggérant que des taux limités de GR peuvent être intégrés sans effet significatif sur la densité finale. En revanche, aux taux plus élevés (50 % et 75 %), la perte de masse volumique devient plus marquée, ce qui peut affecter les performances mécaniques et la durabilité du matériau. Ces résultats soulignent la nécessité d'un contrôle rigoureux du taux de substitution, en fonction des exigences techniques de l'ouvrage et des caractéristiques souhaitées du béton durci.

#### 4.5.2. Essai de compression

L'essai de résistance à la compression a été mené afin d'évaluer les performances mécaniques à l'état durci des différentes formulations de béton, en particulier leur évolution dans le temps. Des éprouvettes standard ont été confectionnées pour le béton ordinaire (BO) ainsi que pour les bétons recyclés (BR) avec des taux de substitution de 25 %, 50 % et 75 % de gravier recyclé (GR). Les essais ont été réalisés après 7, 21 et 28 jours de cure, conformément aux prescriptions normatives, afin de suivre la cinétique de développement de

la résistance mécanique. Ce protocole permet de comparer non seulement les performances finales à 28 jours, mais aussi la vitesse de gain de résistance à court et moyen termes. L'objectif est de mettre en évidence l'effet du remplacement progressif du granulat naturel par du granulat recyclé sur la résistance à la compression. Le tableau 4.08 résume la résistance en compression des BO et BR.

Tableau 4.17 : Résistance à la compression des bétons.

		BO	BR25%	BR50%	BR75%
<b>Résistance à la compression (MPa)</b>	7 j	24.33	23.21	22.11	20.11
	21 j	26.62	26.27	23.74	22.31
	28 j	31.82	29.03	28.68	28.10

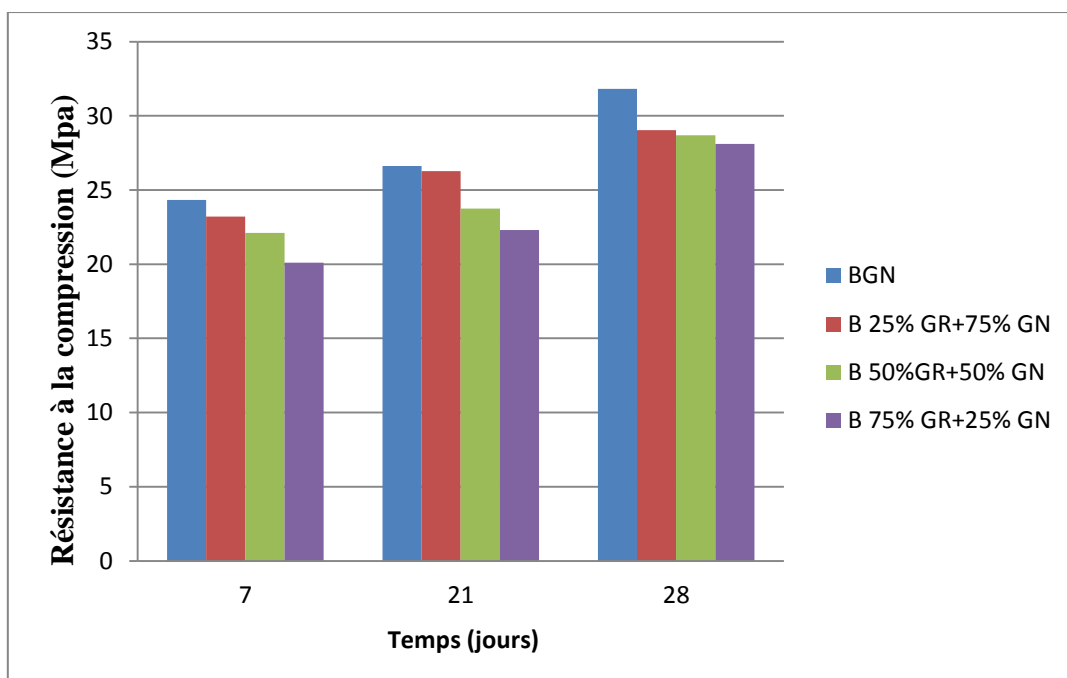


Figure 4.12: Variation de la résistance à la compression des BO et BR en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge.

L'analyse des résultats de l'essai de compression montre une évolution croissante de la

résistance mécanique pour l'ensemble des formulations au fur et à mesure de l'avancement de la cure figure 4.10. Le béton ordinaire (BO) présente les valeurs les plus élevées à chaque âge, ce qui confirme la supériorité mécanique des granulats naturels en termes de compacité et d'adhérence à la matrice cimentaire. En revanche, les bétons recyclés (BR) affichent une réduction progressive de la résistance en fonction du taux de substitution en gravier recyclé (25 %, 50 %, 75 %). Cette baisse est d'autant plus marquée à 7 jours, en raison de la forte absorption initiale du GR, qui réduit localement le rapport eau/ciment effectif. Toutefois, à 21 et 28 jours, un rattrapage partiel de la résistance est observé, notamment pour les formulations contenant 25 % et 50 % de GR, ce qui suggère une hydratation plus progressive et une contribution mécanique du mortier résiduel présent dans les GR. À 75 % de substitution, la résistance reste significativement inférieure, traduisant une altération de la compacité globale du béton et une adhérence moins efficace à la pâte. Ces résultats confirment que l'utilisation de granulats recyclés est envisageable dans une certaine limite, à condition de bien maîtriser la formulation et les conditions de cure.

#### **4.5.3. Essai de traction par flexion**

Dans le prolongement de l'étude des propriétés mécaniques, un essai de résistance à la traction par flexion a été réalisé sur les différentes formulations de béton, afin d'évaluer leur comportement face aux efforts de traction indirects, souvent à l'origine des fissurations dans les ouvrages en béton. Cette propriété, bien que secondaire par rapport à la compression, joue un rôle essentiel dans l'analyse de la ductilité, de la tenue aux fissures et de la résistance à la flexion des éléments soumis à des sollicitations complexes. L'essai a été appliqué sur des éprouvettes prismatiques fabriquées à partir du béton ordinaire (BO) ainsi que des bétons recyclés (BR) comportant 25 %, 50 % et 75 % de gravier recyclé. Les mesures ont été effectuées après des temps de cure de 7, 21 et 28 jours, permettant ainsi d'apprécier l'évolution du gain de résistance dans le temps. Cet essai complète l'analyse en compression et fournit des éléments de comparaison quant à l'aptitude des bétons recyclés à assurer la cohésion transversale de la matrice cimentaire, en fonction du taux de substitution et de l'âge du béton.

Tableau 4.18 : Résistance à la traction par flexion des BO et BR.

	BO	BGR 25%	BGR 50%	BGR 75%
7 j	3.32	3.16	2.96	2.17
21 j	3.76	3.4	3.15	2.57
28 j	4.81	3.79	3.57	2.70

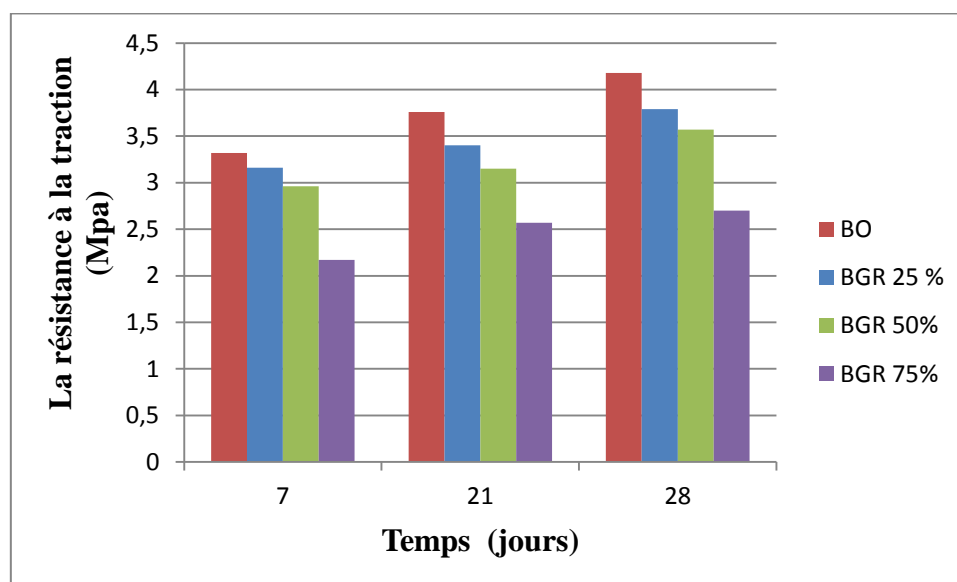


Figure 4.13 : Variation de la résistance à la traction par flexion des BO et BR en fonction des taux de remplacement des GR et l'âge.

L'interprétation des données obtenues de l'essai de traction par flexion figure 4.11 révèle une diminution progressive des performances mécaniques des bétons contenant du gravier recyclé (GR), en comparaison avec le béton ordinaire (BO). Ce dernier présente, à tous les âges de cure (7, 21 et 28 jours) les valeurs les plus élevées de résistance en flexion, traduisant une bonne cohésion interne et une tenue structurelle satisfaisante. L'introduction de GR dans la formulation entraîne une dégradation progressive de la tenue à la flexion liée à la qualité inférieure de l'interface pâte-granulat, à la porosité accrue et à la présence de mortier résiduel sur les granulats recyclés. Cette tendance est plus marquée à 7 jours, période durant laquelle l'hydratation est encore incomplète et les effets négatifs de l'absorption d'eau par les GR sont plus prononcés. À 21 et 28 jours, on observe toutefois une évolution favorable des propriétés mécaniques pour les mélanges avec 25 % et 50 % de GR, ce qui suggère une restructuration progressive de la microstructure. En revanche, au-delà de 50 %, la fragilité du matériau augmente, compromettant sa capacité à supporter des efforts de traction. Ces résultats confirment que le comportement en flexion des bétons recyclés reste acceptable pour

des taux modérés de substitution, mais devient nettement plus limité lorsque la part de GR dépasse 50 %.

#### **4.6. Conclusion**

Pour conclure ce chapitre, les résultats ont montré que l'incorporation de gravier recyclé modifie à la fois les propriétés physiques et mécaniques du béton. Sur le plan physique, on observe une augmentation de l'absorption d'eau plus importante, et une légère baisse de la masse volumique. Côté performances mécaniques, les résistances à la compression et à la flexion diminuent progressivement avec le taux de substitution, surtout au-delà de 50 %. Cependant, pour des taux modérés (jusqu'à 25 ou 50 %), les résultats restent satisfaisants, notamment après 28 jours de cure. Cela montre que le gravier recyclé peut être utilisé de manière contrôlée, dans une logique de valorisation des déchets et de construction durable, sans compromettre fortement les performances du béton.

---

## *Conclusion générale*

---

## **Conclusion générale et perspectives**

Ce mémoire a porté sur l'étude expérimentale de l'incorporation de graviers recyclés (GR) en substitution partielle du gravier naturel (GN) dans la formulation de bétons courants, dans une perspective de valorisation des déchets de construction et de réduction de l'impact environnemental du secteur du BTP. L'objectif principal était d'analyser, avec rigueur, les effets du taux de remplacement (25 %, 50 % et 75 %) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux ainsi que sur les performances globales du béton.

L'analyse des caractéristiques physiques des granulats a montré que les GR présentent une masse volumique inférieure, une porosité plus élevée, ainsi qu'un taux d'absorption d'eau supérieur à celui du GN, principalement en raison de la présence de mortier résiduel. En ce qui concerne leur résistance à l'usure et aux chocs, les granulats recyclés ont affiché des valeurs plus élevées aux essais Los Angeles (LA) et Micro-Deval (MDE) traduisant une moindre résistance mécanique intrinsèque comparée aux granulats naturels. Ces résultats confirment que les GR sont plus sensibles à la fragmentation et à l'abrasion, ce qui peut impacter la durabilité du béton dans certaines conditions d'usage.

Les résultats à l'état frais ont révélé une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation du taux de GR, ainsi qu'une baisse de la masse volumique du béton frais, reflétant une compacité réduite du squelette granulaire. Ces effets sont principalement dus à la texture plus rugueuse, la forme anguleuse et la forte capacité d'absorption d'eau des GR.

À l'état durci, les essais de compression et de traction par flexion ont montré une baisse progressive des performances mécaniques en fonction du taux de GR, plus marquée aux premiers âges de cure (7 et 21 jours) mais partiellement compensée à 28 jours pour les taux de substitution modérés (25 % et 50 %). Le comportement structurel du béton devient en revanche plus fragile lorsque le taux de substitution atteint 75 % en raison d'une interface pâte-granulat affaiblie, d'une porosité accrue et d'une diminution de la cohésion interne.

En résumé, cette étude confirme que l'utilisation de granulats recyclés est techniquement possible et pertinente dans des formulations de béton courant à condition de limiter leur taux de substitution à 50 % maximum. Au-delà, les effets négatifs deviennent trop importants pour garantir les exigences structurelles usuelles. Ces résultats constituent une base solide pour promouvoir l'intégration de matériaux recyclés dans le béton, dans le cadre d'une démarche de construction durable, tout en appelant à des études complémentaires sur l'amélioration des GR ou leur combinaison avec des adjuvants spécifiques.

## **Perspectives**

À l'issue de ce travail de recherche, les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre les effets de l'utilisation du gravier recyclé sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, à l'état frais comme à l'état durci. Ils confirment l'intérêt technique et environnemental de cette valorisation, tout en mettant en évidence certaines limites liées à la porosité, à l'absorption d'eau et à la baisse de performances mécaniques aux taux de substitution élevés. Ces constats offrent un socle solide de réflexion pour envisager des prolongements à cette étude, tant sur le plan expérimental que sur les aspects techniques, environnementaux et réglementaires. À cet effet, plusieurs pistes de recherche peuvent être proposées.

- **Utilisation combinée de GR et de fibres de renforcement :**

Intégrer des fibres métalliques, plastiques ou naturelles (comme le chanvre ou le sisal) aux bétons recyclés, pour améliorer la résistance à la fissuration et la tenue en traction, souvent pénalisées par l'emploi des GR.

- **Étude du comportement thermo-mécanique :**

Examiner la résistance du béton recyclé aux variations de température (chocs thermiques, températures extrêmes), afin de mieux évaluer son adaptation à divers environnements.

- **Réutilisation du béton recyclé dans des bétons auto-plaçant:**

Tester l'intégration contrôlée de GR dans des formulations de béton à auto-plaçant, pour élargir leur champ d'application à des ouvrages techniques ou durables.

- **Développement de bétons légers ou isolants :**

Explorer la possibilité d'utiliser les GR dans des bétons allégés ou non-structuraux, destinés à l'isolation thermique, acoustique ou à des éléments de remplissage, grâce à leur faible densité et leur structure poreuse.

- **Proposition d'un cadre normatif local :**

Élaborer, à terme, des recommandations techniques ou pré-normatives pour l'usage des granulats recyclés dans le contexte algérien ou maghrébin, en tenant compte des matériaux disponibles, des pratiques du BTP et des objectifs de durabilité régionaux.

---

## *Références bibliographiques*

---

**Références bibliographiques**

1. Aïtcin, P.-C. and S. Mindess, *Sustainability of concrete* 2011: Crc Press.
2. Energy, C.I., *The Cement Sustainability Initiative*.
3. Dixit, M.K., et al., *Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. Energy and buildings*, 2010. **42**(8): p. 1238-1247.
4. Kuhar, M.S., *World aggregates market: a new study predicts the North American aggregates market will be a global area of growth through 2017. Rock Products*, 2014. **117**(2): p. 52-56.
5. Kenai, S. and F. Debieb, *Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés abase de gros et fins granulats de briques et de béton concassés Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates. Materials and structures*, 2011. **44**: p. 815-824.
6. Tojo, N. and C. Fischer, *Europe as a recycling society. European recycling policies in relation to the actual recycling achieved. ETC/SCP working paper, 2011(ETC/SCP working paper 2/2011)*.
7. Ding, T. and J. Xiao, *Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai. Waste management*, 2014. **34**(11): p. 2327-2334.
8. Laneyrie, C., *Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés*, 2014, Université de Cergy Pontoise.
9. Diaz, N.K.S. and N. Karina, *Valorisation des granulats recyclés dans le béton pour les pavages et trottoirs*, 2018, Université de Sherbrooke.
10. Hernandez, H.M., *Amélioration de granulats de béton recyclé par bioprécipitation*, 2022, École centrale de Nantes.
11. Wagih, A.M., et al., *Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. HBRC journal*, 2013. **9**(3): p. 193-200.
12. Behera, M., et al., *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. Construction and Building Materials*, 2014. **68**: p. 501-516.
13. Ismail, S., K.W. Hoe, and M. Ramli, *Sustainable aggregates: The potential and challenge for natural resources conservation. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013. **101**: p. 100-109.

14. *Krajnc, D. and P. Glavič, A model for integrated assessment of sustainable development. Resources, Conservation and Recycling, 2005. 43(2): p. 189-208.*
15. *Lee, C.-H., J.-C. Du, and D.-H. Shen, Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 66-71.*
16. *Sereng, M., Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO2: étude de la faisabilité pré-industrielle, 2020, Université Paris-Est.*
17. *Akbarnezhad, A., et al., Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 2011. 25(8): p. 3469-3479.*
18. *Akhtar, A. and A.K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of cleaner production, 2018. 186: p. 262-281.*
19. *Sanchez-Cotte, E.H., et al., Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design. Construction and Building Materials, 2020. 259: p. 120427.*
20. *Gálvez-Martos, J.-L., et al., Construction and demolition waste best management practice in Europe. Resources, Conservation and Recycling, 2018. 136: p. 166-178.*
21. *Xu, Y. and R. Jin, Multi-functional concrete with recycled aggregates 2022: Elsevier.*
22. *Chalmeton, H., Préservation de l'environnement et travaux publics, 2007, Université de Nantes (Unam).*
23. *Cabral, A.E.B., et al., Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2010. 24(4): p. 421-430.*
24. *Cook, E., C.A. Velis, and L. Black, Construction and demolition waste management: a systematic scoping review of risks to occupational and public health. Frontiers in Sustainability, 2022. 3: p. 924926.*
25. *Silva, R., J. de Brito, and R. Dhir, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. Construction and Building Materials, 2014. 65: p. 201-217.*
26. *de l'Équipement, D.D.D., Service Habitat, Urbanisme, et Environnement. Plan départementale de gestion de déchets de chantiers du BTP du Doubs, 2002: p. 114.*
27. *Debieb, F. and S. Kenai, Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates, 2007.*
28. *DE LA CONSTRUCTION, R.D.R. and R.E. DÉMOLITION, IDENTIFICATION SIGNALITIQUE. 2010.*

29. Walter, B. and B. Winter, *Aggregates case study-Draft Final Report referring to contract nr. 150787-2007 FISC-AT 'Aggregates case study-data gathering. Umweltbundesamt, Austria, 2008. 13.*
30. Nagataki, S., et al., *Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Research, 2004. 34(6): p. 965-971.*
31. Duan, Z.H. and C.S. Poon, *Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. Materials & Design, 2014. 58: p. 19-29.*
32. Shi, C., et al., *Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. Journal of cleaner production, 2016. 112: p. 466-472.*
33. Chisholm, D., *Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete. Paper of Cement & Concrete Association of New Zealand, 2011: p. 31-34.*
34. Quattrone, M., S.C. Angulo, and V.M. John, *Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. Resources, Conservation and Recycling, 2014. 90: p. 21-33.*
35. Mulder, E., T.P. de Jong, and L. Feenstra, *Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. Waste management, 2007. 27(10): p. 1408-1415.*
36. Shima, H., et al., *An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. Journal of advanced concrete technology, 2005. 3(1): p. 53-67.*
37. de Andrade Salgado, F. and F. de Andrade Silva, *Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. Journal of Building Engineering, 2022. 52: p. 104452.*
38. Vu, T.-H., *Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés: étude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires, 2009, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.*
39. Fraj, A.B. and R. Idir, *Concrete based on recycled aggregates—Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. Construction and Building Materials, 2017. 157: p. 952-964.*

40. Chakradhara Rao, M., S. Bhattacharyya, and S. Barai, *Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. Materials and structures*, 2011. **44**: p. 205-220.
41. Eckert, M. and M. Oliveira, *Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. Construction and Building Materials*, 2017. **133**: p. 416-424.
42. Yang, S. and H. Lee, *Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. Construction and Building Materials*, 2017. **136**: p. 9-17.
43. Hansen, T.C. and H. Narud, *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete international*, 1983. **5**(1): p. 79-83.
44. De Juan, M.S. and P.A. Gutiérrez, *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials*, 2009. **23**(2): p. 872-877.
45. Corinaldesi, V. and G. Moriconi, *Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials*, 2009. **23**(8): p. 2869-2876.
46. Bergeron, G., B. de normalisation du Québec, and P. Gardon, *Granulats: matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques: classification et caractéristiques 2002: [Sainte-Foy]: Bureau de normalisation du Québec.*
47. Catalao, M.J., et al., *Diversity in bacterial lysis systems: bacteriophages show the way. FEMS microbiology reviews*, 2013. **37**(4): p. 554-571.
48. Moniz, C., *Performance mécanique, hydrique et au gel des matériaux granulaires recyclés: évaluation en laboratoire. 2012.*
49. Djelal, H. and V. Nouvel. *Gestion des déchets de démolition et environnement. in Annales du Batiment et des Travaux Publics. 2008.*
50. Hansen, T.C., *Recycling of demolished concrete and masonry 1992: CRC press.*
51. Abbas, A., et al., *Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. Materials characterization*, 2009. **60**(7): p. 716-728.
52. Liu, Q., J. Xiao, and Z. Sun, *Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. Cement and Concrete Research*, 2011. **41**(10): p. 1050-1057.

53. Younis, K.H. and K. Pilakoutas, *Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 2013. **49**: p. 688-701.
54. Dao, D.-T., *(Multi-) recyclage du béton hydraulique*, 2012, Ecole centrale de Nantes.
55. Xuan, D., B. Zhan, and C.S. Poon, *Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 2016. **65**: p. 67-74.
56. Bai, G., et al., *An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties*. *Construction and Building Materials*, 2020. **240**: p. 117978.
57. Tegguer, A.D., *Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach*. *Construction and Building Materials*, 2012. **27**(1): p. 112-116.
58. Thiery, M., *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires: prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*. *THESE DE DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES, SPECIALITE: STRUCTURES ET MATERIAUX*, 2005.
59. García-González, J., et al., *Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture*. *Materials*, 2014. **7**(9): p. 6224-6236.
60. Bendimerad, A.Z., *Comportements au jeune âge et différé des bétons recyclés: influence de la saturation initiale en eau et du taux de substitution*, 2016, Ecole Centrale de Nantes.
61. de Larrard, F. and H. Colina, *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée: Ifsttar. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages. 2018.
62. Deodonne, K., *Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental*, 2015, Université de Strasbourg.
63. Gutiérrez, A. and M. De Juan. *Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*. in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. 2004. RILEM Publications SARL.
64. De Brito, J. and N. Saikia, *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste 2012*: Springer Science & Business Media.
65. Tegguer, A.D., et al. *Propriétés des bétons de granulats recyclés*. in *GC'2015*. 2015. ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL-AFGC.

66. *Gómez-Soberón, J.M., Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. Cement and Concrete Research, 2002. 32(8): p. 1301-1311.*
67. *EN, N., 1097-2. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-partie 2: méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation. ANFOR: Paris, France, 2010.*
68. *de Larrard, F. and H. Colina, Le béton recyclé, 2018, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l' ...*
69. *EN, N., Béton—Spécification, performance, production et conformité—Complément national à la norme NF EN 206. 2014.*
70. *BOURNETON, N., et al., Rejointoiement des ouvrages en site maritime.*
71. *Abderrahmane, R., Etude de la nature du sable sur le comportement des bétons ordinaires sous différentes conditions de durcissement.*
72. *KOUL, L. and A. ABDELHADI, Le comportement physico-mécanique du Béton à base des granulats recyclés des déchets de démolition, 2023, université Ghardaia.*
73. *Torres, P.P., G. Wardeh, and E. Ghorbel, Etude expérimentale du fluage des bétons de granulats recyclés. Academic Journal of Civil Engineering, 2018. 36(1): p. 80-83.*
74. *Tam, V.W., C. Tam, and Y. Wang, Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. Construction and Building Materials, 2007. 21(10): p. 1928-1939.*
75. *Etxeberria, M., et al., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research, 2007. 37(5): p. 735-742.*
76. *Boulay, V., R. GAGNÉ, and R. MORIN, Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel, 2014, Université de Sherbrooke.*
77. *Brito, J.d. and R. Robles, Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties. 2010.*
78. *Bravo, M., et al., Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. Journal of cleaner production, 2015. 99: p. 59-74.*
79. *Fonseca, N., J. De Brito, and L. Evangelista, The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. Cement and Concrete Composites, 2011. 33(6): p. 637-643.*

80. Thomas, C., et al., *Durability of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials*, 2013. **40**: p. 1054-1065.
81. Medina, C., et al., *Influence of mixed recycled aggregate on the physical–mechanical properties of recycled concrete. Journal of cleaner production*, 2014. **68**: p. 216-225.
82. Medina Martínez, C., M.I. Sánchez de Rojas, and M. Frías, *Properties of recycled ceramic aggregate concretes: Water resistance*. 2013.
83. Bouakaz, F. and N. Atmimou, *Etude expérimentale d'un béton à base de granulats recyclés*, 2021, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
84. Adessina, A., *Caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle des propriétés mécaniques et de durabilité des bétons à base de granulats recyclés*, 2018, Université Paris-Est.
85. Braymand, S. *Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons*. in *Actes du colloque Matériaux*. 2010.
86. Abd Elhakam, A. and E. Awad, *Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. Construction and Building Materials*, 2012. **35**: p. 421-427.
87. Limbachiya, M., T. Leelawat, and R. Dhir, *Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Materials and structures*, 2000. **33**: p. 574-580.
88. Ayob, A., et al. *Engineering behavior of concrete with recycled aggregate*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
89. Shahria Alam, M., E. Slater, and A. Muntasir Billah, *Green concrete made with RCA and FRP scrap aggregate: Fresh and hardened properties. Journal of materials in civil engineering*, 2013. **25**(12): p. 1783-1794.
90. Katz, A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and Concrete Research*, 2003. **33**(5): p. 703-711.
91. Kou, S.-c., C.-s. Poon, and F. Agrela, *Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. Cement and Concrete Composites*, 2011. **33**(8): p. 788-795.
92. Beltrán, M.G., et al., *Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. Journal of cleaner production*, 2014. **79**: p. 124-133.
93. Sri Ravindrarajah, R. and C. Tam, *Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of concrete research*, 1985. **37**(130): p. 29-38.

94. Parthiban, K. and K.S.R. Mohan, *Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. Construction and Building Materials*, 2017. **133**: p. 65-72.
95. Gesoglu, M., et al., *Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. Construction and Building Materials*, 2015. **98**: p. 334-344.
96. de Oliveira, M.B. and E. Vazquez, *The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. Waste management*, 1996. **16**(1-3): p. 113-117.
97. Huoth, P., T. Suntharavadivel, and K. Duan, *Effect of silica fume on recycled aggregate concrete*.2014.
98. Folino, P. and H. Xargay, *Recycled aggregate concrete–Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. Construction and Building Materials*, 2014. **56**: p. 21-31.
99. Kou, S.C., C.S. Poon, and D. Chan, *Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Journal of materials in civil engineering*, 2007. **19**(9): p. 709-717.
100. Silva, R.V., J. De Brito, and R.K. Dhir, *Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. Journal of cleaner production*, 2016. **112**: p. 2171-2186.
101. Hansen, T.C., *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. Materials and structures*, 1986. **19**: p. 201-246.
102. Xiao, J., J. Li, and C. Zhang, *Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research*, 2005. **35**(6): p. 1187-1194.
103. LAHMAR, N., *Propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons à base de granulats recyclés*, 2021, Bensaid BOULEKBACHE/El-Hadj MEZIANE.
104. Evangelista, L. and J. De Brito, *Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites*, 2010. **32**(1): p. 9-14.
105. de Brito, J. and F. Alves, *Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. Materials and structures*, 2010. **43**: p. 35-51.
106. Pereira, C.G., J. Castro-Gomes, and L.P. de Oliveira, *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. Construction and Building Materials*, 2009. **23**(2): p. 602-608.

107. *Rasheeduzzafar and A. Khan, Recycled concrete—A source for new aggregate. Cement, Concrete, and Aggregates, 1984. 6(1): p. 17-27.*

---

## *Annexes*

---

## . Annexe(A)

**Tableau 1 :** Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'en apprécier la qualité pour composer un béton.

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	<b>Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.</b>
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	<b>Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.</b>
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	<b>Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.</b>
ES ≥ 85%	ES ≥ 80%	<b>Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.</b>

## .Annexe(B)

**Tableau 2 :** classification des sables en fonction du module de finesse.

Qualité du sable	Module de finesse
<b>Grossier</b>	3,1 à 3,7
<b>Sable moyen</b>	2,3 à 3,0
<b>Sable fin</b>	1,6 à 2,2
<b>Sable superfin</b>	0,7 à 1,5

**.Annexe (c)****Tableau 3** : classification des roches en fonction du coefficient LA .

Coefficient Los-Anglos LA	Nature de la roche
<20	Très dur
20 à 25	Dur
25 à 30	Assez dur
30 à 40	Mi-dur
40 à 50	Tendre

**. Annexe (D)****Tableau 4** : classification des roches en fonction du coefficient MDE.

Coefficient Micro Deval MDE	Qualité du granulat
<10	Très bon à bon
10 à 20	Bon à moyen
20 à 35	Moyen à faible
>35	Médiocre

**Annexe (E) : fiche technique du ciment Awted .**

# AMOUDA CIMENT



**AMOUDA  
CIMENT**

إسمنت ذو كفاءة عالية،  
(المنشآت الضخمة)  
NA 442-C M /A- 42.5 N



لديغفة المعيارفة

لمنشآت فف الأوساط فر العءوافة

نقل الكرسافة الءاهرة للاسءعمال،  
للبنءاء

لءءوءفاء الكفمفافة

لءءوءفاء الففزفافة المفكائففة



**CIMENT CUIRASSE**  
Société des ciments d'Abidjan (SCA)



## FICHE TECHNIQUE

# CPA - CEM I 42,5R

Ciment  
Portland  
Artificiel

Norme Ivoirienne : NI 05.06.001 : 2018  
NF EN 197-1 : Avril 2012

Version Juillet 2022

		NI 05.06.001 NF EN 197-1	Moyenne usine
<b>Composition du ciment</b>			
Clinker	%	95-100	95
Laitier (s)	%	0-5	5
Gypse	%		3,5
<b>Caractéristiques physiques et mécaniques</b>			
Résistance à la compression	2 jours	Mpa	Mini 20,0
	7 jours	Mpa	
	28 jours	Mpa	Mini 42,5
Surface spécifique Blaine (SSB)	cm <sup>2</sup> /g		3439
E/C	%		29,0
Stabilité	mm	Maxi 10	1
Temps début de prise	min	Mini 60	220
Temps fin de prise	min		290
Température livraison ciment vrac	*C		Maxi 65
<b>Composition chimique</b>			
SiO <sub>2</sub>	%		20,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%		5,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%		3,2
CaO	%		62,9
MgO	%		2,6
SO <sub>3</sub>	%	Maxi 4,00	2,6
Na <sub>2</sub> O équivalent	%		0,76
Chlorures (Cl)	%	Maxi 0,10	0,00
Perte au feu (LOI)	%	Maxi 5,00	1,30
Résidus insolubles (IR)	%	Maxi 5,00	0,51

### ■ APPLICATIONS

Ouvrages en béton armé ou non (poteaux, poutres et autres éléments porteurs)  
Construction d'ouvrages et de bâtiments  
Ouvrages précontraints  
Travaux de génie civil  
Voiries et chaussées en béton  
Plateformes industrielles  
Ouvrages à structure porteuse  
Préfabrication industrielle  
Panchers, dallages, sols industriels, chapes

**SCA Producteur de ciment en Côte d'Ivoire depuis 1967**

## Annexe (F)

### Formulation des béton de Dreux Gorisse

Choix du ciment :

**Tableau 1** : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie $\sigma'c$	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

**Tableau 2**: Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats  $D_{max}$ .

Qualité des granulats	Dimension $D_{max}$ des granulats		
	Fins $D_{max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

### Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

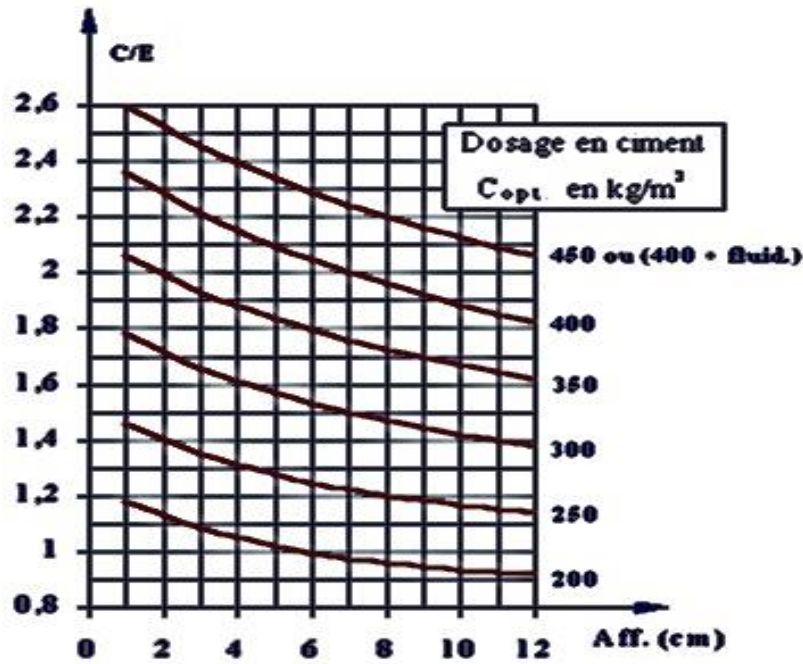


Figure 1 : Abaque permettant la détermination de  $C_{opt}$

**Tableau 3:** K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
<b>Forme des granulats</b> (du sable en particulier)						
<b>Dosage en Ciment</b>						
400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

**Tableau 4 :** Compacité du béton en fonction de  $D_{max}$ , de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	compacité ( $c_0$ )						
		$D_{max}= 5$	$D_{max}= 8$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}= 20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}= 50$	$D_{max}= 80$
<b>Molle (TP-FI)</b>	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
<b>Plastique (P)</b>	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
<b>Ferme (F)</b>	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

**Nota :**

- Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :
  - Sable roulé et gravier concassé ( $c_1 = - 0,01$ )*
  - Sable et gravier concassé ( $c_1 = - 0,03$ )*
- Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de  $c$  : ( $c_2 = - 0,03$ ) \* Pour un dosage en ciment  $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$  on apportera le terme correctif suivant : ( $c_3 = (C - 350) / 5000$ )

**Détermination des masses de granulats**

Connaissant le volume total absolu des granulats ( $V$ ) et les pourcentages en volume absolue de sable ( $S \%$ ), de gravillon ( $g \%$ ) et de gravier ( $G \%$ ), il est alors possible de déterminer les volumes de sable ( $V_s$ ) de gravillon ( $V_g$ ) et de gravier ( $V_G$ ) ainsi que leurs masses respectives ( $S$ ,  $g$  et  $G$ ) :

$$V_s = V * S \%$$

$$S = V * S \% * \rho_{s(S)}$$

$$V_g = V * g \%$$

$$g = V * g \% * \rho_{s(g)}$$

$$VG = V * G \%$$

$$G = V * G \% * \rho_{s(G)}$$