

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



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** : VOA

Présenté par :

Mme AMMARI MOUNIA

Mlle BOUKAFHA HOURIA

*Sujet du mémoire*

***Amélioration de la qualité des granulats recyclés et leur  
impact sur les propriétés physiques et  
mécaniques des bétons recyclés***

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

Mme A. DRAOUI

Mlle Z. RENNAK

Mr H. BEKKI

Mr B. SERBAH

Présidente

Encadrante

Examineur

Examineur

**PROMOTION : 2024/2025**

# Remerciement

Le premier remerciement est adressé à **Dieu** Tout-Puissant, qui nous a permis d'être à cette étape de notre vie et d'accomplir ce travail avec sérénité.

Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à nos **chers parents**, véritables piliers de notre vie, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et les innombrables sacrifices qu'ils ont consentis pour notre réussite.

Nous remercions sincèrement **Melle RENNAK ZOHRA**, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux et son accompagnement attentif tout au long de ce projet.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, **Mr. H. BEKKI**, **Mr. B. SERBAH**, Mme **A. DRAOUI** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, leurs remarques constructives et leur bienveillance.

Un remerciement tout particulier aux **ingénieurs du laboratoire**, pour leur accueil chaleureux, leur encadrement technique, ainsi que pour leur générosité dans le partage de leur savoir-faire tout au long de notre stage.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre gratitude à l'ensemble des **enseignants** du département de génie civil, qui nous ont transmis leurs connaissances avec passion et professionnalisme.

Enfin, nous remercions tous nos camarades et amis de la spécialité "**VOA**", avec qui nous avons partagé cette belle aventure universitaire, faite de travail, d'entraide et de souvenirs inoubliables.

# Dédicace

À **moi-même**, À ma patience, ma foi et ma persévérance...

Je te dédie ce travail, ce moment, et cette réussite, Car tu as toujours été la plus digne, même lorsque tu en doutais. Et parce que tu mérites d'être célébrée... aujourd'hui et chaque jour.

À ma mère, **Ouahiba**,

Douceur dans l'épreuve, lumière sur mon chemin, et secret précieux dans ce monde. La prunelle de mes yeux, celle qui a cru en moi et ne m'a jamais lâchée. Je te dédie le fruit de mes efforts, Car tout en moi porte ton empreinte. Si l'amour mesurait le mérite, Ce travail ne suffirait pas. Merci d'avoir toujours été là. Je t'aime, maman... infiniment.

À mon père **bouabdellah**,

Celui qui a marché dans l'ombre pour éclairer mon chemin, Et dont les silences valaient mille encouragements. Chaque pas que j'ai fait porte la trace de ses sacrifices. Il a été la base de mon équilibre. Chaque réussite vient de ses efforts. Je lui dédie ce travail, Avec tout mon respect, toute ma reconnaissance, Et cet amour qu'on exprime peu... mais qu'on ressent profondément.

À ma sœur **Sarah**,

Elle n'est pas seulement une sœur, elle est une partie de mon cœur, un amour pur que rien ne remplace. Sa tendresse m'a portée lors de la réalisation de ce travail. Merci pour votre soutien

À mes frères,

**Houssem, Mustapha, Abdel Hamid et Sofiane**, Des épaules solides, des cœurs protecteurs. Votre force m'a portée, votre présence m'a rassurée. Avec vous, je ne me suis jamais sentie seule. Chaque réussite est marquée par votre présence essentielle.

À mon mari **Anis**

Mon conseiller et mon soutien moral. Je souhaite que nous partagions ensemble toutes les réussites à venir, et que tu restes ce pilier tendre sur lequel je peux toujours m'appuyer. Merci d'être là, Ce travail t'est dédié aussi, parce que ta présence en fait partie.

À Ma binôme **Houria**

et amie de toujours. De nos premiers cours à nos dernières nuits blanches, tu as toujours été là. Merci pour ta présence, ton humour, et tous ces souvenirs qui rendent ce parcours inoubliable. Ce mémoire est le reflet de notre belle aventure étudiante.

**Mounia**



# Dédicace

À **moi-même**, À ma patience, ma foi et ma persévérance...

Je te dédie ce travail, ce moment, et cette réussite, Car tu as toujours été la plus digne, même lorsque tu en doutais. Et parce que tu mérites d'être célébrée... aujourd'hui et chaque jour.

À ma mère, **Ouahiba**,

Douceur dans l'épreuve, lumière sur mon chemin, et secret précieux dans ce monde. La prunelle de mes yeux, celle qui a cru en moi et ne m'a jamais lâchée. Je te dédie le fruit de mes efforts, Car tout en moi porte ton empreinte. Si l'amour mesurait le mérite, Ce travail ne suffirait pas. Merci d'avoir toujours été là. Je t'aime, maman... infiniment.

À mon père **bouabdellah**,

Celui qui a marché dans l'ombre pour éclairer mon chemin, Et dont les silences valaient mille encouragements. Chaque pas que j'ai fait porte la trace de ses sacrifices. il a été la base de mon équilibre. Chaque réussite vient de ses efforts. Je lui dédie ce travail, Avec tout mon respect, toute ma reconnaissance, Et cet amour qu'on exprime peu... mais qu'on ressent profondément.

À ma sœur **Sarah**,

Elle n'est pas seulement une sœur, elle est une partie de mon cœur, un amour pur que rien ne remplace. Sa tendresse m'a portée lors de la réalisation de ce travail. Merci pour votre soutien

À mes **frères**,

**Housseem, Mustapha, Abdel Hamid et Sofiane**, Des épaules solides, des cœurs protecteurs. Votre force m'a portée, votre présence m'a rassurée. Avec vous, je ne me suis jamais sentie seule. Chaque réussite est marquée par votre présence essentielle.

À mon mari **Anis**

Mon conseiller et mon soutien moral. Je souhaite que nous partagions ensemble toutes les réussites à venir, et que tu restes ce pilier tendre sur lequel je peux toujours m'appuyer. Merci d'être là, Ce travail t'est dédié aussi, parce que ta présence en fait partie.

À Ma binôme **Houria**

et amie de toujours. De nos premiers cours à nos dernières nuits blanches, tu as toujours été là. Merci pour ta présence, ton humour, et tous ces souvenirs qui rendent ce parcours inoubliable. Ce mémoire est le reflet de notre belle aventure étudiante.

**Mounia**



---

# Résumé

---

## Résumé

Dans le cadre de la valorisation des matériaux issus de la déconstruction, cette recherche s'attache à étudier l'amélioration de la qualité des granulats recyclés (GR) et leur influence sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons recyclés. L'objectif est de promouvoir une utilisation durable des ressources en intégrant efficacement les granulats recyclés dans la formulation des bétons.

L'étude expérimentale s'est appuyée sur la fabrication et l'analyse de cinq types de bétons. Un béton ordinaire (de référence) a été réalisé avec 100 % de gros granulats naturels (BGN), tandis que quatre autres bétons ont été formulés en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés issus du concassage de déchets de béton, à des taux volumiques de 25 % et 75 %, sans traitement et selon trois méthodes d'amélioration distinctes :

- a) **Amélioration chimique** par traitement des GR à la fumée de silice ;
- b) **Amélioration mécanique** par triple broyage des granulats ;
- c) **Amélioration par l'approche de mélange en deux étapes** (Two-Stage Mixing Approach – TSMA).

Les résultats montrent que les traitements appliqués aux granulats recyclés améliorent significativement leurs caractéristiques physiques, notamment en réduisant la porosité et l'absorption d'eau. Sur le plan mécanique, les bétons contenant des GR traités présentent de meilleures résistances à la compression comparées aux bétons incorporant des GR non traités, avec des performances d'autant plus élevées que le taux de substitution est modéré (25 %). Parmi les méthodes testées, l'approche chimique avec la fumée de silice et la méthode de triple broyage des granulats se sont révélées les plus efficaces en termes de conservation des propriétés mécaniques du béton.

Ce travail confirme que l'amélioration ciblée des granulats recyclés permet leur intégration dans le béton sans compromettre sa performance, ouvrant ainsi la voie à une utilisation élargie et responsable des BGR dans le secteur de la construction.

**Mots clés:** granulats recyclés , amélioration, propriétés mécaniques, propriétés physiques, béton recyclé, traitement.

# Abstract

In the context of valorizing materials resulting from demolition, this study focuses on investigating the improvement of recycled aggregates' (RA) quality and their influence on the physical and mechanical properties of recycled concrete. The objective is to promote a sustainable utilization of resources by effectively incorporating recycled aggregates into concrete mixture design.

The experimental study was based on the production and analysis of five types of concrete. A conventional concrete (reference) was made with 100% natural coarse aggregates (NCA), while four other concrete mixes were formulated by replacing the natural aggregates with recycled aggregates derived from crushed concrete waste at volumetric substitution rates of 25% and 75%, without treatment or following one of the following improvement methods:

- a) chemical improvement by treating the recycled aggregates with silica fume;
- b) mechanical improvement by triple grinding of the aggregates;
- c) improvement by a two-stage mixing approach (Two-Stage Mixing Approach — TSMA).

The results show that the treatments applied to recycled aggregates significantly improve their physical characteristics, particularly by reducing porosity and water absorption. From a mechanical perspective, the concrete containing treated recycled aggregates demonstrates higher compressive strength than those with untreated recycled aggregates, with even greater performance when the substitution rate is kept at 25%. Among the methods investigated, the chemical treatment with silica fume and the triple grinding process proved to be the most effective in preserving the mechanical properties of the concrete.

This study confirms that the targeted improvement of recycled aggregates allows their incorporation into concrete without compromising its performance, thereby opening the way toward a more extensive and responsible use of recycled aggregates in the construction sector.

**Keywords:** recycled aggregates, improvement, mechanical properties, physical properties, recycled concrete, treatment.

## المخلص

في سياق تثمين مواد الهدم، تتناول هذه الدراسة التحليل التقني لتحسين نوعية الحصى المعاد تدويره وتأثيره على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعاد تدويرها. يتمثل الهدف في تحقيق استخدام أكثر استدامة وكفاءة لهذه الموارد عبر إدماج الحصى المعاد تدويره ضمن الخلطات الخرسانية دون التفريط بأدائها الإنشائي.

اعتمد البرنامج التجريبي على تحضير وتحليل خمسة أنواع مختلفة من الخلطات الخرسانية. تم إعداد الخلطة المرجعية باستخدام 100% من الركام الخشن الطبيعي، في حين تم تحضير أربع خلطات أخرى عبر استبدال الركام الخشن بأخر معاد تدويره والناتج من تكسير مخلفات الخرسانة ضمن نسبة إحلال حجمية قدرها 25% و 75%. تم تطبيق على هذه الخلطات أساليب مختلفة للتعديل التقني على الركام المعاد تدويره، وتضمنت:

(أ) التحسين الكيميائي عبر معالجة الركام بأبخرة السيليكا؛

(ب) التحسين الميكانيكي عبر الطحن الثلاثي لحبيبات الركام؛

(ج) التحسين بواسطة طريقة الخلط على مرحلين (Two-Stage Mixing Approach — TSMA)

أظهرت نتائج التحاليل أن المعالجات المطبقة على الركام المعاد تدويره أسفرت عن تحسين ملحوظ في خصائصه الفيزيائية، ولا سيما تقليل المسامية والامتصاص المائي. بالإضافة إلى ذلك، أبدت الخلطات الخرسانية التي تحتوي على الركام المعالج مقاومات ضغط أعلى مقارنة بتلك التي تحتوي على الركام غير المعالج، مع تحقيق أداء محسّن عند نسبة قدرها 25%. وفي هذا السياق، ثبت أن المعالجة بأبخرة السيليكا بالإضافة إلى طريقة الطحن الثلاثي أكثر فعالية في الحفاظ على الخواص الميكانيكية للخرسانة المعاد تدويرها.

تؤكد هذه الدراسة على أن التحسين التقني المستهدف في الحصى المعاد تدويره يتيح استخدامه في الخلطات الخرسانية دون التضطر بأدائها الإنشائي، وهو ما يفتح آفاقاً للتطبيق الواسع والامسؤول في مشاريع البناء.

**الكلمات المفتاحية:** الحصى المعاد تدويره، التحسين التقني، الخواص الميكانيكية، الخواص الفيزيائية، الخرسانة المعاد تدويرها، المعالجة.

# Table de matière

---

# Table de matière

<b>Remerciement</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>ii</b>
<b>Resumé</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>المخلص</b> .....	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>01</b>

## Chapitre I

### Granulats recyclés

I.1 Introduction .....	4
I.2 Les déchets .....	4
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Les type de déchets : .....	4
I.2.2.1 Les déchets de construction : .....	4
I.2.2.2 Déchets inertes (DI): .....	5
I.2.2.3 Les déchets de chantier : .....	5
I.2.2.4 Déchets industriels banals (DIB) : .....	6
I.2.2.5 Les déchets industriels spéciaux (DIS)( déchets dangereux (DD)): .....	6
I.2.2.6 Les déchets d’emballages : .....	6
I.2.2.7 Déchets d’un remblai propre : .....	6
I.2.2.8 Composition des déchets de bâtiment : .....	6
I.2.2.9 Les matériaux récupérés : .....	7
I.2.2.10 Déconstruction : .....	7
I.2.2.11 Réutilisation de la structure : .....	8
I.2.2.12 Démolition : .....	8

I.2.3 Techniques et matériaux de démolition :	8
I.2.3.1 Boulets de démolition :	9
I.2.3.2 Démolition par dynamitage :	10
I.2.3.3 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés :	10
I.2.3.4 Pousser et tirer les murs :	11
I.2.3.5 Technique de démolition à l'aide d'outils à main :	12
I.2.3.6 Cisailles de démolition :	12
I.3 Procèdes du recyclage	13
I.3.1 Aperçu historique du recyclage du béton :	14
I.3.2 Définition des granulats recyclés :	14
I.3.3 Source de granulats recyclés :	14
I.3.4 Propriétés de granulats recyclés	15
I.3.4.1 Propriétés physique des granulats recyclés	16
I.3.4.1.1 Distribution granulométrique	16
I.3.4.1.2 Absorption d'eau	17
I.3.4.1.3 Masse volumique (Densité)	18
I.3.4.2 Propriété mécanique des granulats recyclé	19
I.3.4.2.1 Résistance à l'abrasion	19
I.3.4.2.2 Résistance à l'attrition	20
I.3.4.2.3 Teneur en mortier attaché	21
1.4 Conclusion	22

## **Chapitre II**

### **Traitement des granulats recyclés**

II.1 Introduction	23
II.2 Les différentes méthodes de traitements	23
II.2.1 Les méthodes mécaniques	23
II.2.1.1 Séparation par chocs :	24
II.2.1.2 Procédé de nettoyage autogène	24
II.2.1.3 Séparation par abrasion	25
II.2.2 Méthodes chimique	25
II.2.2.1 Traitement acide	25
II.2.3 Méthodes thermiques	25

II.2.3.1 Haute température.....	25
II.2.3.2 Ecaillage par gradient thermique .....	25
II.2.3.3Ecaillage par pression interne .....	26
II.2.3.4 Perte des propriétés mécaniques de la pâte de ciment .....	26
II.2.3.5 Basse température :.....	26
II.2.3.6 Augmentation de volume de l'eau :.....	26
II.2.4 Autre méthodes :.....	26
II.2.4.1 Traitement par vibrations ultrasoniques :.....	26
II.2.4.2 Traitement par micro-ondes : .....	27
II.2.4.3 Traitement par jet hydraulique : .....	27
II.2.4.4 Electro-fragmentation :.....	28
II.2.4.5 Pré trempage dans l'eau : .....	29
II.2.5 Amélioration des propriétés de la pâte de ciment : .....	30
II.2.5.1 Carbonatation forcée :.....	30
II.3 Conclusion .....	30

## **Chapitre III**

### **Béton de granulats recyclés**

III.1 Introduction .....	32
III.2 Propriétés du béton recyclé .....	33
III.2.1 Propriétés du béton recyclé à l'état frais .....	33
III.2.1.1 Influence de l'absorption des granulats recyclés sur la demande en eau du béton ....	33
III.2.1.2 Affaissement .....	34
III.2.1.3 La masse volumique à l'état frais.....	35
III.2.2 Propriétés du béton recyclé à l'état durci .....	36
III.2.2.1 La résistance à la compression .....	36
III.2.2.2 La résistance à la traction .....	38
III.2.2.3 Module d'élasticité .....	40
III.2.2.4 La densité à l'état durci .....	41
III.3 Utilisation de béton recyclé .....	41
III.4 Construction à base de granulats recyclés .....	42
III.5 Conclusion .....	44

# Chapitre IV

## Partie expérimentale

IV.1 Introduction .....	45
IV.2 Matériaux utilisées .....	45
IV.2.1 Choix du ciment .....	45
IV.2.2 Les granulats .....	46
IV.2.2.1 Sable .....	46
IV.2.2.2 Gravier .....	48
IV.2.3 L'eau de gâchage .....	50
IV.2.4 Superplastifiant .....	50
IV.2.5 Fumée de silice .....	51
IV.3 Propriétés de granulats recyclés .....	52
IV.3.1 Analyses physiques : .....	52
IV.3.1.1 Analyse Granulométrique par Tamisage du sable et gravier (NF P18 560) : .....	53
IV.3.1.1.1 Le Calcul : .....	54
IV.3.1.1.2 Tracé de la courbe granulométrique : .....	54
IV.3.1.2 Module de finesse (EN 13139) : .....	55
IV.3.1.3 Correction de sable : .....	56
IV.3.1.4 Essai d'équivalent de sable (EN 933-8) : .....	57
IV.3.1.4.1 Interprétation des résultats et qualité du sable: .....	58
IV.3.1.4.2 Qualité d'un sable .....	59
IV.3.1.5 Masse volumique : .....	60
IV.3.1.5.1 La masse volumique apparente (NF 18-554) : .....	60
IV.3.1.5.2 Masse volumique absolue (NF P 18-301) : .....	63
IV.3.1.6 Coefficient d'absorption d'eau (Ab) (NF P18-554) : .....	65
IV.3.2 Analyses mécaniques : .....	66
IV.3.2.1 Essai de Los Angeles (NF P 18-573) : .....	66
IV.3.2.2 Essai micro-Deval (NA 457/1990) : .....	67
IV.3.2.2.1 Calcul du MDE .....	67
IV.4 Formulation de béton .....	69
IV.5 Préparation des mélanges .....	70
IV.5.1 Béton ordinaire : .....	71

IV.5.2 Béton recyclé :	71
IV.5.2 .1 Amélioration chimique par fumée de silice	71
IV.5.2 .2 Amélioration mécanique par triple broyage des GR	72
IV.5.2 .3 Approche de mélange en deux étapes (TSMA)	73
IV.6 Propriétés de béton à l'état frais :	73
IV.6.1 Affaissement au cône d'Abrams :	73
IV.6.2 La masse volumique du béton frais	74
IV.7 Fabrication des éprouvettes de bétons :	74
IV.8 Propriétés de béton à l'état durci	76
IV.8.1 Essai de Résistance à la compression des éprouvettes	76
IV.8.1.1 La conduite de l'essai :	77
IV.8.2 Essai de Résistance à la traction par flexion (trois points)	78
IV.9 Conclusion	79

## **Chapitre V**

### **Résultats et interprétation**

V.1 Introduction	80
V.2 Résultats des essais	80
V.2.1 Résultats physique	80
V.2.2 Résultats mécanique	91
Conclusion générale et prespective	111

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

<b>Figure .I.1.</b> Compositions des déchets .....	7
<b>Figure .I.2.</b> Boulets de démolition.....	10
<b>Figure .I.3.</b> Démolition à l'aide d'outils portés.....	11
<b>Figure .I.4.</b> démolition manuel.....	12
<b>Figure .I.5.</b> démolition à l'aide de cisailles.....	13
<b>Figure .I.6.</b> de déchets de construction .....	15
<b>Figure .I.7.</b> Courbes granulométriques des GN et des GR.....	16
<b>Figure .I.8.</b> Analyse granulométrique des gros granulats recyclés et naturels.....	17
<b>Figure .I.9.</b> Absorption d'un granulats recyclé en fonction du temps.....	18
<b>Figure .I.10.</b> Relation entre mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau des GBR .....	18
<b>Figure .I.11.</b> Relation entre la densité et le taux de mortier attaché .....	19
<b>Figure .I.12.</b> Coefficients de Los Angeles pour (GN et GR) .....	20
<b>Figure .I.13.</b> Résultats de l'essai de MDE sur les granulats (GR et GN) .....	21
<b>Figure .I.13.</b> Teneur en mortier attaché en fonction de la taille des granulats .....	22

## Chapitre II

<b>Figure .II.1.</b> principe du traitement par vibration ultrasonique .....	27
<b>Figure .II.2.</b> interaction entre l'eau sous pression et le matériaux traité .....	28
<b>Figure .II.3.</b> principe de l'électro-fragmentation .....	29

## Chapitre III

<b>Figure .III.1.</b> Corrélation entre l'absorption d'eau et la densité de la fraction grossière de granulats de béton recyclés et de Granulats mixtes recyclés .....	34
<b>Figure .III.2.</b> Affaissement des différents types de béton .....	35
<b>Figure .III.3.</b> masse volumique à l'état frais du béton en fonction de différents pourcentages et types de granulats recyclé .....	36
<b>Figure .III.4.</b> Variation de la résistance à la compression .....	37
<b>Figure .III.5.</b> Variation de la résistance à la traction par flexion .....	38
<b>Figure .III.6.</b> Variation de la résistance à la traction par fendage .....	39

<b>Figure .III.7.</b> Relation entre la résistance à la traction et au fendage des bétons recyclés et conventionnels .....	40
<b>Figure .III.8.</b> Influence de la teneur en RCA sur le module d'élasticité (d'après Juan et Alaejos) .....	41
<b>Figure .III.9.</b> Influence de la teneur en RCA sur le module d'élasticité du béton dur (d'après Juan et Alaejos) .....	41
<b>Figure .III.10.</b> La procédure depuis la démolition du béton jusqu'à l'application sur site .....	42
<b>Figure .III.11.</b> Déformations totales au centre de la paroi d'essai .....	43
<b>Figure .III.12.</b> Spécimens de maquette .....	43
<b>Figure .III.13.</b> Construction d'un bâtiment avec granulats recyclés .....	44

## Chapitre IV

<b>Figure .IV.1.</b> ciment Awted .....	46
<b>Figure .IV.2.</b> Sable a) sable naturel b) sable de carrière .....	47
<b>Figure .IV.3.</b> Sable corrigé .....	48
<b>Figure .IV.4.</b> Gravier naturel .....	49
<b>Figure .IV.5.</b> Gravier recyclés .....	50
<b>Figure .IV.6.</b> Adjuvant superplastifiant SikaPlast-40 Pro .....	51
<b>Figure .IV.7.</b> Fumée de silice Tekna Chem .....	52
<b>Figure .IV.8.</b> Essai de l'analyse granulométrique de sable et GN ,GR .....	55
<b>Figure .IV.9.</b> Procédure d'essai d'équivalent de sable .....	59
<b>Figure .IV.10.</b> Détermination de la masse volumique apparente de sable .....	62
<b>Figure .IV.11</b> Détermination de la masse volumique apparent de GN,GR .....	63
<b>Figure .IV.12.</b> Détermination de la masse volumique apparente de ciment .....	63
<b>Figure .IV.13.</b> la masse volumique absolu du a) sable b) Gravier (GN et GR) .....	65
<b>Figure .IV.14.</b> Essai Los Angeles.....	67
<b>Figure .IV.15.</b> Essai micro-devale.....	68
<b>Figure .IV.16.</b> Triple broyage des GR .....	72
<b>Figure .IV.17.</b> Affaissement au cône d'Abrams .....	74
<b>Figure .IV.18.</b> Fabrication des éprouvettes de béton .....	76
<b>Figure .IV.19.</b> Essais de compression des éprouvettes cylindriques.....	78
<b>Figure .IV.20.</b> Essai de traction par flexion des éprouvettes prismatiques .....	79

# Chapitre V

<b>Figure .V.1.</b> Analyse granulométrique des granulats .....	86
<b>Figure .V.2.</b> Masses volumiques apparentes de matériaux .....	88
<b>Figure .V.3.</b> Masses volumiques absolue de matériaux .....	89
<b>Figure .V.4.</b> Evolution de coefficient d'absorption d'eau des GR .....	90
<b>Figure .V.5.</b> Résultats d'essai Los Angles .....	91
<b>Figure .V.6.</b> Résultats d'essai Micro-Deval .....	92
<b>Figure .V.7.</b> Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement.....	94
<b>Figure .V.8</b> Variation de la masse volumique des 3 méthodes .....	96
<b>Figure .V.9</b> Variation de la densité moyenne des 3 méthodes en fonction de temps des éprouvettes cylindriques .....	101
<b>Figure .V.10</b> Variation de la densité moyenne des 3 méthodes en fonction de temps des éprouvettes prismatiques .....	102
<b>Figure .V.11.</b> Variation de la résistance moyenne de compression des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps .....	108
<b>Figure .V.12.</b> Variation de la résistance moyenne à la traction par flexion des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps .....	110

# LISTE DES Tableaux

## Chapitre III

<b>Tableau .III.1.</b> Résistance à la compression des bétons .....	37
---	----

## Chapitre IV

<b>Tableau .IV .1.</b> nature et qualité de sable.....	58
<b>Tableau .IV.2.</b> Nombre des boulets pour essai Los Angeles .....	66
<b>Tableau .IV.3.</b> type des graviers selon le coefficient MD .....	69
<b>Tableau .IV.4.</b> Conception du mélange kg/m <sup>3</sup> .....	70

## Chapitre v

<b>Tableau .V.1.</b> Analyse granulométrique de sable (0/5).....	82
<b>Tableau .V.2.</b> Analyse granulométrique de sable gros.....	83
<b>Tableau .V.3.</b> Analyse granulométrique de sable correction .....	84
<b>Tableau .V.4.</b> Analyse granulométrique de Gravier normale (GN) (3/8, 8/15).....	84
<b>Tableau .V.5.</b> Analyse granulométrique de Gravier recyclés .....	85
<b>Tableau .V.6.</b> Résultats d'essai de l'équivalent de sable Correction .....	86
<b>Tableau .V.7.</b> Masses volumiques apparentes des constituants utilisés.....	87
<b>Tableau .V.8.</b> Masses volumiques absolues des constituants utilisés .....	88
<b>Tableau .V.9.</b> Taux d'absorption d'eau .....	89
<b>Tableau .V.10.</b> Taux d'absorption d'eau de gravier naturel .....	89
<b>Tableau .V.11.</b> Résultats d'essai Los Angeles.....	90
<b>Tableau .V.12.</b> Résultats obtenus pour l'essai de MDE.....	91
<b>Tableau .V.13.</b> Valeurs de l'affaissement des bétons .....	93
<b>Tableau .V.14.</b> Valeur de la masse volumique de béton à l'état frais.....	94
<b>Tableau .V.15.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BO .....	96
<b>Tableau .V.16.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (FS)-25% .....	97
<b>Tableau .V.17.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (FS)-75% .....	97
<b>Tableau .V.18.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (3 Br)-25% .....	98

<b>Tableau .V.19.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR (3 Br)-75% .....	98
<b>Tableau .V.20.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR ( ADME25%) .....	99
<b>Tableau .V.21.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR (AMDE-75%) .....	99
<b>Tableau .V.22.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRnt (BRnt-25%) .....	99
<b>Tableau .V.23.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRnt (BRnt-75%) .....	100
<b>Tableau .V.24.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BO .....	103
<b>Tableau .V.25.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR (FS)-25%.....	103.
<b>Tableau .V.26.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR (FS)-75%.....	104
<b>Tableau .V.27.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt (3 Br)-25%.....	104
<b>Tableau .V.28</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt ( 3Br)-75%.....	105
<b>Tableau .V.29.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt ( AMDE)-25% .....	105
<b>Tableau .V.30.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt (AMDE)-75%.....	106
<b>Tableau .V.31.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR nt 25% .....	106
<b>Tableau .V.32.</b> Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR nt 75% .....	107

## Liste des abréviations et notation

**GBR : Gravier de béton recyclé**

**GR : Gravier recyclés**

**GN : Gravier naturel**

**Es : équivalent de sable**

**ESv : équivalent de sable visuel**

**Esp : équivalent de sable par piston**

**ITZ : Zone de transition interfaciale**

**BO : Béton ordinaire**

**BRt : Béton recyclé traité**

**BRnt : Béton recyclé non traité**

**FS : fumés de silice**

**Br : Broyage**

**AMDE : Approche de mélange en deux étapes**

**LA : Los Angeles**

**MDE : Micro-DEval**

**3 Br : Méthode trois fois broyage**

# Introduction générale

---

### Introduction générale

Chaque année, 3000 millions de tonnes de déchets sont produits dans les pays de l'Union Européenne, dont 90 millions sont considérés comme dangereux. Seulement en Europe, l'industrie de la construction produit environ 900 millions de tonnes de déchets par année. Par conséquent, ces déchets représentent environ 25% à 30% de tous les déchets produits. Au Canada, des études ont démontré que près du tiers des 20 millions de tonnes de déchets solides introduits dans les flux de déchets municipaux sont produits par les activités de construction, de rénovation et de démolition. La quantité de déchets provenant de l'industrie de la construction utilisés comme matériau de remplissage ou jetés illégalement dans la nature a augmenté avec le temps. Cela a conduit à un manque croissant de zones de décharge, en même temps qu'à une augmentation des coûts dans les sites d'enfouissement. Par conséquent, la manutention des déchets est devenue l'un des problèmes environnementaux les plus importants dans les pays développés.

Le béton est le matériau le plus utilisé au monde. Il est principalement composé de granulats, de ciment et d'eau. Avec l'expansion urbaine, les exigences du secteur de la construction et une consommation mondiale annuelle d'un mètre cube par habitant, Deux défis simultanés sont posés à l'industrie de la construction. D'abord, l'importante demande en béton pour le secteur de la construction a causé une érosion graduelle des ressources naturelles non renouvelables de granulats. En second lieu, l'immense volume de débris issus de la démolition des constructions entraîne un manque d'espace pour les décharges publique. Le réemploi et le recyclage des déchets de construction sont souvent recommandés comme une solution aux deux problèmes majeurs évoqués précédemment [1].

Il est donc impératif de rechercher des alternatives durables et innovantes. L'intégration de matières premières recyclées dans sa production constitue une approche fondamentale du développement durable

Le recyclage est une méthode de gestion des déchets provenant de produits ayant atteint la fin de leur vie utile, facilitant le recyclage de certains de leurs matériaux dans la fabrication de nouveaux produits. Les matériaux recyclables comprennent certains types de plastique, de carton, de métaux, de gravats, de verre, etc. Dans le domaine du génie civil, l'industrie de la construction et de la démolition représente une partie importante de la production de déchets [2].

Les matériaux alternatifs (Granulats recyclés) sont élaborés par tri-concassage, criblage pour obtenir des granulats recyclés. Pour utiliser des granulats recyclés, leur résistance doit être proche de celle des granulats naturels, c'est-à-dire que la résistance du béton recyclé et celle du béton naturel doivent être presque similaires. Pour y parvenir, il est nécessaire de mettre en œuvre certaines méthodes permettant d'améliorer leur qualité.

Ce genre d'agrégat est souvent sujet à une cohésion faible et une résistance mécanique diminuée, à cause de la présence de restes de mortier ancien et d'un haut niveau d'absorption. Dans cette perspective, l'interrogation porte sur les techniques les plus efficaces pour optimiser la qualité de ces granulats, en particulier via des méthodes physiques et chimiques aptes à renforcer leurs caractéristiques. Ainsi, cette recherche pose la question suivante : quels sont les traitements physiques et chimiques les plus appropriés pour améliorer la cohésion et la résistance mécanique des granulats recyclés avant leur utilisation dans le béton ?

Par conséquent, ce travail propose une série de méthodes visant à gérer ou optimiser la pâte de ciment résiduelle, ce qui permet d'améliorer les performances des granulats recyclés est de diminuer la porosité et d'améliorer la qualité, produisant ainsi un béton ayant une résistance comparable à celle du béton Ordinaire(BO). Cela ouvre la voie à de nouvelles possibilités d'utilisation dans différentes applications technique

L'objectif principal de notre travail expérimental est d'améliorer la qualité des granulats recyclés afin de favoriser leur utilisation dans la fabrication du béton et leur impact sur les propriétés physiques et mécaniques de ce matériau

Cette démarche vise non seulement à valoriser les déchets issus de la démolition, mais également à contribuer à leur élimination et utilisation d'où la protection de l'environnement, et aide à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats.

Le mémoire est structuré en deux grandes parties : une recherche bibliographique et une étude expérimentale

**La première partie** : constitue une revue bibliographique organisée en trois chapitres principaux

- **Chapitre 1** : Présente les origines des granulats recyclé et leur propriété physico-mécanique
- **Chapitre 2** : rassemble la méthodologie adoptée pour améliorer les granulats recyclés

- **Chapitre 3** : a fait l'objet sur l'étude des principales caractéristiques du matériau béton recyclé et leur utilisation dans le domaine de la construction.

**La deuxième partie** : concerne le programme expérimental divisé en deux chapitres

- **Chapitres 1** : regroupe la démarche suivie pour l'expérimentation (identification des matériaux et éléments constitutifs, composition du béton, élaboration et dimensionnement des échantillons, outils de mesure)
- **Chapitre 2** : est destiné à l'interprétation, la discussion et l'analyse des résultats expérimentaux trouvés.

Et enfin Une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus.

# Chapitre I

## Granulats recyclés

---

## **I.1 Introduction**

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa résistance. Il S'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra de déterminer son sort, c'est-à-dire, le type de valorisation choisir. Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et types et natures de granulats ainsi que les autres composants de béton de granulats recyclés.

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton. Ce chapitre s'intéresse davantage aux caractéristiques des granulats recyclés, ainsi qu'aux différents paramètres qui influent sur le comportement mécanique et rhéologique du béton.

## **I.2 Les déchets**

### **I.2.1 Définition**

Les déchets sont définis comme des résidus, substances ou matériaux issus de la production, de la transformation ou de l'utilisation, qui ont été abandonnés ou sont destinés à l'être. Les déchets ultimes sont des déchets qui ne subissent aucun traitement supplémentaire et qui sont destinés à être mis en décharge. Les déchets de construction et de démolition (DCD) comprennent le béton, les pierres et les déblais produits lors des travaux d'excavation (parfois appelés collectivement « matériaux de remblai » ou gravats), ainsi que l'asphalte, le bois (traité, peint et propre), les métaux (ferreux et non ferreux) et divers matériaux [3].

Au cours des opérations de construction, rénovation et démolition, l'un ou plusieurs types de déchets suivants peuvent être générés :

### **I.2.2 Les type de déchets**

#### **I.2.2.1 Les déchets de construction**

Les déchets de construction réglementés sont ceux qui ne sont pas classés comme déchets propres et qui ne seront ni réutilisés ni recyclés. Les déchets de construction

---

réglementés non dangereux doivent être éliminés dans une décharge ou une station de transfert autorisée et sont réglementés par la loi [3].

### **I.2.2.2 Déchets inertes (DI)**

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction [4].

Les déchets inertes représentent théoriquement 94% des déchets de l'activité déconstruction. Mais en réalité, ce taux n'est que de 60% car certains déchets non inertes ne peuvent être séparés des autres : restes de plâtre sur les bétons, présence d'éléments de second œuvre comme le bois et les plastiques qui n'ont pu être retirés des murs [3].

La valorisation du béton pur atteint un taux de 77,7%. Une enquête menée entre fin 2001 et mi 2002 par la FNTF avec l'ADEME et le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable[5] a montré que l'essentiel des déchets inertes était constitué de déchets en mélange (37,2 %), de ciment et mortier (12,9 %) et de béton armé (9,8%). Le 40,1 % restant correspond à d'autres déchets qui ne sont pas en mélange mais différents du ciment, du mortier et du béton armé (plaques de plâtre, vitres, etc.) Une étude plus récente (actualisée sur le site web de l'ADEME) réalisée, estime que les déchets inertes sont de l'ordre de 20 millions de tonnes, dont 56 % correspondent à des produits inertes mélangés, 17 % à des produits à base de ciment, mortier et béton, 19 % à du béton armé et 7% à des terres cuites et céramiques. Ces déchets proviennent à 9 % de la construction neuve, 35 % correspondent à des travaux de réhabilitation et 56 % à des démolitions [6].

Les déchets inertes sont définis comme « tout déchet provenant, par exemple, de travaux d'extraction minière, de carrière, de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subit pas d'altération physique, chimique ou biologique lors de son rejet et qui n'est pas contaminé par des matières dangereuses ou d'autres éléments présentant un risque pour la santé humaine ou l'environnement [4].

### **I.2.2.3 Les déchets de chantier**

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction.

---

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron [7].

#### **I.2.2.4 Déchets industriels banals (DIB)**

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

Exemple : plastiques, métaux, verre, bois non traités [4].

#### **I.2.2.5 Les déchets industriels spéciaux (DIS) (déchets dangereux (DD))**

Tandis que déchets dangereux, ce type de déchets est traité selon des procédures différentes pour les gestionnaires de commandes. Ils contiennent des composés nocifs pour l'homme et l'environnement. Une réglementation stricte régit leur stockage et leur manipulation. Par exemple, les solvants, les peintures, les huiles, les colles, le goudron, le bois traité ou les emballages souillés.

Exemple : amiante, solvants, peintures, huiles, colles, goudron, bois traités ou Emballages souillés [2].

#### **I.2.2.6 Les déchets d'emballages**

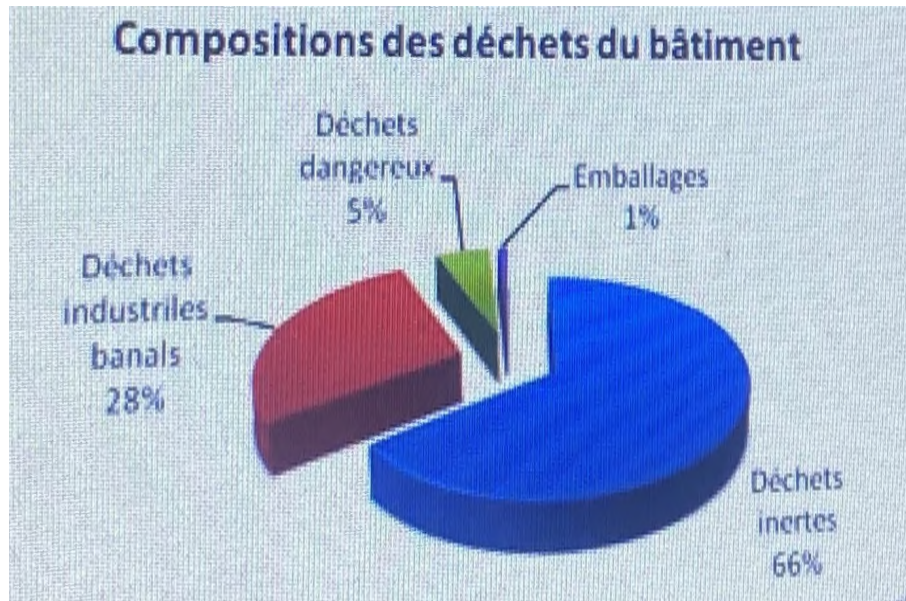
Le traitement impose-t-il une valeur au-delà d'une certaine quantité produite (volume hebdomadaire 1100 litres [1].

#### **I.2.2.7 Déchets d'un remblai propre**

Un remblai propre est un matériau non contaminé, constitué de terre, de roche, de sable, de gravier, de béton, de béton bitumineux, de parpaings, de briques, de quantités minimales de bois et de métal, ainsi que de solides inertes (non réactifs). Lorsqu'ils sont spécifiés comme non contaminés, par exemple par des peintures à base de métal, y compris le plomb et d'autres métaux lourds, ces matériaux peuvent être utilisés directement pour le remblai, la valorisation ou d'autres fins [3].

#### **I.2.2.8 Composition des déchets de bâtiment**

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets [4].



**Figure .I.1.** Compositions des déchets [4].

En effet, la composition approximative des déchets de démolition en Grèce se répartit comme suit: béton (40 %) brique (30 %), bois (10 %), plastique (5 %), métaux (5 %), autres éléments (10 %) [6].

### **I.2.2.9 Les matériaux récupérés**

Les matériaux récupérés sont ceux qui sont retirés pour être réutilisés et ceux qui sont retirés pour être recyclés en nouveaux produits. Les déchets potentiellement recyclables peuvent inclure la ferraille, les bardeaux d'asphalte, les plaques de plâtre, le bois d'œuvre, le verre et les fils électriques [3].

### **I.2.2.10 Déconstruction**

Tout bâtiment a une durée de vie limitée. Bien que certains bâtiments durent plus de 100 ans, des durées de vie plus courantes sont présentées ci-dessous. En fin de vie, trois options sont généralement possibles, la plus appropriée dépendant des coûts, des conditions environnementales et d'autres enjeux locaux tels que les ordonnances de préservation [4].

Une démolition peut prolonger la durée de vie d'un bâtiment et constituer une alternative à sa démolition. Lors de la démolition, toutes les parties non porteuses du bâtiment sont déconstruites. La reconstruction commence par l'ancienne ossature [3].

### **I.2.2.11 Réutilisation de la structure**

La déconstruction et la réutilisation de la structure elle-même peuvent constituer une alternative pour certaines structures, notamment celles en acier. Cette méthode permet de donner une seconde vie à la structure porteuse, par exemple pour des ponts ou des halls [1].

### **I.2.2.12 Démolition**

La démolition complète est le scénario de fin de vie typique. Pour éviter les déchets et la mise en décharge, la réutilisation et le recyclage des matériaux doivent être pris en compte.

La réutilisation de structures entières, voire d'un bâtiment entier, permet de minimiser l'impact sur les ressources naturelles. Si un bâtiment entier peut être déconstruit et reconstruit ailleurs, aucun déchet n'est produit. Si cette possibilité est envisagée avant la construction, on parle de « conception pour la déconstruction » [1].

Si des éléments structurels entiers ne peuvent être réutilisés, le recyclage des matériaux est la meilleure option, tout en produisant peu de déchets [3].

## **I.2.3 Techniques et matériaux de démolition**

Plusieurs éléments déterminent la méthode ou l'association de méthodes employées lors d'un projet de démolition :

- la zone opérationnelle accessible ;
- la présence de lois locales ou nationales imposant le tri des déchets ;
- l'existence de normes écologiques (imposées par le Commanditaire) ;
- la localisation du site de démolition ;
- l'ampleur de la démolition ;
- la durée prévue pour effectuer la démolition.

Seulement les entreprises qualifiées et compétentes pour mettre en place des mesures de sécurité appropriées envers leurs employés et leurs voisins, peuvent appliquer les méthodes décrites ci-après.[1]

Parmi les techniques de démolition importantes, nous mentionnons :

### **I.2.3.1 Boulets de démolition**

Le principal problème lié à l'utilisation des boulets de démolition réside dans leur difficulté de contrôle. Bien qu'ils puissent être particulièrement efficaces pour détruire la maçonnerie et les bâtiments en béton, ils sont moins précis que les techniques de dynamitage, de cisaillement ou d'implosion. Compte tenu de la taille d'un boulet de démolition moyen, une légère variation de visée peut avoir des conséquences considérables. L'arc du boulet de démolition doit être contrôlé avec une grande précision. L'utilisation sûre d'un boulet de démolition reposant sur un contrôle minutieux, une main-d'œuvre qualifiée est nécessaire pour une utilisation efficace des grues. Pour cette seule raison, de nombreuses équipes de démolition préfèrent utiliser des alternatives moins risquées, ce qui leur permet d'employer une main-d'œuvre moins qualifiée. Avec la diminution de l'utilisation des boulets de démolition, de moins en moins de grutiers possèdent l'expérience nécessaire à la démolition par boulets de démolition. Lorsque les grutiers sont sollicités pour cette tâche, leur relative inexpérience peut accroître les risques d'une technique déjà dangereuse [1].

Une mauvaise utilisation de la boule de démolition peut avoir des conséquences désastreuses. Elle peut se détacher de la grue, détruisant potentiellement des bâtiments, voire causant des décès. Mal guidée, une boule de démolition peut également surcharger la grue. Dans ce cas, sa trajectoire devient incontrôlable. Cela peut provoquer un mouvement de recul, la boule heurtant la flèche de la grue. Un accident de cette ampleur illustre les pires conséquences possibles d'une démolition par boule de démolition.

Outre le danger, de nombreuses équipes renoncent à utiliser des boules de démolition pour des raisons d'efficacité et de commodité. Si une boule de démolition peut facilement détruire la maçonnerie ou le béton, une fois le béton brisé, une main-d'œuvre supplémentaire importante est nécessaire pour couper les barres d'armature intactes.

De plus, une boule de démolition n'est efficace que pour les bâtiments dont la taille correspond à celle de la grue utilisée. De plus, des facteurs tels que la proximité de lignes électriques doivent être pris en compte et peuvent rendre un site inapproprié pour la démolition par boule de démolition. Enfin, la boule de démolition gêne le voisinage, en générant bruit, poussière et vibrations importants [3].



**Figure I.2.** boulets de démolition [8].

### **I.2.3.2 Démolition par dynamitage**

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets [9].

### **I.2.3.3 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés**

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent [10].



**Figure .I.3.** Démolition avec Outils portés [11].

#### **I.2.3.4 Pousser et tirer les murs**

Si les boulets de démolition et les cisailles de démolition sont courants pour la démolition d'un bâtiment entier, les techniques de poussée et de traction sont des mesures supplémentaires pour des parties spécifiques d'un bâtiment. Avant l'invention d'outils tels que les cisailles de démolition, et à une époque où les bâtiments étaient principalement en maçonnerie, pousser et tirer les murs était le seul moyen de démolir un bâtiment avec des excavatrices.

L'idée est simple. La résistance d'un mur de briques à la puissance d'une excavatrice étant faible, il est possible de pousser un mur à l'intérieur du bâtiment à l'aide du back acter ou de placer ce dernier sur un mur et de tirer le mur vers l'extérieur. La hauteur étant le facteur limitant, des rallonges de traction pourraient être utilisées pour étendre la portée de l'excavatrice.

Il est évident qu'il existe un risque, notamment lors de l'extraction de murs. Les murs se brisent généralement au pied de l'étage suivant, mais il est impossible de prévoir l'entaille exacte. L'équipe de démolition doit soigneusement déterminer le comportement du mur. C'est pourquoi, avant de tirer un mur vers l'extérieur, le conducteur de l'excavatrice doit tester son comportement par quelques essais de traction à faible puissance afin de déterminer l'emplacement exact de l'entaille.

En raison du danger, les directives de sécurité relatives à la poussée/traction d'éléments de construction recommandent une distance de sécurité comprise entre  $h$  et  $1,5 \times h$  par rapport au bâtiment, où  $h$  correspond à la hauteur restante du bâtiment [3].

### I.2.3.5 Technique de démolition à l'aide d'outils à main

Ces méthodes sont principalement mises en œuvre pour les démolitions de faible volume, ainsi que pour les travaux préliminaires avant la démolition de structures de plus grande taille. En ce qui concerne les travaux préparatoires, on élimine les contaminants (tels que l'amiante, le plomb, etc.). On utilise divers instruments comme des maillets, des pioches et des marteaux, qui peuvent être de type électrique, pneumatique ou hydraulique. Ce genre de démolition est progressif et onéreux, toutefois, si elle est correctement réalisée, elle favorise un meilleur tri [1].



Figure .I.4. déconstruction manuel [11].

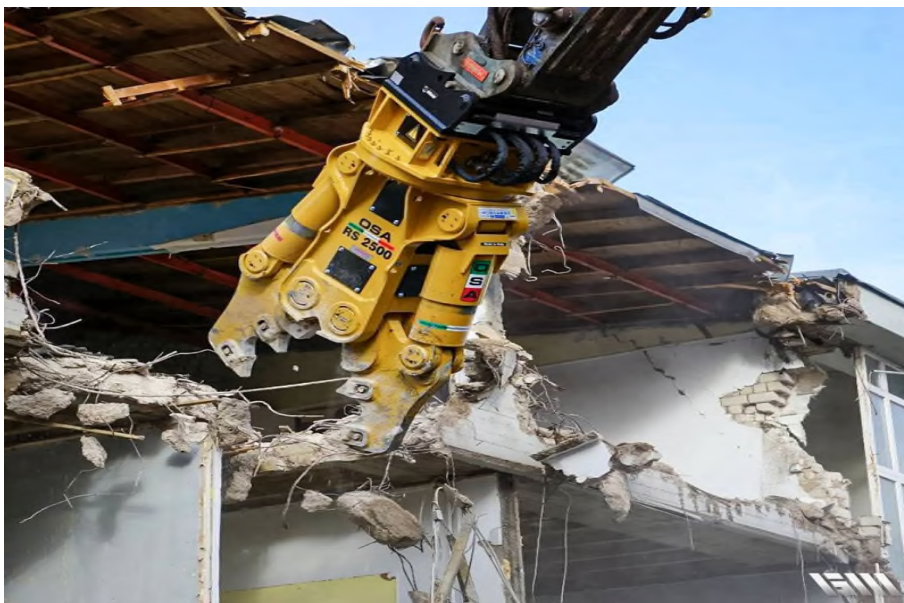
### I.2.3.6 Cisailles de démolition

Aujourd'hui, la plupart des démolitions sont réalisées par morceaux à l'aide de cisailles à fissures. Cette démolition s'effectue à l'inverse du processus de construction. Les poteaux et autres éléments porteurs sont démolis en dernier, tandis que les dalles sont démolies en premier. À l'aide de cisailles à fissures, les bâtiments sont démolis de haut en bas. Le non-respect de cette règle entraîne des défauts de stabilité et peut entraîner un effondrement incontrôlé. Les cisailles de démolition sont des outils de travail dotés de mâchoires mobiles équipées de lames en acier trempé sur une mâchoire supérieure et une mâchoire inférieure. Techniquement, la cisaille à fissures détruit la structure en béton ou en maçonnerie uniquement entre les deux lames. L'avantage des cisailles à fissures réside dans leur haut niveau de contrôle. Contrairement aux boulets de démolition, la démolition ne fait intervenir aucune force cinématique et ne comporte donc aucune pièce mobile susceptible de devenir incontrôlable. L'énergie de démolition est fournie par des pompes hydrauliques. L'opérateur

de la machine doit posséder des connaissances de base en construction pour utiliser efficacement les cisailles à fissures

L'utilisation des cisailles à fissures est limitée par la hauteur de l'excavatrice, qui est généralement inférieure à celle des grues. Les excavatrices classiques ne dépassent pas 12 à 15 m de hauteur ; les bâtiments plus hauts nécessitent donc des excavatrices spéciales pour la démolition par cisailles à raclage. Les excavatrices modernes à long front peuvent atteindre des hauteurs allant jusqu'à 40 m, mais avec l'augmentation de la hauteur, la charge disponible pour les outils d'attache diminue. Par conséquent, les cisailles utilisées pour les hauteurs plus importantes sont plus petites et moins puissantes que les cisailles classiques, ce qui réduit leur efficacité.

La démolition par cisailles à fissures est peu encombrante et produit peu de vibrations. C'est donc la technique privilégiée dans les zones à forte densité de population [3].



**Figure .I.5.** démolition à l'aide de cisailles [12].

### **I.3 Procèdes du recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz [3].

### **I.3.1 Aperçu historique du recyclage du béton**

Le recyclage dans le secteur de la construction remonte à plusieurs siècles. On pense que les Romains ont été les premiers à développer cette technologie, il y a plus de 1900 ans. Ils ont construit des murs, des routes et des aqueducs en béton, utilisant de la roche, et parfois de la brique d'argile cuite concassée, comme granulats. Le recyclage du béton à grande échelle a commencé en Europe après les destructions massives causées par la Seconde Guerre mondiale. En Allemagne, le recyclage est devenu une solution importante pour valoriser les débris produits pendant la guerre. La reconstruction des infrastructures de transport étant une priorité absolue, l'Allemagne a rapidement développé le recyclage des gravats en nouveaux produits de construction routière. Par exemple, en 1987, quelque 100 millions de tonnes de débris avaient été transformées en granulats et autres produits rien qu'à Berlin. La première utilisation moderne enregistrée du recyclage du béton a eu lieu aux États-Unis en 1942. Ce procédé a été réalisé par la Portland Cément Association et utilisé pour la réhabilitation de chaussées endommagées au Kansas. L'utilisation du béton recyclé s'est généralisée dans les années 1970, lorsque l'armée l'a utilisé pour la construction de pistes d'atterrissage [7].

### **I.3.2 Définition des granulats recyclés**

Le granulats recyclés est le produit dérivé de la conversion de matériaux inorganiques préalablement utilisés dans la construction. Cette catégorie comprend des matériaux tels que le béton broyé, le fraisât d'enrobés bitumineux, et ainsi de suite [7]. ces matériaux sont filtrés et nettoyés pour être réutilisés comme granulats dans les béton pour d'autres applications.

### **I.3.3 Source de granulats recyclés**

La production de granulats recyclés à partir de déchets initialement destinés à la mise en décharge constitue une innovation répondant aux exigences de durabilité dans le secteur de la construction. Toutefois, un défi majeur pour les chercheurs est d'évaluer dans quelle mesure les propriétés des granulats recyclés peuvent être comparées à celles des granulats naturels traditionnels. Pour ce faire, il est essentiel d'analyser les différentes sources de granulats recyclés utilisées dans la production du béton afin de mieux comprendre leurs caractéristiques et performances.

Parallèlement, alors que les nouveaux chantiers de construction disponibles continuent de diminuer à l'échelle mondiale en raison de la demande croissante 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 atteint plus de 3 milliards de tonnes par an, et cette tendance n'a cessé d'augmenter. 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 l'épuisement des terres et le gaspillage des ressources financières et matérielles. De plus, il a été 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 [13].



**Figure .I.6.** de déchets de construction [14].

### **I.3.4 Propriétés de granulats recyclés**

L'aspect distinctif majeur des granulats recyclés provenant du béton est la présence d'une gangue de ciment ancien liée aux granulats naturels primaires. Elle joue un rôle majeur

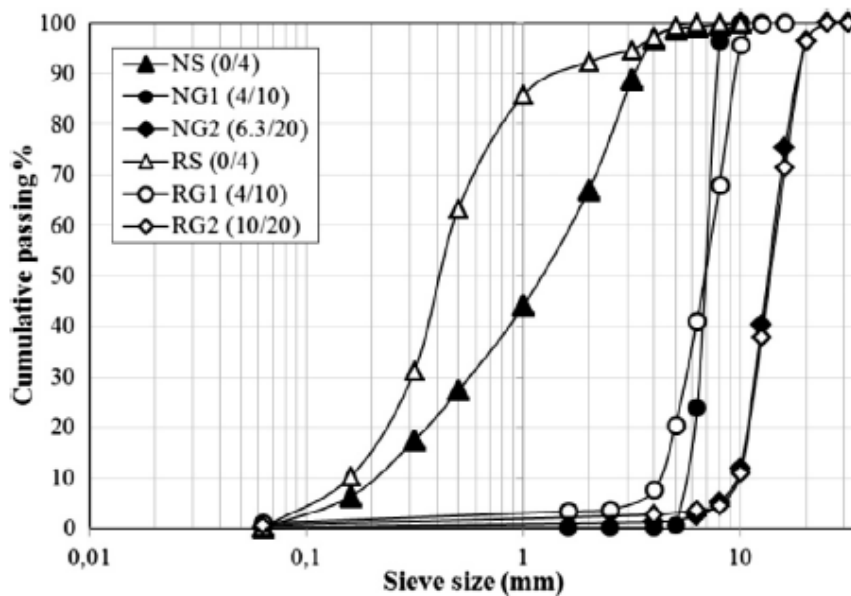
dans le comportement des bétons contenant des granulats recyclés, car elle conditionne en grande mesure les propriétés géométriques (forme, état de surface), physiques (porosité et absorption d'eau). Ces granulats ne peuvent être classés comme inertes, compte tenu de leurs caractéristiques mécaniques (comme la friabilité, la résistance aux chocs et à l'usure) [10].

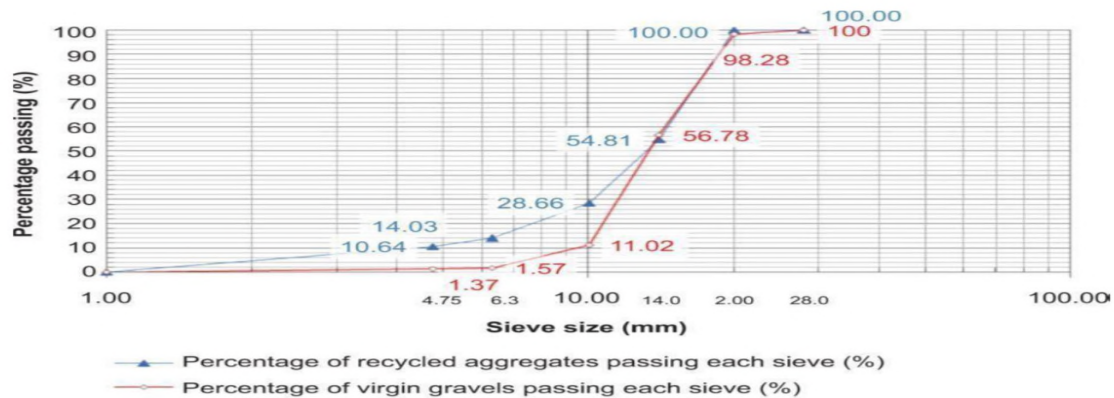
### I.3.4.1 Propriétés physique des granulats recyclés

#### I.3.4.1.1 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des granulats de béton recyclé (GBR) est généralement différente par rapport des granulats ordinaires. Les GBR sont produits en adoptant les procédés de broyage et de criblage et, par conséquent, la taille des GBR se situent généralement dans les limites maximales de la gradation du broyeur. L'utilisation de la technique de broyage similaire avec la même taille maximale ou si le broyeur est réglé sur une ouverture spécifique, il génère des GBR avec des distributions granulométriques similaires [15].

la distribution granulométrique est similaire pour deux types de GBR, où la composition de leurs bétons d'origine est légèrement différente, mais broyés par des concasseurs similaires avec la même taille maximale [16].(FigureI.7.)



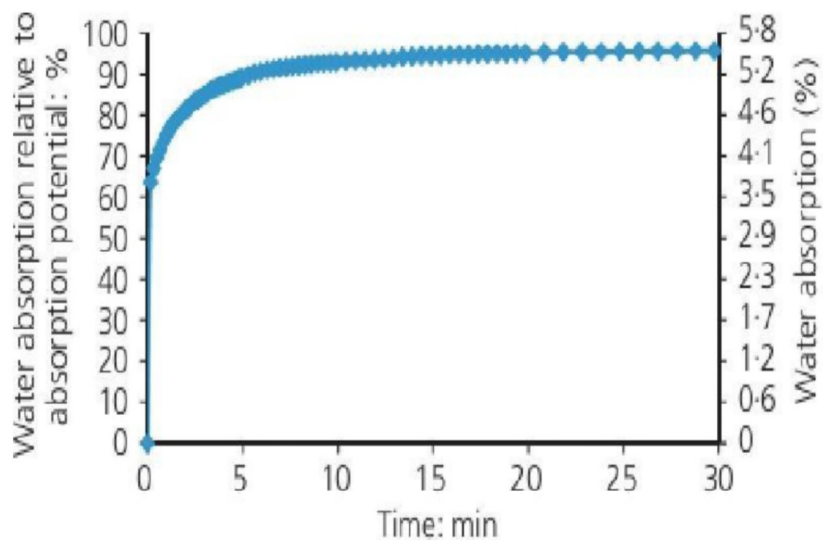


**Figure I.8.** Analyse granulométrique des gros granulats recyclés et naturels [17].

#### I.3.4.1.2 Absorption d'eau :

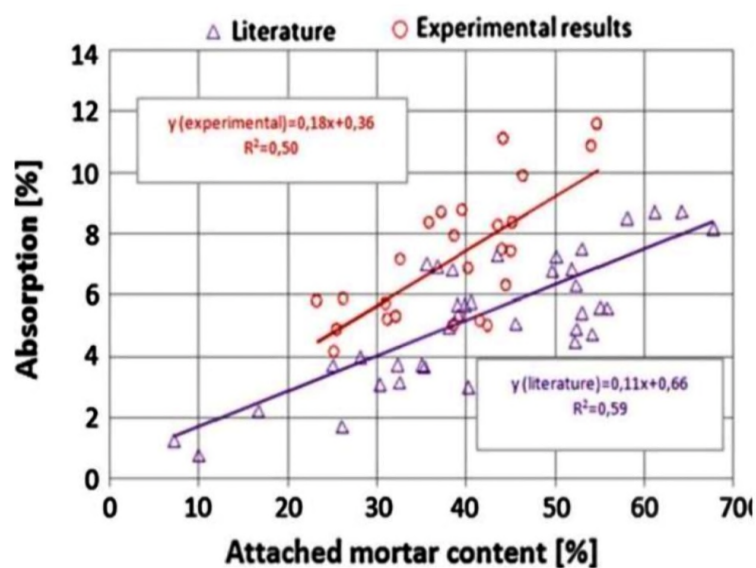
Dans toutes les études consultées, l'absorption des granulats recyclés est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés sont comprises entre 3% et 10%, alors que pour le granulat naturel cette propriété est entre 1% et 5% [18]. Les granulats recyclés avec ou sans particules de faible densité (par exemple bois) ont une absorption avec 1,63 et 1,68 fois plus d'eau que pour le granulat naturel, en raison de la porosité élevée du mortier résiduel. C.Medina et al.[19],Etxeberria et al.[20],Agrela et al.[21] ont rapporté des valeurs d'absorption dans la gamme de 2,10 % à 8,79% pour différents types de granulats recyclés.

L'absorption des granulats ont un impact important sur les propriétés du béton. Puisqu'elle affecte, la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. La figure présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 minutes. Elle démontre que la plus grande partie d'eau absorbée se fait dans les 30 premières minutes. Une absorption de 89,2 %) est obtenue après 5 minutes.



**Figure I.9.** Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [22].

De Juan et Gutierrez [14], ont également établi une relation inverse entre la densité globale des GBR et la capacité d'absorption d'eau. La relation entre le mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau des GBR est présentée dans la figure (I.10)



**Figure I.10.** Relation entre mortier attaché et la capacité d'absorption d'eau des GBR [14].

#### I.3.4.1.3 Masse volumique (Densité) :

Plusieurs recherches reportent une diminution de la densité des granulats recyclés par rapport au granulat conventionnel, ce qui a un effet direct sur la densité du béton contenant ce

type de granulats. La densité relative des granulats recyclés est moins grande que celle des granulats naturels d'où diminuer par conséquent la masse volumique totale qui se situe généralement entre 2,4 et 2,5 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75. La masse volumique plus faible des granulats recyclés est causée par la présence du mortier attaché qui a une masse volumique plus faible avec une forte porosité Juan MS et Gutierrez PA [23] ont établi une relation entre la densité et le mortier attaché, comme l'indique dans la figure(I.11).

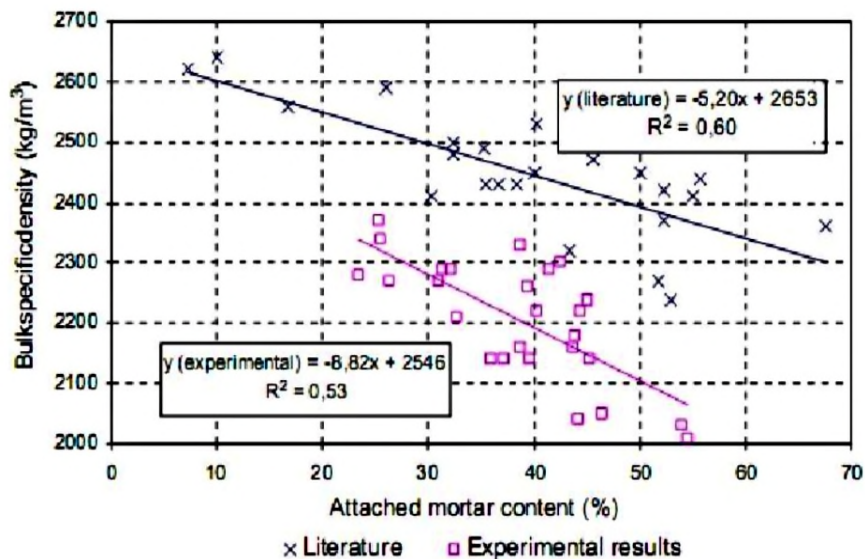
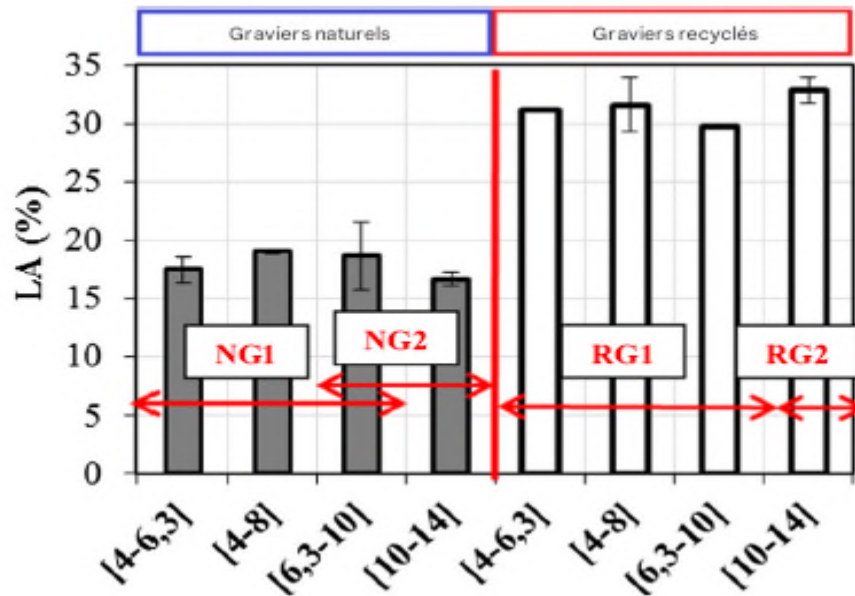


Figure .I.11. Relation entre la densité et le taux de mortier attaché [14].

### I.3.4.2 Propriété mécanique des granulats recyclés

#### I.3.4.2.1 Résistance à l'abrasion

Les granulats présentent un rapport de Los Angeles supérieur aux granulats classiques. Cette constatation, appuyée par les recherches de De Juan M.S & Gutiérrez[23] s'explique par la proportion de pâte de ciment qui enrobe les granulats concassés. En fait, la résistance à l'abrasion est directement liée à la fois à la solidité et à la quantité de mortier résiduel. Il est même démontré par la figure(I.12) que l'augmentation de ce mortier entraîne une montée correspondante de l'abrasion Los Angeles [1].



**Figure .I.12.** Coefficients de LA pour Granulats naturel et recyclés [1].

#### I.3.4.2.2 Résistance à l'attrition

Comme le démontrent De Larrard et Sedran,[24] plus la valeur du coefficient Micro Deval est faible, plus les granulats grossiers naturels (GN) résistent bien à l'attrition. Toutefois, les granulats recyclés grossiers (GR) n'ont pas bien performé lors du test d'attrition mécanique en environnement humide. Selon Barbudo et al.[25] le ciment collant est nettement moins résistant à l'abrasion résultant d'une combinaison de frottements réciproques et de coups modérés que le granulats d'origine. Le taux de perte lors des tests sur ces GR est supérieur.

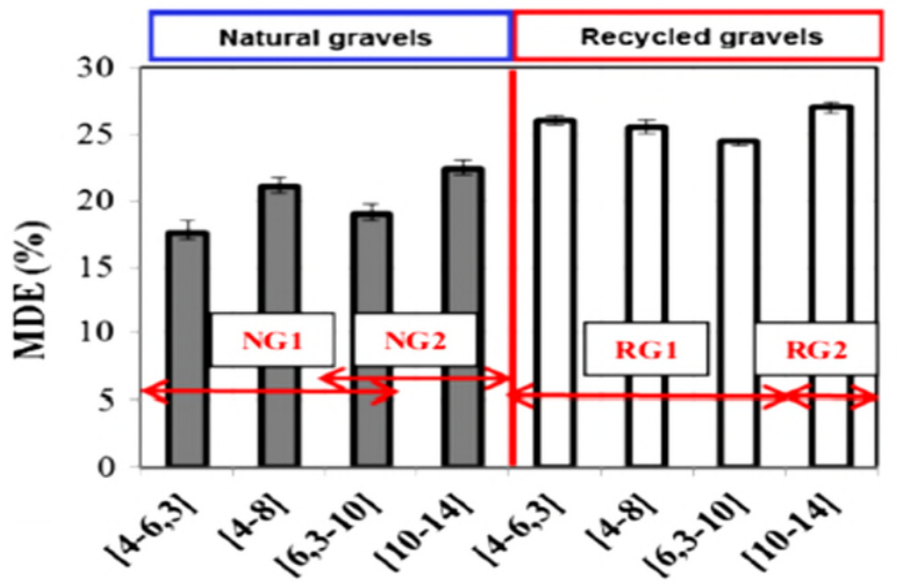


Figure I.13. Résultats de micro-deval sur (RG et NG) [1].

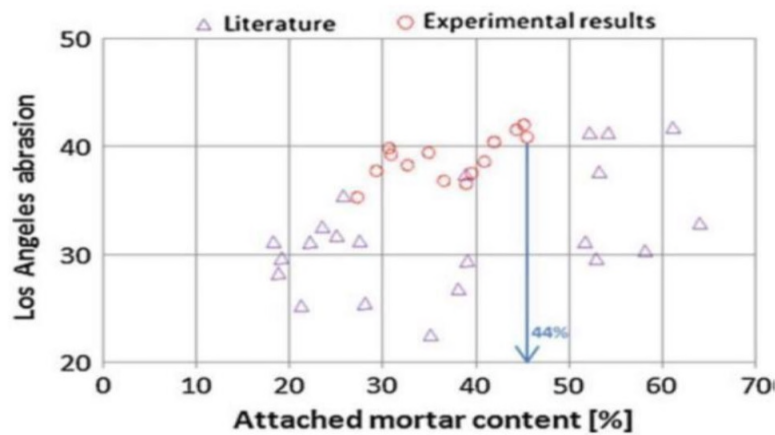
#### I.3.4.2.3 Teneur en mortier attaché

Le granulats grossiers recyclés (GR) peut se composer du granulats grossiers naturels (GN) et d'une couche de mortier résiduel adhérente. La présence significative de ce mortier résiduel dans les GR confère à ces derniers une caractéristique distincte. Effectivement, le point le plus vulnérable dans le béton incorporant des GR est le mortier adhérent du fait de sa grande porosité et de son nombre élevé de microfissures. On observe également une variabilité dans la quantité de mortier ou pâte de ciment collante parmi les différentes études. D'après Yagishita et al. [26] la quantité de mortier adhérent s'accroît en fonction de la dimension des grains. Selon Juan et Gutiérrez [23], il est conclu que la proportion acceptable de mortier résiduel dans les bétons structuraux intégrant des GR ne devrait pas dépasser 44% du volume total.

La quantité de mortier résiduel présente dans le granulats est l'une des propriétés essentielles pour juger la qualité d'un GR. Effectivement, plusieurs méthodes différentes pourraient être employées pour déterminer la quantité de mortier résiduel. Selon Boulay et al [27] Ces techniques facilitent l'enlèvement du mortier des surfaces en granit sans procéder à leur destruction, les éléments clés qui influencent la quantité de pâte de ciment liée aux GR : le rapport E/C, la solidité du béton d'origine et le volume des GR comme indiquent Medina et al et Exeberria et al.

D'après Juan et Gutiérrez [23], le pourcentage acceptable de mortier résiduel dans les bétons structuraux contenant des GR ne devrait pas excéder 44% du volume global.

présence de mortier résiduel dans le granulat est l'un des critères fondamentaux pour évaluer la qualité d'un GR. Il est vrai qu'il existe plusieurs techniques distinctes pour évaluer la quantité de mortier résiduel comme la montre Boulay et al.[27] Ces méthodes simplifient l'extraction du mortier sur les surfaces en granit sans provoquer leur destruction [26]. Les facteurs principaux qui déterminent la quantité de pâte de ciment associée aux granulats recyclés sont : le ratio E/C, la résistance du béton initial et la quantité de granulats recyclés selon les travaux de Medina et al [28], Etxeberria et al [28].



**Figure .I.13.** Teneur en mortier attaché en fonction de la taille des granulats [29].

## 1.4 Conclusion

L'étude souligne que l'origine des granulats recyclés joue un rôle prépondérant sur l'évolution de leurs propriétés physico-mécaniques et, par conséquent, sur le comportement des bétons qui en sont formés. Les granulats provenant de bétons démolis, de décombres ou d'autres sources présentent des caractéristiques physiques propres telles que leur porosité, leur absorption d'eau ou leur texture pouvant affecter leur résistance, leur compacité et leur durabilité. Cette variabilité souligne l'importance d'un traitement ciblé et d'un contrôle de la qualité de chaque gisement de granulats, afin d'optimiser leur intégration dans la formulation de bétons performants.

# Chapitre II

## Traitement des granulats recyclés

---

## II.1 Introduction

Face à l'augmentation mondiale des déchets de construction et de démolition, leur recyclage comme matière première pourrait constituer une étape essentielle vers une construction durable en béton. Cependant, l'élaboration d'une méthodologie claire pour leur réutilisation dans le béton est essentielle à leur application pratique. Le développement de la technologie du béton à base de granulats recyclés permet non seulement de traiter les déchets de construction, mais aussi de pallier la pénurie de granulats naturels. Cependant, comparés aux granulats naturels, les granulats recyclés présentent une faible masse volumique apparente, une porosité élevée, une surface rugueuse, une absorption d'eau élevée, une valeur d'écrasement élevée et de nombreuses microfissures, etc., causées par l'adhérence de vieux mortier. De plus, le béton recyclé présente les inconvénients d'une consommation d'eau importante, d'un retrait important, de mauvaises propriétés mécaniques et d'une durabilité limitée. Ces inconvénients ont fortement limité l'application du béton recyclé en ingénierie. Par conséquent, Ce chapitre présente plusieurs techniques d'élimination ou d'amélioration de la pâte de ciment résiduelle et de traité les performances des granulats recyclés.

En synthèse des travaux examinés à la section précédente, il est observé que la pâte de ciment est le point faible dans les granulats recyclés de béton. Pour améliorer les granulats recyclés de béton, il faut des lors, réduire la quantité de pâte de ciment ou améliorer ses propriétés. Cette partie explique quelques solutions pour améliorer la qualité des granulats recyclés [30].

Différentes méthodes de séparation entre les granulats naturels et la pâte de ciment existent et se basent sur des principes soit mécanique, soit chimique, soit physique. Ces Méthodes se fondent sur la différence de propriétés entre les granulats naturels et la pâte de ciment ou sur la zone de transition inter faciale qui présente une grande porosité [30].

## II.2 Les différentes méthodes de traitements

### II.2.1 Les méthodes mécaniques

Le traitement mécanique est également une méthode efficace de renforcement des granulats. Les bords et les angles des bétons en béton armé sont polis par collision les uns contre les autres afin de réduire l'adhérence du mortier usagé et d'obtenir une forme plus arrondie. selon Li et al.[31] ont conçu un équipement de mise en forme des particules pour bétons en béton armé. Le principe de ce dispositif est que les granulats sont mis en collision

les uns avec les autres par une turbine rotative à grande vitesse afin d'obtenir des granulats mis en forme et de la poudre recyclée par impact, cisaillement et frottement répétés. Les propriétés du béton recyclé avec des granulats mis en forme sont améliorées, tout comme la rétention d'eau et la cohésion du béton en béton armé frais. Cependant, le processus de mise en forme des particules peut accentuer les fissures internes de certains bétons en béton armé, affectant ainsi considérablement leur durabilité. Ils ont également constaté que l'indice d'écrasement, le taux d'absorption d'eau et la porosité du béton en béton armé obtenus par traitement mécanique étaient respectivement inférieurs de 40,5 %, 38,3 % et 9 % à ceux des granulats recyclés non traités. La résistance aux ions chlorure du béton armé après un traitement primaire de mise en forme des particules est proche de celle du béton armé non traité, tandis que sa résistance à la pénétration des chlorures après un traitement secondaire de mise en forme des particules est supérieure à celle du béton ordinaire [32].

### **II.2.1.1 Séparation par chocs**

La méthode de séparation par chocs se base sur l'essai Los Angeles qui consiste à étudier la résistance des granulats en les fragmentant dans un cylindre contenant des boulets en acier. L'efficacité de cette méthode dépend de la quantité de granulats à traiter, du nombre de boulets utilisés, de la vitesse de rotation du cylindre et de la durée du traitement. D'après de larrard et sedran [24] Pour avoir une séparation efficace, il suffit d'augmenter le temps de traitement [33].

### **II.2.1.2 Procédé de nettoyage autogène**

L'intérêt principal du procédé de nettoyage autogène est d'éliminer la couche de mortier collée à la surface du béton armé afin d'en améliorer la qualité. Les bétons armés sont placés dans un tambour de broyage rotatif de 300 mm de diamètre et de 500 mm de profondeur afin d'entrer en collision avec les particules environnantes. selon tam et al [18] Pendant le fonctionnement, le tambour est rempli au tiers de son volume et tourne à environ 60 tr/min. Le nettoyage autogène nécessite un lavage à l'eau du béton armé pour éliminer toutes les particules libres et la poussière de sa surface. Le post-traitement du nettoyage autogène est presque similaire au pré trempage dans l'eau suggéré. d'après barbudo et al,[25] Une efficacité élevée du procédé de nettoyage autogène a été constatée avec une rotation du tambour de broyage de 10 à 15 minutes. Cette méthode présente un avantage par rapport au traitement de pré trempage, car elle permet d'éliminer un plus grand pourcentage de mortier

adhérent, mais comme le montre Tam[18] elle présente également la limitation que seul un faible pourcentage de mortier adhérent peut être séparé [34].

### **II.2.1.3 Séparation par abrasion**

La méthode de séparation par abrasion se base sur l'essai micro-Deval qui consiste à mesurer l'abrasion des granulats en mettant le matériau dans un récipient rempli d'eau et de billes d'acier. Le récipient est, ensuite, mis en rotation pour abraser le matériau teste. Cette méthode dépend également de la durée de traitement mais est moins efficace que la séparation par chocs. Malgré cela, la séparation par abrasion a pour avantage de garder les granulats naturels non-fragmentés [30].

## **II.2.2 Méthodes chimique**

### **II.2.2.1 Traitement acide**

L'élimination du mortier de ciment adhérent de la surface du béton armé est une tâche très difficile, car l'hydratation du ciment est une réaction chimique entre ses constituants et l'eau pendant une longue période, conférant ainsi au béton sa structure solide et rigide. Cependant, différents acides (de concentration forte à moyenne) sont utilisés pour éliminer le mortier adhérent. Les produits d'hydratation du ciment sont dissous dans cette solution acide. Plusieurs études ont démontré l'intérêt de différentes solutions acides pour éliminer le mortier adhérent du béton armé. Les acides les plus couramment utilisés dans cette catégorie sont l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), l'acide chlorhydrique ( $HCl$ ), l'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ) et l'acide acétique ( $CH_3COOH$ ) [34].

## **II.2.3 Méthodes thermiques**

### **II.2.3.1 Haute température**

La méthode de traitement à haute température consiste à chauffer les granulats afin que trois phénomènes permettent la séparation entre la pâte de ciment et les granulats naturels. Les trois phénomènes sont les suivants :

### **II.2.3.2 Ecaillage par gradient thermique**

La température de la surface des granulats recyclés de béton est à haute température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus basse ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

### **II.2.3.3 Ecaillage par pression interne**

L'eau présente dans les pores des granulats recycle passe sous forme gazeuse grâce à l'augmentation de température. Une partie de cette vapeur d'eau ne pouvant s'échapper, montent en pression et induisent des pressions internes qui fissurent la pâte de ciment.

### **II.2.3.4 Perte des propriétés mécaniques de la pâte de ciment**

La pâte de ciment perd ses propriétés mécaniques à haute température et se détériore ce qui libère les granulats naturels [30].

### **II.2.3.5 Basse température**

La méthode de traitement à basse température repose sur les actions liées au cycle gel dégel. Les granulats recyclés de béton sont d'abord saturés puis sont exposés à plusieurs cycles

gel-dégel. Les cycles gel-dégel vont mettre à contribution deux phénomènes qui sont :

### **II.2.3.6 Augmentation de volume de l'eau**

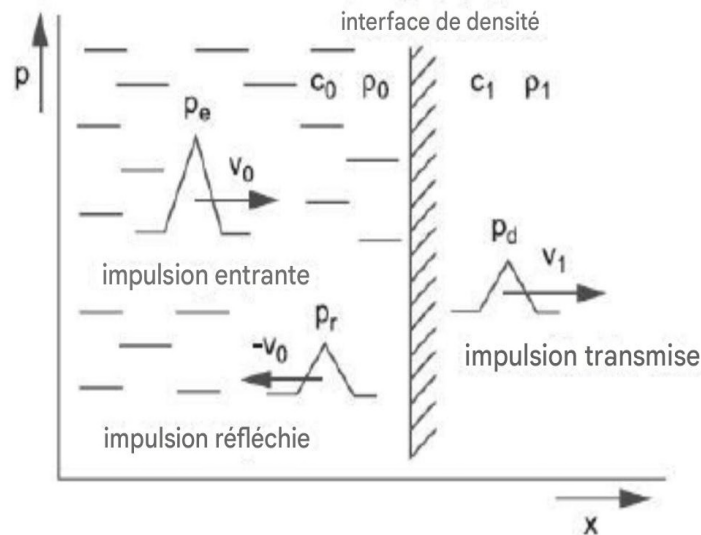
L'eau en présence dans les pores passe de la phase liquide à la phase solide. L'eau est le seul élément qui, en passant de sa forme liquide à sa forme solide, augmente son volume. Le volume des pores étant fixe, l'augmentation de volume de l'eau engendre des contraintes internes qui provoquent l'éclatement de la pâte de ciment.[30]

## **II.2.4 Autre méthodes**

### **II.2.4.1 Traitement par vibrations ultrasoniques**

L'utilisation des vibrations ultrasoniques repose sur la diffusion des ondes sonores à haute fréquence et sur les interférences générées à l'interface de deux matériaux de différentes caractéristiques. Dans la zone de transition inter faciale, qui est la région où le granulat naturel rencontre la pâte de ciment, une portion des ondes est réfléchi, ce qui génère des interférences. Ces interférences engendrent des tensions et, par conséquent, des contraintes qui provoquent la fissuration de la pâte de ciment dans la zone de transition, facilitant ainsi l'élimination de cette dernière. Pour optimiser cette méthode, il est conseillé d'avoir une répartition régulière des ondes autour des granulats recyclés ce qui permet d'améliorer l'efficacité du traitement et à réduire la dégradation des granulats naturels d'origine. Cette technique donne de meilleurs résultats que les méthodes de concassage au moyen de broyeur

mais dépend fortement de la taille des granulats traités. Par contre, cette méthode consomme une quantité très importante d'énergie [35].



**Figure II.1.** Principe du traitement par vibration ultrasonique [30].

#### II.2.4.2 Traitement par micro-ondes

Le traitement par micro-ondes est plus à considérer comme un prétraitement qu'un traitement en lui-même - car il est à réaliser avant le concassage traditionnel. Selon Sohn et al [36] Le principe de cette méthode se base sur la différence de sensibilité aux micro-ondes de la pâte de ciment et des granulats naturels constituant les granulats recyclés de béton. Il y a alors des gradients de température qui se créent dans les granulats recyclés qui vont engendrer des contraintes et créer des micro-fissures dans la pâte de ciment, de plus, si de l'eau est présente dans les pores des granulats recyclés de béton, cette eau va chauffer et passer de sa phase liquide à sa phase gazeuse qui créera des contraintes supplémentaires puisque la vapeur d'eau a une masse volumique plus grande que l'eau liquide. L'avantage de ce traitement est qu'il dégrade moins les granulats naturels comparé au traitement à haute température classique puisque la durée du traitement est plus courte et la température est moins élevée. Poon et al [37] montrent que ce traitement est plus efficace en présence de granulats grossiers que de granulats recyclés fins [38].

#### II.2.4.3 Traitement par jet hydraulique

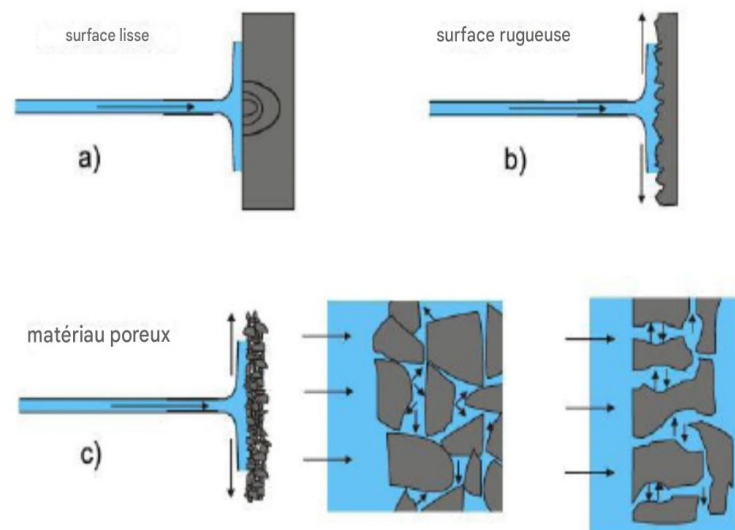
Le traitement par jet hydraulique se base sur la technique de l'hydro-démolition qui consiste à l'utilisation d'un jet d'eau sous pression dans le but de détacher le béton des

armatures Dacier du béton armé. selon zega et al er di maio[39] la pression du jet d'eau varie normalement entre 200 et 3000 bars. Cette méthode repose sur deux principes :

**Impact :** Le jet d'eau sous haute pression entre en contact avec les matériaux ce qui libère une grande quantité d'énergie sur une petite zone. Cette énergie provoque de grandes contraintes sur les matériaux qui se désagrègent.

**Pression dans les pores :** Lorsque le matériau traité est poreux, l'eau sous pression s'engouffre dans les pores et crée des contraintes au sein de ce dernier. Ces contraintes vont entraîner la destruction du matériau.

D'après tam Ce traitement dépend de la pression utilisée ainsi que la distance entre le matériau traité et la buse. Il est nécessaire de bien régler ces paramètres pour ne pas endommager les granulats naturels si l'énergie à dissiper est trop grande

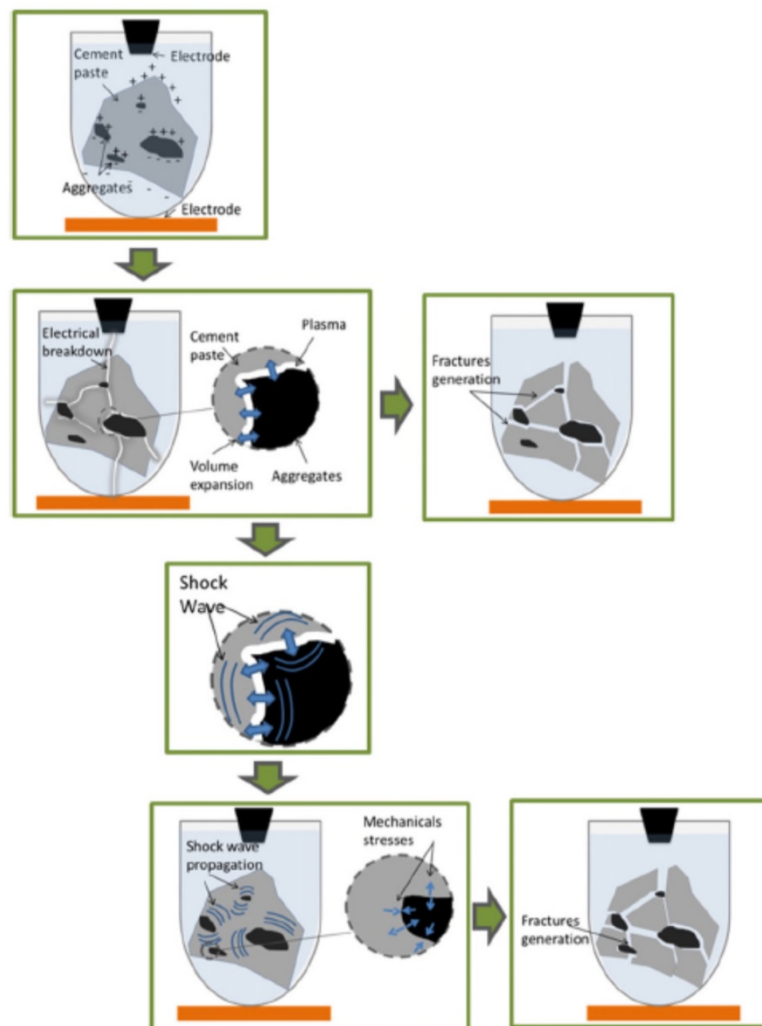


**Figure II.2.** interaction entre l'eau sous pression et le matériaux trait [30].

#### II.2.4.4 Electro-fragmentation

L'électro-fragmentation est la technique qui consiste à faire circuler un courant électrique à travers un matériau multiphasique ; en traversant le matériau ; le courant électrique induit une polarisation qui varie selon les propriétés physique et chimique des différent composantes. À l'interface entre les granulats naturels et la pâte de ciment, un déséquilibre se forme entre les charges positives et négatives, entraînant la génération locale de plasma. Selon zhang et al [40] La génération de plasma s'accompagne

d'une expansion thermique qui engendre une onde de choc radiale et libère les agrégats naturels de la pâte de ciment [41] .



**Figure .II.3.** principe de l'électro-fragmentation [30].

#### II.2.4.5 Pré trempage dans l'eau

Le lavage à l'eau du béton armé, ou pré trempage dans l'eau, est la principale méthode de traitement pour éliminer les particules de mortier adhérentes. Cette méthode permet de nettoyer le béton armé par lavage à l'eau afin d'éliminer les particules de poussière, le mortier non adhérent et autres impuretés. L'étude de tam et al[18] également que le traitement par bain à ultrasons peut potentiellement améliorer les propriétés techniques du béton armé (augmentation de la résistance à la compression de 7 %). Cette méthode présente deux limites fondamentales :

Elle ne permet d'éliminer qu'un faible pourcentage de mortier non adhérent ou de particules de poussière ;

L'eau utilisée pour le lavage des granulats doit être recyclée après contamination/mélange avec de la poussière de ciment et d'autres impuretés. Selon les travaux de Katz [42] en termes de durabilité, cette méthode n'a pas d'impact significatif, car le mortier adhérent est encore présent sur le béton armé ancien [34].

## **II.2.5 Amélioration des propriétés de la pâte de ciment**

### **II.2.5.1 Carbonatation forcée**

La carbonatation forcée est une technique qui permet d'améliorer les propriétés de la pâte de ciment constituant les granulats recyclés de béton. Selon Tam et al [18] Elle se base sur une réaction naturelle se produisant entre la matrice cimentaire du béton et le CO<sub>2</sub> présent dans l'air. D'après Zhan et al [43] La concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère varie généralement entre 0.03% et 1%. La limite basse est d'application dans les milieux ruraux et la limite haute peut être atteinte dans des villes fortement polluées. Poon et al [44] montrent que l'augmentation des rejets en CO<sub>2</sub> ne fait que augmenter les valeurs de concentration vers la hausse [34].

Ces dernières années, des rapports de recherche pertinents sur l'application de la technologie de durcissement au CO<sub>2</sub> pour améliorer les propriétés des granulats grossiers recyclés continuent de paraître. Selon Shao et al. [45]. La masse de CO<sub>2</sub> absorbée par le ciment lorsqu'il réagit avec le CO<sub>2</sub> représente théoriquement 50 % de la masse du ciment. Le CO<sub>2</sub> peut réagir avec les principaux composants C<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>A et C<sub>2</sub>AF du clinker de ciment, et la vitesse de réaction avec C<sub>2</sub>S et C<sub>2</sub>S est la plus rapide. De plus, des recherches plus poussées ont montré que le CO<sub>2</sub> peut réagir non seulement avec le clinker de ciment, mais aussi avec ses produits d'hydratation. Des pâtes de ciment ont été fixées à la surface des granulats recyclés, D'après Ye et al [46] le CO<sub>2</sub> peut réagir avec les produits d'hydratation contenus dans ces pâtes.

## **II.3 Conclusion**

L'étude des différentes méthodes de traitement des granulats recyclés (GR) a mis en évidence l'importance cruciale de l'amélioration de leurs propriétés physiques et mécaniques pour permettre leur intégration efficace dans la fabrication de bétons recyclés (BGR).

L'optimisation des granulats recyclés (GR) est essentielle pour leur intégration efficace dans les bétons recyclés (BGR), garantissant des performances mécaniques et physiques adaptées aux exigences structurelles. Les GR présentent des propriétés intrinsèquement dégradées par rapport aux granulats naturels (GN), notamment une porosité accrue, un taux d'absorption d'eau élevé, une densité apparente réduite et la présence de résidus de pâte de ciment durcie. Ces caractéristiques altèrent la compacité et la cohésion de la matrice cimentaire, réduisant ainsi la résistance mécanique et la durabilité des bétons incorporant des GR non traités. L'application de méthodes de traitement, qu'elles soient chimiques ou mécaniques, permet de corriger ces défauts et d'améliorer la qualité des GR.

# Chapitre III

## Béton de granulats recyclés

---

### III.1 Introduction

Bien que les ressources minérales naturelles qui servent à produire le béton soient quasi inépuisables calcaire, argiles et roches dures l'ouverture de nouvelles carrières à distance raisonnable des villes est devenue un réel défi dans de nombreux pays. En effet, dans la compétition pour l'utilisation des sols, entre terrains résidentiels, agricoles et industriels, la troisième catégorie perd souvent la bataille.

La mise en décharge des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) est de plus en plus prohibée par les politiques publiques.

Il existe une pression sociale pour réduire les distances de transport des matériaux depuis les sites de production jusqu'aux sites d'utilisation, afin de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et l'impact du trafic des camions sur la population. Comme les matériaux de démolition sont principalement enterrés dans les villes, là où de nouveaux chantiers de construction ont besoin d'être alimentés, l'utilisation de DCD dans une nouvelle construction a alors un double avantage, en réduisant à l'échelle de la zone urbaine les transports générés à la fois par l'évacuation et par l'approvisionnement des matériaux.

Enfin, le béton doit rattraper les autres matériaux (acier, enrobés bitumineux, etc.) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années. Ce n'est pas ici l'endroit pour analyser le cycle de vie du béton recyclé en tant que matériau de construction, par rapport à d'autres solutions. Notons simplement que, même si la solution « béton » a de nombreux avantages, sa capacité à incorporer ses propres déchets constitue un aspect important selon la plupart des méthodes d'évaluation environnementale.

Effectivement, le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé à travers le monde en raison de sa polyvalence, de sa durabilité et de sa disponibilité. Cependant, son utilisation généralisée pose des défis environnementaux importants. La production de béton nécessite d'importantes quantités de ressources naturelles, notamment du gravier et du sable. L'extraction de ces matériaux peut entraîner la destruction des écosystèmes locaux, la dégradation des sols et la déplétion des ressources[16]. Pour cette raison, les chercheurs ont encouragé l'usage du béton recyclé.

Le béton recyclé est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents (sable, ciment, L'eau, gravier naturelle et gravier recyclés).

Ce dernier a deux conséquences écologiques majeures la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une activité économique de la société de consommation [47].

### III.2 Propriétés du béton recyclé

Il faut envisager le béton en générale sous deux perspectives :

**Le béton frais** : combinaison de matériaux solides en suspension dans l'eau, il se présente sous forme dispersée à la sortie des dispositifs de malaxage et sous forme compactée une fois mis en place dans son coffrage.

**Le béton durci** : matériau dont les caractéristiques de résistance mécanique et de longévité se développent au fil de réactions physico-chimiques entre ses éléments, sur une durée allant de quelques jours à quelques semaines [48].

#### III.2.1 Propriétés du béton recyclé à l'état frais

L'utilisation de granulats recyclés à une influence importante sur les propriétés du béton frais, notamment sur sa maniabilité. Les fortes propriétés d'absorption de ces granulats, combinées à leur hétérogénéité, rendent plus difficile l'ajustement et le contrôle de la consistance du béton [3].

##### III.2.1.1 Influence de l'absorption des granulats recyclés sur la demande en eau du béton

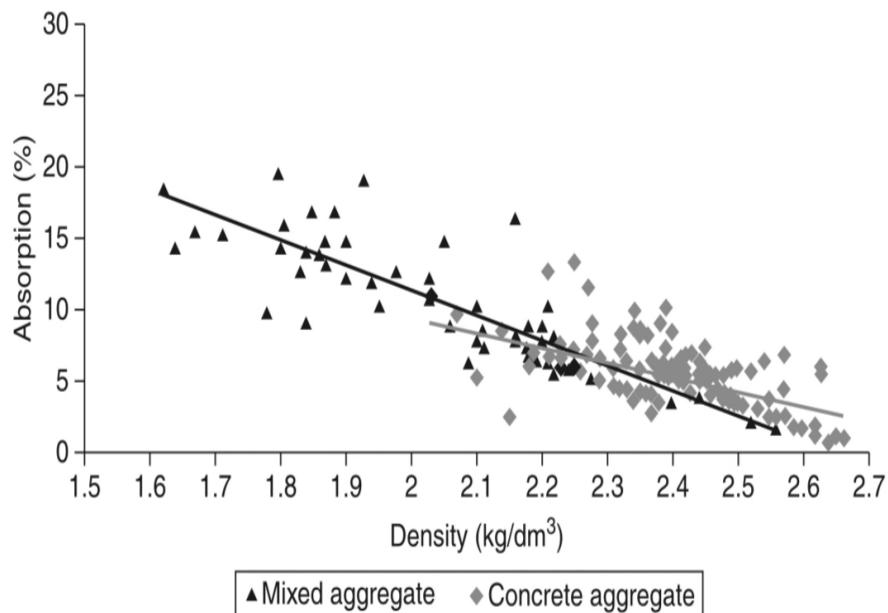
Les granulats recyclés ont des valeurs d'absorption plus élevées que les granulats naturels, généralement inférieures à 3 %. Les propriétés d'absorption des granulats recyclés dépendent principalement de leur nature : elles sont plus faibles pour les granulats grossiers du béton (généralement inférieures à 12 %), mais atteignent jusqu'à 20 % pour les granulats mixtes contenant une grande quantité de particules céramiques[3] figure (III.1).

Cependant, la fraction fine des granulats recyclés est composée d'une quantité importante de particules de mortier poreuses, produites par le concassage, et présentent donc généralement des valeurs d'absorption élevées [1].

La demande en eau supplémentaire doit être prise en compte lors de la production de béton recyclé, pour lesquelles différentes alternatives peuvent être appliquées :

- Une augmentation directe de la quantité d'eau de gâchage ;

- l'utilisation d'adjuvants chimiques (plastifiants ou super plastifiants) ;
- la pré-saturation des granulats recyclés.



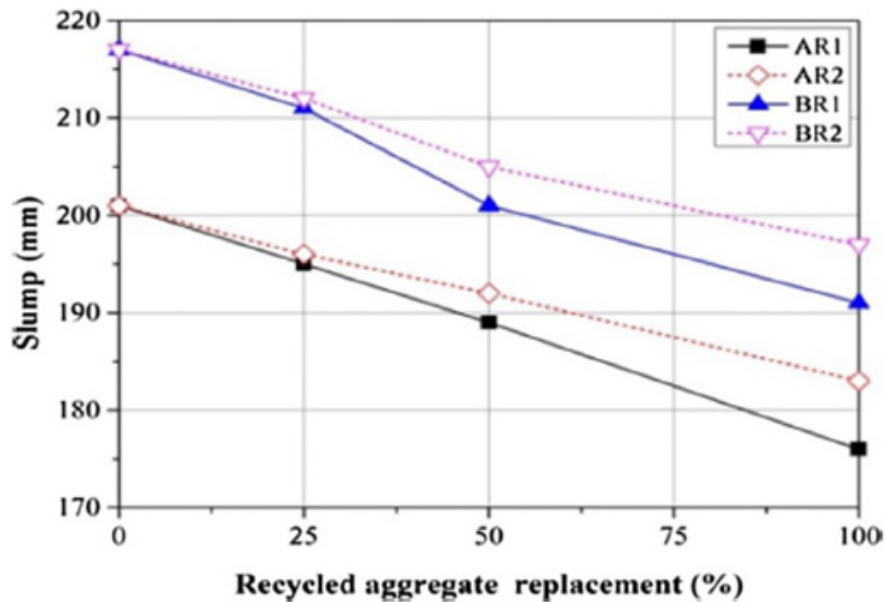
**Figure .III.1.** Corrélation entre l'absorption d'eau et la densité de la fraction grossière de granulats de béton recyclés et de Granulats mixtes recyclés [3].

### III.2.1.2 Affaissement

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. Boulay Chakradhara Rao et al.[27], López-Gayarre et al.[49] dans leur étude, Bravo et al.[50] ont rapporté qu'il est nécessaire d'augmenter le rapport effectif E/L lorsque 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. De Brito et al.[51] ont indiqué que la forme plus rugueuse du granulats recyclés, par rapport à la forme du granulats naturels, peut contribuer à ce changement de maniabilité.

Par contre, César Medina et al.[52] 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 compensée par la conception initiale du mélange, dans lequel l'humidité initiale et l'absorption ont été prises en considération pour empêcher leurs effets négatifs sur une telle propriété physique importante. Des résultats

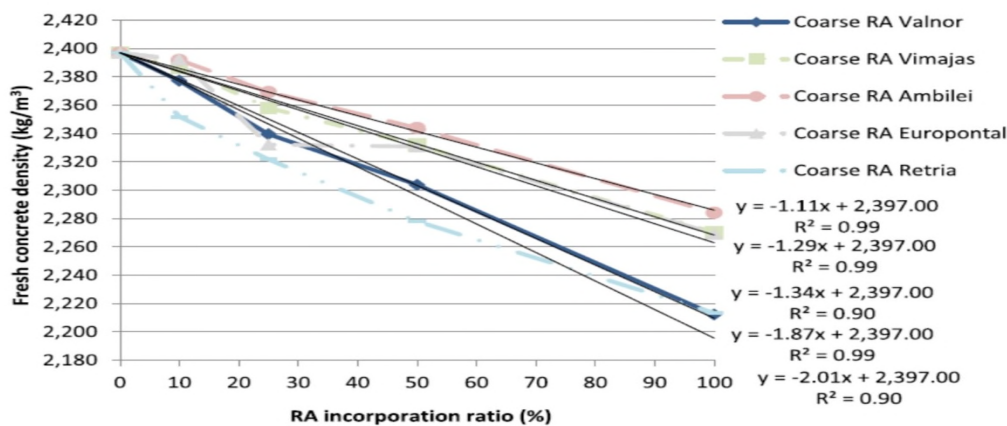
similaires sont rapportés par Fonseca, et al.[53] ils ont observé que l'utilisation de granulats recyclés dans le béton n'a pas eu d'impact direct sur la maniabilité pour un même rapport E/L [54].



**Figure .III.2.** Affaissement des différents types de béton [55].

### III.2.1.3 La masse volumique à l'état frais

Diverses études montrent une diminution de la masse volumique du béton à l'état frais avec une augmentation du pourcentage de granulats recyclés utilisés Agrela et al.[56] Tam et al.[57] 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 selon ces recherches 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 [54].



**Figure .III.3.** Masse volumique à l'état frais du béton en fonction de différents pourcentages et types de granulats recyclé [39].

### III.2.2 Propriétés du béton recyclé à l'état durci:

Les propriétés les plus importantes des bétons recyclés durcis analysées dans cette section sont :

- la résistance à la compression
- la résistance à la traction

#### III.2.2.1 La résistance à la compression :

De nombreuses recherches ont été menées sur les caractéristiques mécaniques et des bétons recyclés, principalement en utilisant la partie grossière du béton recyclé (Nixon; Hansen, ; Topçu et Sengel.[58] et dans une moindre mesure, le béton recyclé Yang et al.[59] ou la partie fine Zega et di Maio[60].

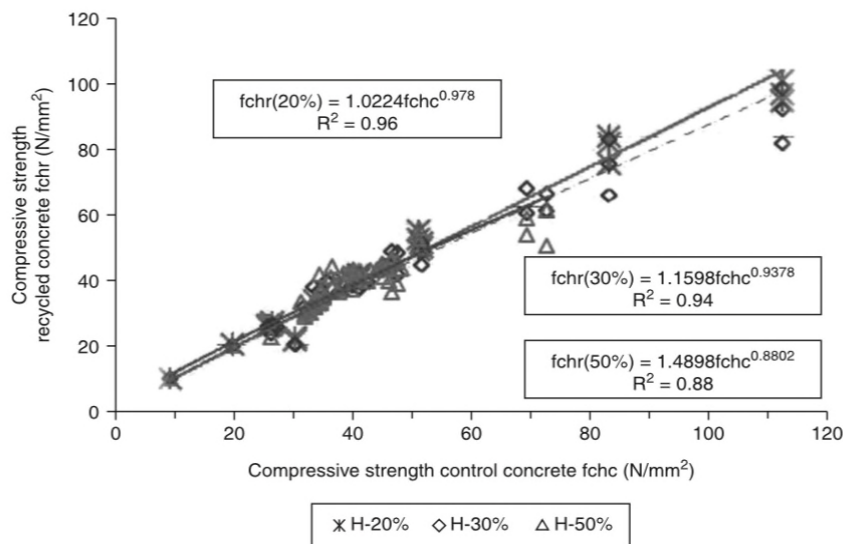
L'utilisation de granulats recyclés grossiers dans le béton entraîne une diminution de la Résistance à la compression, notamment lorsque le taux de substitution augmente et de manière plus significative lorsque des granulats recyclés sont utilisés. Cette diminution est principalement due aux causes suivantes :

- Un coefficient de Los Angeles plus faible et la présence de sulfates dans certains cas ;
- une demande en eau plus élevée pour le malaxage, affectant le rapport E/C et, par conséquent, les propriétés mécaniques du béton ;
- la présence de zones de faiblesse dans le béton, dues au mortier [3].
- la contrainte est concentrée lors du support de compression axiale à cause de la haute Porosité des granulats recyclés

- le concassage de granulats recyclés entraîne de nombreux défauts, par exemple, L'accumulation des dommages de concassage cause une quantité de microfissures à l'intérieur et sur la surface des granulats recyclés.
- la surface des granulats recyclés enrobée de pâte de ciment conduit à des zones de faible adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et le granulat recyclé [16].

**Tableau .III.1.** Résistance à la compression des bétons [61].

Béton des granulats naturels	C 35-1	C45-1	C50-1	C55-1	C60-c
<b>La résistance à la compression (fcu)</b>	43.76	53.52	57.56	61.15	66.02
Béton des granulats recyclés	C35-2	C45-2	C50-2	C55-2	C60-2
<b>La résistance à la compression (fcu)</b>	42.69	51.73	55.59	57.63	59.70



**Figure .III.4.** Variation de la résistance à la compression [3].

Juan et al[62] que la diminution de la résistance à la compression est négligeable pour les bétons de résistance inférieure à 50 N/mm<sup>2</sup> et légèrement supérieure pour les bétons à haute résistance. Une perte de résistance maximale de 6 % est attendue pour une substitution allant jusqu'à 50 % dans les bétons de résistance inférieure à 40 N/mm<sup>2</sup>. Cette diminution n'est pas considérée comme significative, étant donné que ces bétons recyclés pourraient être conçus avec presque la même quantité de ciment que les bétons conventionnels.

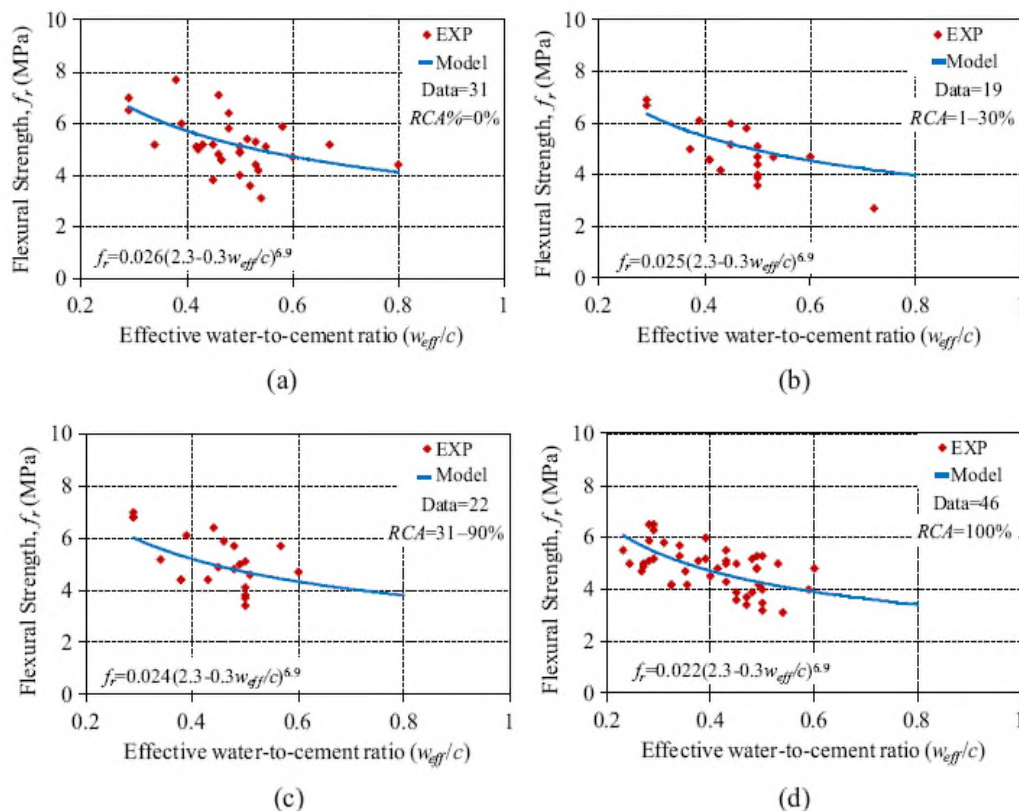
### III.2.2.2 La résistance à la traction

#### a) Essai de traction par flexion

L'augmentation du taux de substitution du GN par un GR entraîne une diminution de la résistance à la traction par flexion du béton.[63] Certaines recherches ont indiqué une diminution de 10 à 20 % pour un taux de remplacement de 100% de GR. Tandis que d'autres spécialistes [64] ont observé que la résistance à la rupture par flexion se réduisait de 8.8 %, 11.1 % et 16 %, respectivement, pour des proportions de 20 %, 40 % et 60 % de GR.

Selon Bairagi et al. [64], Le béton contenant 25 %, 50 % et 100 % de GR présente une résistance à la traction par flexion qui est environ inférieure de 6 à 26 % comparativement au béton standard.

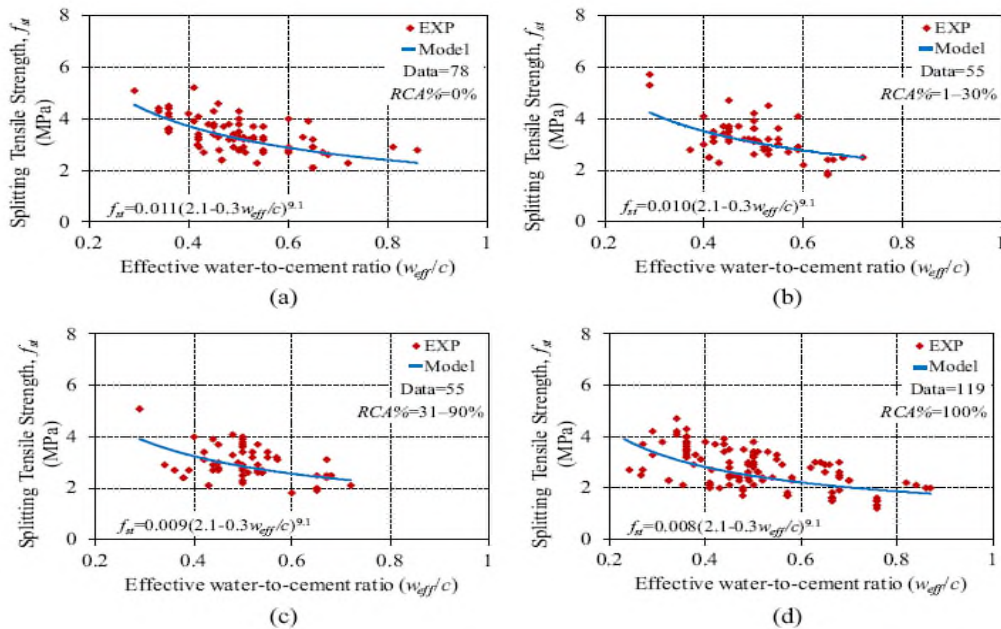
De plus, la figure(III.5) démontre que la résistance à la traction par flexion se réduit avec l'accroissement du taux de substitution [65]. Cette réduction est attribuée à la porosité plus élevée et à la densité spécifique inférieure des GR en comparaison avec les GN [64].



**Figure III.5.** Variation de la résistance à la traction par flexion [65].

### b) Essai de traction par fendage

Il est confirmé que la résistance à la traction par fendage diminue avec l'accroissement de la substitution du GN par le GR [66]. Effectivement, la figure (III.6) démontre que la résistance à la traction se réduit lorsque le taux de remplacement s'accroît [65].

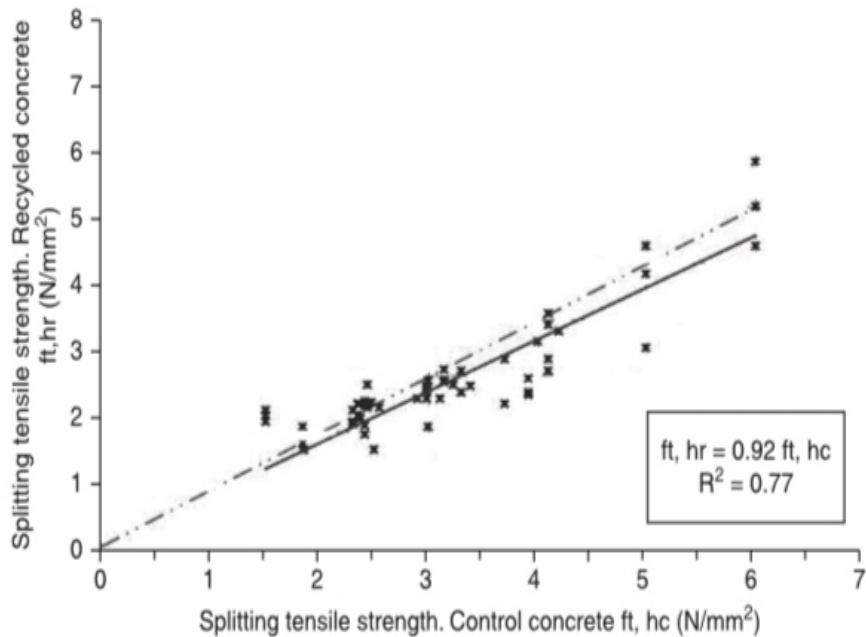


**Figure III.6.** Variation de la résistance à la traction par fendage [65].

Selon Bairagi et al.[67], La résistance à la traction était respectivement inférieure de 6%, 10% et 40% par rapport au béton standard pour des taux de substitution de 25%, 50% et 100%.

On attribue cette baisse de la résistance à la traction à une porosité accrue, une densité réduite, une résistance affaiblie du GR et l'existence de trois zones de transition interfaciale (ITZ). En réalité, ces ITZ sont le point faible et la cause de la fragilité du béton [68].

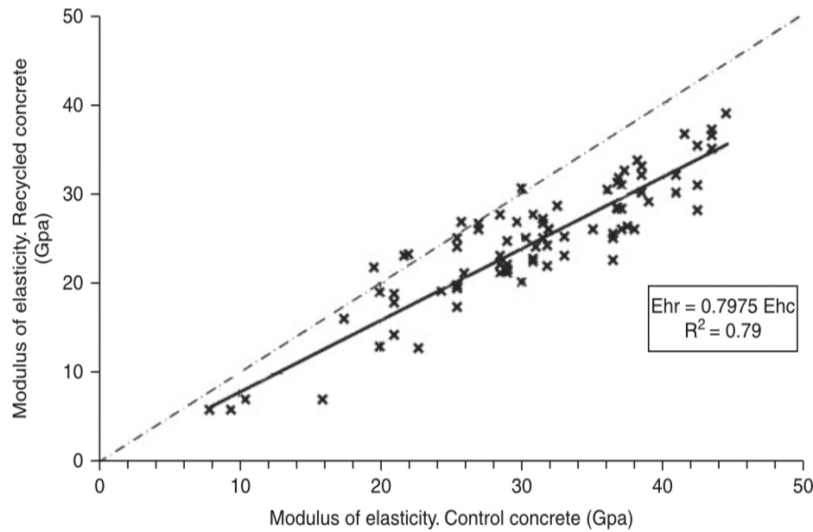
certaines recherches [69] ont démontré que la résistance à la traction du béton avec un taux de substitution pouvant aller jusqu'à 30% est égale voire excède celle du béton traditionnel à base de GN.



**Figure .III.7.** Relation entre la résistance à la traction et au fendage des bétons recyclés et conventionnels [3].

### III.2.2.3 Module d'élasticité

Différents auteurs se sont intéressés à la question du module d'élasticité, et tous sont d'accord pour dire qu'il se situe entre 50 et 70% du module d'élasticité d'un béton naturel, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Gomez et al ont montré que la perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais cette porosité diminue avec le temps et donc que la différence de module d'élasticité s'amenuise [70].

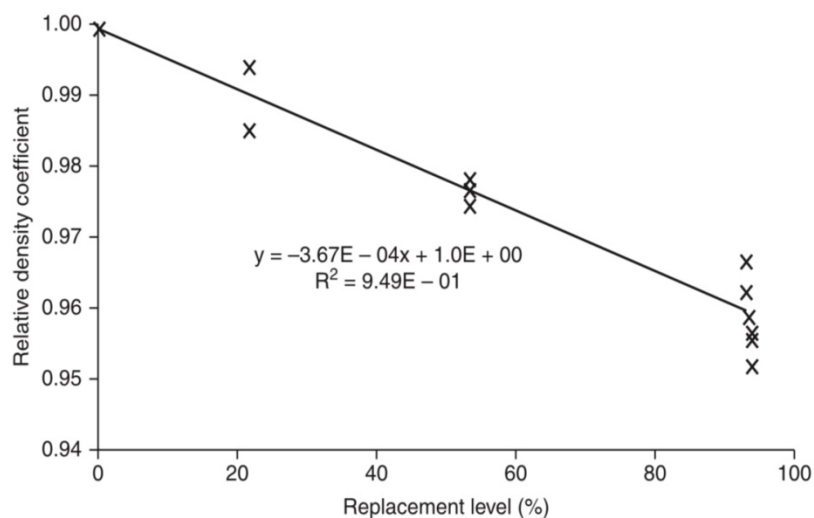


**Figure .III.8.** Influence de la teneur en RCA sur le module d'élasticité (d'après Juan et Alaejos) [71].

#### III.2.2.4 La densité à l'état durci

Les Granulats naturels ont une densité plus élevée que les granulats recyclés. Cette différence n'est pas aussi marquée pour granulats de béton recyclés, et même en cas de remplacement total des granulats grossiers, l'effet final sur la densité du béton durci est minime. La figure(III.8) présente quelques résultats expérimentaux tirés de la littérature.

D'un point de vue théorique, la diminution attendue de la densité du béton recyclé, lors de l'utilisation de ce dernier [1].



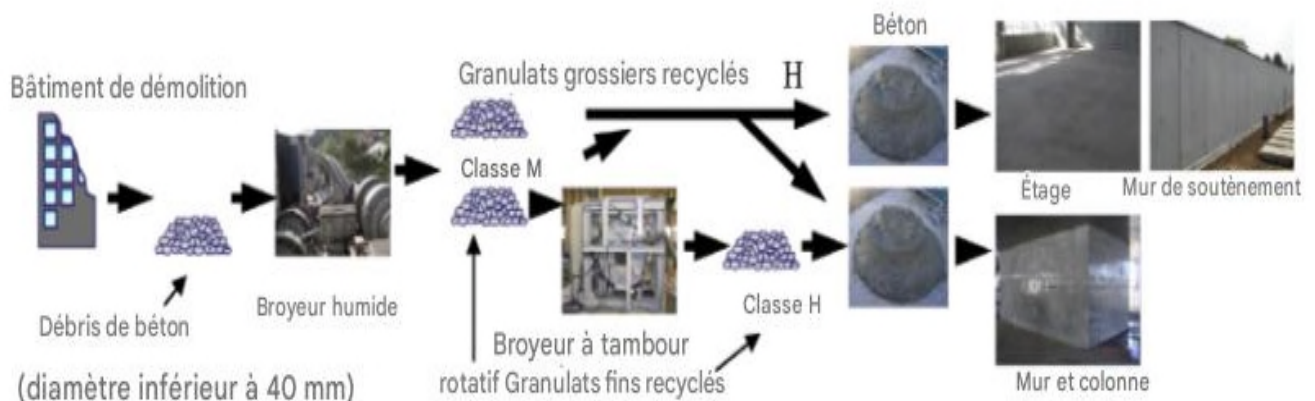
**Figure .III.9.** Influence de la teneur en RCA sur le module d'élasticité du béton dur (d'après Juan et Alaejos) [3].

### III.3 Utilisation de béton recyclé

L'utilisation des granulats provenant du recyclage du béton de démolition dans des nouveaux bétons n'est pas récente. Le premier état de l'art sur le sujet a en effet été publié par la RILEM selon Nixon [72].

Elsevier[73] a déclaré que L'utilisation de granulats recyclés est une technologie prometteuse pour économiser les ressources et réduire l'impact environnemental. Elle est plus efficace lorsque des granulats fins recyclés sont utilisés en complément des granulats grossiers recyclés. L'utilisation de granulats fins recyclés pour les structures supérieures présente toutefois des progrès mineurs en raison du compromis entre la qualité des granulats et l'émission de particules fines. Deux technologies efficaces, la production de granulats recyclés de qualité moyenne économes en énergie et de granulats fins recyclés de haute qualité, présentées dans cet article, ont permis l'application de granulats recyclés de qualité moyenne à la structure supérieure pour la première fois au Japon [74].

### III.4 Construction à base de granulats recyclés



**Figure .III.10.** La procédure depuis la démolition du béton jusqu'à l'application sur site [74].

Un test de maquette pour confirmer la résistance aux fissures des granulats recyclés de qualité moyenne du béton a été réalisé pour les murs, comme le montre la figure(III.10) à partir de granulats recyclés béton avec agent expansif et béton à granulats normaux .Les déformations totales au centre de la paroi sont montré dans la Figure(III.11). Il a été confirmé que la formation de la fissure initiale de l'échantillon

a été largement retardée par rapport au béton à granulats normaux, prouvant ainsi une excellente résistance aux fissures du béton à granulats recyclés.

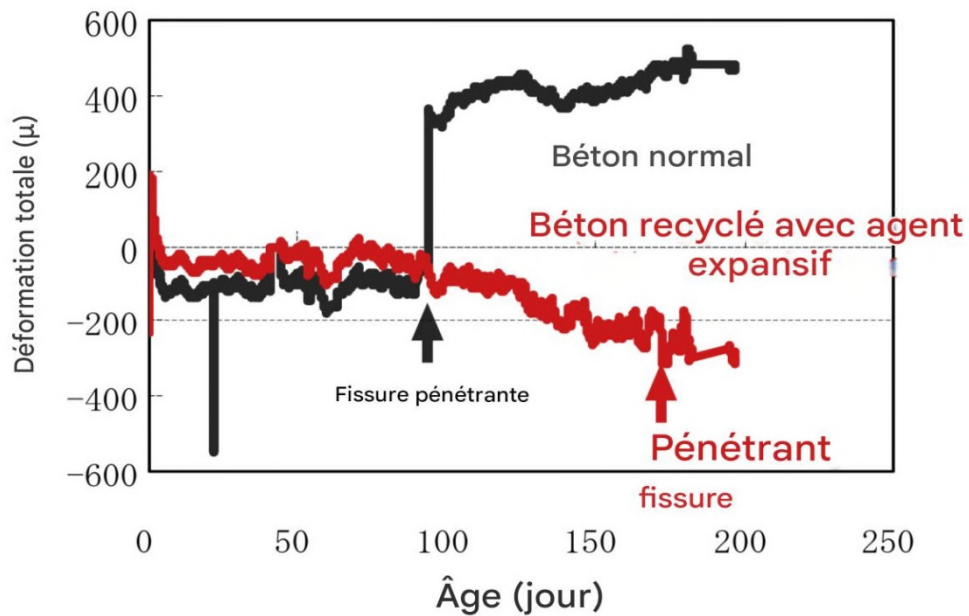


Figure. III.11. Déformations totales au centre de la paroi d’essai [74].

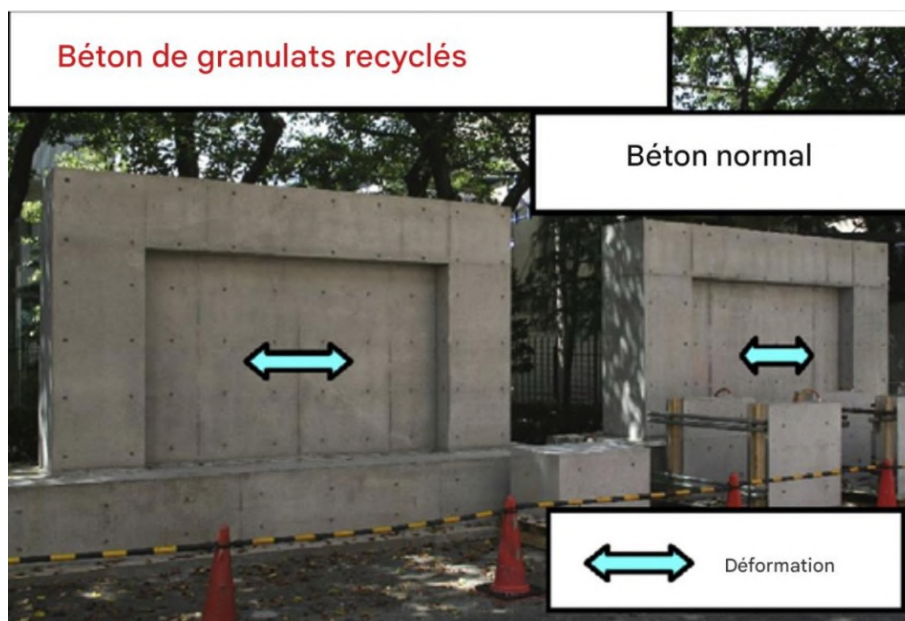


Figure .III.12. Spécimens de maquette [74].



**Figure .III.13.** Construction d'un bâtiment avec granulats recyclés [74].

### III.5 Conclusion

Les études menées sur l'impact des granulats recyclés (GR) sur les propriétés du béton ont mis en évidence des effets significatifs sur sa performance globale. L'intégration de GR, en raison de leur porosité élevée et de leur absorption d'eau accrue, entraîne une diminution de l'ouvrabilité du béton recyclé (BGR), nécessitant des ajustements dans le dosage en eau et en adjuvants pour maintenir une consistance adaptée.

Par ailleurs, la présence de résidus de pâte de ciment ancienne sur la surface des GR altère la compacité du mélange, induisant une réduction de la densité apparente du béton. Cette baisse de densité impacte directement la résistance mécanique, particulièrement en compression et en traction, où les BGR affichent des valeurs inférieures à celles des bétons conventionnels à base de granulats naturels.

Toutefois, la nature et l'ampleur de ces effets varient selon le taux de substitution des GR et les méthodes de traitement appliquées.

# Chapitre IV

## Partie expérimentale

---

## **IV.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux obtenus afin d'en tirer des conclusions sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés. L'approche adoptée consiste à organiser la présentation des résultats de manière progressive et cohérente, en suivant l'évolution du matériau depuis l'état frais jusqu'à l'état durci.

Nous commencerons par l'étude des propriétés des bétons recyclés à l'état frais, notamment la maniabilité (mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams) et la masse volumique. Ces paramètres permettent d'évaluer la facilité de mise en œuvre du béton et d'identifier l'effet des granulats recyclés, traités ou non, sur la consistance et la compacité du mélange.

Dans un second temps, l'analyse portera sur les propriétés à l'état durci, telles que la masse volumique, la résistance à la compression, ainsi que la résistance à la traction par flexion. L'objectif est de comparer les performances mécaniques et physiques des différents bétons fabriqués avec divers types de granulats recyclés, en fonction des traitements appliqués (chimique, mécanique ou formulation par mélange en deux étapes) et du taux de substitution.

Cette organisation vise à offrir une vision claire de l'impact des granulats recyclés, qu'ils soient traités ou non, sur la qualité globale du béton, en distinguant précisément les effets observés aux deux principaux stades de sa vie : à l'état frais et à l'état durci.

## **IV.2 Matériaux utilisés**

### **IV.2.1 Choix du ciment**

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland de marque Awted, conforme à la norme algérienne NA 442 relative aux liants hydrauliques. Il s'agit d'un produit 100 % algérien, fabriqué exclusivement par l'usine Amouda El Beïdha, située dans la wilaya de Laghouat. Ce ciment, largement utilisé dans les travaux de construction en Algérie, a été sélectionné pour sa disponibilité locale, sa conformité aux exigences normatives en vigueur, ainsi que pour ses performances techniques adaptées à la formulation de bétons avec granulats recyclés.



Figure .IV.1. Ciment Awted utilisé.

## IV.2.2 Les granulats

### IV.2.2.1 Sable

Dans le cadre de cette étude, deux types de sable ont été utilisés afin d'obtenir une composition granulométrique optimale adaptée à la formulation du béton.

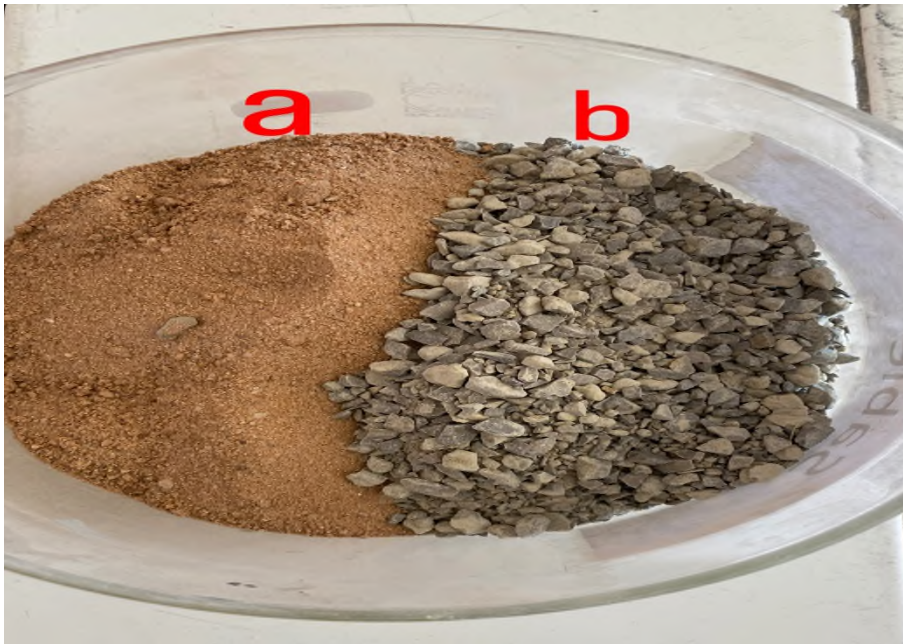
#### a) Sable naturel

Le premier type est un sable naturel, disponible sur le marché local (Gueltet Sidi Saâd) (wilaya de Laghouat), fréquemment utilisé dans les projets de construction régionaux. Toutefois, ce sable présente une granulométrie très fine, avec une proportion importante de particules inférieures à 0,315 mm. Cette finesse excessive entraîne une augmentation de la demande en eau, une diminution de l'ouvrabilité du béton, ainsi qu'une baisse de la résistance mécanique figure IV.2.a.

#### b) Sable de carrière

Pour remédier à ces limites, un second type de sable, issu d'une carrière locale, a été introduit. Ce sable de carrière, plus grossier, possède une granulométrie plus favorable, permettant d'améliorer la compacité du mélange et de réduire les vides dans la matrice granulaire.

Afin d'obtenir une courbe granulométrique équilibrée, les deux sables ont été corrigés et combinés selon la méthode des modules de finesse. Cette méthode permet de déterminer les proportions optimales de chaque type de sable à mélanger, de manière à atteindre un module de finesse ciblé, garantissant une bonne ouvrabilité, une distribution homogène des granulats fins, et des performances mécaniques satisfaisantes figure IV.2.b.



**Figure .IV.2.** Sable a) sable naturel b) sable de carrière

### c) Sable corrigé

L'utilisation d'un sable corrigé, issu du mélange rationnel entre le sable naturel trop fin et le sable de carrière plus grossier, a donc permis d'optimiser la formulation du béton, en particulier dans le contexte d'un béton contenant des granulats recyclés, où la compacité et la maniabilité sont des paramètres essentiels figure IV.3.



**Figure .IV.3.** Sable corrigé utilisé

#### **IV.2.2.2 Gravier**

Dans cette étude, les graviers utilisés pour la confection des bétons, de classe granulométrique (3/15 mm), sont de deux types : gravier naturel et gravier recyclé.

##### **a) Gravier naturel**

Le gravier naturel est d'origine dolomitique et provient de la carrière de Ben Brahim, située à Rechaïga, dans la région sud de la wilaya de Tiaret (Algérie). Ce granulat, conforme aux spécifications techniques requises pour les bétons de structure, a été utilisé comme référence (béton témoin) figure IV.4.



**Figure .IV.4.** Gravier naturel

#### **b) Gravier recyclé**

Parallèlement, un granulats recyclés grossiers figure IV.5 a été produit à partir de déchets de béton durci, plus précisément des éprouvettes cylindriques préalablement soumises à des essais de compression. Le processus de fabrication de ces granulats recyclés a été réalisé en plusieurs étapes :

- Fragmentation primaire des éprouvettes de béton à l'aide d'un marteau piqueur, permettant de détacher les blocs de béton initial ;
- Réduction secondaire des blocs fragmentés à des tailles plus appropriées au moyen d'un marteau manuel, en vue de faciliter leur passage dans l'équipement de concassage ;
- Concassage mécanique des fragments à l'aide d'un concasseur à mâchoires, pour obtenir un granulats de dimensions équivalentes à celles des graviers naturels ;

- Tamisage du matériau concassé afin de séparer les fractions granulométriques : les granulats grossiers (3/15 mm), utilisés dans la fabrication des bétons, ont été isolés des particules plus fines.

Cette procédure a permis de produire un granulat recyclé homogène, tout en maintenant une proportion constante d'agrégats dans l'ensemble des mélanges testés. L'objectif était de comparer les performances mécaniques et physiques des bétons contenant ces granulats recyclés à celles du béton fabriqué avec du gravier naturel, dans des conditions expérimentales rigoureusement maîtrisées.



**Figure .IV.5.** Gravier recyclés

### **IV.2.3 L'eau de gâchage**

L'eau utilisée pour la fabrication des bétons dans le cadre de cette étude est une eau potable fournie par le réseau de distribution public (eau du robinet). Elle répond aux exigences des normes en vigueur relatives à l'eau de gâchage, notamment en ce qui concerne l'absence de substances nuisibles pouvant altérer le processus d'hydratation du ciment ou les propriétés finales du béton.

### **IV.2.4 Superplastifiant**

Dans le cadre de cette étude expérimentale, l'adjuvant SikaPlast-40 Pro figure IV.6 a été spécifiquement incorporé à la formulation des bétons recyclés, en s'appuyant sur une méthode d'amélioration chimique par l'ajout de fumée de silice. Cette synergie entre la fumée de silice et un superplastifiant à haute performance à base de polycarboxylates modifiés, vise

à optimiser les performances mécaniques et rhéologiques du béton. L'emploi de cet adjuvant permet une réduction significative du rapport eau/ciment, contribuant ainsi à une meilleure ouvrabilité du mélange tout en augmentant sa densité et sa compacité.



**Figure .IV.6.** Adjuvant superplastifiant SikaPlast-40 Pro.

#### IV.2.5 Fumée de silice

Tekna Chem (SILTEK POWDER) est un produit en poudre composé d'une excellente silice micronisée, communément appelée « fumée de silice ». SILTEK POWDER pour sa teneur élevée en silice et en microsiliques actifs et pour sa très grande surface spécifique est considérée aujourd'hui comme l'un des meilleurs matériaux à haute activité pouzzolanique figure IV.7.



**Figure .IV.7.** Fumée de silice Tekna Chem

### IV.3 Propriétés de granulats recyclés

Afin d'évaluer la qualité des matériaux utilisés dans la fabrication du béton, qu'il soit ordinaire ou recyclé, une série d'essais normés a été réalisée sur l'ensemble des constituants (granulats naturels, granulats recyclés, sables, ciment). Ces essais ont permis de caractériser les propriétés physiques et mécaniques des matériaux selon les normes en vigueur. Les principales étapes et tests effectués sont les suivantes :

- Analyse granulométrique par tamisage des graviers naturels (GN), des graviers recyclés (GR), ainsi que des deux types de sable (naturel et de carrière), conformément à la norme NF P18-560 ;
- Essai de l'équivalent de sable, pour évaluer la propreté des sables (argile, limon), selon la norme NF P18-598 ;
- Détermination des masses volumiques apparentes des granulats naturels, du sable et du ciment, suivant la norme NF EN 1097-3 ;
- Mesure des masses volumiques absolues des granulats naturels et recyclés, selon la norme NA 255/1990 ;
- Essai de résistance à l'usure (Los Angeles) des granulats grossiers, selon la norme NA 485/1990 ;
- Essai Micro-Deval, destiné à évaluer la résistance à l'usure par abrasion humide des granulats, selon la norme NA 457/1990 ;

- Détermination du coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) des granulats, conformément à la norme NF P18-554 ;
- Essai d'affaissement au cône d'Abrams, pour mesurer la consistance du béton frais, suivant la norme NF P18-451 ;
- Mesure de la masse volumique du béton à l'état frais, selon la norme NF EN 12350-6 ;
- Essai de résistance à la compression sur éprouvettes normalisées, réalisé selon les normes NF P18-430-3 et NF EN 12390-3 ;
- Essai de résistance à la traction par flexion (essai aux trois points), conformément aux normes NF P18-433 et NF EN 12390-5.

Ces essais ont permis de garantir une caractérisation complète des matériaux et de mieux comprendre leur influence sur les performances globales des bétons recyclés, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

### **IV.3.1 Analyses physiques**

#### **IV.3.1.1 Analyse Granulométrique par Tamisage du sable et gravier (NF P18 560)**

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains ;
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral) ;
- Déduire le module de finesse ( $M_i$ ).

Afin d'évaluer la qualité des matériaux utilisés dans la fabrication des bétons, qu'ils soient ordinaires ou recyclés, une série d'essais normalisés a été réalisée sur les constituants principaux : granulats naturels, granulats recyclés, sables naturels et de carrière. Ces essais ont permis de caractériser leurs propriétés physiques et mécaniques selon les normes en vigueur.

L'analyse granulométrique par tamisage, réalisée conformément à la norme NF P18-560, a porté sur les sables et les graviers (naturels et recyclés). Elle a permis d'établir les courbes granulométriques et de déterminer la distribution dimensionnelle des particules, information essentielle pour garantir la compacité et la maniabilité des bétons.

Elle consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne des tamis figure IV.8 dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0.063 mm. On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis. Et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

La masse à utiliser sera telle que :

$$0.2D \leq M \leq 0,6D \quad \text{Eq (IV.1)}$$

Avec

**D** : le diamètre du plus gros granulat exprime en millimètres.

**M** : la masse de l'échantillon, exprimée en kg.

#### IV.3.1.1.1 Le Calcul :

On note les masses des refus partiels ( $R_i$ ), on calcule les pourcentages des refus partiels donné par la relation suivante :

$$(i) \% = \frac{R_i}{M} \times 100 \quad \text{Eq (IV.2)}$$

**i** : pourcentages des refus partiels

**M** : la masse totale de l'échantillon

On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisât partiels par la formule suivante :

$$\text{Tamisat}(i) = 100 - \text{refus}(i)\% \quad \text{Eq (IV.3)}$$

#### IV.3.1.1.2 Tracé de la courbe granulométrique

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât partiels sur une feuille semi logarithmique :

En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique

En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue.



**Figure .IV.8.** essai de l'analyse granulométrique de sable et GN ,GR

#### IV.3.1.2 Module de finesse (EN 13139)

Le module de finesse d'un sable «MF » est calculé par la relation :

$$MF = \frac{1}{100} \times \sum \text{Refus cumules en des tamis (0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5)} \quad \text{Eq (IV.4)}$$

Le module de finesse (MF) constitue un paramètre essentiel dans la caractérisation des sables, notamment en vue de leur utilisation dans la fabrication du béton. Il reflète la répartition granulométrique du sable et influe directement sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton.

Un sable adapté au béton doit présenter un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8, plage dans laquelle l'équilibre entre ouvrabilité, compacité et résistance mécanique est généralement optimal. En dehors de cet intervalle, les performances du béton peuvent être compromises :

- $MF < 2,2$  : le sable est trop fin, avec une forte proportion de particules très fines. Cela entraîne une augmentation de la demande en eau pour maintenir la consistance, ce qui peut nuire à la résistance mécanique du béton. Toutefois, les sables ayant un MF compris entre 1,8 et 2,2 peuvent être utilisés lorsque la facilité de mise en œuvre est prioritaire, au détriment éventuel de la résistance ;
- $2,2 < MF < 2,8$  : cette plage est considérée comme idéale pour les sables destinés au béton. Elle permet de concilier ouvrabilité satisfaisante, résistances mécaniques adéquates et faibles risques de ségrégation ;
- $2,8 < MF < 3,2$  : le sable devient relativement grossier, ce qui peut contribuer à obtenir des résistances élevées, mais au prix d'une ouvrabilité réduite et avec une augmentation du risque de ségrégation dans le mélange ;
- $MF > 3,2$  : le sable est considéré comme trop grossier et inadapté à une utilisation dans le béton, en raison d'un déséquilibre granulométrique important et d'un risque élevé de ségrégation.

Ainsi, le contrôle du module de finesse est fondamental pour optimiser la formulation du béton et garantir des performances adaptées aux exigences du projet.

#### **IV.3.1.3 Correction de sable**

La correction des sables peut être réalisée de manière expérimentale, en ajoutant progressivement un sable complémentaire au sable principal, jusqu'à obtenir un mélange présentant les caractéristiques granulométriques souhaitées, et conférant ainsi au béton les propriétés recherchées. Toutefois, lorsque les modules de finesse des deux sables composant le mélange ainsi que celui du sable cible sont connus, il est possible de déterminer directement les proportions optimales en appliquant la règle d'Abrams. Cette méthode permet

un ajustement précis et rationnel du mélange, sans avoir recours à une série d'essais empiriques.

Les proportions des deux sables composant devront être les suivantes :

Donc on obtient un sable  $S = S_1 + S_2$

$$\text{Avec :} \quad S_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} \quad \text{Eq (IV.5)}$$

$$\text{Et} \quad S_2 = \frac{MF - MF_1}{MF_1 - MF_2} \quad \text{Eq (IV.6)}$$

**MF**: Module de finesse 2,5

**MF1** : Module de finesse de sable gros

**MF2** : Module de finesse de sable fin

#### IV.3.1.4 Essai d'équivalent de sable (EN 933-8)

L'essai d'équivalent de sable est un test couramment utilisé pour évaluer la propreté des sables, en particulier leur teneur en fines argileuses. Ces particules fines, lorsqu'elles sont présentes en excès, peuvent nuire à l'adhérence pâte-granat, augmenter la demande en eau, et réduire la résistance et la durabilité du béton. L'objectif de l'essai est de déterminer la proportion relative de particules fines argileuses par rapport aux grains de sable propres dans un échantillon de sable, et quantifier indirectement la qualité du sable en matière de pureté. L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants figure IV.9 :

- hauteur  $h_1$ : sable propre + éléments fins ;
- hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui permet de déterminer le degré de propreté du sable, par convention:

$$ES_v = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad \text{Eq (IV.7)}$$

$$ES_p = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad \text{Eq (IV.8)}$$

---

Selon que la hauteur **h<sub>2</sub>** est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston. On détermine:

**ES<sub>v</sub>** : (équivalent de sable visuel) ;

**ES<sub>p</sub>** : (équivalent de sable au piston).

Le mode opératoire à une grande influence sur le résultat donc il faut le suivre scrupuleusement.

L'essai est effectué avec 120 g de grains. Il faut tamiser au tamis de 5 mm, éliminer le refus, et recueillir tout le tamisât.

#### **IV.3.1.4.1 Interprétation des résultats et qualité du sable**

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.



Appareillages nécessaires



Agitation horizontale



10 minutes de repos après agitation



Lavage à l'aide du tube laveur



20 minutes de repos après lavage



Expression des résultats ESV,ESP

**Figure .IV.9.** Procédure d'essai d'équivalent de sable

#### IV.3.1.4.2 Qualité d'un sable

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 tableau .IV.1 pour composer un béton.

**Tableau .IV.1.** Nature et qualité de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES<65%	ES<60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65%≤ES75%	60%≤ES70%	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.
75%≤ES85%	70%≤ES80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES≥85%	ES≥80%	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.

#### IV.3.1.5 Masse volumique

On détermine la masse volumique apparente (y compris les vides) et la masse volumique absolue (sans tenir compte des vides) d'une fraction granulaire (4/16).

##### IV.3.1.5.1 La masse volumique apparente (NF 18-554)

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté figure IV.10. La masse volumique apparente sèche  $\rho_{app}$  est la

---

masse de granulats secs ( $M_s$ ) occupant un volume apparent (volume des solides :  $V_s$ + volume des vides  $V_v$ ).

La masse volumique apparente est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \quad \text{Eq (IV.9)}$$

Avec :

**M1** : Le poids du récipient vide ;

**M2** : Le poids du récipient avec le matériau ;

**V** : le volume du récipient. ( $V=1\text{litre}=1000 \text{ cm}^3$ )



Appareillages nécessaires



Remplissage du moule avec le sable



Nivèlement de la surface supérieure

pesée du moule plein

**Figure .IV.10.** Détermination de la masse volumique apparente de sable



**Figure .IV.11.** Détermination de la masse volumique apparent de GN,GR



**Figure .IV.12.** Détermination de la masse volumique apparente de ciment

#### IV.3.1.5.2 Masse volumique absolue (NF P 18-301)

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre  $\rho_s$  avec la masse volumique  $\rho$  qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

On détermine la masse volumique absolue du sable figure IV.11 à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300g. On place l'échantillon dans le récipient de Capacité 1000 ml et on y verse 300 ml d'eau préparé préalablement dans

le deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange granulas-eau soit (V) ce volume. Sachant que le volume (V1) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume du granulat :

$$V1 = V - 300 \text{ (ml)} \quad \text{Eq (IV.10)}$$

La masse volumique absolue du granulat est déterminée par la formule :

$$\rho_d = \frac{MS}{VS} \quad \text{Eq (IV.11)}$$



a) Sable



b) Gravier (GN et GR)

**Figure .IV.13.** la masse volumique absolu du a) Sable b) Gravier (GN et GR)

#### IV.3.1.6 Coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) (NF P18-554)

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption du gravillon noté  $A_b$  a pour expression :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{Eq (IV.12)}$$

**$M_a$**  en (g): la masse du l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé

Soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche) ;

**$M_s$**  en (g): la masse de l'échantillon séché à 105°C.

### IV.3.2 Analyses mécaniques

#### IV.3.2.1 Essai de Los Angeles (NF P 18-573)

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets figure IV.12.

L'essai consiste à introduire des gravillons dans le cylindre dans une machine cylindrique de Los Angeles en 500 rotations. Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons. Ce qui permet de mesurer la masse  $m$  d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs provoqués par la chute de boulets normalisés tableau IV.2.

**Tableau(IV.2):** Nombre des boulets pour essai Los Angeles

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse de la charge de boulets (g)
<b>4.0 – 8</b>	8	3450 à 3540
<b>6,3 - 109</b>	9	3840 à 3980
<b>8- 12.510</b>	10	4260 à 4420
<b>10 .0-1411</b>	11	4700 à 4860
<b>12.5-1612</b>	12	5120 à 5300

Le coefficient Los Angeles « LA » est déterminé par la formule suivante :

$$LA = \frac{(5000 - M)}{5000} \times 100 \quad \text{Eq (IV.13)}$$

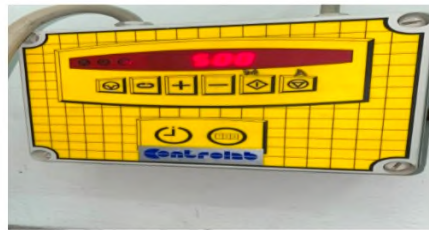
Avec

**M** : masse du refus à 1.6 mm



Machine Los Angeles

Les boulets d'acier



Réglage de compteur sur 500 tours



état de gravie après l'essai

**Figure .IV.14.** Essai Los Angeles

#### IV.3.2.2 Essai micro-Deval (NA 457/1990)

Consiste à déterminer le coefficient d'usure par attrition (frottements mutuels) des granulats en présence d'eau à l'aide de l'appareil Micro-Deval.

L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6 mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure figure IV. 13.

##### IV.3.2.2.3 Calcul du MDE

$$MDE = \frac{M}{m} \cdot 100 \quad \text{Eq (IV.14)}$$

**m:** Représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en (g) ;

**M:** Masse initiale sèche de l'échantillon en (g),  $M = 500 \pm 2$  g.



**Figure .IV.15.**Essai Micro- DEval

L'analyse des résultats obtenus pour le coefficient Micro-Deval permet de les situer par rapport aux valeurs de référence présentées dans le tableau comparatif (tableau IV.3). Cette comparaison vise à apprécier l'effet de l'usure des granulats recyclés en milieu humide

et à évaluer leur aptitude à une utilisation dans le béton. Une valeur élevée du coefficient Micro-Deval indique une faible résistance à l'abrasion, ce qui peut compromettre la durabilité des bétons fabriqués à partir de ces granulats. À l'inverse, des valeurs proches de celles des granulats naturels traduisent une meilleure tenue mécanique et une résistance accrue à l'usure. En examinant les écarts entre les résultats expérimentaux et les seuils de référence, il est possible d'identifier les granulats recyclés les mieux adaptés et d'orienter les choix en matière de traitement et de dosage dans la formulation des bétons recyclés. Cette évaluation est essentielle pour garantir l'intégration efficace des granulats recyclés dans des applications structurelles ou non structurelles

**Tableau .IV.3.** Appréciation des graviers selon le coefficient MD

Valeur	Repère
<b>Micro Deval</b>	Appréciation
<b>&lt;10</b>	Très bon à bon
<b>10 à 20</b>	Bon à moyen
<b>20 à 35</b>	Moyen à faible
<b>&gt;35</b>	Médiocre

#### IV.4 Formulation de béton

La formulation du béton est une étape essentielle qui vise à concevoir un matériau répondant aux exigences spécifiques en termes de résistance mécanique et de maniabilité. Elle repose sur un dosage précis des constituants : ciment, granulats et eau. Le choix et la proportion des granulats influencent particulièrement les performances du béton, tant sur le plan structurel que sur sa durabilité face aux agressions externes.

Dans le cadre du béton recyclé, cette démarche de formulation devient encore plus stratégique. L'incorporation de granulats recyclés issus du concassage de déchets de béton pose plusieurs défis liés à leur porosité élevée, leur absorption accrue d'eau et la présence de résidus de pâte de ciment. Ces caractéristiques peuvent altérer la compacité du béton, sa résistance et son comportement à long terme. Ainsi, l'élaboration d'une formulation optimisée

pour les bétons recyclés nécessite une adaptation des dosages et parfois l'application de traitements spécifiques aux granulats, tels que des améliorations chimiques ou mécaniques. Le tableau IV.4 résume le dosage des constituants du béton (kg/m<sup>3</sup>).

Dans le cadre de cette étude expérimentale, nous avons appliqué la méthode Dreux-Gorisse pour la formulation du béton, en suivant avec rigueur les différentes étapes et procédures en laboratoire. Cette méthode permet de déterminer de manière simple et rapide une composition initiale du béton. Toutefois, la formulation définitive ne peut être arrêtée qu'après la réalisation de plusieurs gâchées d'essai, accompagnées de la fabrication et des essais d'éprouvettes, afin d'ajuster avec précision les dosages en fonction des propriétés recherchées et des caractéristiques réelles des matériaux disponibles.

**Tableau .IV.4.** Conception du mélange kg/m<sup>3</sup>

Ciment (kg / m <sup>3</sup> )	Sable (kg)	Gravier naturel (kg)		Gravier recyclé (kg)		E/C	Eau (kg / m <sup>3</sup> )
400	584,63	1030,73				0,51	204,08
		25%	75%	75%	25%		
		257,60	772,77	772,77	257,60		

#### IV.5 Préparation des mélanges

La préparation du mélange de béton intégrant des granulats naturels et recyclés suit un processus rigoureux afin d'assurer la qualité et la performance du matériau final.

Dans un premier temps, les granulats naturels (sable et gravier) et les granulats recyclés sont soigneusement pesés selon les proportions définies lors de la formulation. Les granulats recyclés, généralement issus de bétons concassés, sont préalablement nettoyés et éventuellement humidifiés pour compenser leur porosité plus élevée. Le mélange commence par l'introduction des granulats secs dans la bétonnière, suivie de l'ajout du ciment. L'eau de gâchage, dosée avec précision, est ensuite incorporée progressivement afin d'obtenir une consistance homogène. Un malaxage prolongé est parfois nécessaire pour assurer une bonne répartition des granulats recyclés dans l'ensemble du mélange. Cette étape est essentielle pour

garantir une bonne cohésion, une maniabilité adéquate et des performances mécaniques conformes aux exigences du projet.

#### **IV.5.1 Béton ordinaire**

Le béton ordinaire est préparé en pesant avec précision les constituants (granulats naturels, ciment, eau) selon la formulation définie. Les granulats sont d'abord introduits dans la bétonnière, suivis du ciment, puis de l'eau de gâchage, ajoutée progressivement. Le malaxage est effectué durant 2 à 3 minutes afin d'assurer une homogénéité optimale et une bonne maniabilité du béton frais.

#### **IV.5.2 Béton recyclé**

La préparation du béton recyclé suit le même protocole, avec des ajustements liés aux propriétés des granulats recyclés. Ces derniers, issus du concassage de bétons de démolition, sont préalablement nettoyés, triés et humidifiés pour limiter leur absorption d'eau. Le mélange est ensuite réalisé selon les proportions définies dans le tableau IV.4, incluant granulats recyclés, naturels, ciment et eau. Un malaxage prolongé (3 à 5 minutes) est souvent nécessaire pour garantir une homogénéité satisfaisante, en raison de la variabilité des matériaux recyclés.

#### **IV.5.2 Préparation du mélange de béton avec granulats naturels et recyclés : approches d'amélioration des GR**

Les bétons aussi ont été formulés en intégrant à la fois des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR), en appliquant trois techniques complémentaires d'amélioration des GR afin d'en optimiser les performances physiques et mécaniques. Ces approches : l'amélioration chimique par fumée de silice, l'amélioration mécanique par triple broyage, et l'approche de mélange en deux étapes (AMDE) visent à atténuer les inconvénients liés à la porosité élevée, à l'absorption d'eau importante et à la faible compacité des GR bruts.

##### **IV.5.2 .1 Amélioration chimique par fumée de silice**

L'amélioration chimique repose sur l'incorporation de fumée de silice à hauteur de 5 % du poids de ciment contribue à la densification de la matrice cimentaire et au comblement des vides capillaires. Cette action favorise une amélioration notable de la compacité du béton durci, tout en renforçant sa durabilité vis-à-vis des agents agressifs externes. L'efficacité de ce traitement est renforcée par l'ajout d'un superplastifiant de type polycarboxylate, tel que le SikaPlast®-40 Pro, dosé à 1 % du poids de liant, permettant de réduire significativement le rapport eau/ciment sans compromettre l'ouvrabilité du mélange. Cette combinaison amélioration chimique–adjuvant optimise ainsi à la fois la performance mécanique et la mise en œuvre du béton recyclé.

### IV.5.2 .2 Amélioration mécanique par triple broyage des GR

L'amélioration mécanique des granulats recyclés a été réalisée par un procédé de triple broyage figure IV.14, visant à améliorer leur qualité structurale. Ce procédé consiste à soumettre les GR à trois cycles successifs de concassage et de tamisage. Le premier broyage fragmente les particules composites et désolidarise une partie du vieux mortier. Le second passage affine les grains restants et élimine les résidus adhérents, tandis que le troisième broyage permet de stabiliser la granulométrie et d'homogénéiser la forme des particules. À l'issue de ce traitement, les GR présentent une densité plus élevée, une porosité réduite et une meilleure compacité, ce qui les rend plus aptes à être utilisés dans les bétons.



Figure .IV.16. Triple broyage des GR

### IV.5.2 .3 Approche de mélange en deux étapes (TSMA)

Afin de mieux contrôler l'absorption d'eau des GR et de garantir un rapport eau/ciment effectif optimal, l'approche de mélange en deux étapes (Two-Stage Mixing Approach – TSMA) a été mise en œuvre. Cette méthode consiste, dans une première phase, à introduire les GR dans le malaxeur avec une partie de l'eau de gâchage (50 à 70 %), afin de pré-humidifier les granulats et de saturer partiellement leurs pores. Après un malaxage initial, les autres constituants : GN, ciment, adjuvants et eau restante sont ajoutés dans une deuxième phase. Cette approche améliore la distribution de l'eau dans le mélange, réduit les variations

de consistance, améliore la compacité du béton et limite les pertes de performance mécanique dues à une absorption excessive d'eau par les GR.

## IV.6 Propriétés de béton à l'état frais

### IV.6.1 Affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement du cône d'Abrams est un test effectué sur du béton frais à faible écoulement pour déterminer sa maniabilité (texture). L'affaissement est également connu sous le nom de « slump ». Cet essai vise à évaluer la consistance d'un volume de béton frais en mesurant la hauteur d'affaissement. Le béton est compacté dans un moule en forme de tronc de cône, et en soulevant ce dernier verticalement figure IV.15, on peut mesurer la diminution de hauteur due à l'affaissement du béton. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est utilisé pour contrôler la maniabilité du béton.

La norme NF EN 206 classe l'affaissement du béton en cinq catégories :

- S1 (10 à 40 mm) : Béton dur, très sec et peu maniable, utilisé dans les routes et les fondations légèrement armées ;
- S2 (50 à 90 mm) : Béton plastique, moyennement hydraté et maniable, utilisé en béton armé ordinaire avec vibration ;
- S3 (100 à 150 mm) : Béton très plastique, très humide et à haute ouvrabilité ;
- S4 (160 à 210 mm) : Béton fluide, très humide et très maniable ;
- S5 (supérieur ou égal à 220 mm) : Béton très fluide, très humide et très maniable.



**Figure .IV.17.** affaissement au cone d'Abrams

### IV.6.2 La masse volumique du béton frais

La masse volumique du béton frais est définie comme la masse d'un mètre cube de béton frais compact (volume des pores inclus) est décrit dans la norme européenne NF EN 12350-6.

La mesure de la masse volumique du béton frais permet d'obtenir rapidement des indications sur la qualité du béton.

Mise en place du béton frais dans une éprouvette cylindrique ( $\emptyset$  16x32cm) de volume  $V$  et de masse ( $M1$ ), le béton est vibré à l'aide d'une aiguille vibrante ou tige de piquage, après un arasement approprié, puis pesé l'ensemble (l'éprouvette et le béton), soit la masse ( $M2$ ).

Déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$\rho = \frac{(M1-M2)}{V} \quad \text{Eq (IV.15)}$$

$\rho$  : est la masse volumique du béton frais (kg/m<sup>3</sup>)

**M1** : est la masse de l'éprouvette (kg)

**M2** : est la masse de l'éprouvette plus la masse du béton contenu dans l'éprouvette (kg)

**V** : est le volume de l'éprouvette en mètre cube (m<sup>3</sup>)

### IV.7 Fabrication des éprouvettes de bétons

Après la réalisation des essais d'affaissement, le béton est mis en place dans des moules de forme cylindrique de dimensions 16x32 cm<sup>2</sup> pour les essais de compression, et des éprouvettes prismatiques de dimensions 10x10x40 cm<sup>3</sup> pour les essais de traction par flexion trois points, sont ensuite vibrées à l'aide d'une table vibrante pendant 30 secondes. Le démoulage s'est fait 24 heures après le coulage figure IV.16.

Les éprouvettes doivent être conservées sans agitation pendant 24 heures  $\pm$  1 heure dans une pièce maintenue à 20°C. $\pm$ 2°C. Après avoir retiré le moule, les éprouvettes doivent être conservées à la même température, dans l'eau. Ce procédé est réalisé pour éviter l'évaporation de l'eau pendant la phase de prise.



**Figure .IV.18.** Fabrication des éprouvettes de béton

## IV.8 Propriétés de béton à l'état durci

### IV.8.1 Essai de Résistance à la compression des éprouvettes (NF P 18 430-3, NF EN 12390-3)

La résistance à la compression constitue l'une des propriétés mécaniques fondamentales du béton et représente un indicateur clé de sa performance structurelle. Elle correspond à la capacité du matériau à résister à des charges axiales sans se rompre. Cette

résistance dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, adjuvants), le rapport eau/ciment, la compacité de la matrice cimentaire, ainsi que les conditions de cure. Dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés (GR), la résistance à la compression peut être significativement influencée par la porosité des GR, la présence de mortier résiduel et leur capacité d'absorption d'eau. L'évaluation de la résistance à la compression est généralement réalisée conformément à la norme NF EN 12390-3, à l'aide d'éprouvettes cylindriques ou cubiques, testées à différents âges (7, 14, 28 jours) afin de suivre l'évolution de la résistance dans le temps.

#### IV.8.1.1 La conduite de l'essai

L'évaluation de la résistance à la compression est généralement réalisée conformément à la norme NF EN 12390-3, à l'aide d'éprouvettes cylindriques ou cubiques, testées à différents âges (7, 14, 28 jours) afin de suivre l'évolution de la résistance dans le temps.

En désignant par  $P$ , la charge maximale qui provoque la rupture en Newton (N) et  $S$  la section en  $\text{mm}^2$ , figure IV.17, la résistance par compression en Méga Pascal (MPa) est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad \text{Eq (IV.16)}$$



**Figure .IV.19.** Essais de compression des éprouvettes cylindriques

#### IV.8.2 Essai de Résistance à la traction par flexion (trois points) (P 18 433, NF EN 12390-5)

Pour évaluer la résistance à la traction du béton, des éprouvettes prismatiques normalisées de dimensions 10x10x40 cm<sup>3</sup> ont été employées. Ce type d'essai est largement utilisé pour cette mesure. Il implique la rupture en flexion d'une éprouvette prismatique ayant un côté de dimension  $d$  et une longueur de  $4d$ , sous l'effet d'une charge totale  $P$  figure IV.18.

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante

$$f_{ef} = \frac{3FL}{2d^1.d_2^3} \quad \text{Eq(IV.17)}$$

Avec

$f_{ef}$ : la résistance en flexion, en méga pascals (newtons par millimètre carré) ;

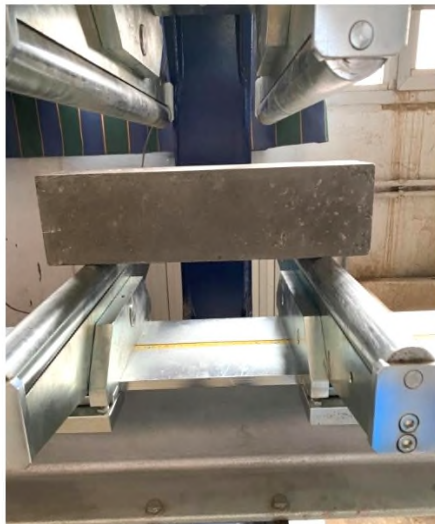
**F** : la charge maximale, en newtons ;

**L** : l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;

**d1** et **d2** : les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.

Si **d1 = d2** la résistance en flexion (**f<sub>cf</sub>**) devient :

$$f_{cf} = \frac{3FL}{2d_2^3} \quad \text{Eq(IV.18)}$$



Mise en charge de l'éprouvette



mise en traction de l'éprouvette

**Figure .IV.20.** Essai de traction par flexion des éprouvettes prismatiques

## IV.9 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir une base technique solide en présentant de manière détaillée les caractéristiques physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés dans la formulation des bétons, qu'il s'agisse de constituants traditionnels ou recyclés. La caractérisation des granulats, du ciment, des additions minérales et des adjuvants a permis de mieux cerner leurs propriétés intrinsèques, essentielles pour comprendre leur comportement au sein du mélange cimentaire.

Par ailleurs, les différentes procédures expérimentales adoptées ont été clairement définies et mises en œuvre conformément aux normes en vigueur, garantissant ainsi la fiabilité et la reproductibilité des essais. Ces protocoles serviront de fondement à l'analyse des performances des bétons élaborés dans cette étude, en particulier en ce qui concerne leur résistance à la compression et à la traction, mais également leurs propriétés à l'état frais.

Les données recueillies dans cette phase préparatoire sont cruciales pour l'interprétation des résultats expérimentaux et l'évaluation de l'efficacité des différentes techniques d'amélioration des granulats recyclés. Le chapitre suivant sera ainsi consacré à l'analyse comparative des performances des bétons frais et durcis, à la lumière des approches de formulation adoptées.

# Chapitre V

## Résultats et interprétation

---

## V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus au cours de cette étude. L'objectif est d'évaluer de manière comparative le comportement des bétons élaborés à base de granulats recyclés, en tenant compte des différentes techniques d'amélioration mises en œuvre. L'analyse des résultats se déroulera selon une approche structurée, permettant de mettre en évidence l'influence de chaque paramètre sur les performances globales du matériau.

Dans un premier temps, l'attention sera portée sur les propriétés à l'état frais des deux types de bétons intégrant des granulats recyclés, en s'intéressant notamment à la masse volumique et à la maniabilité. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer la facilité de mise en œuvre du béton, ainsi que sa cohésion et sa stabilité avant durcissement.

Dans un second temps, l'étude portera sur les propriétés à l'état durci, en mettant l'accent sur la résistance mécanique, notamment la résistance à la compression et à la traction, mesurées à différents âges. Cette analyse permettra de déterminer l'impact des techniques d'amélioration telles que l'ajout de fumée de silice, le traitement mécanique par triple broyage et l'approche de mélange en deux étapes sur la performance globale des bétons recyclés.

L'ensemble des résultats sera présenté sous forme de tableaux, de graphiques comparatifs et de commentaires analytiques, afin de tirer des conclusions claires et argumentées sur l'efficacité des approches testées dans l'optimisation des bétons à base de granulats recyclés.

## V.2 Résultats des essais

### V.2.1 Résultats physiques

#### V.2.1.1 Essai d'analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la répartition dimensionnelle des particules composant les granulats utilisés (naturels et recyclés), afin d'évaluer leur aptitude à être incorporés dans des formulations de béton. Une bonne répartition granulométrique contribue à une meilleure compacité, à une réduction des vides et à une amélioration des propriétés mécaniques du béton.

Au cours de la phase de formulation, plusieurs types de sable ont été testés afin d'identifier un sable adapté aux exigences techniques du béton. Les essais réalisés ont mis en évidence des résultats peu satisfaisants, notamment en ce qui concerne la finesse excessive des matériaux et la mauvaise qualité globale de certains sables. En particulier, les tests d'équivalent de sable (ES), effectués selon la norme NF P 18-598, ont révélé des valeurs inférieures à 50 %, ce qui indique une forte teneur en fines argileuses et une mauvaise propreté du sable. Un tel résultat traduit un sable de mauvaise qualité, susceptible d'entraîner des effets négatifs sur le comportement du béton, notamment une augmentation de la demande en eau, une réduction de la compacité, une baisse de la résistance mécanique.

Par ailleurs, l'analyse granulométrique a confirmé que les sables initialement choisis présentaient une courbe très fine, déséquilibrée, ce qui se traduisait par un squelette granulaire peu dense et un besoin élevé en liant pour enrober l'ensemble des particules. Afin de corriger ces défauts, une correction granulométrique a été réalisée en introduisant un sable plus grossier. Cette démarche a permis de rééquilibrer la courbe granulométrique globale du sable, d'améliorer la compacité du mélange, de limiter la surface spécifique à enrober, et ainsi d'optimiser le rapport eau/ciment tout en maintenant une bonne ouvrabilité du béton frais. Ce sable corrigé a été retenu pour les formulations finales en raison de sa conformité aux exigences normatives et de ses effets positifs sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton.

- **Sable fin**

La masse de l'échantillon pour essai doit être supérieur à  $0.2D$ , avec

**M** : masse de l'échantillon exprimée en kilogramme.

**D** : la plus grande dimension du granulat exprimée en mm.

Pour tester la granulométrie du sable 0/5, nous avons utilisé  $0,2 \times 5 \text{ mm} = 1 \text{ kg}$ .

Les résultats des analyses granulométriques de sable étudié sont regroupés dans le tableau (V.1) suivant:

**Tableau .V.1.** Analyse granulométrique de sable (0/5)

Tamis(mm)	Refus partiels(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisé (%)
5	0	0	0	100
2,5	19	19	1,9	98,1
1,25	36	55	5,5	94,5
0,63	85	140	14	86
0,315	370	510	51	49
0,16	392	902	90,2	9,8
0,08	86	988	98,8	1,2
fond	12	1000	100	0

- **Module de finesse**

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5 )} \quad \text{Eq (V.1)}$$

$MF = 1,63$  ( Le coefficient de finesse indique que le sable est très fin. ), Ce qui ne permet pas une maniabilité satisfaisante et une bonne résistance. Ce sable est considéré comme fragile.

- **Sable gros**

Après avoir obtenu un sable très fin lors de l'analyse granulométrique, nous avons apporté du sable plus grossier afin de réaliser une correction du granulat. Cette démarche a pour but d'équilibrer la distribution granulométrique conformément aux normes, et d'assurer ainsi la qualité du mélange utilisé

**Tableau .V.2.** Analyse granulométrique de sable gros

Tamis(mm)	Refus partiels(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisat (%)
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**

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5)}$$

Eq (V.2)

**MF** = 3.45 module de finesse de 3.45 pour le sable indique un sable grossier. Le module de finesse est un indicateur de la granulométrie du sable, et les valeurs plus élevées correspondent à des grains plus gros

- **Correction du sable**

Correction d'un sable fin de module de finesse MF=3.45 (Sable gros) par un sable fin de module de finesse MF=1.63) et on obtient un sable corrigé de module de finesse MF=2.5

**Sable gros:**

$$S1 = \left( \frac{2.5 - 1.63}{3.45 - 1.63} \right) = 48\%$$

Eq (V.3)

**Sable fin:**

$$S2 = \left( \frac{3.45 - 2.5}{3.45 - 1.63} \right) = 52\%$$

Eq (V.4)

**Sable Correction (sable fin + sable carrière)**

Les résultats des analyses granulométriques de sable correction sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau .V.3.** Analyse granulométrique de sable correction

Tamis(mm)	Refus partiels(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisat (%)
5	4	4	0,4	99,6
2,5	154	158	15,8	84,2
1,25	149	307	30,7	69,3
0,63	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

- **Module de finesse**

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis}$$

$$(0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5) \quad \text{Eq (V.5)}$$

MF= 2,43 Le module de finesse est compris entre la valeur 2,2 et 2,8 ( $2,2 < Mf < 2,8$ ) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. On est en présence d'un sable préférentiel.

- **Gravier**

**Gravier naturel****Tableau .V.4.** Analyse granulométrique de Gravier normale (GN) (3/8, 8/15).

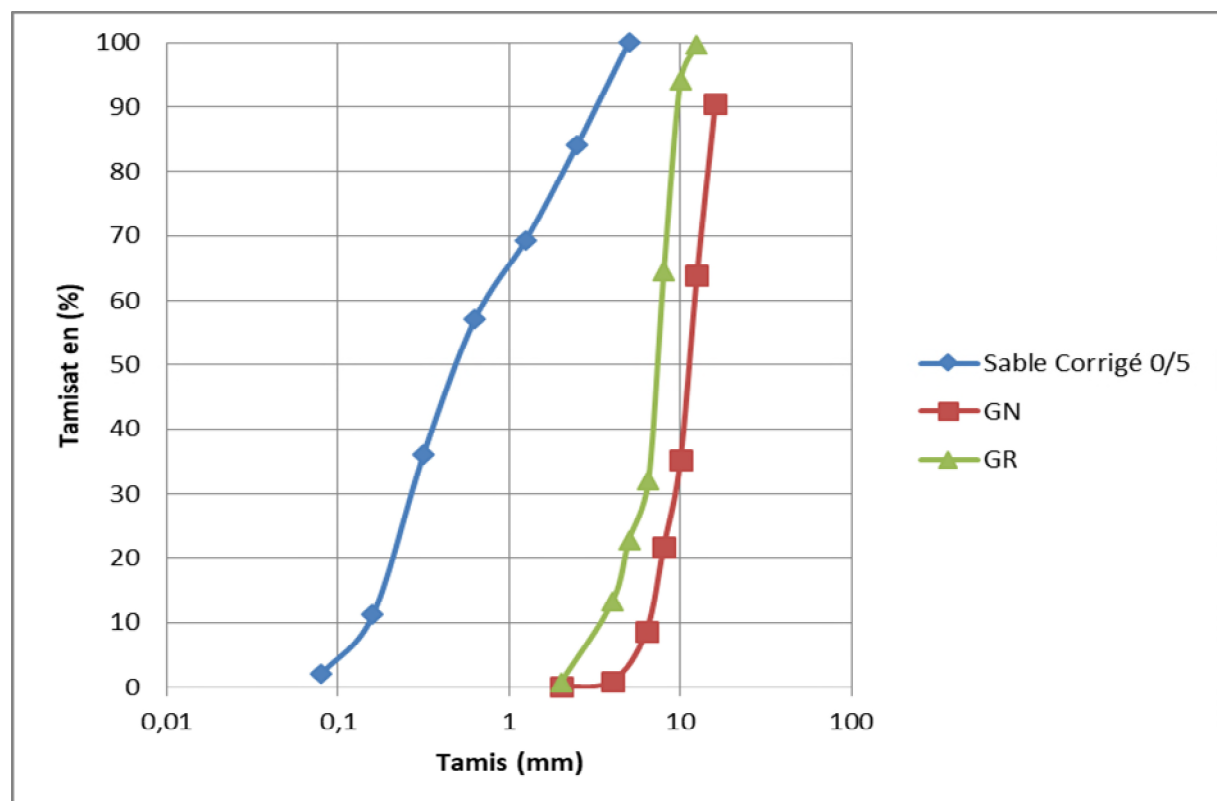
Tamis	Refus partiels	Refus cumulés	Refus cumulés%	Tamisat %
16	302	302	9,347	90,563
12,5	855	1157	36,156	63,844
10	915	2072	64,75	35,25
8	429	2501	78,156	21,844
6,3	424	2925	91,406	8,594
4	243	3168	99	1
2	30	3198	99,937	0,063
fond	2	3200	100	0

**Gravie recyclés**

**Tableau .V.5.** Analyse granulométrique de Gravier recyclé

Tamis	Refus partiels	Refus cumules	Refus cumules %	Tamisât %
12,5	10	10	0,4	99,6
10	140	150	6	94
8	740	890	35,6	64,4
6,5	810	1700	68	32
5	230	1930	77,2	22,8
4	240	2170	86,8	13,2
2	310	2480	99,2	0,8
fond	20	2500	100	0

Les courbes granulométriques du sable, gravier naturel et recyclé sont tracées sur un graphique où l'axe vertical (ordonnée) représente le pourcentage passant, tandis que l'axe horizontal (abscisse) indique les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique



**Figure .V.1.** Analyse granulométrique des granulats

La figure V. I illustre la distribution des particules au sein des différents matériaux utilisés. Le sable corrigé montre une courbe granulométrique étalée, avec une répartition équilibrée entre les fines et les fractions plus grossières, ce qui indique une bonne aptitude à combler les vides entre les grains de gravier. Cette correction a permis d'améliorer la compacité globale du squelette granulaire, ce qui est favorable à la réduction de la demande en eau et à l'obtention d'un béton plus dense.

Concernant les graviers, les résultats mettent en évidence une distinction entre le gravier naturel et le gravier recyclé. Le gravier naturel présente une granulométrie continue, bien centrée autour des dimensions intermédiaires, conformément aux spécifications requises pour une bonne formulation de béton. En revanche, le gravier recyclé présente une distribution légèrement déséquilibrée, avec une proportion de fines. Cela s'explique par la présence de mortier adhérent et par la dégradation subie lors des opérations de concassage.

Cette différence de granularité pourrait affecter la compacité du mélange et augmenter la porosité du béton si elle n'est pas correctement compensée. Ainsi, ces résultats justifient pleinement l'application de techniques d'amélioration telles que le triple broyage des granulats recyclés ou l'ajout de liants actifs comme la fumée de silice dans les formulations, afin de pallier ces écarts granulométriques et optimiser les performances mécaniques du béton.

#### V.2.1.2 Essai de l'équivalent de sable

- **Sable Corrigé**

Le tableau V.6 résume l'essai d'équivalent de sable corrigé suivant :

**Tableau .V.6.** Résultats d'essai de l'équivalent de sable Correction

Eprouvette	H1(cm)	H2(cm)	H1'(cm)	ESV(%)	ESP(%)
1	10,8	9,1	8,6	84,25	79,63
2	10,0	8,5	7,9	85	79
3	10,4	9	8	86,5	76,92

**ESP** : équivalent de sable mesuré au piston.

**ESV** : équivalent de sable visuel mesuré visuellement ;

**H1** : Hauteur du sable propre et élément fins ;

**H2** : Hauteur du sable propre seulement ;

**H1'** : Hauteur du sable propre seulement au piston.

D'après les résultats obtenus l'équivalent de sable (ESP) compris entre  $65 \% \leq ESP \leq 80 \%$  donne un sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité

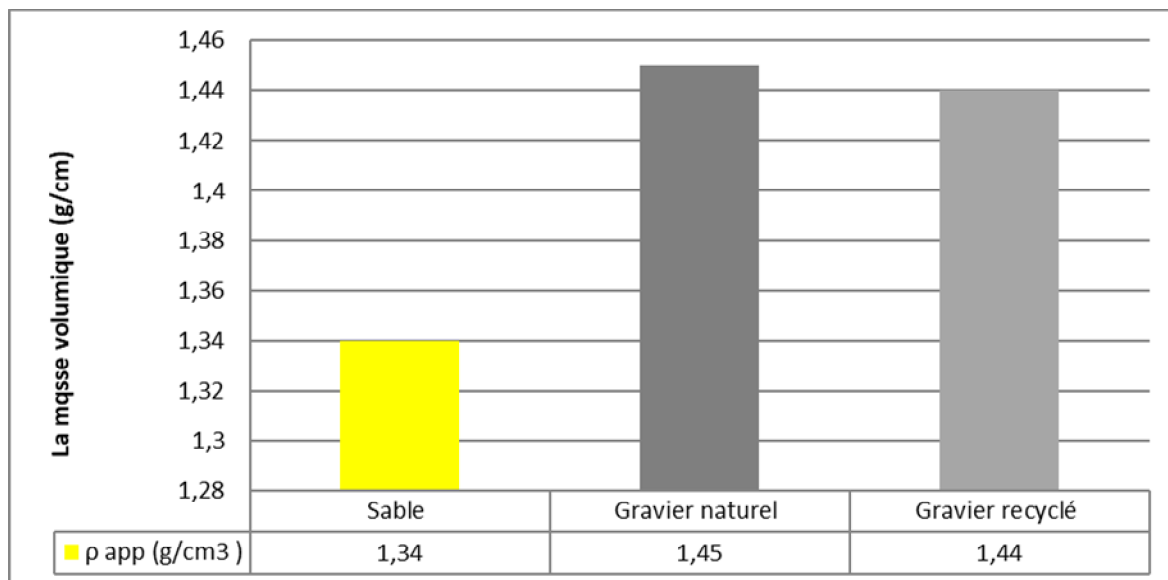
**V.2.1.3 Les masses volumiques apparentes et absolues**

Chaque mesure de masse volumique apparente ou absolue a été effectuée trois fois. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux V.7 et V.8.

- Les masses volumiques apparentes

**Tableau .V.7.** Masses volumiques apparentes des constituants utilisés

Matériaux	M1(g)	M2(g)	$\rho$ app (g/cm <sup>3</sup> )
Sable	1800	460	1,34
Gravier naturel	1911	460	1,45
Graviers recyclés	1900	460	1,44
Ciment	1860	460	1,4

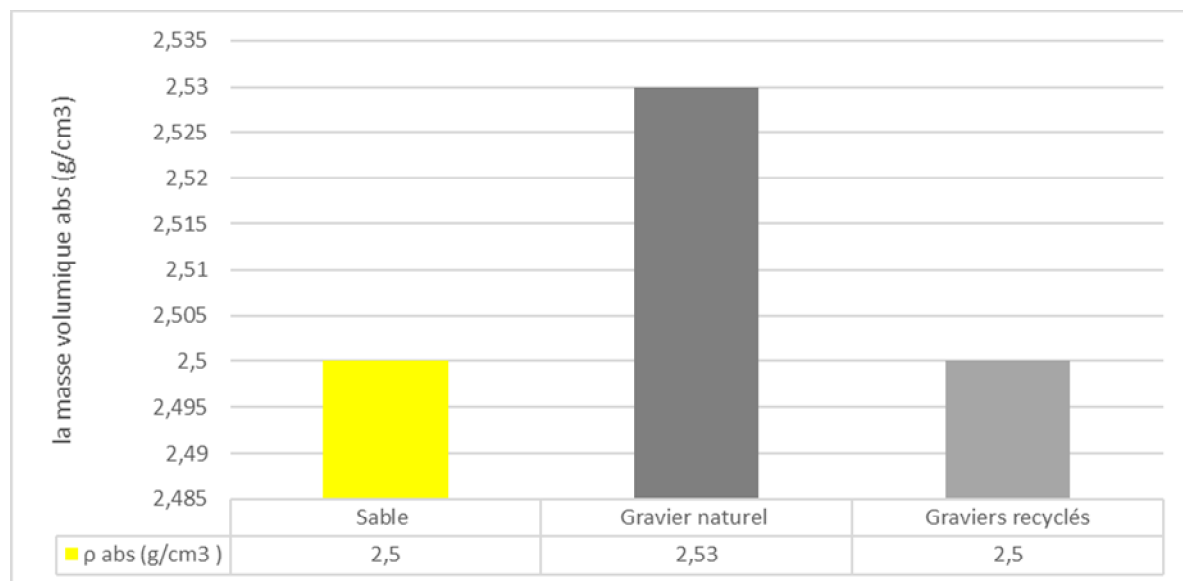


**Figure .V.2.** Masses volumiques apparentes de matériaux

- **La masse volumique absolue**

**Tableau .V.8.** Masses volumiques absolues des constituants utilisés

	M1(g)	v(ml)	$\rho$ abs (g/cm <sup>3</sup> )
Sable	300	460	2,5
Gravier naturel	300	460	2,5
Graviers recyclés	300	460	2,53

**Figure .V.3.** Masses volumiques absolue des matériaux

Les figures (V.2) et(V.3) mettent en évidence que les masses volumiques apparente et absolue des granulats naturels sont nettement plus élevés que celles des granulats recyclés. Cette différence s'explique par la variation de la structure et de la composition entre ces matériaux, notamment par la présence de mortier adhérent dans les granulats recyclés.

**V.2.1.4 Coefficient d'absorption d'eau (Ab)**

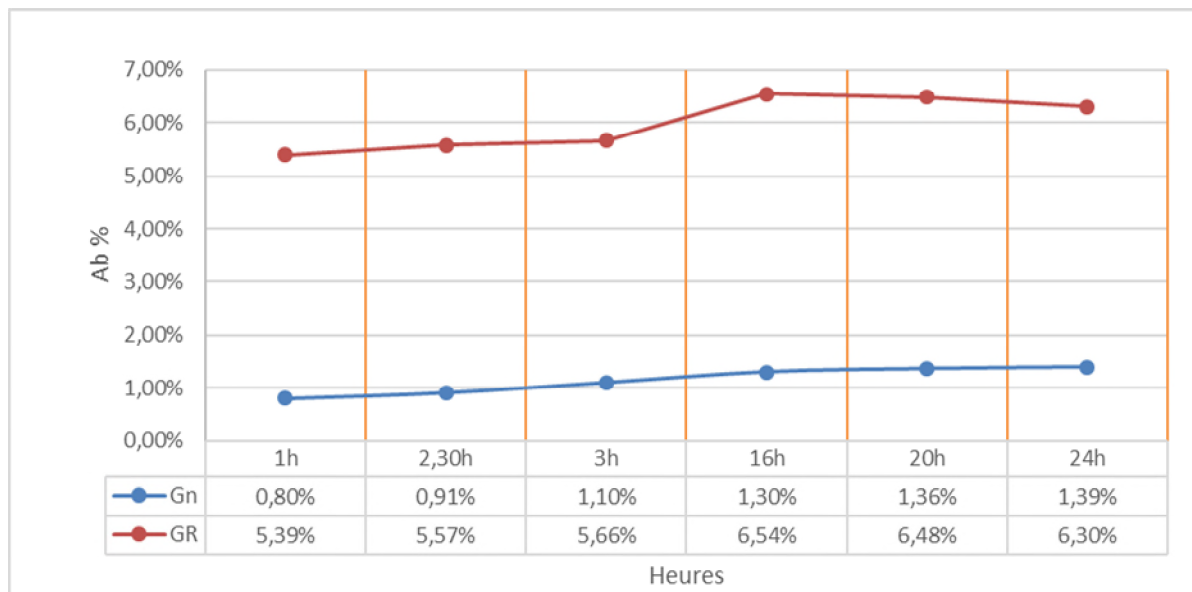
L'absorption d'eau des granulats recyclés et naturels a été mesurée afin d'évaluer leur capacité d'imbibition et leur porosité, par la suite faire une comparaison, cette propriété pouvant influencer de manière significative le comportement du béton à l'état frais et durci. Les tableaux V.9 et V.10 regroupent les résultats des taux d'absorption d'eau des granulats GR et GN.

**Tableau .V.9.** Taux d'absorption d'eau de granulats recyclés

Heures	Ms (Kg)	Ma(Kg)	Ab
1h	1Kg	1,057	5,39%
2h	1Kg	1,059	5,57%
3h	1Kg	1,06	5,66%
21h	1Kg	1,066	6,54%
23h	1Kg	1,067	6,48%
24h	1Kg	1,07	6,30%

**Tableau .V.10** Taux d'absorption d'eau de gravie naturel

Heures	Ms (Kg)	Ma(Kg)	Ab
1h	1Kg	1,008	0,80%
2h	1Kg	1,009	0,91%
3h	1Kg	1,0093	1,10%
21h	1Kg	1,0098	1,30%
23h	1Kg	1,001	1,36%
24h	1Kg	1,0012	1,39%



**Figure .V.4.** Evolution de coefficient d’absorption d’eau des GR et GN

Comme illustré dans la figure(V.4) l'absorption d'eau par les granulats augmente progressivement au fil du temps après leur immersion. Les granulats recyclés présentent une absorption d'eau plus élevée que les granulats naturels, ce comportement est principalement dû à la structure poreuse et ouverte de ces granulats, qui permet à l'eau de pénétrer facilement. Dans un premier temps, l'absorption est rapide en raison de la présence de nombreux pores superficiels. Ensuite, la vitesse d'absorption ralentit progressivement jusqu'à atteindre un état proche de la saturation. Cette propriété joue un rôle essentiel dans la détermination de la quantité d'eau effective dans le mélange de béton, influençant ainsi ses caractéristiques finales telles que la résistance à la compression et la maniabilité.

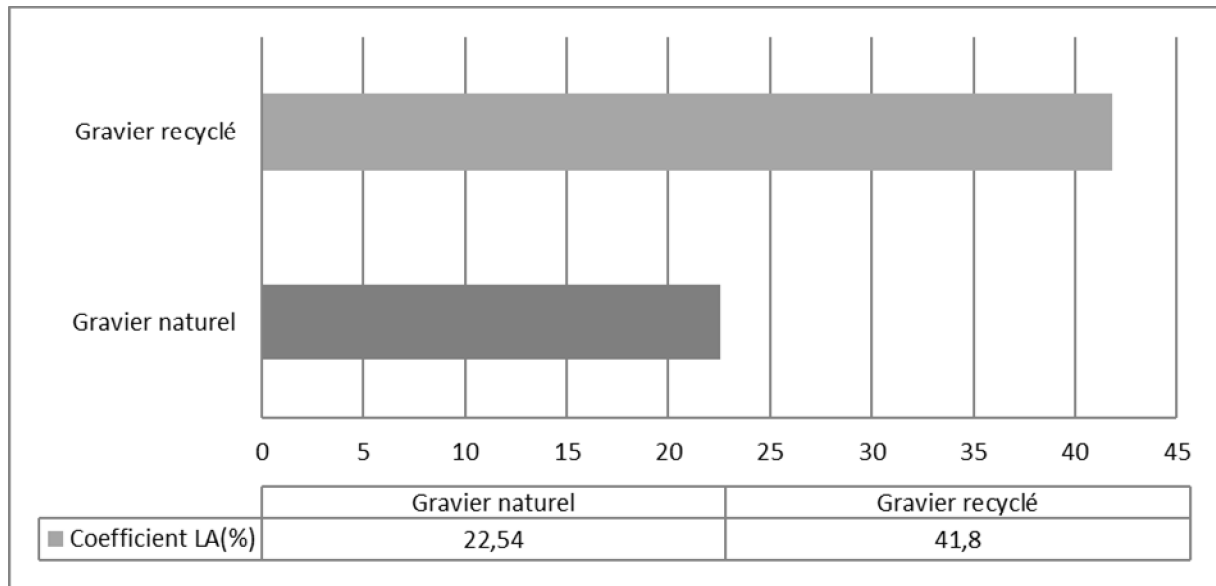
## V.2.2 Résultats mécaniques

### V.2.2.1 Essais Los Angeles

**Tableau(V.11):** Résultats d’essai Los Angeles

Type de gravier	Gravier naturel	Gravier recyclé
Coefficient LA(%)	22,54	41,8

Le coefficient Los Angeles de GN utilisé dans notre étude est de 22,54% selon la classification des roches ce granulats est dure. Et pour le GR le coefficient MD est de 41.8% le granulats est tendre.



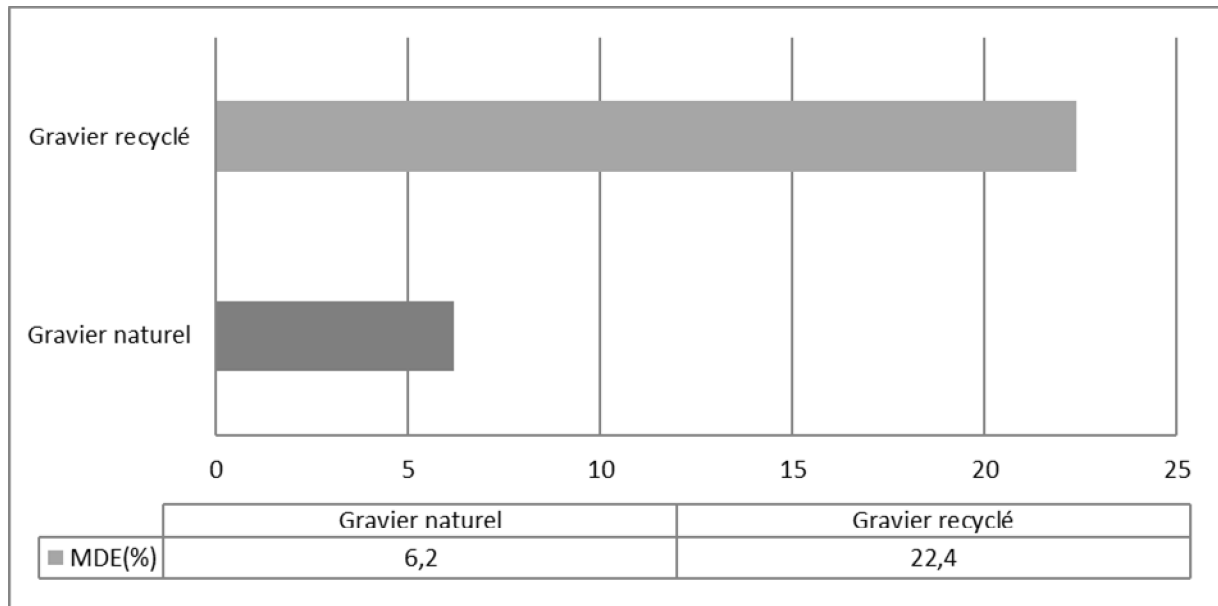
**Figure .V.5.** Résultats d’essai Los Angeles

Les résultats des essais Los Angeles mettent en évidence une résistance plus importante des granulats naturels (GN) face aux chocs que celle des granulats recyclés (GR). Concrètement, la figure V.5 montre que le coefficient Los Angeles des GN est plus faible (de l'ordre de 22.54%) que celui des GR (jusqu'a 41.8%). Cette valeur plus élevée des GR souligne leur fragilité, leur structure plus poreuse et leur texture hétérogène, renforcée par la présence de mortier ancien. Cette fragilité se traduit par une plus grande production de fines sous l’action des chocs, pouvant influencer négativement le comportement mécanique et la durabilité des bétons.

**V.2.2.2 Essais Micro-DEval**

**Tableau .V.12.** Résultats obtenus pour l’essai de MDE

Type de gravier	Gravier naturel	Gravier recyclé
MDE(%)	6,2	22,4



**Figure .V.6.** Résultats d'essai Micro-Deval

De même, l'essai Micro Deval montre que les granulats recyclés présentent une résistance à l'usure par frottement inférieure à celles des granulats naturels figure V.6. Cette observation est cohérente avec leur porosité plus importante, leur surface plus rugueuse et leur composition plus composite, pouvant contenir des restes de pâte de ciment. Cette usure renforcée des GR se traduit par une création plus importante de particules fines pendant l'essai, pouvant affecter leur capacité portante, leur cohésion globale, et donc leur pertinence en tant que granulats pour la formulation de bétons de structure.

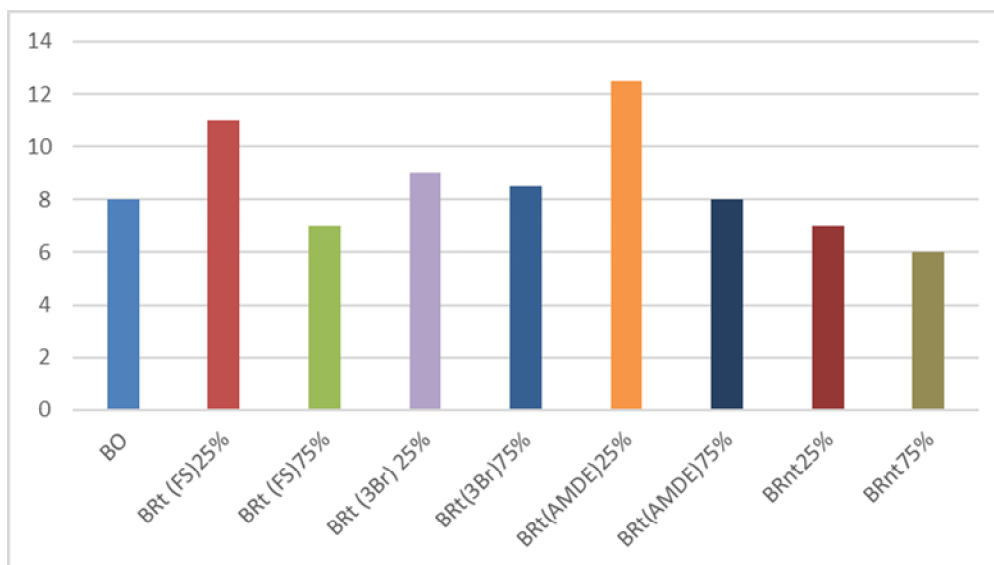
### V.2.2.3 L'essai de l'affaissement

L'essai d'affaissement a été réalisé afin d'évaluer la consistance et l'ouvrabilité du béton à l'état frais. Le tableau V.13 résume les résultats trouvés.

**Tableau .V.13.** Valeurs de l'affaissement des bétons

Types de béton	Affaissement (cm)
<b>BO</b>	8
<b>BRt (FS)25%</b>	11
<b>BRt (FS)75%</b>	7
<b>BRt (3Br) 25%</b>	9
<b>BRt(3Br)75%</b>	8,5
<b>BRt(AMDE)25%</b>	12,5
<b>BRt(AMDE)75%</b>	8
<b>BRnt25%</b>	7
<b>BRnt75%</b>	7

Les résultats de l'essai d'affaissement font ressortir l'influence de l'incorporation des granulats recyclés et les méthodes d'amélioration sur l'ouvrabilité des bétons comme illustrer dans la figure V.7 suivante.

**Figure .V.7.** Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement

Le béton ordinaire, constitué à 100 % de granulats naturels (GN), présente un affaissement de 8 cm, ce qui traduit une fluidité suffisante pour assurer une bonne mise en place sans ségrégation.

Pour les bétons recyclés ayant bénéficié de l'amélioration chimique par la fumée de silice et l'adjuvant, l'affaissement est plus important avec 11 cm pour le BR25% et 7 cm pour le BR75%. Cette variation souligne que l'adjonction de la fumée de silice, en association avec le superplastifiant, favorise l'ouvrabilité lorsque le pourcentage de granulats recyclés est

modéré, tandis que l'augmentation de leur teneur réduit l'affaissement, sans toutefois tomber en dessous d'une valeur acceptable.

Pour les bétons recyclés non traités (BRnt), l'affaissement est de 7 cm (BRnt 25%) et de 6 cm (BRnt 75%). Cette diminution souligne l'impact négatif de l'incorporation de granulats recyclés non traités sur l'ouvrabilité, en particulier lorsque leur teneur est importante.

Dans le cas de l'amélioration mécanique par triple broyage, l'affaissement est de 9 cm (BR25%) et de 8,8 cm (BR75%). Cette technique semble donc assurer une meilleure régularité de l'ouvrabilité des bétons, proche de celui du béton de référence, ce qui est lié à la meilleure morphologie des granulats obtenue par le broyage.

Quant à l'approche de mélange en deux étapes, elle se traduit par un affaissement de 12,5 cm (BR25%) et de 8 cm (BR75%) figure V.7. Cette méthode favorise donc de manière significative l'ouvrabilité lorsque le pourcentage de granulats recyclés est faible, tandis que son efficacité diminue lorsque leur teneur augmente, se rapprochant de l'affaissement du béton de référence.

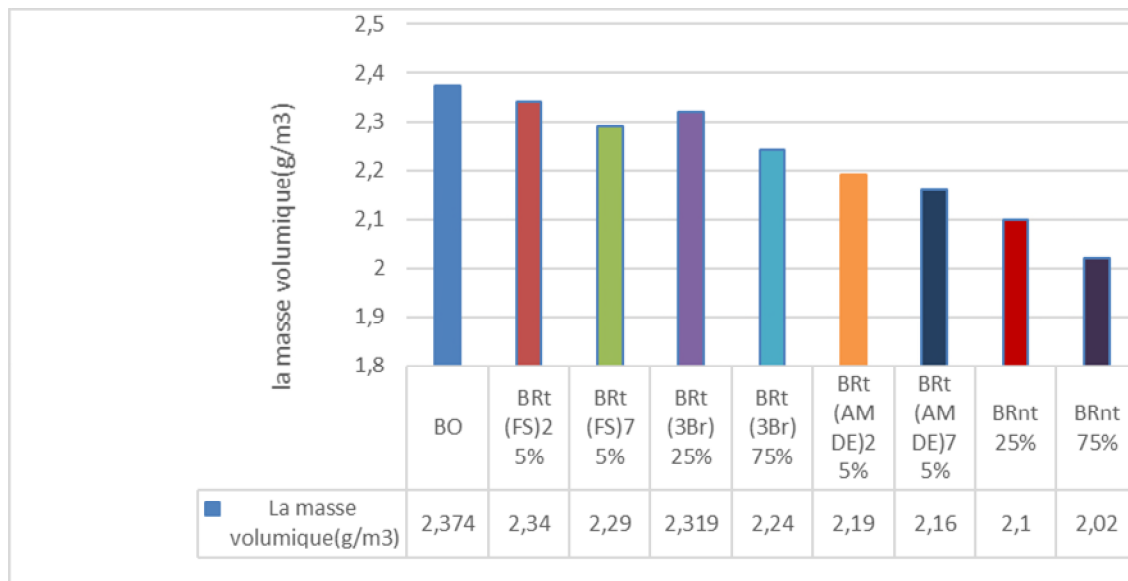
**V.2.2.4 La masse volumique (densité) de béton a l'état frais**

Dans le tableau V.14 nous avons rassemblé les résultats de mesure de densité à l'état frais pour les trois formules de béton utilisées dans l'étude.

**Tableau .V.14.** Valeur de la masse volumique de béton a l'état frais

	BO	BRt (FS)		BRt (3Br)		BRt (AMDE)		BRnt 25%	BRnt 75%
La masse volumique(g/m3)	2,374	2,34	2,29	2,319	2,24	2,19	2,16	2,1	2,02

Les résultats de la masse volumique mettent en valeur l'influence de l'incorporation des granulats recyclés et des méthodes d'amélioration sur la densité à l'état frais des bétons.



**Figure .V.8.** Variation de la masse volumique des 3 méthodes

Le béton ordinaire, constitué à 100 % de granulats naturels (GN), présente la masse volumique la plus élevée, avec  $2,37 \text{ g/cm}^3$ . Cette valeur traduit la compacité importante de la matrice béton.

Pour les bétons recyclés ayant profité de de l'amélioration chimique par la fumée de silice et l'adjuvant, la masse volumique est légèrement plus faible, s'établissant à  $2,34 \text{ g/cm}^3$  (BR25%) et  $2,29 \text{ g/cm}^3$  (BR75%). Cette décroissance souligne l'incorporation de granulats recyclés, généralement plus poreux et plus légers que les granulats naturels, ce qui se traduit par une densité plus faible.

Dans le cas de l'amélioration mécanique par triple broyage, la masse volumique est de  $2,32 \text{ g/cm}^3$  (BR25%) et de  $2,24 \text{ g/cm}^3$  (BR75%). Cette méthode semble donc permettre d'obtenir une matrice plus dense que le béton non traité, sans toutefois égaler le béton de référence, en raison de la porosité des granulats.

Relativement à l'approche de mélange en deux étapes, elle se traduit par des masses volumiques de  $2,19 \text{ g/cm}^3$  (BR25%) et de  $2,16 \text{ g/cm}^3$  (BR75%). Cette technique, tout en favorisant l'ouvrabilité, semble conduire à une structure plus aérée et donc plus légère que les bétons renforcés par d'autres méthodes.

Finalement, les bétons recyclés non traités (BRnt) présentent les masses volumiques les plus faibles, avec  $2,10 \text{ g/cm}^3$  (BR25%) et  $2,02 \text{ g/cm}^3$  (BR75%). Cette observation souligne leur porosité plus importante, due tant à la nature des granulats recyclés que l'absence d'une étape d'amélioration, et explique leur densité globale plus réduite.

En résumé, la masse volumique des bétons est influencée par le pourcentage de granulats recyclés, leur origine, leur porosité, et par le traitement d'amélioration mis en place. Cette propriété est un facteur important pouvant conditionner leur résistance mécanique et leur durabilité.

#### V.2.2.5 La masse volumique (densité) de béton a l'état durci

La masse volumique du béton dépend de plusieurs facteurs, le plus important étant la teneur en eau libre interne, elle-même dépendante de l'humidité et de la température. Les tableaux (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22) et (23) montrent la variation de la masse volumique selon les trois méthodes de traitement et en fonction du temps (7, 21 et 28 jours) et des taux de remplacement (25 %, 75 %)

**Tableau .V.15.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BO

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BO	Cylindrique01	15	6,43	2,33	15,15	6,43	2,41	15,16	6,43	2,36
	Cylindrique02	15,07	6,43	2,34	15,05	6,43	2,34	15,16	6,43	2,43
	Prismatique	9,43	4,00	2,36	9,66	4,00	2,41	9,7	4,00	2,42

**Tableau .V.16.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (FS)-25%

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BR t(FS)-25%	Cylindrique01	14 ,74	6,43	2,29	14,74	6,43	2,29	14,80	6,43	2 ,30
	Cylindrique02	14 ,74	6,43	2,29	14 ,88	6,43	2,31	14,89	6,43	2 ,31
	Prismatique	9,35	4,00	2, 33	9,55	4,00	2, 38	9 ,35	4 ,00	2,41

**Tableau .V.17.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (FS)-75%

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BR t(FS)-75%	Cylindrique01	14 ,45	6,43	2,25	14,45	6,43	2,25	14,61	6,43	2 ,27
	Cylindrique02	14 ,56	6,43	2,26	14 ,68	6,43	2,28	14,56	6,43	2 ,26
	Prismatique	9,13	4,00	2, 28	9,14	4,00	2, 29	9 ,07	4 ,00	2,26

**Tableau .V.18.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt(3 Br)-25%

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BR t (3 Br)-25%	Cylindrique01	14 ,83	6,43	2,30	14,90	6,43	2,32	14,85	6,43	2 ,31
	Cylindrique02	14 ,88	6,43	2,31	14 ,85	6,43	2,31	15,00	6,43	2 ,33
	Prismatique	9,34	4,00	2, 33	9,27	4,00	2, 31	9 ,42	4 ,00	2,35

**Tableau .V.19.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (3Br)75%

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>-3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BR t(3 Br)-75%	Cylindrique01	14 ,72	6,43	2,29	14,71	6,43	2,87	14,78	6,43	2 ,30
	Cylindrique02	14 ,76	6,43	2,295	14,75	6,43	2,75	14,85	6,43	2 ,309
	Prismatique	9,25	4,00	2, 321	9,44	4,00	2, 36	9 ,32	4 ,00	2,33

**Tableau .V.20.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt(AMDE-25%)

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BRt ( AMDE) -25%	Cylindrique01	14 ,78	6,43	2,263	14,97	6,43	2,31	15,09	6,43	2 ,3
	Prismatique	9 ,34	4,00	2,335	9,56	4,00	2,39	9,48	4,00	2 ,37

**Tableau .V.21.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRt (AMDE-75%)

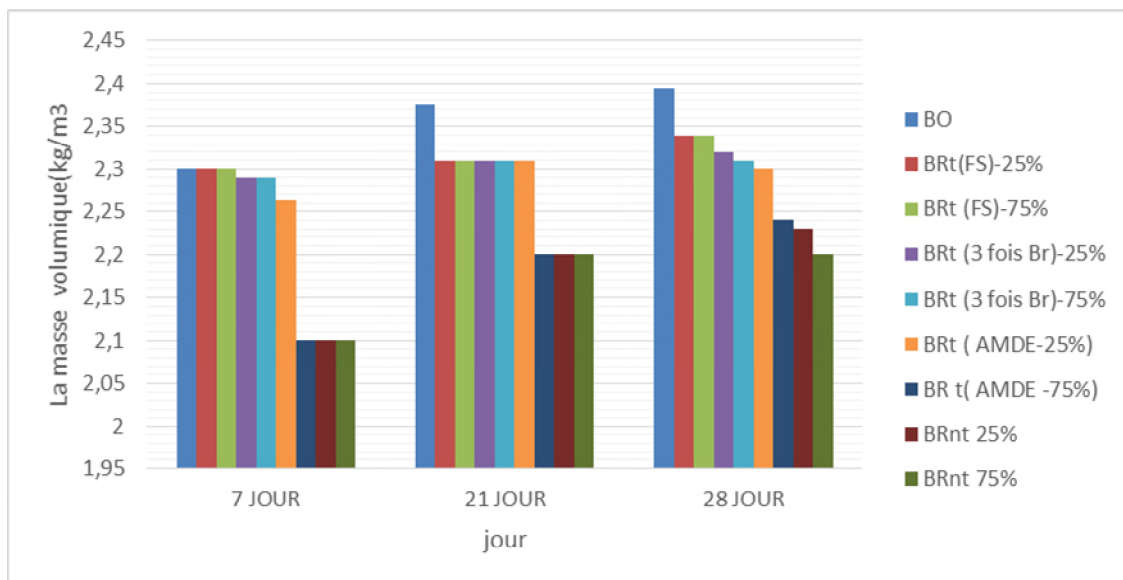
	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BR t( AMDE) -75%	Cylindrique01	14 ,80	6,43	2,1	14,87	6,43	2,2	14,94	6,43	2 ,24
	Prismatique	9 ,22	4,00	2,305	9,40	4,00	2,35	9,40	4,00	2 ,35

**Tableau .V.22.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRnt (BRnt-25%)

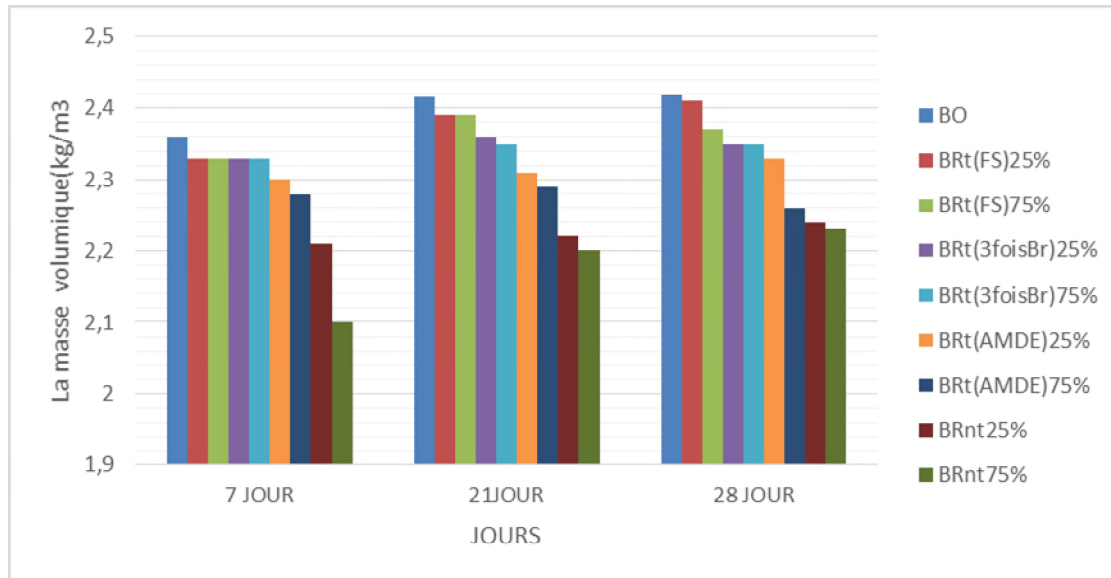
	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BRnt -25%	Cylindrique01	14 ,80	6,43	2,1	14,87	6,43	2,2	14,33	6,43	2 ,23
	Prismatique	8 ,84	4,00	2,21	8,88	4,00	2,22	8,96	4,00	2 ,24

**Tableau .V.23.** Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BRnt (BRnt-75%)

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )×10 <sup>3</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
BRnt -75%	Cylindrique01	14 ,80	6,43	2,1	14,87	6,43	2,2	14,87	6,43	2 ,22
	Prismatique	8 ,4	4,00	2,1	8,80	4,00	2,2	8,92	4,00	2 ,23



**Figure .V.9.** Variation de la densité moyenne des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps des éprouvettes cylindrique



**Figure .V.10.** Variation de la densité moyenne des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps des éprouvettes prismatiques

Les résultats de la masse volumique mettent en exergue l'évolution de la compacité des bétons en fonction de l'âge, du taux de remplacement en granulats recyclés et de la méthode d'amélioration utilisée.

De manière globale, on observe sur la figure V.9 que la masse volumique de l'ensemble des bétons augmente avec l'âge (de 7 jusqu'à 28 jours), ce qui est lié au phénomène d'hydratation du ciment, renforçant leur structure interne.

### **Béton ordinaire (de référence)**

Le béton ordinaire présente les densités les plus élevées, comprises entre 2,34 g/cm<sup>3</sup> et 2,43 g/cm<sup>3</sup> jusqu'à 28 jours. Cette valeur est renforcée par l'emploi de granulats naturels denses et par un rapport eau/ciment faible, favorisant une compacité renforcée de la matrice cimentaire.

### **Béton recyclé non traité (BR)**

Concernant le béton recyclé non traité, quelle que soit la forme des éprouvettes ou le taux de remplacement, on observe des densités plus faibles que celles du béton ordinaire, variant de 2,23 g/cm<sup>3</sup> à 2,27 g/cm<sup>3</sup>. Cette observation est due à la porosité plus importante et à l'hétérogénéité de la structure des granulats recyclés, qui engendrent une compacité moindre.

---

**Béton recyclé avec méthode d'amélioration chimique (fumée de silice + adjuvant)**

L'amélioration chimique a permis d'atteindre des densités plus élevées que celles des bétons non traités, jusqu'à  $2,41 \text{ g/cm}^3$ . Cette progression souligne que le traitement chimique contribue effectivement à combler une part des vides liés à la porosité des granulats, renforçant leur compacité.

**Béton recyclé avec la méthode d'amélioration mécanique (triple broyage)**

Le béton ayant bénéficié d'une amélioration mécanique par triple broyage présente des densités intermédiaires, comprises entre  $2,30 \text{ g/cm}^3$  et  $2,36 \text{ g/cm}^3$ . Cette valeur souligne que le broyage permet d'améliorer l'emboîtement des grains et de réduire leur porosité, augmentant de ce fait leur densité globale.

**Béton recyclé avec l'approche de mélange en deux étapes**

L'approche de mélange en deux étapes a donné des densités proches de celles obtenues avec l'amélioration chimique, variant de  $2,29 \text{ g/cm}^3$  à  $2,39 \text{ g/cm}^3$ . Cette méthode, par une meilleure dispersion des granulats et de la pâte de ciment, favorise leur arrangement et réduit leur porosité globale, renforçant leur compacité.

**V.2.2.5 Résultats des essais de compression et de traction par flexion :**

Afin de déterminer les différences entre les différentes compositions de béton, les essais suivants ont été réalisés :

- **Flexion** (éprouvette prismatique  $10 \times 10 \times 40$ ) ;
- **Compression** (éprouvette cylindrique  $16 \times 32$ ).

Les tableaux (V.20), (V.21), (V.22), (V.23), (V.24), (V.25) et (V.26) ci-dessous présentent l'ensemble des résultats obtenus lors des essais de compression et de traction à 7, 21 et 28 jours pour les différentes éprouvettes.

**Tableau .V.24.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BO.

BO	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	15,03	27,53	15,10	35,487	15,165	41,952
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,427	4,13	9 ,546	4,260	9,660	4 ,311

**Tableau .V.25.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt (FS)-25%.

BRt (FS)-25%.	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,881	25,68	14,861	32 ,34	14,769	39,984
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,410	4,01	9,7	4 ,013	9,351	4,11

**Tableau .V.26.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt (FS)-75%.

BRt (FS)-75%.	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,587	22,587	14 ,498	27,34	14,567	32,416
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,129	3,658	9,139	3,965	9,069	4,11

**Tableau .V.27.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt(3 Br)-25%.

BRt (3 Br)-25%	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,831	21,823	14 ,968	28,441	14,929	30,216
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,342	2,691	9,267	3,535	9,420	3,854

**Tableau.V.28.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt (3 Br)-75%

BRt (3 Br)-75%	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,74	21,823	14 ,771	28,414	14,713	28,662
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,250	2,42	9,435	3,411	9,324	3,658

**Tableau.V.29.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt ( AMDE)-25%.

BRt ( AMDE)-25%.	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	15,008	19,481	14 ,971	25,597	15,093	28,662
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,342	2,353	9,564	3,035	9,476	3,49

**Tableau .V.30.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BRt( AMDE)-75%.

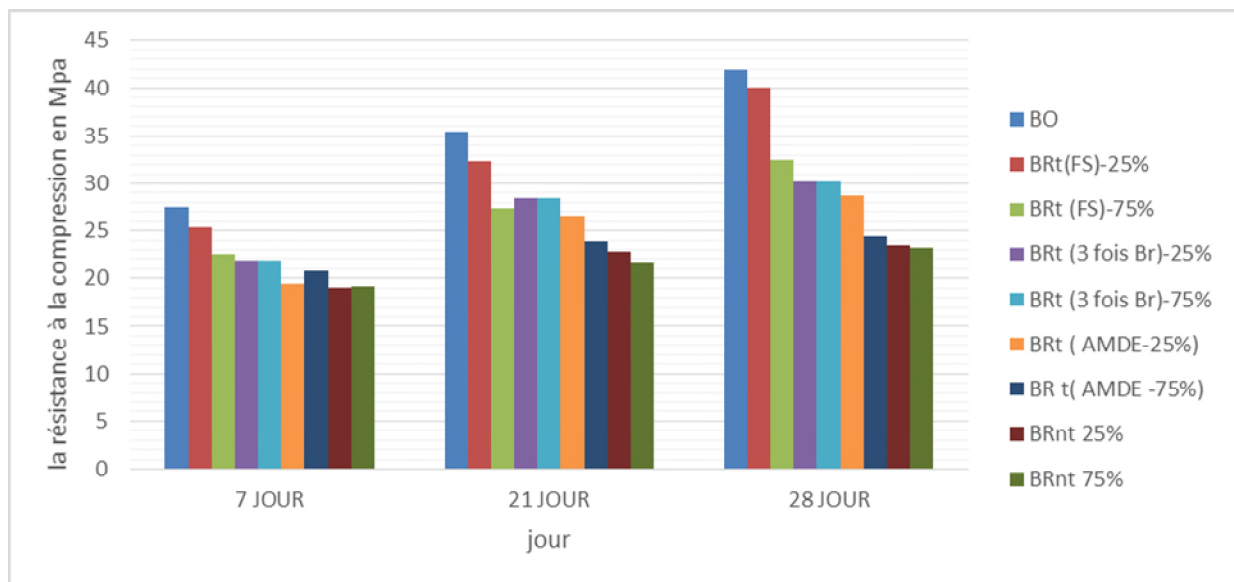
BR t(AMDE)-75%.	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,801	20,817	14 ,936	23,872	14,872	24,432
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,22	2,04	9,403	2,836	9,476	2,91

**Tableau .V.31.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR nt-25%.

BR nt-25%.	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cylindrique	14,70	19,08	14 ,80	22,76	14,89	23,43
	Traction Par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	8,84	1,365	8,88	1,77	8,96	1,89

**Tableau .V.32.** Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR nt 75%.

Compression						
7 jours			21 jours		28 jours	
Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
Cylindrique	14,76	19,13	14 ,80	21,56	14,81	23,25
Traction Par Flexion						
7 jours			21 jours		28 jours	
Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
Prismatique	8,4	1,35	8,80	1,56	8,92	1,59



**Figure .V.11.** Variation de la résistance moyenne de compression des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps

Les résultats de la résistance à la compression figure V.11 distinguent l'évolution des performances mécaniques des bétons en fonction de l'âge, du taux de remplacement en granulats recyclés et de la méthode d'amélioration utilisée.

### **Béton ordinaire (de référence)**

Le béton ordinaire présente les résistances les plus élevées, avec des valeurs de 27,53 MPa, 35,49 MPa et 41,95 MPa, respectivement, à 7, 21 et 28 jours. Cette performance est due à l'emploi de granulats naturels de meilleure qualité, offrant une structure plus dense et plus cohérente.

### **Béton recyclé non traité (BRnt)**

Le béton recyclé non traité présente des résistances plus faibles que le béton ordinaire. Cette dégradation est renforcée lorsque le taux de remplacement augmente : Avec 25 % de granulats recyclés, la résistance passe de 19,13 MPa (à 7 j) à 26,54 MPa (à 28 j). Et avec 75 % de granulats recyclés, elle est encore plus réduite, variant de 18,03 MPa (à 7 j) jusqu'à 23,90 MPa (à 28 j). Ceci est lié à la porosité plus importante des granulats recyclés, ce qui affaiblit l'assemblage de la matrice béton.

### **Béton recyclé avec la méthode d'amélioration chimique (fumée de silice + adjuvant)**

L'amélioration chimique compense en grande partie cette dégradation de résistance : Avec 25 % de remplacement, elle atteint 25,34 MPa (à 7 j), 32,34 MPa (à 21 j) et 39,98 MPa (à 28 j). Alors qu'avec 75 % de remplacement, elle se situe de 22,59 MPa (à 7 j) jusqu'à 32,42 MPa (à 28 j). Ainsi, l'adjonction de silice et d'adjuvant densifie la matrice et réduit l'impact négatif des granulats recyclés.

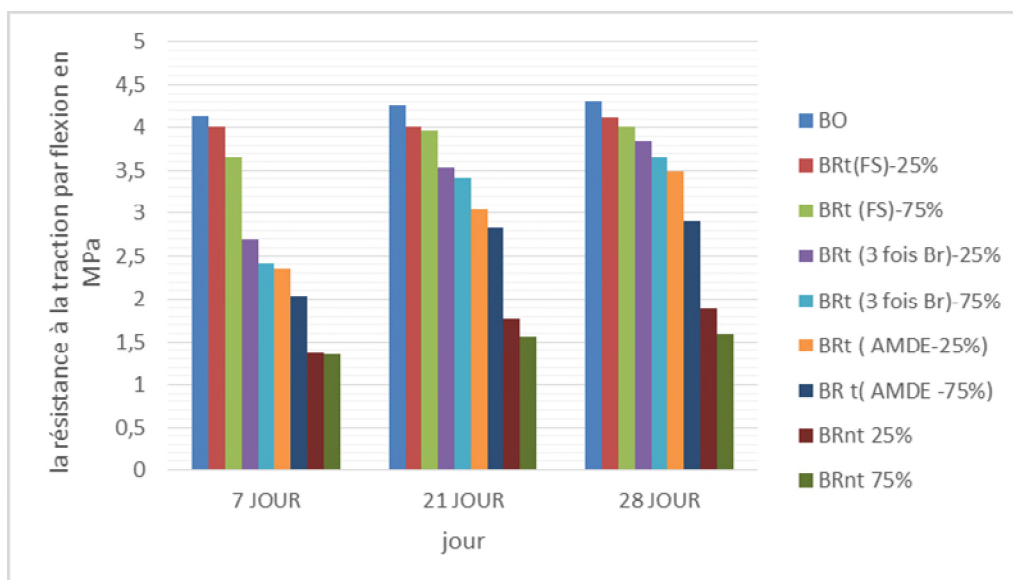
### **Béton recyclé avec l'approche de mélange en deux étapes**

Le béton ayant bénéficié d'une amélioration mécanique par triple broyage présente des performances intermédiaires : Avec 25 % de remplacement, la résistance évolue de 19,84 MPa (à 7 j) jusqu'à 28,66 MPa (à 28 j). Et avec 75 % de remplacement, elle va de 20,82 MPa (à 7 j) jusqu'à 24,432 MPa (à 28 j). Ainsi, le triple broyage a un impact positif sur l'assemblage des grains, ce qui se traduit par un gain de résistance, sans pour autant égaler le béton ordinaire ni le béton amélioré chimiquement.

### Béton recyclé avec la méthode d'amélioration mécanique (triple broyage)

L'approche de mélange en deux étapes montre des performances plus faibles que l'amélioration chimique : Avec 25 % de remplacement, elle varie de 21,82MPa (à 7 j) jusqu'à 30,216MPa (à 28 j). Avec 75 % de remplacement, elle évolue de 21,82MPa (à 7 j) jusqu'à 28,662 MPa (à 28 j). Cette technique semble donc offrir une résistance intermédiaire, sans combler l'écart avec le béton ordinaire.

En conclusion, le béton ordinaire affiche de meilleures performances mécaniques que toutes les formulations de béton recyclé. Cependant, l'emploi de méthodes d'amélioration, et en particulier l'adjonction de silice et d'adjuvant, permet de combler un grand part de l'écart de résistance, tandis que le triple broyage et le mélange en deux étapes contribuent, quant à eux, à limiter la dégradation des propriétés mécaniques.



**Figure .V.12.** Variation de la résistance moyenne à la traction par flexion des bétons traités par les trois méthodes d'amélioration des GR et les bétons non traités en fonction de temps

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion trois points sont représentés sur la figureV.12. Selon les résultats, l'évolution des performances mécaniques des bétons en fonction de l'âge, du taux de remplacement et de la méthode d'amélioration, le béton ordinaire présente les valeurs les plus élevées, avec des résistances de 4,13 MPa, 4,26 MPa et 4,31 MPa, respectivement à 7, 21 et 28 jours. Cette résistance diminue lorsque le béton est composé de granulats recyclés non traités, variant de 1,80 MPa (à 7 j) jusqu'à 2,02 MPa (à 28 j) avec 25 % de remplacement, et de 1,40 MPa (à 7 j) jusqu'à 1,79 MPa (à 28 j) avec 75 % de remplacement. L'adjonction de silice et d'adjuvant a permis d'accroître de

---

manière significative les performances, avec des valeurs proche de celles du béton ordinaire (jusqu'à 4,11 MPa à 28 j) lorsque le remplacement est de 25 %. Cette méthode est également assez efficace avec 75 % de remplacement (jusqu'à 4,01 MPa à 28 j). Le béton recyclé ayant bénéficié d'une amélioration mécanique par triple broyage affiche des résultats intermédiaires, variant de 2,69 MPa (à 7 j) jusqu'à 3,85 MPa (à 28 j) avec 25 % de remplacement, et de 2,42 MPa (à 7 j) jusqu'à 3,658 MPa (à 28 j) avec 75 % de remplacement. En ce qui concerne l'approche de mélange en deux étapes, elle montre des performances plus faibles que l'amélioration chimique et mécanique, avec des valeurs comprises, pour 25 % de remplacement, entre 2,35 MPa (à 7 j) et 3,490 MPa (à 28 j), et pour 75 % de remplacement, de 2,04 MPa (à 7 j) jusqu'à 2,91 MPa (à 28 j). Cette observation souligne l'intérêt des méthodes d'amélioration, en particulier chimiques, afin d'accroître la résistance des bétons intégrant des granulats recyclés.

# Conclusion générale et perspectives

---

## Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de ce mémoire était d'évaluer l'influence de différentes méthodes d'amélioration sur la qualité des granulats recyclés (GR) et leurs effets sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons recyclés (BGR). Les granulats recyclés, à l'état brut, présentent des caractéristiques physiques et mécaniques nettement moins favorables que les granulats naturels (GN), notamment, une porosité élevée, un taux d'absorption d'eau supérieur à 5 %, une densité apparente plus faible, la présence de résidus de pâte de ciment durcie, et des performances mécaniques réduites (valeurs élevées de l'indice Los Angeles (LA) et de Micro-Deval (MDE)).

Ces propriétés dégradées influencent négativement les performances des bétons fabriqués avec ces granulats non traités, en entraînant une perte significative de résistance à la compression, une perméabilité accrue et une faible cohésion de la matrice. Ces effets sont particulièrement prononcés lorsque le taux de substitution dépasse 25 %, rendant l'usage de GR non traités peu adapté aux ouvrages à exigences structurelles élevées.

Pour surmonter ces limitations, trois techniques d'amélioration des GR ont été mises en œuvre, l'amélioration chimique par fumée de silice a permis de combler les pores résiduels, de densifier la zone interfaciale pâte-granat et de réduire l'absorption d'eau. Cette méthode s'est avérée la plus efficace, offrant une amélioration marquée de la résistance à la compression, y compris à 75 % de substitution, et une meilleure compacité globale du béton. L'amélioration mécanique par triple broyage a contribué à réduire la pâte de ciment résiduelle et à améliorer la texture des granulats. Bien que légèrement moins performante que l'amélioration chimique, cette méthode a tout de même permis une augmentation significative des propriétés mécaniques et une réduction des valeurs de LA et MDE. L'approche de mélange en deux étapes (AMDE), quant à elle, a permis une répartition plus homogène de la pâte et une meilleure compacité du béton. Toutefois, les résistances mécaniques obtenues avec l'AMDE restent inférieures à celles des deux autres méthodes. Bien qu'acceptables, ces performances traduisent une efficacité limitée de cette approche pour compenser pleinement les défauts des GR.

Les résultats expérimentaux montrent aussi que, à 25 % de substitution, les performances mécaniques des BGR sont proches de celles du béton témoin lorsque les GR sont traités, notamment par amélioration chimique ou mécanique.

À 75 % de substitution, les GR non traités entraînent une baisse importante de résistance, alors que les GR traités, surtout chimiquement, permettent de maintenir des propriétés mécaniques encore compatibles avec les normes du béton structurel.

L'essai d'affaissement souligne que l'ouvrabilité des bétons est influencée tant par le pourcentage de granulats recyclés que par le mode d'amélioration mis en place. Cette propriété est un facteur important pouvant conditionner leur mise en œuvre sur chantier et leur compacité finale.

Enfin, cette étude met en évidence que l'utilisation de granulats recyclés non traités conduit à une dégradation significative des performances du béton, rendant leur emploi limité sans amélioration préalable. En revanche, l'application de méthodes de traitement en particulier l'amélioration chimique et mécanique permet de corriger les défauts initiaux des GR, tant sur le plan physique que mécanique avec des gains notables en termes de résistance et compacité.

L'approche AMDE, bien qu'intéressante pour sa simplicité de mise en œuvre, reste moins performante et devrait être considérée pour des applications non structurelles ou en complément d'autres améliorations.

La valorisation des déchets de béton à travers des techniques d'amélioration adaptées s'inscrit donc pleinement dans une démarche de construction durable, permettant d'allier performance technique et réduction de l'impact environnemental dans le secteur du bâtiment.

### **Perspectives**

À partir de cette conclusion, plusieurs perspectives de recherche et d'application peuvent être dégagées. Elles s'inscrivent dans la continuité du travail réalisé, en vue de l'approfondissement scientifique, de l'optimisation technique, et de la valorisation industrielle des granulats recyclés dans les bétons de construction.

#### **1. Optimisation combinée des méthodes d'amélioration**

Bien que l'étude ait évalué séparément les effets de l'amélioration chimique, mécanique et de l'approche par mélange en deux étapes (AMDE), une piste pertinente consisterait à combiner

deux ou plusieurs méthodes, par exemple l'amélioration mécanique suivie d'un traitement chimique, afin de maximiser la performance des granulats recyclés.

### **2. Extension à d'autres types de déchets et adjuvants**

Il serait intéressant d'élargir l'étude à d'autres types de déchets minéraux ou industriels (cendres volantes, laitiers, métakaolin) pour comparer leurs effets synergiques avec ceux de la fumée de silice sur la microstructure et la durabilité des BGR.

### **3. Étude du comportement à long terme**

Les performances mécaniques à court terme sont prometteuses, mais il conviendrait d'évaluer la durabilité à long terme (perméabilité, carbonatation, cycles gel/dégel, résistance chimique, fluage et retrait) des BGR contenant des GR améliorés, afin de valider leur emploi dans des ouvrages soumis à des contraintes environnementales sévères.

# Références

---

## Références

1. NADOUR, Y., *Propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des bétons autoplaçants à base de granulats recyclés*, 2023, HAMRAT Mostefa/BOULEKBACHE Bensaid.
2. Driss, D., *MATERIAUX Recyclés*.
3. Pacheco-Torgal, F. and Y. Ding, *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. 2013: Elsevier.
4. GRONDIN, A., *Valorisation des granulats recyclés de béton: Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton*, 2011, INSA de Strasbourg.
5. Fnb, L., *Déchets de chantier de bâtiment. Les actions de la Fédération nationale du bâtiment. Environnement, Ingénierie & Développement*, 1997.
6. Djama, Z., *Comportement mécanique et rhéologique des bétons à base des granulats recyclés*, 2015, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou.
7. Le, L., *Déchets de chantiers de bâtiment. enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME*, 1999.
8. Osaily, Y., A. Copping, and S. McCann. *Demolition project management pathways: the route towards circular demolition*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. IOP Publishing.
9. Naouaoui, K., A. Bouyahyaoui, and T. Cherradi, *Concrete Recycling: Social and Environmental Technical Gain for Smart Cities*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020. **44**: p. 309-311.
10. de Larrard, F. and H. Colina, *Le béton recyclé*, 2018, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l' ...
11. Allam, A.S. and M. Nik-Bakht, *From demolition to deconstruction of the built environment: A synthesis of the literature*. Journal of Building Engineering, 2023. **64**: p. 105679.
12. Bourmer, A., *Barcelona:[mit grossem Cityplan]*. 2013: Baedeker.
13. Xu, Y. and R. Jin, *Multi-functional concrete with recycled aggregates*. 2022: Elsevier.
14. Schaeffer, A., *Recyclage: nous avons tous un rôle à jouer*. 2017.
15. Chen, H.-J., T. Yen, and K.-H. Chen, *Use of building rubbles as recycled aggregates*. Cement and concrete research, 2003. **33**(1): p. 125-132.
16. BOUDALI, S., *La Durabilité de Béton autoplaçant à base de granulats recyclées*, 2018, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ...
17. Beltrán, M.G., et al., *Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates*. Construction and Building Materials, 2014. **72**: p. 231-238.
18. Tam, V.W., C.M. Tam, and K.N. Le, *Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches*. Resources, Conservation and Recycling, 2007. **50**(1): p. 82-101.
19. Caneda-Martínez, L., et al., *Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance*. Cement and Concrete Composites, 2022. **131**: p. 104608.
20. 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.
21. Agrela, F., et al., *Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain*. Resources, Conservation and Recycling, 2012. **58**: p. 98-106.
22. Ferreira, L., J. De Brito, and M. Barra, *Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties*. Magazine of Concrete Research, 2011. **63**(8): p. 617-627.

23. 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.
24. De Larrard, F. and T. Sedran, *Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model*. Cement and concrete research, 1994. **24**(6): p. 997-1009.
25. Barbudo, A., et al., *Photocatalytic recycled mortars: Circular economy as a solution for decontamination*. Applied Sciences, 2020. **10**(20): p. 7305.
26. 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.
27. Boulay, V., R. GAGNÉ, and R. MORIN, *Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel*, 2014, Université de Sherbrooke.
28. Santillán, L.R., C.J. Zega, and E.F. Irassar, *Current Knowledge and Pending Research on Sulfate Resistance of Recycled Aggregate Concrete*. Sustainability, 2024. **16**(3): p. 1310.
29. Tang, W., et al., *Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**(1): p. 2761294.
30. Simon, H., *Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers*. 2019.
31. Li, J., H. Xiao, and Y. Zhou, *Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(3): p. 1287-1291.
32. Ebohon, O. and J. Momoh, *Existing sustainability rating systems in adopting waste reuse, in Multi-Functional Concrete with Recycled Aggregates*. 2023, Elsevier. p. 347-361.
33. Agrela, F., P. Alaejos, and M. De Juan, *Properties of concrete with recycled aggregates, chapter 12*, 2013, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead ....
34. Mistri, A., et al., *A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials*. Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117894.
35. Linß, E. and A. Mueller, *High-performance sonic impulses—an alternative method for processing of concrete*. International Journal of Mineral Processing, 2004. **74**: p. S199-S208.
36. Oikonomou, N.D., *Recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(2): p. 315-318.
37. Poon, C.S., Z. Shui, and L. Lam, *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*. Construction and Building Materials, 2004. **18**(6): p. 461-468.
38. Bru, K., et al., *Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste*. International Journal of Mineral Processing, 2014. **126**: p. 90-98.
39. Zega, C.J. and A.A. Di Maio, *Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(5): p. 2047-2052.
40. Zhang, C., et al., *An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe*. Science of the Total Environment, 2022. **803**: p. 149892.
41. Fernando, D., et al., *Study of technological advancement and challenges of façade system for sustainable building: Current design practice*. Sustainability, 2023. **15**(19): p. 14319.
42. Katz, A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and concrete research, 2003. **33**(5): p. 703-711.
43. Xuan, D., B. Zhan, and C.S. Poon, *Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2017. **84**: p. 214-221.

44. Poon, C.S., S. Kou, and L. Lam, *Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks*. Construction and Building Materials, 2002. **16**(5): p. 281-289.
45. Shao, Y., et al., *Studies on concrete containing ground waste glass*. Cement and concrete research, 2000. **30**(1): p. 91-100.
46. Liang, C., et al., *Carbonation behavior of recycled concrete with CO<sub>2</sub>-curing recycled aggregate under various environments*. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2020. **39**: p. 101185.
47. Serifou, M., *Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation*, 2013, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I; Université Félix Houphouët ....
48. Mohamed El Amine, M. and B. Amar, *Effet de la qualité de béton d'origine sur les caractéristiques d'un béton élaboré avec des agrégats recyclés*, 2024, université Ibn Khaldoun.
49. Domingo-Cabo, A., et al., *Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(7): p. 2545-2553.
50. Bravo, J., *J. Bravo*. SCRIPTA THEOLOGICA, 1994. **26**: p. 2.
51. Brito, J.d. and R. Robles, *Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties*. 2010.
52. 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.
53. Fonseca, N., *FONSECA*. Dados, 2024. **10**(04): p. 27-03.
54. Diaz, N.K.S. and N. Karina, *Valorisation des granulats recyclés dans le béton pour les pavages et trottoirs*, 2018, Université de Sherbrooke.
55. Fan, C.-C., et al., *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 708-715.
56. Agrela, F., et al., *Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(10): p. 3950-3955.
57. Tam, V.W., X. Gao, and C.M. Tam, *Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. Cement and concrete research, 2005. **35**(6): p. 1195-1203.
58. Topcu, I.B. and S. Şengel, *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate*. Cement and concrete research, 2004. **34**(8): p. 1307-1312.
59. Yang, J., Q. Du, and Y. Bao, *Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(4): p. 1935-1945.
60. Zega, C.J. and Á.A. Di Maio, *Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements*. Waste management, 2011. **31**(11): p. 2336-2340.
61. Yu, B., *Les caractéristiques mécaniques et la microstructure du béton des granulats recyclés a hautes performances*, 2012, Université de Lorraine.
62. Agrela, F., P. Alaejos, and M.S. De Juan, *Properties of concrete with recycled aggregates*, in *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. 2013, Elsevier. p. 304-329.
63. 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.
64. Tuyan, M., A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, *Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate*. Materials & Design, 2014. **53**: p. 983-991.
65. Gholampour, A., A.H. Gandomi, and T. Ozbakkaloglu, *New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming*. Construction and Building Materials, 2017. **130**: p. 122-145.
66. Andal, J., M. Shehata, and P. Zacarias, *Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality*. Construction and Building Materials, 2016. **125**: p. 842-855.
67. Bairagi, N., K. Ravande, and V. Pareek, *Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates*. Resources, Conservation and Recycling, 1993. **9**(1-2): p. 109-126.

- 
68. Limbachiya, M., T. Leelawat, and R. Dhir, *Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete*. *Materials and Structures*, 2000. **33**: p. 574-580.
  69. Pereira, P., L. Evangelista, and J. De Brito, *The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 2012. **34**(9): p. 1044-1052.
  70. ADDA, B. and T. AZZOUZ, *Étude expérimentale d'un béton à hautes performances recyclé à base de fumée de silice (Granitex, Sika)*, 2021, FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL.
  71. Alaejos, P., et al., *Recycled aggregates for structural concretes*. Research Project CLEAM for Spanish Ministry of Environmental Affairs, December, 2010.
  72. Nixon, P., *Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review*. *Matériaux et Construction*, 1978. **11**: p. 371-378.
  73. Kikuchi, M., et al. *Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 1—Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete*. in *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, London, UK on 11–12 November 1998*. 1998. Thomas Telford Publishing.
  74. Yoda, K. and A. Shintani, *Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements*. *Construction and Building Materials*, 2014. **67**: p. 379-385.

# Annexes

---

---

## Annexe 1: Formulation de béton

Le béton est un mélange de constituants de base dont on dissocie:

**La partie liante du béton (solide) :** Elle assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant. Elle se compose de ciment, d'eau et éventuellement d'additions minérales (filler calcaire, filler siliceux, laitier de haut fourneau, fumée de silice, cendres volantes, métakaolin...).

**Le squelette (solide):** Cette phase constituée de granulats, généralement inertes, occupe la majorité du volume. Elle participe aux propriétés générales du matériau à l'état frais et durci.

**La partie liquide :** Elle englobe l'eau et l'adjuvant. L'eau entre dans la réaction chimique avec le liant pour former les hydrates, mais est toujours largement excédentaire par rapport aux besoins de hydratation du ciment afin d'assurer une certaine rhéologie à l'état frais. Ces excédents introduisent une porosité résiduelle dans le matériau qui dégrade l'ensemble des propriétés (durabilité, résistance, etc). Les adjuvants améliorent les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci.), un adjuvant est incorporé lors du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5 % des éléments fins. Il existe 11 familles d'adjuvants (entraîneur d'air, super plastifiant, retardateur de prise, etc).

**L'air (gazeux) :** Le béton renferme toujours une certaine quantité d'air, appelé air occlus, car des bulles d'air sont piégées lors du malaxage. Cette quantité d'air, qui varie de 1 à 2,5 % en absence de produit entraîneur d'air et peut atteindre 4 à 8 % en Présence d'entraîneur d'air, influe sur les performances mécaniques du matériau durci.

L'étude de la formulation a pour but de sélectionner les constituants du béton et de choisir Leur proportion dans le but de répondre à un cahier des charges. Le cahier des charges minimum, imposé concerne la résistance, la maniabilité et la durabilité.

### Méthode de Dreux-Gorisse

L'étude de la composition du béton implique de déterminer le mélange idéal des divers éléments (granulat, eau, ciment) pour produire un béton qui possède les caractéristiques souhaitées (résistance, consistance). On propose une multitude de techniques. Et il n'est pas possible de toutes les citer ; elles se traduisent par des mesures volumétriques ou, idéalement, pondérales, le passage de l'une à l'autre pouvant être effectué, si besoin, en fonction de la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Synthétise les diverses techniques de l'époque .pour en dériver une méthode pratique et simplifiée de formulation adaptée aux matériaux. Cette technique repose sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue qui vise à créer un squelette granulaire le plus compact possible et à optimiser la proportion de ciment et d'eau dans les bétons standards.

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

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides ;
- Détermination de la compacité du béton ;
- Détermination des masses de granulats.

Les résultats relatifs à chaque étape de calcul seront consignés dans le chapitre 5.

### Objectif

En tenant compte des normes de maniabilité et de durabilité établies, il convient de déterminer le type et les quantités idéales de matériaux requis pour la production d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m<sup>3</sup>). Ceci consiste à déterminer, selon le genre de structure à construire, les critères indispensables pour l'application du béton et la stabilité de l'édifice à court et long terme. Les critères essentiels à déterminer incluent : la maniabilité et la robustesse du béton, le type de ciment utilisé ainsi que la variété de granulats.

### Critère de maniabilité

La maniabilité est caractérisée, entre autres, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff.). Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier (tableau)

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
<b>0 à 4</b>	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
<b>5 à 9</b>	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
<b>10 à 15</b>	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
<b>≥ 16</b>	Fluide	FI	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

### Critère de résistance

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique  $\sigma'_{28}$ .

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

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}$$

### Choix du ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie  $\sigma'_c$  et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...). La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantit une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabricant est donnée dans le tableau.

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

### Détermination du rapport C/E

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

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma_c \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

$\sigma'_{28}$  = 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 ;

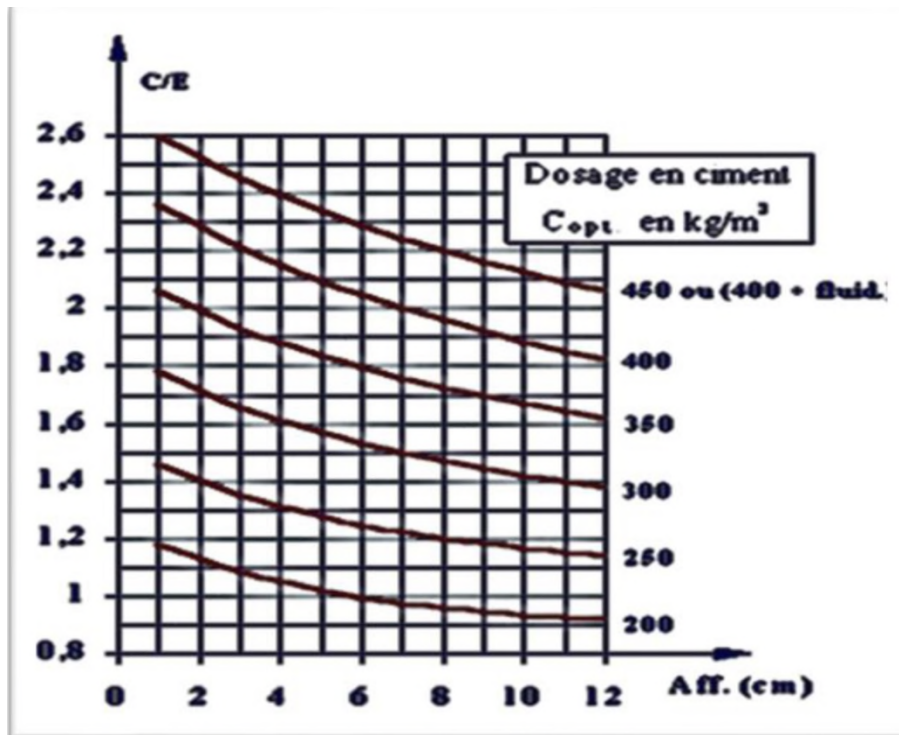
E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m<sup>3</sup> de béton ;

G' = Coefficient granulaire (Tableau) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Qualité des granulats	Dimension Dmax des granulats		
	Fins Dmax < 12,5 mm	Moyens 20 < Dmax < 31,5	Gros Dmax > 50 mm
<b>Excellente</b>	0,55	0,60	0,65
<b>Bonne, courante</b>	0,45	0,50	0,55
<b>Passable</b>	0,35	0,40	0,45

### Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure(I.10) en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams



Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C<sub>opt.</sub>. Au-delà de 400 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluide.).

### Détermination de E

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

### Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E

Lorsque la dimension maximale des granulats D<sub>max</sub> est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

Les corrections (Tableau) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé).

Dimension maximale des granulats (Dmax en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

### Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence ;
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux Tracé de la droite de référence de Dreux :
- La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :
- En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm } X = \frac{D_{\max}}{2}$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm } \text{Module } (X) = \frac{\text{Module } (D_{\max}) + 38}{2}$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1,25(D_{\max})} + k \text{ Avec } k' = K + K_s + K_p$$

Y:est donné en pourcentage de passants cumulés

K:est un coefficient donné par le tableau 1.6, K<sub>s</sub> et K<sub>p</sub> étant des coefficients correctifs définis par :

K<sub>s</sub>:(correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$$K_s = (6 \text{ Mfs} - 15)$$

Avec Mf : le module de finesse du sable ;

K<sub>p</sub> : (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

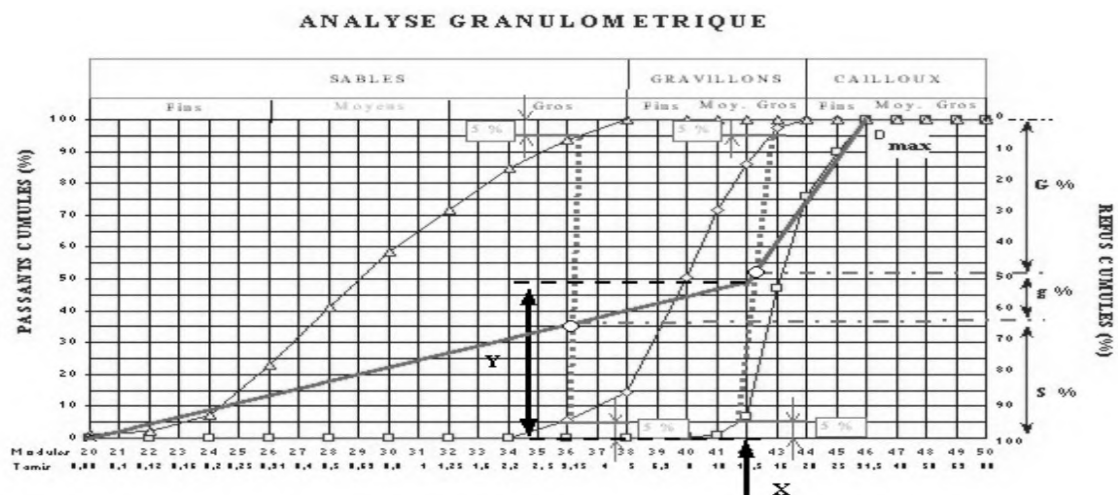
$K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

	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 + Fluide	- 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

La droite de Dreux a pour origine les point 0 origines du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats

### Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire



**Détermination de la compacité du béton :**

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m<sup>3</sup> de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c<sub>0</sub> est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tab). Des corrections (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> et c<sub>3</sub>) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tab) :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c)$$

Où V<sub>c</sub> est le volume de ciment défini par :

$$V_c = \frac{c}{\rho_s(c)}$$

Où ρ<sub>s</sub> (c) est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

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  $G$ ) :

$$\left. \begin{aligned} V_s &= V \cdot S \% \\ V_g &= V \cdot g \% \\ V_G &= V \cdot G \% \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} S &= V \cdot S \% \cdot \rho_s(S) \\ g &= V \cdot g \% \cdot \rho_s(g) \\ G &= V \cdot G \% \cdot \rho_s(G) \end{aligned} \right\}$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes :

$$\rho_s(c) = 3,1 \text{ t/m}^3, \rho_s(S) = 2,6 \text{ t/m}^3, \rho_s(g) = 2,6 \text{ t/m}^3 \text{ et } \rho_s(G) = 2,6 \text{ t/m}^3$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes :

$$\rho_s(c) = 3,1 \text{ t/m}^3, \rho_s(S) = 2,6 \text{ t/m}^3, \rho_s(g) = 2,6 \text{ t/m}^3 \text{ et } \rho_s(G) = 2,6 \text{ t/m}^3$$

**Obtention de la formulation théorique de béton :**

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable

S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton

$\Delta_0 = (E + C + S + g + G)$  est pour un béton courant comprise entre 2,3 t/m<sup>3</sup> et 2,5 t/m<sup>3</sup>. La

Formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais

De laboratoire avant d'être utilisée.

## Annexe 2: Fiche technique de Ciment



**AMOUDA  
CIMENT**



# AWTED

CIMENT AUX PERFORMANCES ÉLEVÉES  
(SUPER STRUCTURES)  
NA 442-CEM II/A-L 42.5 N

### CONFORMITÉ PRODUIT

NA442 : 2013 – EN 197-1 : 2012,

### DESIGNATION NORMALISEE

NA 442-CEM II/A-L 42.5 N.

### OUVRAGES EN MILIEUX NON AGRESSIFS

Coulage par temps chaud,

### TRANSPORT DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

#### FABRICATION

-PRODUIT 100% ALGERIEN

-Fabrication exclusive à l'usine Amouda Ciment  
sise à El Beida Laghout,

### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

#### PROPRIETES CHIMIQUES

NA 5042 (EN 196-2) : SO<sub>3</sub> ≤ 3,5%

NA 5042 (EN 196-2) : chlorure ≤ 0,1%

#### PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mn

NA 234 (EN 196-1) :

-Résistance à la compression 2 jours > 10 Mpa

-Résistance à la compression 28 jours > 42.5 Mpa

### EMPLOIS ET USAGES CONFORME À VOS PROJETS

- Ouvrages en béton armé.
- Bétons autoplaçants.
- Dallages.
- sols industriels , chapes.
- Fondations.
- Travaux souterrains.
- Voiries et chaussées en béton.



### NOS PRODUITS AUSSI



#### AL ESSE

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5.  
Ciment Résistant aux Sulfates.



#### AL IMRAN

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R.  
Ciment pour les  
professionnels de la  
construction

POUR PLUS D'INFORMATION VEUILLEZ CONSULTER NOTRE SITE WEB :

[www.amoudaciment.com](http://www.amoudaciment.com)

Email : [service.clients@amoudaciment.com](mailto:service.clients@amoudaciment.com)

#### Direction commerciale

Lotissement 202, Section 4, Zone d'activité Amara,  
Chéraga, Alger.  
Tél. : 023 305 515 Région Nord : 0655 521 235  
Fax : 023 30 55 14 Région Sud : 0658 363 463



#### Coordonnées usine

Commune El-Bedha, Gueltat Sidi Saad,  
wilaya de LAGHOUAT  
Tél. : 029 173 490 Spécialiste Qualité : 0658 403 772  
Fax : 029 17 34 91





# أوتاد

إسمنت ذو كفاءة عالية،  
(المنشآت الضخمة)  
NA 442-CEM II/A-L 42.5 N



## التطبيقات و الإستعمالات حسب مشاريعكم

- منشآت بالإسمنت المسلح.
- خرسانة ذاتية التسوية.
- التبليط.
- أرضيات صناعية، أرضيات إسمنتية.
- أساسات.
- منشآت تحت أرضية.
- أشغال الطرق والطرق الإسمنتية.

## منتجاتنا الأخرى



### العمران

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R  
إسمنت لمحترفي البناء



### الأساس

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5  
إسمنت مقاوم للكبريتات

للمزيد من المعلومات، يرجى زيارة موقعنا على الانترنت :  
[www.amoudaciment.com](http://www.amoudaciment.com)  
البريد الإلكتروني : [service.clients@amoudaciment.com](mailto:service.clients@amoudaciment.com)

AMOUDA  
CIMENT



## مطابقة المنتج

NA442 : 2013 - EN 197-1 : 2012

### الصفة المعيارية

NA 442-CEM II/A-L 42.5 N

### المنشآت في الأوساط غير العدوانية

الأشغال في الأجواء الحارة.

### لقل الخرسانة الجاهزة للإستعمال البيئات

- منتج 100% جزائري.
- منتج حصريا في مصنع امودا للإسمنت بمنطقة البيضاء - الأغواط

## المميزات

### الخصائص الكيميائية

NA 5042 (EN 196-2) : SO3 ≤ 3.5%

NA 5042 (EN 196-2) : chlorure ≤ 0.1%

### الخصائص الفيزيائية الميكانيكية

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mm

NA 234 (EN 196-1) :

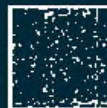
- مقاومة الضغط (يومين) < 10 MPa
- مقاومة الضغط (28 يوم) < 42,5 MPa



### المصنع :

بلدية البيضاء قلعة سيدي سعد  
ولاية الأغواط  
الهاتف : 029 173 490  
الفاكس : 029 17 34 91

مخمس النوعية: 0656 403 772



### المديرية التجارية:

المنطقة الصناعية مجموعة ملكية رقم 202 قسم 04  
تسراقة الجزائر

الهاتف : 023 305 515 المنطقة الشمالية : 0655 521 235

الفاكس : 023 30 55 14 المنطقة الجنوبية : 0658 36 3 463

## Annexe 3: Fiche technique de Adjuvant superplastifiant SikaPlast-40 Pro



### NOTICE PRODUIT

# SikaPlast®-40 Pro

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération

#### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

SikaPlast®-40 Pro est un superplastifiant haut réducteur d'eau, à base de polycarboxylates modifiés.

#### DOMAINES D'APPLICATION

SikaPlast®-40 Pro est un superplastifiant/haut réducteur d'eau qui permet d'obtenir un long maintien de rhéologie. Il est donc parfaitement adapté au BPE et à l'utilisation sur chantier.

SikaPlast®-40 Pro permet la fabrication de :

- bétons de consistance S3 et S4,
- bétons à différents rapports E/C,
- bétons pompés.

Dans les bétons fluides, SikaPlast®-40 Pro améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule plus robuste vis-à-vis des variations de dosage en eau et des propriétés des constituants.

#### DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Bidon 5 kg Bidon 10 kg Cubi 1100 kg
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et ré-homogénéisé
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Densité	1,055 ± 0,015
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %

#### RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage de dosage : 0,7 à 2,5% du poids de liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
--------	--

Notice produit  
SikaPlast®-40 Pro  
Octobre 2023, Version 01.03  
021301011000003541

**Distribution**

SikaPlast®-40 Pro est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage

**VALEURS DE BASE**

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

**ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ**

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

**INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION**

SikaPlast®-40 Pro est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

**RESTRICTIONS LOCALES**

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

**INFORMATIONS LÉGALES**

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika E. Daza® SPA  
09 route de Larbaa  
16111 Les Eucalyptus  
ALGERIE  
Tél: 0 23 88 89 92 09  
Fax: 0 23 88 89 92 08  
dza.sika.com



Notice produit  
SikaPlast®-40 Pro  
Octobre 2023, Version 01.03  
021301011000003541

SikaPlast-40Pro-Ir-02-110-2023-1-3.pdf



## Annexe 4: Fiche technique de Fumée de silice Tekna Chem



Rév.  
0  
07/22









# POUDRE SILTEK

« Fumée de silice » - Smicrosilicates micronisés actifs lilice sélectionnés de haute pureté

### DESCRIPTION

SILTEK POWDER est un produit en poudre composé d'une excellente silice micronisée, communément appelée « fumée de silice ».

SILTEK POWDER pour sa teneur élevée en silice et en microsilicates actifs et pour sa très grande surface spécifique est considérée aujourd'hui comme l'un des meilleurs matériaux à haute activité pouzzolanique.

### FONCTIONNALITÉS

SILTEK POWDER se compose de 93 à 98% de particules sphériques de SiO<sub>2</sub> amorphe d'une taille maximale de quelques dixièmes de micron, de sorte que sa surface spécifique est d'environ 220 000 cm<sup>2</sup> / g (Blaine). Caractéristique qui lui confère une grande capacité à capturer et à fixer l'hydrate de calcium [Ca(OH)<sub>2</sub>] et à le transformer d'abord en silicate hydraté, puis en silicate de calcium stable et irréversible.

Cette particularité vous permet de modifier le comportement des mélanges de ciment à la fois à l'état humide et à l'état durci.

Il faut dire que dans tous les mélanges contenant du ciment, pour obtenir une bonne maniabilité, il est nécessaire d'utiliser une quantité d'eau toujours supérieure à celle nécessaire à l'hydratation du ciment, ce qui implique dans la pâte de ciment durcie la formation de capillaires et de cavités plus nombreuses est grande la quantité d'eau utilisée. De plus, lors de l'hydratation du ciment, une certaine quantité de chaux libre est formée qui est disposée dans les cavités disponibles. Ce comportement rend le conglomérat durci vulnérable, en raison d'agents externes, ce qui réduit sa durabilité.

SILTEK POWDER ajouté au mélange à raison de 3 à 5 % sur le poids du ciment, capture et réagit avec la chaux libre, remplissant les vides présents dans la pâte de ciment, ce qui rend le conglomérat plus compact, plus imperméable et plus résistant et par conséquent plus durable dans le temps et avec une meilleure apparence.

### APPLICATIONS

SILTEK POWDER trouve ses principales applications dans tous les bétons et mortiers de qualité.

SILTEK POWDER est utilisé dans la préparation de:

- bourreaux protétifs
- bourreaux pour les injections de consolidation
- bourreaux expansifs
- mortiers ou bétons à haute résistance mécanique
- mortiers ou bétons à haute imperméabilité
- bétons précontraints résistants aux agressions chimiques
- mortiers ou bétons pour applications sous-marines en particulier dans des environnements agressifs
- mortiers thixotropes pour la restauration
- mortiers anti-retrait, pré-mélangés et humides.

FEUILLE



TKNA CHEM S.p.A.

Instalaceent, Rendre (MR) - Rue Sotom, 7 - 20036 - TÈ - +39 0462 91 8111

Web: [www.teknachemgroup.com](http://www.teknachemgroup.com) - Courriel: [info@teknachemgroup.com](mailto:info@teknachemgroup.com) - Téléphone: +39

0262 81 93 86

1/3

# POUDRE SILTEK



Cependant, à chaque occasion où le mortier ou le béton est nécessaire pour obtenir des performances supérieures, telles que:

- résistance mécanique
- résistance chimique
- résistance à l'usure et imperméabilité à la cavitation
- stabilité et cohésion
- durabilité globale

Il est également utilisé pour réduire la purge des bétons, dans les bétons pompables et dans les bétons présentant des caractéristiques mécaniques et de durabilité élevées.

SILTEK POWDER est également particulièrement recommandé pour les bétons dont la construction de la courbe granulométrique a révélé un manque de finesse.

## GRANULOMÉTRIE

Dans SILTEK POWDER, la taille moyenne des particules est de 0,1 µm (micron). La très petite taille des particules de cette poudre se traduit par une énorme surface spécifique qui nécessite une plus grande quantité d'eau. Par conséquent, pour le bon fonctionnement de SILTEK POWDER dans la production de béton, il est toujours recommandé de l'utiliser en combinaison avec un bon superfluidifiant de la ligne SUPERIOR ou UNICUM.

## PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Énoncé physique

Couleur argentée foncée

Distribution granulométrique de 0,05 à 0,15 µm

Densité: 0,5 kg/dm

Solubilité dans l'eau soluble

## COMPOSITION

SiO <sub>2</sub>	>96%
CaO	<3 %
MgO	<3 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<3%
à zO <sub>2</sub>	<3 %
autres	composants traces

## DOSAGE

Le dosage de SILTEK POWDER est de 3 à 5 % sur le poids du ciment en fonction du mélange à ajouter et des caractéristiques souhaitées. Cependant, des doses autres que celles recommandées après des tests d'orientation préventifs peuvent être utilisées.

## ASSAISONNEMENT DU BÉTON

Les réactions dans l'environnement pouzzolanique sont assez longues et se déroulent dans un environnement humide; pour cette raison, un assaisonnement correct du mortier ou du béton est nécessaire afin d'éviter un séchage trop rapide.

À cet égard, il est conseillé de protéger les jets, lors de la première phase de durcissement, avec des feuilles de polyéthylène, puis d'appliquer un film d'anti-évaporation TEKNAPUR 31 sur les surfaces exposées, ce qui évitera une évaporation rapide des jets, permettant une réaction pouzzolanique correcte à ceux-ci.

## PACKS

Les packages dépendront des caractéristiques physiques (version ND, SD, D)

Vrac dans des réservoirs.

Big-bags de 600 à 1250 kg

Sacs de 9 à 12 kg.

FEUILLE



TEKNA CHEM S.p.A.

Craibosson (MI) - Viale Sottano, 11 - 20038 - Tel. +39 0362 91 81 11

Site internet: [www.teknahegroup.com](http://www.teknahegroup.com) - Courriel: [info@teknahegroup.com](mailto:info@teknahegroup.com) - Téléphone: +39 0362 91 93 96

2/3

# POUDRE SILTEK



## VALIDITÉ

SILTEK POWDER, s'il est stocké dans un endroit sec et dans les sacs d'origine parfaitement fermés, est valable 12 mois.

L'humidité finalement adsorbée par le produit n'affecte pas son efficacité, mais rend son dosage difficile et imprécis ainsi qu'une distribution homogène dans le mélange fini.

Il est donc conseillé de fermer soigneusement les sacs après chaque retrait.

SILTEK POWDER est disponible en vrac, en big-bags ou en sacs.

Le produit en vrac est transporté avec les torpilles classiques et peut être stocké dans des silos à ciment normaux et dosé avec l'équipement de l'usine de dosage.

## AVERTISSEMENTS

SILTEK POWDER est inoffensif au contact de l'épiderme.

Il est facilement enlevé avec du savon et de l'eau de n'importe quelle surface.

Par inhalation, il peut provoquer une légère irritation des voies respiratoires supérieures, de sorte que l'utilisation du masque anti-poussière est recommandée.

En cas de perte accidentelle, il doit être collecté à l'état sec et éliminé dans une décharge autorisée.

## IFGAI

Les informations contenues dans cette fiche technique, bien que représentant le stade de connaissance le plus avancé, ne dispensent pas l'utilisateur d'effectuer des tests préliminaires précis dans ses conditions d'utilisation et de fonctionnement. Nous déclinons donc toute responsabilité pour l'utilisation inappropriée du produit.

FEUILLE



TEKNA CHEM S.p.A.

Craftsman srl - Via del Lavoro - 20038 - 041 435 0362 91 81 11

Site internet: [www.teknahegroup.com](http://www.teknahegroup.com) - Courriel: [info@teknahegroup.com](mailto:info@teknahegroup.com) - Téléphone: +39 0362 91 93 96

3/3