

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)  
Faculté du Génie de la Construction

**Département de Génie Civil**



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du diplôme de master  
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Structures**

### ***Thème***

**Caractérisation expérimentale du béton à base de granulats  
recyclés.**

*Présenté par : Mme Ifrene Thafrara*

*Devant le jury composé de :*

<i>Mr. BOUAFIA YOUCEF</i>	<i>professeur à l'UMMTO</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr. ATLAOUI DJAMEL</i>	<i>Maître de conférences</i>	<i>président</i>
<i>Mme. ALI AHMED CHAFIKA</i>	<i>Maître de conférences</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>Mme. IGUETOULENE FATIHA</i>	<i>Maître assistante</i>	<i>Co-encadreur</i>

Promotion : 2024/2025

## Dédicaces

*À ceux qui ont toujours été mon pilier, qui se sont dévoués avec amour et se sont sacrifiés sans compter pour moi ;*

*A ceux qui m'ont encouragé dans les moments de doute, soutenue face aux épreuves de la vie, et incitée à donner le meilleur de moi-même : je dédie cette thèse, avec une profonde et éternelle reconnaissance, à mes parents bien-aimés.*

*À mes précieuses sœurs, Liticia, Malika et Malha, ainsi qu'à mon cher frère Amhnde,*

*Merci pour votre aide précieuse, votre affection constante et votre présence réconfortante. Je vous adresse tout mon amour et mon admiration sincère.*

*À ma belle-famille, qui m'a toujours entourée de bienveillance : à mes belles-sœurs Thanina et Nesserine, à mes beaux-frères, à ma belle-mère et à mon beau-père,*

*Merci pour votre soutien indéfectible tout au long de ce parcours.*

*À celui qui partage ma vie, mon époux, qui m'a épaulé avec patience, encouragée avec tendresse, et soutenue sans relâche :*

*Je t'offre ici l'expression de toute ma gratitude et de mon amour.*

*À mes chères amies Sonia, Sonia, pour leur fidélité, leur réconfort et leur soutien tout au long de cette aventure.*

*Et à tous ceux, proches ou lointains, connus ou discrets, qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à mener à bien ce modeste travail :*

*Merci du fond du cœur.*

## ***Remerciements***

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur Y. Bouafia, mon encadrant, pour sa disponibilité constante, ses conseils avisés et sa bienveillance tout au long de cette aventure. Son accompagnement m'a été précieux et déterminant dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également adresser mes vifs remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Leurs remarques pertinentes et constructives seront, sans aucun doute, d'une grande utilité pour enrichir et améliorer le présent travail.

Ce travail a été mené au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et c'est avec une reconnaissance sincère que je remercie chaleureusement tous les membres de ce laboratoire. Je tiens tout particulièrement à saluer Madame Ben Medjbar Fadhila et Monsieur Bouherraoua Rachid et Madame Iguetoulene Fatiha pour leur accompagnement, leur accueil chaleureux et leur précieuse assistance lors des expérimentations.

Mes remerciements vont également aux enseignants et au personnel de la bibliothèque du département de Génie Civil, ainsi qu'à toutes les personnes, connues ou dans l'ombre, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

Enfin, une pensée toute particulière à mes amis et collègues de promotion : Farid, Mouloud, Lyes, Younès, Melissa, Hakim, Samia, Ahmed, et bien d'autres encore, pour leur camaraderie, leur soutien et les précieux moments partagés tout au long de ce parcours.

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'utilisation des granulats recyclés (GR) issus de bétons de démolition, en substitution partielle des granulats naturels (GN), dans la fabrication de bétons. L'étude vise à évaluer l'influence de différents taux de substitution (10 %, 30 % et 60 %) sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.

Les résultats expérimentaux montrent que l'incorporation de GR modifie la masse volumique, augmente l'absorption d'eau et réduit la compacité. Sur le plan mécanique, la résistance à la compression diminue de 47,2 MPa pour le béton témoin à 38,1 MPa (BR-10 %), 36,1 MPa (BR-30 %) et 32,6 MPa (BR-60 %). En flexion, la charge maximale passe de 5,8 kN (BT) à 5,3 kN (BR-10 %), 4,5 kN (BR-30 %) et 4,0 kN (BR-60 %).

Il ressort que le taux de 10 % de substitution constitue un compromis intéressant, car il conserve des performances proches de celles du béton témoin, tout en contribuant à la valorisation des déchets de construction. Des solutions comme l'ajout d'adjuvants, d'additions minérales ou de fibres peuvent améliorer encore les performances des bétons recyclés.

**Mots-clés :** béton recyclé, granulats recyclés, granulats naturels, résistance mécanique, durabilité, substitution, développement durable.

## Abstract

This thesis focuses on the use of recycled aggregates (RA) derived from demolished concrete, as a partial replacement for natural aggregates (NA) in concrete production. The aim of the study is to evaluate the effect of different substitution rates (10%, 30%, and 60%) on the physical and mechanical properties of concrete.

The experimental results show that the incorporation of RA reduces bulk density, increases water absorption, and decreases compactness. Mechanically, the compressive strength decreases from 47.2 MPa for the reference concrete to 38.1 MPa (RA-10%), 36.1 MPa (RA-30%), and 32.6 MPa (RA-60%). In flexural tests, the maximum load drops from 5.8 kN (RC) to 5.3 kN (RA-10%), 4.5 kN (RA-30%), and 4.0 kN (RA-60%).

It can be concluded that a 10% substitution rate represents a good compromise, maintaining performance close to that of reference concrete while promoting the recycling of construction waste. Moreover, the use of admixtures, mineral additions, or fibers can further enhance the performance of recycled aggregate concrete.

**Keywords:** recycled concrete, recycled aggregates, natural aggregates, mechanical strength, durability, substitution, sustainable development.

# Liste des figures

## Chapitre I : Etude Bibliographique

- **Figure I .1** : composition du beton
- **Figure I .2** : granulats du beton
- **Figure I .3** : courbe granulométrique
- **Figure I .4** : granulats d'origine minéralogique
- **Figure I .5** : granulats alluvionnaires (roules)
- **Figure I .6** : le ciment
- **Figure I .7** : schématisation d'un granulat recycle
- **Figure I .8** : schématisation d'un granulat recyclé
- **Figure I .9** : les types des gros granulats de beton recycle selon la forme structurale
- **Figure I .10** : Granulat recyclé (GN associé à une couche de mortier adhérent).
- **Figure I .11** : machine los Angeles.

## Chapitre II : Matériaux utilisés et caractérisation expérimentale a l'état frais

- **Figure II.1** : Le ciment utilisé
- **Figure II.2** : Sable séché à l'étuve
- **Figure II.3** : Gravier naturel 8/15 à l'étuve.
- **Figure II.4** : Sable (0/3) et gravier naturel (3/8) (8/15) sec
- **Figure II.5** : Déchets de démolition des vieux murs
- **Figure II.6** : Le gravier recyclé 8/15 préparé avec le concassage
- **Figure II.7** : Tamiseuse électrique
- **Figure II.8** : : La courbe granulométrique du sable 0/3
- **Figure II.9** : La courbe granulométrique du gravier naturel 3/8 et gravier recyclé 3/8
- **Figure II.10** : La courbe granulométrique du gravier naturel 8/15 et gravier recyclé 8/15
- **Figure II.11** : principe d'essai d'équivalent de sable
- **Figure II.12** : éprouvette après agitation
- **Figure II.13** : essai de masse volumique absolue.
- **Figure II .14** : essai de masse volumique apparente
- **Figure II.15** : : détermination d'affaissement du beton a l'Etat frais
- **Figure II.16** : malaxeur
- **Figure II.17** : table vibrante
- **Figure II.18** : éprouvettes après coulage

- **Figure II.19** : éprouvettes en cure d'hydratation.
- **Figure II.20** : éprouvettes après la cure d'hydratation.

### **Chapitre III : caractérisation du béton a l'état durci.**

- **Figure III.1** : affaissement au cône d'Abrams.
- **Figure III.2** : mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.
- **Figure III.3** : vitesse ultrason.
- **Figure III.4** : essai de compression Uri axial.
- **Figure III.5** : influence du taux de substitution par les granulats recycles sur la contrainte maximale (eprouvette 10x20 cm).
- **Figure III.6** : courbes contrainte-déformation des éprouvettes 10x20cm pour différents taux de substitution en granulats recycles
- **Figure III.7** : évolution des fissures selon l'axe de compression des éprouvettes 10/20 cm.
- **Figure III.8** : influence du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recycles sur la contrainte maximale à la compression des éprouvettes de béton (fraction granulaire 16/32).
- **Figure III.9** : développement des fissures sous l'effet de la compression des éprouvettes.
- **Figure III.10** : courbes contrainte-déformation obtenus lors de l'essai de compression sur l'éprouvettes 16/32 cm en fonction du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recycles.
- **Figure III.11** : dispositif expérimentale pour l'essai de traction par flexion 3 point.
- **Figure III.12** : force applique et fonction de déplacement des éprouvettes.
- **Figure III.13** : vue rupture au sein des poutres en flexion.
- **Figure III.14** :  $\epsilon_u$  étant la déformation du rupture sigu la contrainte correspondante [35].

## **Chapitre I : Etude Bibliographique**

- **Tableau I.1** : ordre de grandeur des constituants d'un beton courant
- **Tableau I.2** : classes des granulats selon la norme XP P18-545.

## **Chapitre II : Matériaux utilisés et caractérisation expérimentale a l'état frais**

- **Tableau II.1** : composition chimique de ciment
- **Tableau II.2** : dosage des constituants pour 1 m<sup>3</sup> des deux bétons
- **Tableau II.3** : Analyse granulométrique du sable (0/3)
- **Tableau II.4** : Analyse granulométrique du gravier naturel (3/8)
- **Tableau II.5** : Analyse granulométrique du gravier naturel (8/15)
- **Tableau II.6** : Analyse granulométrique du gravier recycle (3/8)
- **Tableau II.7** : Analyse granulométrique du gravier recycle (8/15)
- **Tableau II.8** : coefficient d'équivalent de sable ES via la nature de la qualité du sable correspondants.
- **Tableau II.9** : les resultats de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue.
- **Tableau II.10** : les resultats d'affaissement du beton
- **Tableau II.11** : évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement NF-EN-206/CN.

# SOMMAIRE

Introduction générale -----	1
<b>CHAPITRE I : Etude Bibliographique</b>	
I.1.Introduction-----	3
I.2. Définition -----	3
I.3. Composants d'un béton-----	4
• I.3.1. Les granulats-----	4
• I.3.2. Classe des granulats-----	4
• I.3.3. Les différents types de granulats -----	6
○ I.3.3.1. Origine minéralogique-----	6
○ I.3.3.2. Granulats roulés et granulats de carrière-----	6
▪ Les granulats alluvionnaires (roulés)-----	6
▪ Les granulats de carrière-----	6
• I.3.3. Le ciment-----	7
○ I.3.3.1. Définition -----	7
○ I.3.3.2. Types du ciment-----	7
• I.3.4. L'eau de gâchage-----	8
I.4. Granulats recyclés issus des déchets de la démolition et de la construction-----	8
• I.4.1. Introduction-----	8
• I.4.2. Composition du granulats recyclé -----	9
• I.4.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés -----	10
○ I.4.3.1. Granulométrie -----	10
○ I.4.3.2. Masse volumique -----	11
○ I.4.3.3. Absorption -----	11
○ I.4.3.4. Résistance à l'usure -----	12
○ I.4.3.5. Essai Los Angeles -----	12
○ I.4.3.6. Conclusion -----	13
I.5. Béton recyclé -----	13
• I.5.1. Introduction -----	13
• I.5.2. Caractéristiques physiques du béton recyclé -----	14
○ I.5.2.1. Absorption -----	14
○ I.5.2.2. Ondes ultrasonores -----	14

• I.5.3. Caractéristiques mécaniques du béton recyclé -----	14
○ I.5.3.1. Traction -----	14
○ I.5.3.2. Flexion -----	15
○ I.5.3.3. Compression -----	15
○ I.5.3.4. Module de Young -----	16
I.6. Conclusion -----	17
<b>CHAPITRE II : Matériaux utilisés et caractérisation expérimentale a l'état frais</b>	
II .1. Introduction -----	19
II .2. Matériaux utilisés -----	19
II .3. Caractéristiques des matériaux -----	19
• II .3.1. Le ciment -----	19
• II .3.2. Le sable -----	20
• II .3.3. Les granulats -----	21
○ Granulats naturels (GN) -----	21
○ Granulats recyclés (GR) -----	22
• II .3.4. L'eau -----	23
II .4. Types d'éprouvettes utilisées -----	24
• Éprouvettes cylindriques de dimensions 16 × 32 cm -----	24
• Éprouvettes cylindriques normalisées de dimensions 10 × 20 cm -----	24
• Éprouvettes prismatiques de dimensions 7 × 7 × 28 cm -----	24
II .5. Analyse granulométrique -----	24
• II .5.1. But de l'essai -----	24
• II .5.2. Principe de l'essai -----	24
○ Analyse granulométrique du sable (0/3) -----	26
○ Analyse granulométrique du gravier naturel (3/8) -----	26
○ Analyse granulométrique du gravier naturel (8/15) -----	27
○ Analyse granulométrique du gravier recyclé (3/8) -----	27

○ Analyse granulométrique du gravier recyclé (8/15)-----	28
○ Fraction 3/8 mm -----	29
○ Fraction 8/15 mm -----	29
II .6. Essai équivalent de sable -----	30
○ Interprétation des résultats -----	32
II.7. Module de finesse -----	32
II .8. Masse volumique absolue et apparente -----	33
II .9. Essais sur le béton frais -----	34
• Affaissement au cône d’Abrams -----	34
II .10. Présentation du matériel-----	36
• Le malaxeur -----	36
• La table vibrante -----	37
II .11. Confection du béton -----	37
II .12. Conservation des éprouvettes -----	38
II .13. Conclusion-----	40
 <b>Chapitre III : Caractérisation du beton a l’état durci.</b>	
III.1. Introduction -----	42
III.2. Résultats et discussion -----	42
• III.2.1. : affaissement au cône d’Abrams. -----	42
• III.2.2. Méthode des ultrasons -----	43
• III.2.3. Densité -----	44
• III.2.4. Essai de compression -----	44
• III.2.5. Essai de traction par flexion trois points -----	51
III.3. MODELISATION DES MATERIAUX :-----	54
III.4. Conclusion -----	55
Conclusion générale -----	54
Références Bibliographique -----	60



## **Introduction générale**

Depuis toujours, l'être humain n'a cessé de rechercher et de développer des matériaux adaptés à ses besoins dans divers domaines. Aujourd'hui, le secteur du bâtiment et des travaux publics représente l'un des piliers majeurs du développement socio-économique et connaît une évolution continue. Cette dynamique s'accompagne d'une forte consommation de matériaux, au premier rang desquels figure le béton, qui demeure le matériau le plus utilisé à l'échelle mondiale, avec une consommation estimée à environ 1 m<sup>3</sup> par an et par habitant.

Cependant, cette forte demande s'accompagne d'un autre phénomène : l'augmentation croissante des opérations de démolition et de déconstruction d'ouvrages en béton, entraînant la production de volumes considérables de déchets. Ces évolutions imposent de nouveaux défis, notamment la nécessité de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction. Dans ce contexte, la valorisation des déchets issus de la démolition apparaît comme une solution prometteuse, contribuant à la fois à la préservation des ressources et à la réduction des volumes de déchets.

Au cours des dernières décennies, les granulats recyclés, obtenus par concassage et broyage des déchets de construction et de démolition, ont suscité un intérêt croissant comme substituts partiels aux granulats naturels (GN). Toutefois, leur spécificité réside dans la présence de mortier et de pâte de ciment résiduels, qui modifient certaines de leurs propriétés physiques et mécaniques et influencent ainsi les performances des bétons produits.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif est d'évaluer le potentiel d'incorporation des granulats recyclés dans le béton. Il s'agit plus particulièrement d'analyser l'effet de différents taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés du béton, dans une double optique : préserver les ressources naturelles et réduire la quantité de déchets générés par le secteur de la construction.

Cette étude expérimentale a été menée au laboratoire de matériaux de la Faculté de Génie de la Construction de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

**CHAPITRE I :**  
**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1. Généralités sur le béton

#### 1. Introduction

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus largement employés à l'échelle mondiale. Sa facilité de fabrication et d'application, son coût abordable ainsi que ses performances mécaniques et de durabilité en font un choix incontournable pour la réalisation de diverses structures. Utilisé dans une grande variété de constructions telles que des bâtiments, des ouvrages d'art, des monuments, et parfois même dans des éléments décoratifs, le béton joue également un rôle clé dans la préfabrication d'éléments de structure. Ces éléments incluent des tuyaux, des blocs, des poutrelles, des pavés, des planchers, des cloisons, des escaliers...etc.

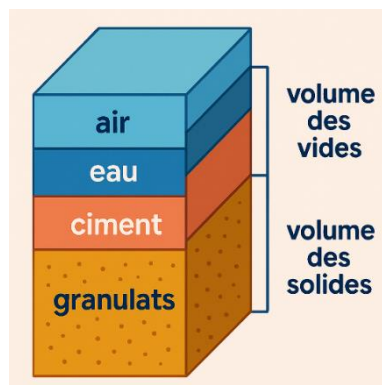
#### 2. Définition

Le béton se compose de granulats (sables, graviers, cailloux) Fig.I.1 'collés' entre eux par un liant hydraulique [1] : le ciment. Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau, il fait prise, puis durcit progressivement. Un béton hydraulique est constitué :

- d'une pâte pure (ciment + eau),
- d'un mélange granulaire,
- de produits additionnels (adjuvants, additions minérales, etc.).

On désigne habituellement sous le vocable :

- de matrice ou de mortier : le mélange (liant + eau + sable),
- de squelette solide ou de squelette granulaire : le mélange des granulats.



**Figure I-1** : Composition d'un béton

Dans un béton, l'ordre des grandeurs des constituants sont en général [2] comme indique dans le tableau suivant :

**Tableau I.1** : ordre de grandeur des constituants d'un béton courant

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	- - -	9-18	65-85

### 3. Composants d'un béton

Les bétons sont constitués à 75 % de leur volume de granulats. Il n'est donc pas surprenant que leurs performances dépendent étroitement des propriétés de ces derniers.

#### 3.1. Les granulats

Les granulats désignent tout matériau inerte issu de l'érosion naturelle des roches ou de leur concassage. Ils sont utilisés dans la construction et entrent dans la composition des mortiers et des bétons. Leurs dimensions varient entre 0 mm et 25 mm, comme le montre la Figure I.2.



**Figure I.2** : granulats du béton

#### 3.2. Classe des granulats

Les granulats sont classés selon leur granularité, c'est-à-dire la répartition dimensionnelle de leurs grains, déterminée par une analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulats est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec d : dimension inférieure du granulats.

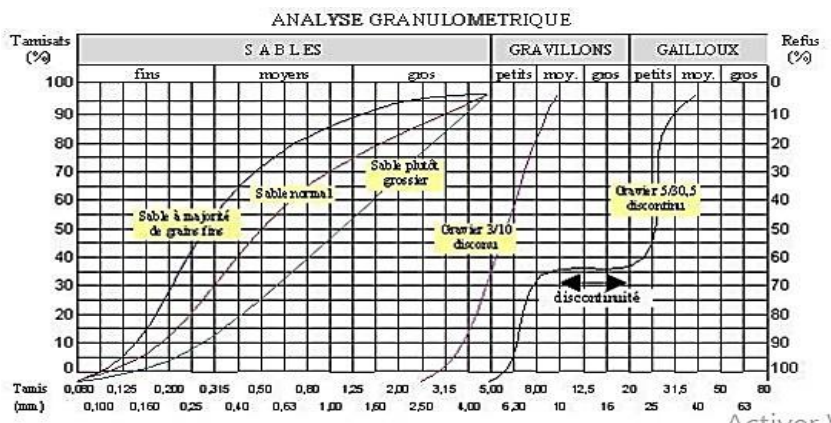
D : dimension supérieure du granulats.

Les différentes classes des granulats, définies conformément à la norme XP P 18-540, sont présentées dans le Tableau I.2

**Tableau I.2** : classes des granulats selon la norme XP P 18-540.

Classe	Délimitations	Caractéristique
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	D ≤ 1 mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 ≤ D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	D ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

La courbe granulométrique (Figure I.3) représente la répartition des différentes tailles de granulats dans un échantillon. Elle permet de visualiser la proportion de chaque fraction de particules



**Figure I.3** : courbe granulométrique

### 3.3. Les différents types de granulats :

#### 3.3.1. Origine minéralogique :

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres (Figure I.4).



**Figure I.4 :** granulats d'origine minéralogique

#### 3.3.2. Granulats roulés et granulats de carrières :

Indépendamment de leur origine minéralogique, les granulats sont classés en deux catégories :

- ✚ **Les granulats alluvionnaires (roulés) :** Ces granulats sont lavés afin d'éliminer les particules argileuses susceptibles de nuire à la résistance du béton. Leur composition varie selon la région d'origine, mais les plus courants sont les granulats silico-calcaires (Figure I.5).
- ✚ **Les granulats de carrière :** Issus de l'abattage et du concassage des roches, ces granulats présentent une forme angulaire et sont classés selon les dimensions granulaires souhaitées.



**Figure I.5 :** granulats alluvionnaires (roulés)

Ces granulats présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, degrés de concassage... ce type de granulats se fait avec soin et après accord sur l'échantillon.

### 3.3.3. Le ciment :

#### 3.3.3.1. Définition :

Le ciment est obtenu par un mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitée, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...) Figure I.6.



**Figure I.6:** le ciment

#### 3.3.3.2. Types du ciment :

Il existe cinq types de ciment normés « CEM ». Cette désignation caractérise un ciment conforme à la norme européenne EN 197-1. Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène.[3].

**CEM I :** désigne un ciment de type « ciment Portland », c'est-à-dire un ciment composé d'un minimum de 95 % de clinker.

**CEM II :** cette désignation caractérise des ciments dont les plus courants sont le « ciment Portland composé », le « ciment Portland au Calcaire », le « ciment Portland au Laitier » ou le « ciment Portland à la fumée de silice ».

**CEM III** : sont des ciments du type « ciment de haut fourneau » constitué de clinker et de laitier de haut fourneau, dans des proportions alternatives.

**CEM IV** : désigne le « ciment pouzzolanique ».

**CEM V** : désigne le « ciment composé ».

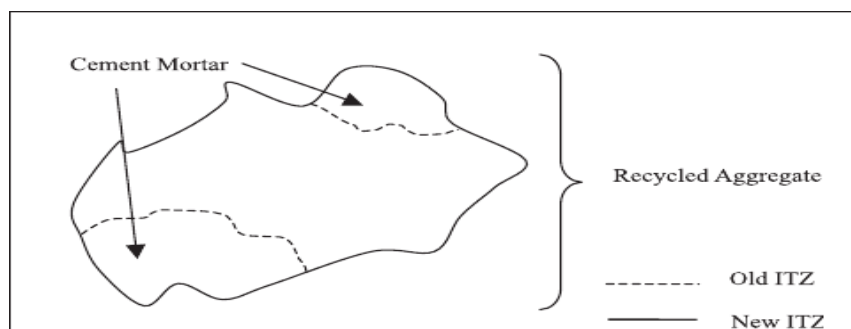
#### 3.3.4. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

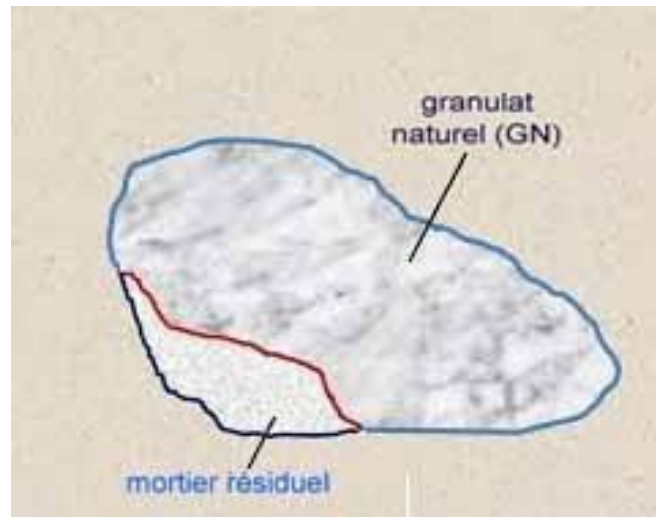
### 4. Granulats recyclés issus des déchets de démolition et de construction :

#### 4.1. Introduction :

Les granulats recyclés (GR) sont formés du granulat d'origine et du mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine [4]. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé (GR) [5]. Elle est également une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé (GR). Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé (GR) et la nouvelle pâte de ciment. La configuration du granulat recyclé (GR) est illustrée sur la figure suivante.



**Figure I.7:** schématisation d'un granulat recyclé [6].

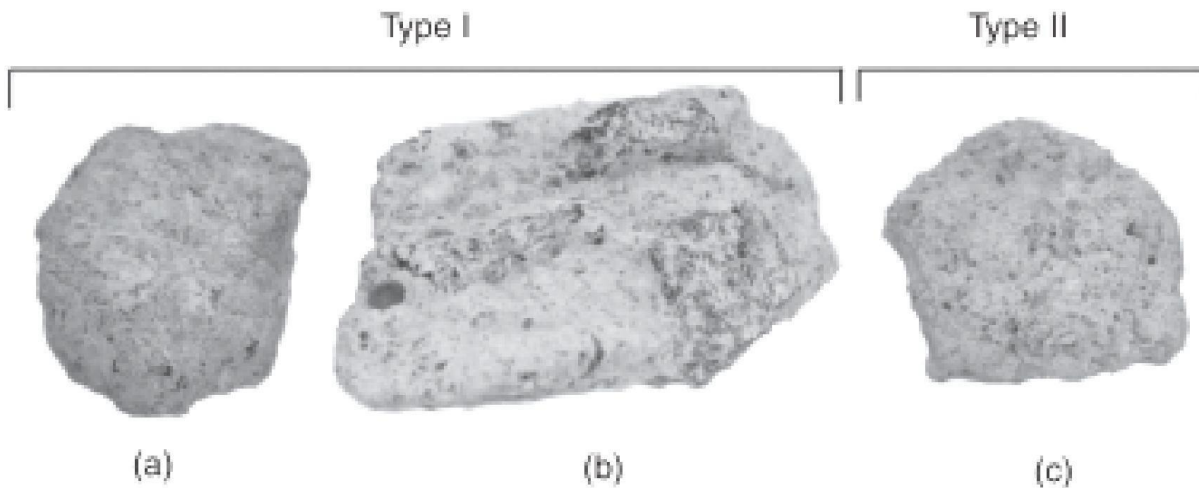


**Figure I.8 :** Structure simplifiée d'un granulats recyclés [7].

#### **4.2. Composition du granulats recyclés :**

Un granulats de béton recyclés (GR) est un matériau composite formé de deux phases distinctes : d'une part, le granulats naturels (GN), et d'autre part, une pâte cimentaire généralement adhérente. Cette dernière peut enrober le granulats totalement ou partiellement, selon la composition du béton d'origine.

La principale différence entre un granulats naturels et un granulats recyclés réside dans cette pâte cimentaire. En effet, le GN est un matériau monophasique, alors que le GR est biphasique. Ainsi, les propriétés physiques et mécaniques du GR dépendent à la fois de celles du GN et de la pâte cimentaire qui l'entoure. Cette dernière, caractérisée par une porosité élevée, influence directement le comportement du granulats recyclés et le distingue du granulats naturels [3]. Les différents types de gros granulats de béton recyclés, classés selon leur forme structurale, sont présentés à la figure I.9.



**Figure I.9** : Les types des gros granulats de béton recyclé, selon la forme structurale.

Le contenu du mortier résiduel est partiel (a) et (b) ; est presque en totalité (c).

Il n'y a pas encore de méthodes pratiques pour séparer les morceaux du mortier

Résiduel et les GN intégrés du GR dans une usine de recyclage et donc les échantillons de GR comprennent habituellement des proportions variables des deux types [7].



**Figure I.10** : Granulat recyclé (GN associé à une couche de mortier adhérent).

### **4.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés :**

#### **4.3.1. Granulométrie :**

La granulométrie des éléments fins a été analysée par diffraction laser, selon la théorie de Fraunhofer. Cette méthode permet de déterminer les diamètres des particules, avec une analyse réalisée en milieu liquide pour les fractions inférieures à 500  $\mu\text{m}$  et en milieu sec pour celles inférieures à 100  $\mu\text{m}$ . L'étude successive des différentes fractions granulaires permet d'évaluer la proportion d'éléments fins présents dans les granulats.

L'essai a été effectué conformément à la norme [NF EN 933-1], par tamisage à sec sans lavage, sur les différents lots. Les granulats recyclés (GR), qui contiennent du mortier adhérent autour du granulat parent, n'ont pas été lavés avant l'essai, contrairement aux recommandations de la norme. Cette approche permet de conserver les fines dans la formulation des bétons et mortiers, évitant ainsi leur élimination par lavage. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs empêche toute hydratation préalable.

#### **4.3.2. Masse volumique :**

La masse volumique correspond au rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat et le volume qu'il occupe dans l'eau. En règle générale, la masse volumique du granulat recyclé (GR) est moins grande que celle du granulat naturel (GN)

La littérature à ce sujet indique que la masse volumique des granulats recyclés (GR) se situe généralement entre 2,4g et 2,5 g (2400 à 2500 kg/m<sup>3</sup>) alors que les granulats naturels (GN) ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75g (2750 kg/m<sup>3</sup>) [8,9,10,11,12]. La masse volumique plus faible du granulat recyclé est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé [8].

#### **4.3.3. Absorption :**

L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulats après immersion dans l'eau et sa masse sèche.

Les études réalisées sur les granulats recyclés (GR) ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les granulats recyclés (GR) que les granulats naturels.

Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le granulat recyclé (GR) et le granulat naturel (GN). Les valeurs d'absorption des granulats recyclés (GR) se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulat naturel (GN) celles-ci sont souvent de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [13].

La mesure de l'absorption d'un granulat recyclé (GR) est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel, une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel [14] et par le fait même, un impact plus important sur les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante

puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption du granulat recyclé (GR) est contenue à l'état saturé est largement supérieure, une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du granulat recyclé (GR) asséché. Comme une plus grande absorption se fait dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé (GR) [15], l'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [15].

#### **4.3.4. Résistance à l'usure :**

La résistance à l'usure désigne la capacité d'un matériau à supporter les chocs et les frottements, influençant ainsi directement sa durée de vie.

#### **4.3.5. Essai los Angeles :**

L'essai Los Angeles est le plus souvent retenu pour déterminer la résistance aux chocs et à l'abrasion des divers granulats recyclés (GR).

Les recommandations de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des granulats recyclés (GR) pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient Los Angeles ( $C_{LA}$ ), réalisé selon la norme [NF EN 1097-2, 2010] des granulats naturels (GN). En général, la valeur du coefficient Los Angeles mesurée sur les matériaux de construction recyclés (CR) est comprise entre 20 et 40. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des granulats naturels (GN). C'est la teneur en mortier des (GR) qui explique cette différence [16]. Il a été également remarqué que les deux types de granulats naturel (GN) et de (GR), présentent une augmentation presque identique de leur ( $C_{LA}$ ), lorsque leur masse volumique diminue, avec un taux de variation très proche.



**Figure I.11 :** machine Los Angeles

#### **4.3.6. Conclusion :**

Les granulats recyclés (GR) présentent une porosité plus importante que les granulats naturels (GN), ce qui entraîne une absorption d'eau plus élevée et une masse volumique plus faible. Cette différence structurelle influence directement leurs propriétés physiques et mécaniques, en modifiant notamment leur densité, leur résistance et leur interaction avec la matrice cimentaire. Ces variations doivent être prises en compte lors de leur utilisation dans les formulations de béton afin d'adapter le dosage en eau et en liant pour garantir des performances optimales.

#### **I.5. Béton recyclé :**

##### **5.1. Introduction :**

De plus en plus, l'environnement et l'écologie deviennent importants aux yeux de tous. Le béton recyclé est un matériau de construction innovant qui joue un rôle crucial dans la promotion de pratiques durables dans l'industrie de la construction. Le recyclage des déchets de béton provenant de la démolition et des chantiers de construction offre une alternative écologique au béton conventionnel tout en préservant les ressources naturelles. Il permet également de réduire l'empreinte carbone. L'industrie de la construction est l'un des principaux contributeurs aux problèmes environnementaux mondiaux tels que la surconsommation de ressources naturelles et la production de déchets. Le béton recyclé est un exemple concret de l'économie circulaire, où les déchets sont transformés en ressources précieuses. Contrairement

au béton conventionnel, qui utilise des ressources naturelles telles que le sable et le gravier dans des proportions considérables, le béton recyclé utilise des agrégats provenant de béton récupéré et recyclé, réduisant ainsi la dépendance aux ressources naturelles et minimisant les déchets de construction envoyés dans les décharges.

#### **5.2.1.1 . Caractéristiques physiques du béton recyclés :**

##### **5.2.1. Absorption :**

L'absorption d'eau du béton contenant des granulats recyclés (GR) est plus élevée que celle du béton ordinaire. Ce taux d'absorption augmente proportionnellement au pourcentage de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés. Des valeurs élevées d'absorption d'eau indiquent une porosité et une perméabilité accrues, ce qui peut avoir un impact négatif sur la durabilité du béton.

##### **5.2.2. Ondes ultra son :**

Il s'agit d'un essai non destructif permettant de détecter plusieurs caractéristiques du béton durci, telles que le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression et le taux de fissuration, entre autres. Cet essai permet de mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales (ondes de compression), qui augmente avec la densité du béton, indiquant ainsi une meilleure résistance. Le principe de cette méthode repose sur la mesure du temps nécessaire à une onde pour parcourir une distance connue.

#### **5.3. Caractéristiques mécaniques du béton recycles :**

##### **5.3.1. Traction :**

La résistance à la traction est un critère essentiel pour évaluer la qualité des bétons. Elle est généralement déterminée par l'essai de traction indirecte, également appelé essai brésilien ou essai de fendage. Bien que le béton ne soit pas spécifiquement conçu pour supporter des efforts de traction directe, cette mesure permet d'estimer la charge à partir de laquelle des fissures commencent à apparaître. [18]. Il semble généralement que la baisse de résistance associée au remplacement du granulat naturel (GN) par un granulat recyclé (GR) dans le béton soit de 10% [19], 10 à 15% dans le cas de [20]. À mesure que le pourcentage de granulats recyclés (GR) remplaçant les granulats naturels (GN) augmente, on observe une réduction de la résistance à la traction du béton, comme c'est le cas pour plusieurs autres de ses propriétés [18,19,20,21]. [22] a aussi trouvé qu'en plus de varier en fonction du taux de remplacement du granulat naturel (GN), la résistance à la traction diminue quand la porosité augmente. Dans

cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés (GR) à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un granulats recyclés (GR) très poreux que pour un granulats recyclés (GR) peu poreux [22]. Le remplacement d'un granulats naturel (GN) par un granulats recyclés (GR) aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction des bétons recyclés (GR) que sur la résistance à la compression [23].

### 5.3.2. Flexion :

La résistance à la flexion des bétons est un paramètre clé pour évaluer leur qualité. Plusieurs études ont montré que l'ajout de granulats recyclés (GR) dans le béton n'entraînait pas une diminution aussi importante de la résistance à la flexion par rapport à la résistance à la compression. Dans certaines études, la variation de la résistance à la flexion entre le béton de référence et celui contenant des GR était négligeable, tandis que dans d'autres, elle ne dépassait pas 30 %, en fonction de facteurs tels que la quantité de remplacement, l'origine et la qualité des granulats recyclés. [24] n'ont pas observé de différences significatives de résistance à la flexion entre le béton de référence et celui contenant des granulats recyclés (GR) à 28 jours. La résistance augmentait avec le temps de durcissement, de la même manière que pour le béton de référence. [19] ont constaté une réduction de la résistance à la flexion allant de 7,5 % à 13,8 % suite au remplacement complet (100 %) des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) à différents âges. Au même taux de substitution, [25] ont observé une réduction de 5 à 21% de la résistance à la flexion à 28 jours. Ils ont observé une résistance à la flexion plus élevée pour le béton de GBR en utilisant des GBR de taille plus petite que pour un béton de GBR de taille plus grande, et dans certains cas la résistance à la flexion était plus élevée que celle du béton de référence [26].

### 5.3.3. Compression :

La résistance à la compression d'un béton est l'un des paramètres fondamentaux utilisés pour évaluer sa qualité. Elle est souvent considérée comme la propriété la plus importante du béton pour plusieurs raisons [18].

- ✚ La résistance à la compression est généralement un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est directement reliée aux propriétés de la pâte de ciment hydratée.
- ✚ La résistance à la compression est un élément essentiel de la conception structural et est généralement requise pour assurer la conformité.

- ✚ Plusieurs autres propriétés du béton, telle la résistance en tension, à la flexion et le module d'élasticité, sont directement reliés à la résistance à la compression.

Cette propriété est aussi la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés. On définit celle-ci comme la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture. L'impact du remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés (GR) sur la résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

Il est généralement reconnu que pour une formulation traditionnelle du béton et un taux de remplacement de 100 % du granulats naturel (GN), on observe une diminution de la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à l'âge de 28 jours du béton dans ce cas [27]. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats de Etxeberria, la résistance à 28 jours serait de 20 à 25% plus faible [28], alors que selon Sagoe-Crentsil la résistance à 28 jours serait la même que pour le béton témoin. Il est, cependant, à noter que dans le cas de l'étude de [29], un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulats naturel (GN) par un granulats recyclés (GR) n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés (GR).

#### **5.3.4. Module de Young :**

Le module d'élasticité (ou module de Young) d'un béton est représenté par la pente de la portion linéaire de la courbe contrainte/déformation. Ce module est influencé par plusieurs facteurs, notamment la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C (rapport entre la masse d'eau et la masse de ciment) et la teneur en air entraînée.

En ce qui concerne les granulats recyclés, plusieurs études ont montré que l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés entraîne une réduction du module d'élasticité du béton. Par exemple, pour un remplacement complet (100 %) des granulats naturels par des granulats recyclés, des baisses du module d'élasticité allant de 28% à 44% ont été observées dans différentes études. Cela indique que plus le taux de remplacement est élevé, plus la diminution du module d'élasticité est importante.

Cependant, l'impact de l'utilisation des granulats recyclés varie selon le taux de remplacement. Pour un taux de remplacement plus bas (par exemple inférieur à 50 %), l'impact est moindre.

Certaines études indiquent qu'un taux de remplacement inférieur à 50 % n'a pas d'impact significatif sur le module d'élasticité, tandis que d'autres indiquent une réduction d'environ 15 % même pour des taux de remplacement plus faibles (par exemple, 30 %). De plus, certaines études montrent des résultats divergents concernant l'impact sur le module d'élasticité. Par exemple, Rahal (2007) rapporte une perte de seulement 3% pour un béton recyclé ayant un rapport E/C de 0,55 et une résistance entre 25 et 30 MPa. D'autre part, selon Yang et al. (2008), l'absorption d'eau des granulats recyclés joue également un rôle crucial, car un taux d'absorption plus élevé de ces granulats réduit davantage le module d'élasticité du béton.

En résumé, l'utilisation de granulats recyclés dans le béton peut réduire le module d'élasticité, surtout pour des taux de remplacement élevés, mais l'ampleur de cet effet dépend de nombreux facteurs, y compris la qualité des granulats recyclés, le rapport E/C, et la teneur en mortier résiduel.

## **6. Conclusion :**

Le béton recyclé (BR) est en moyenne moins résistant et plus absorbant que le béton ordinaire. D'une manière générale, les caractéristiques du béton à base de granulats recyclés (GR) sont certes plus faibles que celles du béton ordinaire.

**Chapitre II :**  
**Matériaux utilisés et caractérisation  
expérimentale à l'état frais**

## **II.1. Introduction :**

Ce chapitre vise à décrire et analyser les différentes étapes expérimentales menées en laboratoire pour l'étude de l'influence des granulats recyclés sur les propriétés du béton. Cette étude porte sur la caractérisation physique et mécanique des granulats naturels et recyclés utilisés, en effectuant plusieurs tests d'identification tels que l'analyse granulométrique, l'essai de Los Angeles, ainsi que la détermination de la densité et de l'absorption des granulats.

Le béton étudié est un béton ordinaire, formulé selon la méthode de Dreux-Gorisse, avec une résistance cible de 25 MPa à 28 jours. L'évaluation du béton se fait à l'état frais et à l'état durci. À l'état frais, l'essai au cône d'Abrams est réalisé pour mesurer la consistance et la maniabilité du béton. À l'état durci, des essais non destructifs, comme l'essai ultrasonique, permettent d'analyser la compacité du matériau, tandis que des essais destructifs, notamment l'essai de compression et l'essai de flexion à 3 points, servent à évaluer la résistance mécanique du béton.

Dans cette étude, quatre formulations de béton ont été préparées. Le premier mélange est un béton de référence (BN) composé uniquement de granulats naturels, tandis que les trois autres formulations sont des bétons recyclés (BR), où les granulats naturels ont été partiellement remplacés par des granulats recyclés à des taux de 10 %, 30 % et 60 %. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces substitutions sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

## **2. Matériaux utilisés :**

Pour la confection du béton, des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR) ont été utilisés, ainsi qu'un liant hydraulique de type ciment CEM II.

## **3. Caractéristiques des matériaux :**

### **3.1. Le ciment :**

Le ciment qu'on a utilisé dans cette étude provient de l'entreprise LAFARGE. C'est un ciment de type CPJ-CEM II/B 42,5 N de LAFARGE d'Alger. La Figure II.1 présente le type de ciment utilisé dans notre étude.



Figure II.1 : Le ciment utilisé.

Le Tableau II.1 illustre la composition chimique du ciment utilisé dans cette étude.

Tableau II.1: Composition chimique de ciment. [3].

Composant	Pourcentage (%)
C3S	62
C2S	22
C3A	8.2
C4AF	13

### 3.2. Le sable :

Le sable dont la taille des grains varie de 0 à 3 mm, est utilisé pour tous les mélanges. Il est d'abord lavé pour éliminer les impuretés, puis séché en étuve à 105 °C pendant 24 heures afin d'assurer une teneur en eau minimale (Figure II.2).

Sable séché



Figure II.2 : sable sèche a l'étuve.

3.3. Les granulats :

✚ Granulats naturels (GN) :

Les granulats naturels utilisés, de fractions 3/8 mm et 8/15 mm, présentent des diamètres compris entre 3 et 15 mm (Figure II.3)( Figure II.4 ). Ils ont été lavés pour éliminer les impuretés, puis séchés en étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, ils ont été conservés dans des bacs à l'intérieur du laboratoire afin de garantir leur propreté et leur état sec.



Figure II.3: Gravier naturel 8/15 sèche a l'étuve.



Figure II.4 : sable (0/3) et gravier naturel (3/8) (8/15) sec.

**Granulats recyclés (GR) :**

Les granulats recyclés ont été préparés à partir du concassage et du broyage d'éprouvettes en béton ainsi que de déchets issus de la démolition de murs anciens. Les matériaux ont été récupérés principalement à partir de murs anciens et d'éprouvettes de béton provenant du laboratoire de l'université de Tizi-Ouzou (site de Bastos)

Et des murs anciens de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, également située à Bastos. Après leur collecte, ces matériaux ont été broyés, puis tamisés pour obtenir deux fractions granulométriques : 3/8 mm et 8/15 mm. La Figure II.6 présente les déchets de démolition issus des vieux murs, utilisés comme source de granulats recyclés.



**Figure II.5 :** déchets de démolition des vieux murs.

La Figure II.7 illustre le gravier recyclé de fraction 8/15 obtenu par concassage.



Figure II.6 : le gravier recycle 8/15 obtenu par le concassage.

### 3.4. L'eau :

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet du laboratoire de béton de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Elle est propre et potable, répondant ainsi aux exigences de qualité pour une utilisation dans les mélanges de béton. Le tableau suivant résume les fractions massiques des différents constituants du bétons à base de GN utilisés dans notre expérience, calculées selon la méthode de Dreux-Gorisse.

Tableau II.2: Dosage des constituants pour 1m<sup>3</sup> des deux bétons.

Constituant	Masse (kg)
<b>Ciment</b>	407,5
<b>Sable 0/3</b>	741,4
<b>Gravier 3/8</b>	230,7
<b>Gravier 8/15</b>	941,8
<b>Eau</b>	243,0

Beton (a).

Constituant	Masse (kg)
<b>Ciment</b>	349,36
<b>Sable 0/3</b>	800,79
<b>Gravier 3/8</b>	249,26
<b>Gravier 8/15</b>	1018,65
<b>Eau</b>	263,00

Beton (b).

#### **4. Types d'éprouvettes utilisées :**

Dans le cadre de ce programme expérimental, trois types d'éprouvettes ont été utilisés, selon la nature des essais à réaliser :

- ✚ **Éprouvettes cylindriques de dimensions 16 × 32 cm** (diamètre  $D = 16$  cm, hauteur  $H = 32$  cm), normes NF P 18-400 et NA 2600, destinées aux essais de compression.
- ✚ **Éprouvettes cylindriques normalisées de dimensions 10 × 20 cm**, conformes aux normes NF P 18-400 et NA 2600, également utilisées pour les essais de compression.
- ✚ **Éprouvettes prismatiques de dimensions 7 × 7 × 28 cm**, conformes aux normes NF P 18-400 et NA 2600, utilisées pour les essais de flexion, notamment selon la méthode de flexion en 3 points.

#### **5. Analyse granulométrique :**

##### **5.1. But de l'essai :**

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition des tailles des grains présents dans un échantillon.

Il est important de ne pas confondre la granulométrie, qui se concentre sur la mesure des dimensions des grains, avec la granularité, qui fait référence à la distribution de ces dimensions au sein d'un granulat.

##### **5.2. Principe de l'essai :**

L'essai consiste à diviser le matériau en classes de grains de tailles décroissantes à l'aide d'un ensemble de tamis. La Figure II.8 présente la tamiseuse électrique utilisée pour la réalisation des analyses granulométriques.



**Figure II.7 :** Tamiseuse électrique.

Les granulats utilisés, granulats naturel (0/3 mm, 3/8 mm et 8/15 mm), sont préalablement lavés puis séchés. Des granulats recyclent (3/8, 8/15). Pour l'essai, une série de tamis à mailles décroissantes est empilée, du tamis le plus large en haut vers le plus fin en bas, avec un fond étanche pour recueillir les fines et un couvercle pour éviter toute perte de matériau. Le matériau est ensuite versé dans la colonne et soumis à des vibrations à l'aide d'une tamiseuse électrique. Le tamisage est considéré comme achevé lorsque le poids des refus devient stable.

Le refus sur chaque tamis est enregistré de manière cumulative ( $R_1$ ,  $R_2$ , ...,  $R_n$ ), et la fraction la plus fine, appelée tamisât, est également pesée. Ces mesures permettent de tracer la courbe granulométrique de chaque type de granulat. Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (II.2, II.3, II.4, II.5, II.6).

**Tableau II.3:** Analyse granulométrique du sable (0/3) :

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
5	15	15	1%	99%
3,15	105	120	8%	92%
2,5	130	250	17%	83%
1,25	445	695	46%	54%
0,63	320	1015	68%	32%
0,315	210	1225	82%	18%
0,16	175	1400	93%	7%
0,08	65	1465	98%	2%
Fond	35	1500	100%	0%

**Tableau II.4:** Analyse granulométrique du gravier nature (3/8) :

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
8	0	0	0%	100%
6,3	95	95	5%	95%
5	640	735	37%	63%
4	425	1160	58%	42%
3,15	520	1680	84%	16%
Fond	320	2000	100%	0%

**Tableau II.5:** Analyse granulométrique du gravier naturel (8/15) :

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
16	40	40	2%	98%
12,5	425	465	19%	81%
10	740	1205	48%	52%
8	605	1810	72%	28%
Fond	690	2500	100%	0%

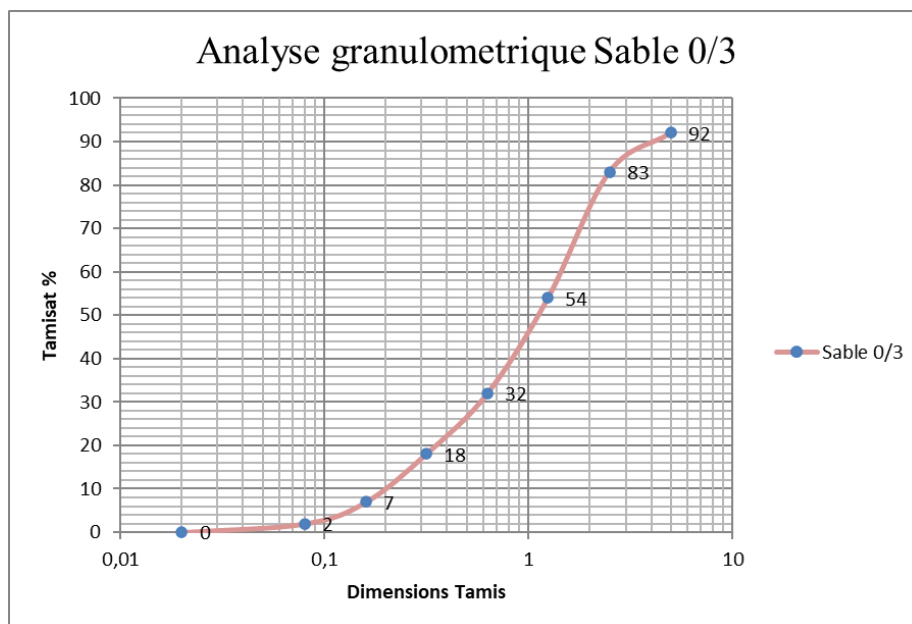
**Tableau II.6:** Analyse granulométrique du gravier recycles (3/8) :

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
8	0	0	0%	100%
6,3	320	320	16%	84%
5	640	960	48%	52%
4	540	1500	75%	25%
3,15	410	1910	95,5%	4,5%
Fond	90	2000	100%	0%

**Tableau II.7:** Analyse granulométrique du gravier recyclés (8/15) :

Mailles des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât Cumulés (%)
16	10	10	0,4%	99,6%
12,5	510	520	20,8%	79,2%
10	1100	1620	64,8%	35,2%
8	710	2330	93,2%	6,8%
Fond	170	2500	100%	0%

➤ Les figures suivantes montrent l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés :



**Figure II.8 :** la courbe granulométrique du sable 0/3.

❖ Fraction 3/8 mm :

Pour la fraction 3/8 mm, une légère différence est observée entre les deux types de gravier. Le gravier naturel présente une montée plus rapide de la courbe, traduisant une plus forte proportion de gros grains, tandis que le gravier recyclé présente un pourcentage plus élevé de particules fines. Ce comportement est lié à l'hétérogénéité du gravier recyclé, résultant de la fragmentation des matériaux d'origine. Malgré cela, les deux courbes suivent une tendance générale proche, atteignant pratiquement 100 % de tamisât en fin d'essai.

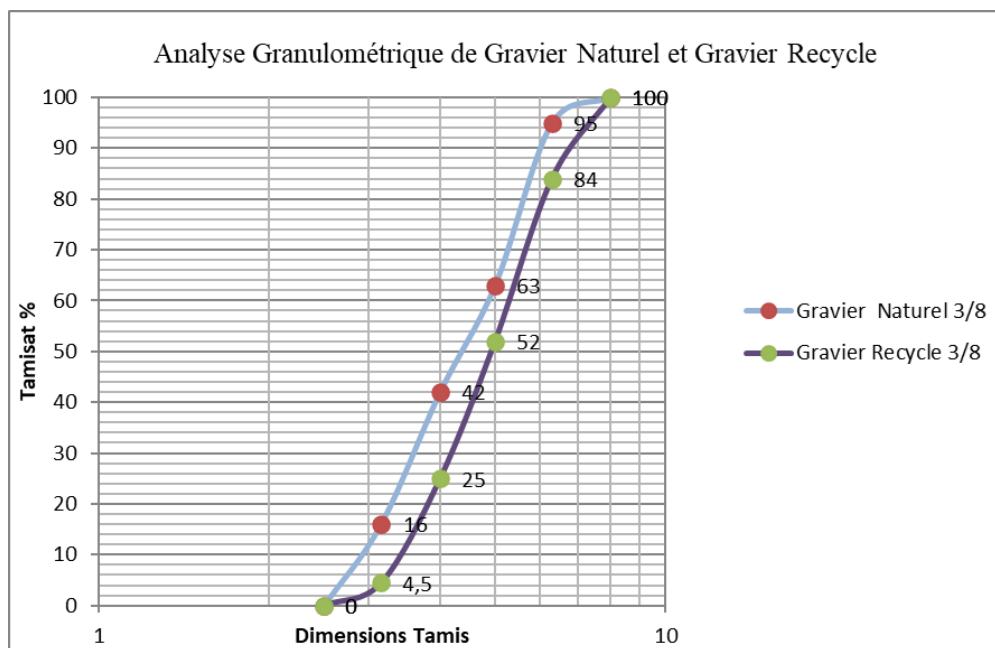


Figure II.9: la courbe granulométrique du gravier naturel 3/8 et gravier recycles 3/8.

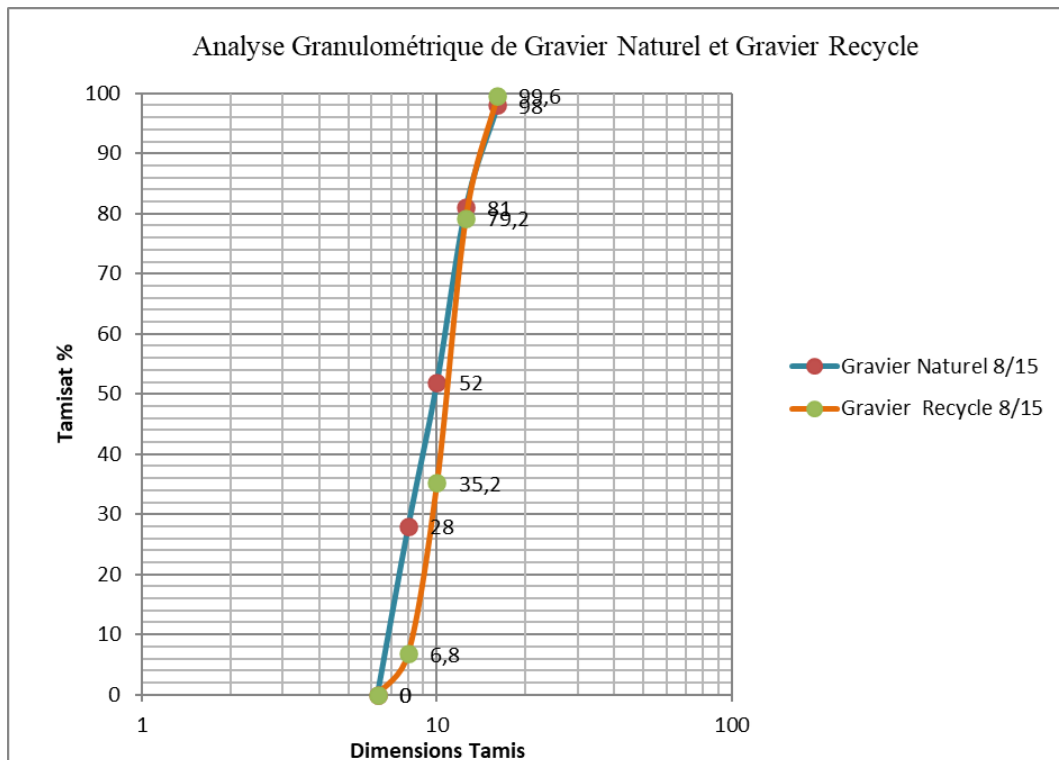
❖ Fraction 8/15 mm :

La courbe granulométrique du gravier naturel et celle du gravier recyclé 8/15 mm présentent une évolution similaire. Les deux matériaux montrent une bonne régularité dans la distribution de la taille des grains. Toutefois, on observe que le gravier recyclé est légèrement plus fin que le gravier naturel pour les dimensions intermédiaires (entre 10 mm et 12,5 mm). Cela peut être attribué à la nature plus fragile du matériau recyclé, qui tend à se fragmenter davantage lors du concassage. À la fin du tamisage, les deux types de gravier atteignent un tamisât proche de 100 %, indiquant des dimensions maximales comparables.

L'analyse granulométrique réalisée montre que les graviers recyclés possèdent une distribution plus fine et légèrement plus étalée que celle des graviers naturels. Cette différence peut influencer certaines propriétés du béton fabriqué avec ces matériaux. En effet, une granulométrie plus fine peut améliorer la compacité du béton, réduisant ainsi sa porosité, mais

elle peut aussi augmenter la demande en eau pour atteindre une bonne maniabilité. D'autre part, l'hétérogénéité plus marquée des granulats recyclés pourrait affecter la cohésion du béton, nécessitant parfois des ajustements dans la formulation du mélange (ajout de superplastifiants, correction de la teneur en eau, etc.).

En conclusion, bien que des différences soient observées, les résultats confirment que les granulats recyclés peuvent être utilisés efficacement dans la fabrication du béton, à condition de maîtriser leur qualité et leur distribution granululaire.



**Figure II.10** : la courbe granulométrique du gravier naturel 8/15 et gravier recycles 8/15.

### 6.Essai équivalent du sable :

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propriété d'un sable ou d'un gravier. L'essai consiste à déterminer l'importance des fines (< 63µm) flocculables contenues dans le sable. L'équivalent de sable indique le degré de pollution des éléments fins dans les sols en stabilisation mécanique. Pour cet essai, on a besoin d'une éprouvette graduée munie d'un bouchon en caoutchouc, d'un agitateur manuel et d'un piston avec un poids bien défini. La première étape consiste à peser 120 g de sable. Entre-temps, on remplit l'éprouvette graduée avec de l'eau jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette, puis on verse les 120 g de sable dans cette dernière. On ferme l'éprouvette avec un bouchon et on la fixe sur la machine d'agitation afin d'agiter de façon à détacher les

Chapitre II : Matériaux utilisés et caractérisation expérimentale à l'état frais

revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. Après avoir agité l'éprouvette, on la remplit avec de l'eau jusqu'au trait supérieur, puis on laisse reposer pendant 20 min sans perturbation. À l'issue de ce délai, on mesure la hauteur totale (sable + fines) qu'on appellera  $h_1$  et la hauteur du sable seul sans fines qu'on appellera  $h_2$ .

• L'équivalent de sable est alors calculé par la formule suivante :

$$Es = \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \cdot 100$$

Dans notre cas, nous avons :  $h_1 = 10. \text{cm}$  et  $h_2 = 7,7. \text{cm}$  et Ce qui nous donne :

$$Es = \left( \frac{7,7}{10} \right) \cdot 100 = 77\%.$$



Figure II.11 : principe d'essai d'équivalent de sable.

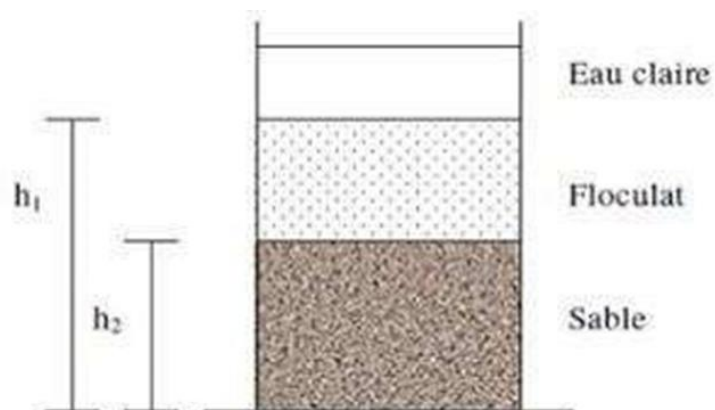


Figure II.12 : Éprouvette après agitation.

- **Interprétation des résultats :** L'interprétation des résultats de l'essai d'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable et de déterminer la proportion de fines argileuses qu'il contient. (Tableau II.8).

**Tableau II.8 :** Coefficient d'équivalent de sable  $E_s$  via la nature et la qualité du sable correspondants.

$E_s$ au piston	Nature et qualité du sable
$E_s < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
$E_s \leq 60\%$	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.
$E_s \leq 70\% < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$E_s \geq 80\%$	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.

D'après les résultats obtenus, ( $E_s \leq 70\% < 80\%$ ) on constate que le sable utilisé

est propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

### 7. Module de finesse :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient pas trop faible proportion. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus Cumulés exprimée en Pourcentages sur les tamis de la série suivante : (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm) Lorsque  $M_f$  est : ( $1.8 < M_f < 2.2$ ) le sable est à majorité de grains fins  
( $2.2 < M_f < 2.8$ ) on est en présence d'un sable moyen, ( $2.8 < M_f < 3.3$ ) le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.  $M_f$  de notre sable : Avec un module de finesse de 3,15, le sable étudié est classé comme un sable légèrement grossier, ce qui favorise l'obtention de bétons résistants mais peut réduire leur maniabilité.

### 8. Masse volumique absolue et apparente :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent.

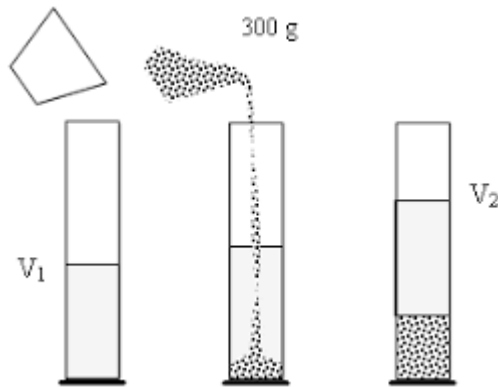


Figure II.13 : Essai de masse volumique absolue.

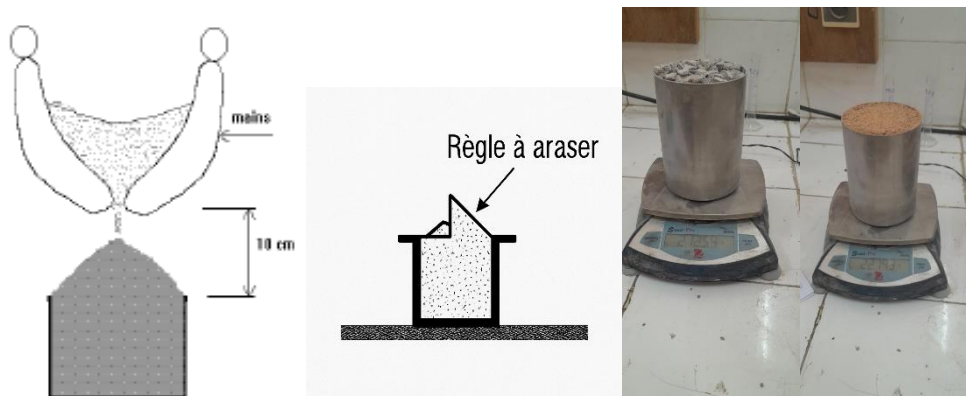


Figure II.14: Essai de masse volumique apparente.

La détermination de la masse volumique apparente et absolue a été réalisée pour l'ensemble des granulats utilisés (sable, gravier naturel et gravier recyclé). Cette mesure permet de caractériser leurs propriétés physiques et de mieux évaluer leur influence sur la formulation et les performances du béton.

Les résultats sont représentés dans le tableau II.9 :

	Granulats Naturels (GN)			Granulats Recyclés (GR)	
	0/3 mm	3/8 mm (GN)	8/15 mm (GN)	3/8 mm (GR)	8/15 mm (GR)
<b>M-V apparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1650</b>	<b>1540</b>	<b>1490</b>	<b>1310</b>	<b>1230</b>
<b>M-V absolue (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2700</b>	<b>2500</b>	<b>2500</b>	<b>2400</b>	<b>2400</b>
<b>Module de finesse</b>	<b>3.15</b>	/	/	/	/

### **9. Essai sur le béton frais :**

L'essai que nous avons réalisé pour évaluer l'ouvrabilité du béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451.

#### **➤ Affaissement au cône d'Abrams :**

L'essai d'affaissement est réalisé à l'aide d'une plaque et d'un cône d'Abrams :

- ✚ La plaque est en acier, rigide, avec une surface lisse et non absorbante.
- ✚ Le cône d'Abrams est en acier galvanisé. Il mesure 300 mm de hauteur, avec un diamètre intérieur de 200 mm à la base et de 100 mm au sommet. Il doit son nom à son inventeur, Duff Abrams.
- ✚ Une tige en acier lisse, de 16 mm de diamètre et à extrémité arrondie, est utilisée pour le compactage.

Les étapes de l'essai sont les suivantes :

1. Le cône est placé au centre de la plaque et solidement maintenu.
2. Il est rempli de béton frais en trois couches égales, chacune étant compactée par 25 coups de tige.
3. La surface du béton est nivelée au ras du cône à l'aide de la tige.

4. Le cône est ensuite retiré doucement, verticalement, avec un léger mouvement de rotation.
5. L'affaissement du béton est alors mesuré immédiatement.



**Figure II.15:** Détermination l'affaissement du béton à l'état frais.

**Les résultats d'affaissement du béton sont représentés ci-dessous :**

**Tableau II.10:** Les résultats d'affaissement du béton.

Taux de granulats recyclés (%)	Affaissement (cm)
0 % (100 % naturel)	7,5 cm
10 %	7,0 cm
30 %	5,0 cm
60 %	4,0 cm

Connaissant sa classe, son ouvrabilité est évaluée à partir du tableau suivant :

**Tableau II.11 :** Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement [Cm]	Dénomination NF-EN-206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1/S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S3
Béton mou	Piquage	10 à 13	S4
Béton liquide	Léger piquage	≥14	S3/S4/S5

D'après la valeur d'affaissement obtenue lors de l'essai, la maniabilité du béton peut être classée comme suit : S1/S2 correspond à un béton ferme nécessitant une bonne vibration, tandis que S3 désigne un béton plastique adapté à une vibration courante.

## 10. Présentation du matériel de laboratoire :

### Le malaxeur :

Le béton a été préparé dans un malaxeur à axe vertical doté de mouvements planétaires. Un temps de malaxage minimal est requis afin de garantir une homogénéité optimale du mélange. Afin de garantir la propreté des matériaux et d'éliminer toute impureté, les graviers ont été soigneusement lavés, puis séchés dans une étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C.



**Figure II.16:** Malaxeur.

**+ La table vibrante :**

L'utilisation d'une table vibrante est essentielle pour éliminer une partie des bulles d'air emprisonnées dans le béton, celles-ci pouvant compromettre ses propriétés mécaniques.



**Figure II.17:** Table vibrante.

## **11. Confection du béton :**

Dans le cadre de ce programme expérimental, le mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques et prismatiques. Sa formulation a été établie selon la méthode de Dreux-Gorisse. Tous les mélanges ont été préparés selon un protocole identique, pour les éprouvettes 16/32 en a utilisé le beton ( a ) et pour les éprouvettes 10/20 et 28x7x7 en a utilisé le beton (b) en utilisant un malaxeur à axe vertical.

Dans le cadre de cette étude, les formulations de béton adoptées sont définies comme suit :

- ✓ **BN** : Béton naturel, formulé uniquement à partir de granulats naturels, utilisé comme béton de référence dans cette étude.
- ✓ **BR10** : Béton recyclé dans lequel 10 % des granulats naturels (GN) sont remplacés par des granulats recyclés (GR).
- ✓ **BR30** : Béton recyclé contenant 30 % de granulats recyclés en substitution des granulats naturels.
- ✓ **BR60** : Béton recyclé avec un taux de substitution de 60 % des granulats naturels par des granulats recyclés.

Afin de faciliter le décoffrage, les moules servant à la réalisation des éprouvettes ont été préalablement huilés. L'ensemble des échantillons a été confectionné dans des conditions uniformes, en respectant les étapes suivantes :

1. Préparation des matériaux (eau, ciment, sable, gravier).
2. Les constituants secs — sable, gravier et ciment — sont versés dans le malaxeur, puis mélangés pendant une minute pour garantir une bonne homogénéité du mélange.
3. L'eau de gâchage est ajoutée au mélange, suivie d'un malaxage de deux minutes.
4. Le mélange est poursuivi pendant 60 secondes, en ajoutant petit à petit le reste de l'eau.
5. Mesure à l'état frais de l'affaissement avec l'essai au Cône d'Abrams.
6. Les moules sont remplis en trois couches, chacune étant vibrée pendant 20 secondes pour bien compacter le béton et éliminer les bulles d'air.
7. Démoulage après 24 heures.
8. Les échantillons sont placés en cure dans l'eau.

## **12. conservation des éprouvettes :**

Après la confection des échantillons, ceux-ci ont été laissés dans les moules pendant 24 heures, puis démoulés. Les éprouvettes ont ensuite été placées dans des bacs d'eau maintenue

Chapitre II : Matériaux utilisés et caractérisation expérimentale à l'état frais

à 20 °C pour une période de cure de 28 jours. À l'issue de cette période, elles ont été retirées de l'eau et entreposées dans la salle du laboratoire pour un séchage à l'air. Les éprouvettes ainsi préparées ont ensuite été soumises aux essais mécaniques à l'âge de 28 jours : essais de compression, de flexion trois points et de traction par fendage. Les éprouvettes confectionnées dans le cadre de cette étude ont suivi différentes étapes essentielles. Après le coulage (Figure II.18), elles ont été placées en cure d'hydratation afin d'assurer un développement optimal des propriétés mécaniques (Figure II.19). Enfin, une fois la période de cure achevée, les éprouvettes ont été sorties et préparées pour les essais (Figure II.20).



**Figure II.18 :** Éprouvettes après coulage.



Figure II.19: Éprouvettes en cure d'hydratation.



Figure II.20 : Éprouvettes après la cure d'hydratation.

### 13. Conclusion :

Ce chapitre présente une étude expérimentale portant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons à base de granulats recyclés (GR), en s'intéressant particulièrement à la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module de Young et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Il a été observé que les granulats recyclés possèdent une masse volumique plus faible et une absorption d'eau plus importante que les granulats naturels (GN). Cette forte absorption s'explique par la présence de mortier adhérent à la surface des GR, dont la structure est plus poreuse. Par ailleurs, le processus de concassage génère fréquemment des fissures dans les granulats recyclés, ce qui peut également affecter leurs performances mécaniques.

**Chapitre III :**  
**Caractérisation du béton a l'état durci.**

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats issus de la recherche expérimentale sont présentés et analysés. Ils concernent, d'une part, les propriétés du béton à l'état durci et à l'état frais, notamment l'affaissement, et d'autre part, les propriétés à l'état durci, telles que les résistances à la compression et à la flexion, ainsi que la densité des bétons fabriqués à partir de granulats naturels (GN) et de granulats recyclés (GR). Par la suite, une méthode ultrasonique est utilisée afin d'estimer la porosité et la connectivité des pores dans ces bétons. Cette technique repose sur l'analyse des vitesses de propagation des ondes ultrasonores en fonction du taux de porosité.

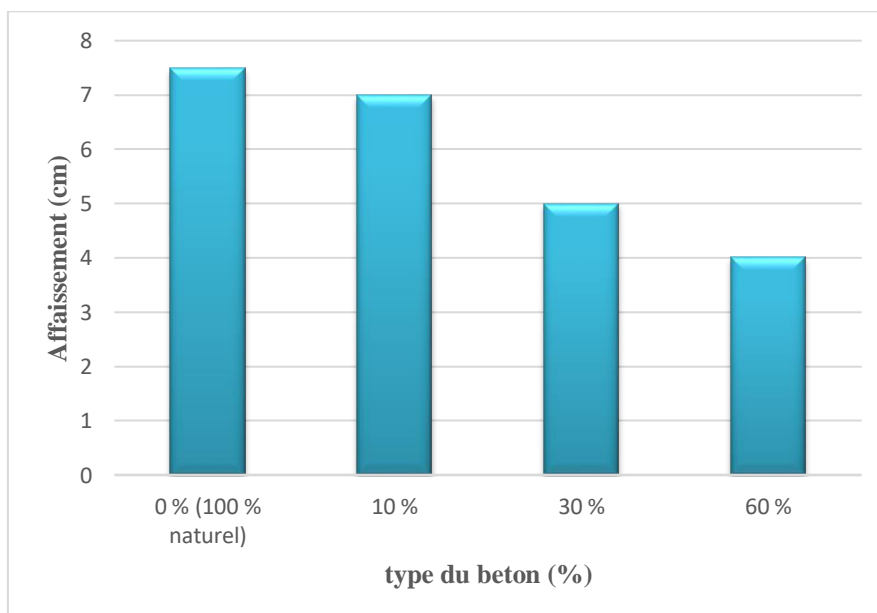
Enfin, une étude approfondie des propriétés mécaniques et de durabilité est menée.

### III.2. Résultats et discussion :

#### III.2.1. : affaissement au cône d'Abrams.

L'affaissement du béton peut se manifester sous différentes formes :

- ✚ Un effondrement total, où le béton perd complètement sa cohésion et s'étale ;
- ✚ Un affaissement par cisaillement, caractérisé par un glissement latéral de la partie supérieure du béton par rapport à la base ;
- ✚ Un affaissement normal, où le béton s'abaisse uniformément tout en conservant approximativement sa forme initiale.



**Figure III.1 :** affaissement au cône d'Abrams.

### III.2.2. Méthode des ultrasons

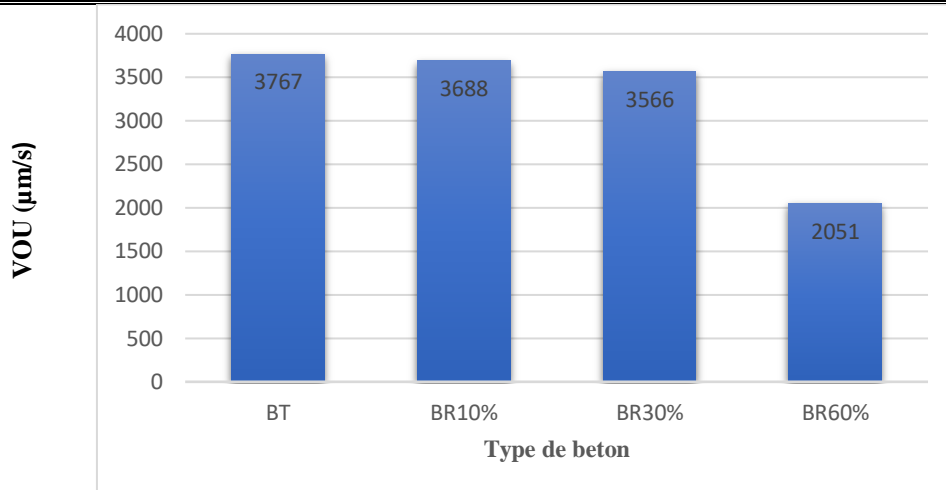
La méthode des ultrasons permet d'évaluer la qualité du béton en mesurant le temps nécessaire à une impulsion ultrasonique pour traverser l'éprouvette. Ce temps de propagation est enregistré électroniquement entre l'émetteur et le récepteur. La vitesse moyenne de l'onde est ensuite déterminée en divisant la distance parcourue par le temps mesuré. Pour chaque éprouvette prismatique, trois mesures sont effectuées au centre des faces latérales, selon une direction perpendiculaire à la surface du béton. Afin de garantir un bon couplage acoustique entre les transducteurs et la surface à examiner, une fine couche de gel de couplage est appliquée sur les deux surfaces de contact.



**Figure III.2:** Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.

#### ✚ Resultats :

La figure ci-dessus montre la variation de la vitesse ultrasonore (VOU) en fonction du type de béton. On observe que la VOU diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés. Le béton témoin (BT) affiche la valeur la plus élevée (3767  $\mu\text{m/s}$ ), suivie des bétons BR10% (3688  $\mu\text{m/s}$ ) et BR30% (3566  $\mu\text{m/s}$ ). En revanche, le béton contenant 60% de granulats recyclés (BR60%) présente une chute significative de la VOU à 2051  $\mu\text{m/s}$ . Cette baisse peut être attribuée à une structure interne plus hétérogène et moins compacte, entraînant une diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ces pourcentages de diminution sont similaires pour l'ensemble des cas étudiés. En effet, [30] et [31] ont rapporté des baisses de la vitesse ultrasonique comparables, de l'ordre de 8 % et 10 % respectivement. En revanche, [32] ont observé une variation plus faible de 5,4 %, attribuée à la qualité des granulats utilisés. Par ailleurs, [33] ont noté une diminution de la VOU liée au remplacement des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR).



**FigureIII.3 :** Vitesse ultrason.

### III.2.3 Densité

Les granulats recyclés (GR) présentent généralement une densité plus faible que les granulats naturels (GN), en raison de leur porosité accrue causée par le mortier adhérent encore présent à leur surface. Cette caractéristique influence directement la densité du béton, qui tend à diminuer lorsque les GR sont utilisés en substitution partielle ou totale des GN.

Lorsque le taux de remplacement des GN par des GR atteint 75 %, plusieurs études, notamment celle de [34], ont mis en évidence une réduction de la masse volumique du béton comprise entre 5 % et 10 %. Malgré cette diminution, le béton obtenu ne peut pas être considéré comme un béton léger. Toutefois, une densité plus faible n'est pas nécessairement un inconvénient en soi, mais elle peut refléter une augmentation de la porosité, susceptible d'affecter négativement la résistance mécanique et la durabilité du matériau.

D'après [4], cette baisse de densité serait principalement liée à une proportion plus élevée de mortier total (résiduel et nouveau) dans les bétons contenant des GR, comparativement à ceux fabriqués avec des GN.

### III.2.4. Essai de compression :

La résistance à la compression a été évaluée sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 16×32 cm pour le béton (a) et 10×20 cm pour le béton (b), fabriquées avec différents taux de remplacement des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR), à

savoir 0 %, 10 %, 30 % et 60 %. L'essai consiste à appliquer une contrainte de compression axiale sur les éprouvettes, positionnées verticalement, afin de déterminer

Leur résistance à la compression ainsi que leur module d'élasticité longitudinal (ou module de Young moyen).

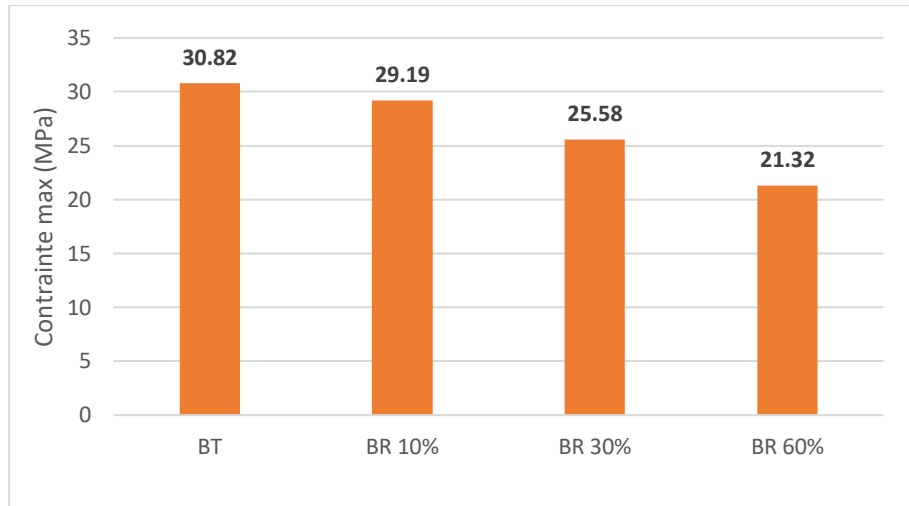
Avant l'essai, les faces des éprouvettes sont soigneusement surfacées pour garantir un contact optimal avec les plateaux de la presse, réduisant ainsi les frottements. Cette opération vise à assurer une répartition homogène des contraintes sur toute la section de l'éprouvette pendant la compression, limitant ainsi l'apparition de concentrations locales de contraintes susceptibles de provoquer une rupture prématurée.

Le surfacage améliore donc la reproductibilité et la fiabilité des résultats, tout en minimisant l'effet de frettage. Ce dernier résulte de la restriction de la dilatation transversale (effet de Poisson) due aux frottements entre les plateaux et l'éprouvette, ce qui induit un état de tri-compression au lieu d'une compression uni axiale pure. Or, le béton présente une résistance plus élevée en tri-compression. Afin d'obtenir une estimation précise de la résistance en compression uni axiale, il est donc essentiel de limiter cet effet au maximum (Figure III.4).



**Figure III.4:** Essai de compression uni axial.

## + Resultats :

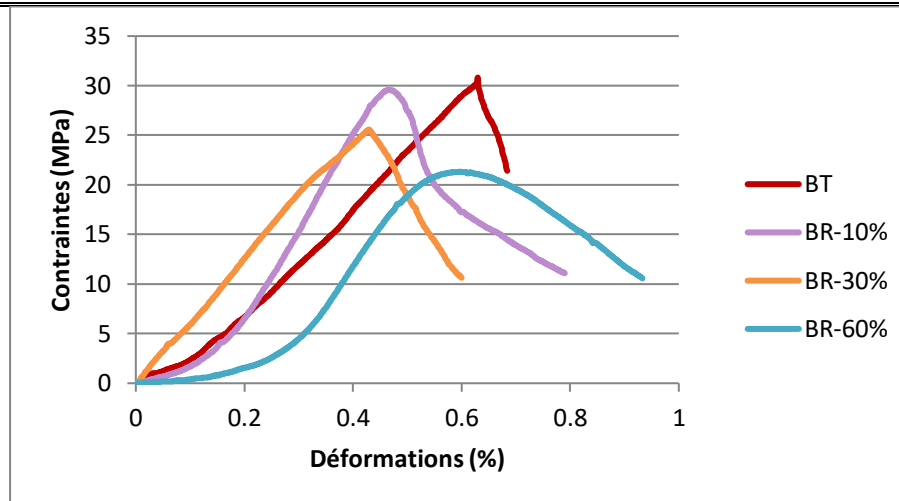


**Figure III.5 :** Influence du taux de substitution par les granulats recyclés sur la contrainte maximale (éprouvettes 10 × 20 cm).

On remarque que la contrainte maximale à la compression diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés

- Le béton témoin (BT) présente la résistance la plus élevée avec 30,82 MPa.
- L'incorporation de 10 % de granulats recyclés entraîne une légère baisse de la contrainte (29,19 MPa).
- Cette diminution devient plus marquée à 30 % de substitution (25,58 MPa).
- Enfin, à 60 %, la résistance chute significativement pour atteindre 21,32 MPa.

On peut donc conclure que l'augmentation du taux de substitution par des granulats recyclés réduit la résistance à la compression du béton, avec un effet plus prononcé à partir de 30 %.



**Figure III.6 :** Courbes contrainte-déformation des éprouvettes 10 × 20 cm pour différents taux de substitution en granulats recyclés.

- Béton témoin (BT) : la contrainte maximale atteint environ 31 MPa pour une déformation de 0,6 %. La courbe est régulière, traduisant une bonne rigidité et un comportement équilibré.
- BR 10 % : la résistance est légèrement améliorée ( $\approx 30$  MPa, supérieure au témoin), mais la rupture intervient plus tôt (0,5 % de déformation). Cela indique un gain en résistance mais une perte de ductilité.
- BR 30 % : la résistance chute à environ 25 MPa, atteinte rapidement (0,4 % de déformation). La rupture est plus brusque, révélant un matériau plus fragile et moins performant.
- BR 60 % : la résistance diminue fortement ( $\approx 21$  MPa), mais la déformation maximale augmente ( $\approx 0,9$  %). Le béton devient plus ductile, mais au détriment de la rigidité et de la résistance.

#### Mode de rupture :



BT



B R10%

BR30%

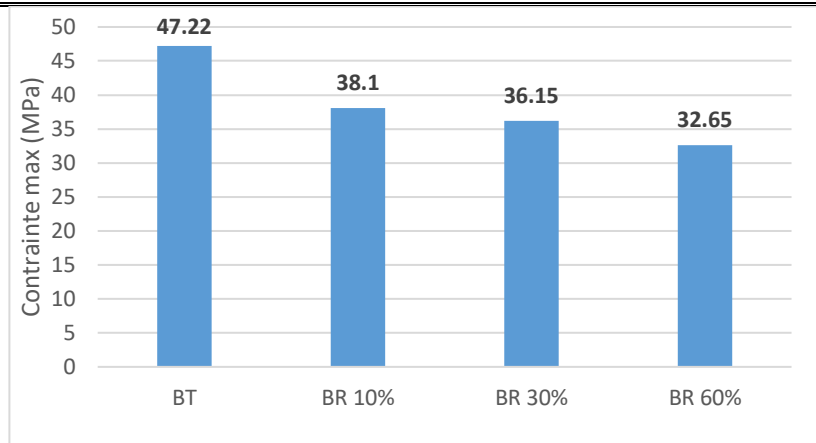
BR60%

**Figure III.7** : Évolution des fissures selon l'axe de compression des éprouvettes

10/20 cm.

- **BT** : présente des fissures verticales nettes et un éclatement modéré, signe d'un béton dense, résistant.
- **BR 10 %** : comportement proche du témoin, fissuration plus franche → compromis intéressant entre performance mécanique et recyclage.
- **BR 30 %** : rupture plus marquée avec des fissures plus larges et une cohésion réduite → fragilité accrue, moins avantageux.
- **BR 60 %** : fissures très ouvertes et multiples microfissurations, résistance plus faible mais capacité de déformation plus importante (béton moins rigide, plus ductile).

La Figure III.8 présente la variation de la contrainte maximale en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés pour les éprouvettes 16/32 cm.



**Figure III.8:** Influence du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur la contrainte maximale à la compression des éprouvettes de béton (fraction granulaire 16/32).

La contrainte maximale à la compression diminue avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés. Le béton témoin (BT) atteint la valeur la plus élevée avec 47,22 MPa. Lors de l'incorporation de 10 % de granulats recyclés, la résistance chute à 38,10 MPa, puis continue à diminuer à 36,15 MPa pour 30 % et à 32,65 MPa pour 60 %. Cette évolution met en évidence une perte progressive de performance mécanique, particulièrement notable dès 10 % de substitution.

#### Mode de rupture :



BT

BR10%

BR30%

BR60%

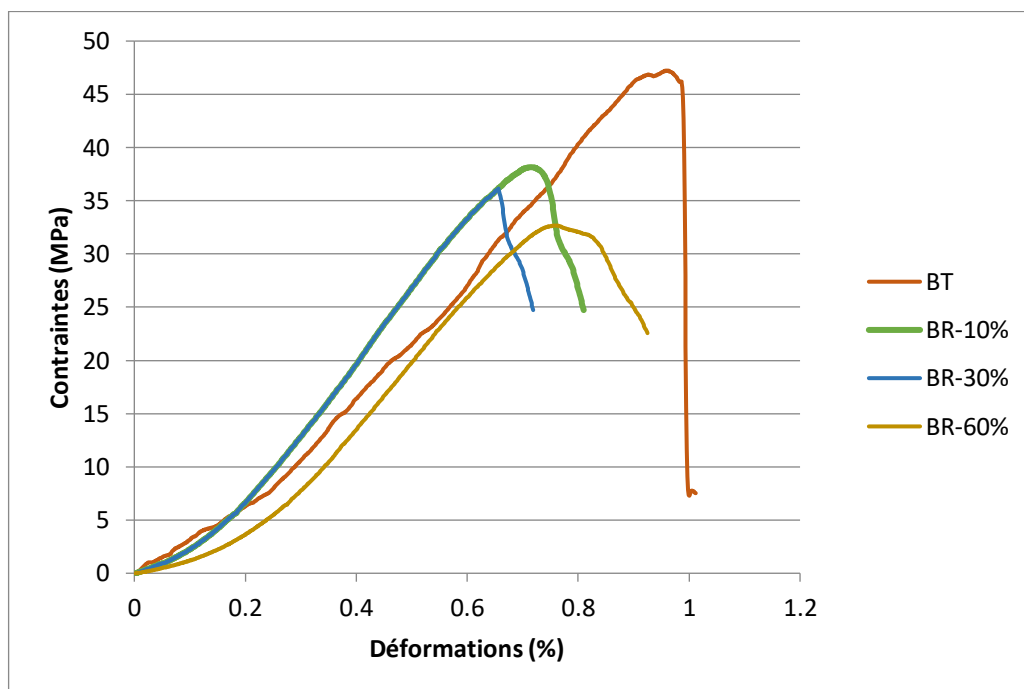
**Figure III.9 :** Développement des fissures sous l'effet de la compression des éprouvettes 16/32.

- Béton témoin (BT) : l'éprouvette présente une fissuration verticale régulière et progressive, traduisant une rupture typique d'un béton compact et homogène. La résistance mécanique mesurée est élevée ( $\approx 47,22$  MPa) avec une déformation maximale de l'ordre de 0,6 %, indiquant une bonne rigidité et une ductilité modérée.

• **BR-10 %** : l'incorporation de 10 % de granulats recyclés (GR) entraîne une contrainte maximale légèrement inférieure à celle du témoin ( $\approx 38,1$  MPa). Toutefois, les fissures apparaissent plus rapidement, sont plus marquées et la rupture se produit de façon plus brutale ( $\approx 0,5$  % de déformation). Le matériau gagne en résistance initiale mais perd en ductilité.

• **BR-30 %** : l'éprouvette présente des fissures traversantes avec un éclatement visible, traduisant une perte nette d'homogénéité. La résistance chute à environ 36,15 MPa, atteinte rapidement (vers 0,4 % de déformation). Le comportement devient plus fragile et la ductilité se réduit fortement.

• **BR-60 %** : la résistance diminue davantage ( $\approx 32,65$  MPa), mais la fissuration est plus diffuse, avec un écaillage progressif et une ouverture de fissures moins brutale. La déformation maximale atteint près de 0,9 %, ce qui traduit une perte de rigidité mais une meilleure capacité de déformation, donc un comportement plus ductile malgré la baisse de résistance.



**Figure III.10** : Courbes contrainte-déformation obtenues lors de l'essai de compression sur l'éprouvette 16/32 cm, en fonction du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés

Toutes les courbes présentent une montée initiale linéaire (comportement élastique), puis un palier ou un pic correspondant à la contrainte maximale avant rupture. L'échantillon BT atteint la contrainte maximale la plus élevée ( $\approx 46-47$  MPa) avec une déformation proche de 1 %, ce qui traduit une bonne résistance mécanique. L'ajout de BR (10%, 30%, 60%) diminue globalement la contrainte maximale atteinte :

- ✓ BR-10% garde encore une résistance correcte mais inférieure à BT.

- ✓ BR-30% montre une diminution plus marquée de la contrainte maximale et une rupture plus précoce.
- ✓ BR-60% présente la résistance la plus faible et une perte nette de rigidité.
- ✓ On observe donc que plus le pourcentage de BR augmente, plus la résistance mécanique diminue, même si la déformation à rupture varie légèrement selon les compositions.

Le matériau pur (BT) est le plus performant mécaniquement, tandis que l'incorporation de BR entraîne une réduction progressive des performances en termes de contrainte maximale supportée.

### III.2.5. Essai de traction par flexion trois points :

Les essais de flexion ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ . Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à rupture, selon un dispositif en flexion trois points. La charge est appliquée au moyen d'un rouleau supérieur, tandis que l'éprouvette repose sur deux rouleaux d'appui inférieurs. Les éprouvettes sont positionnées avec soin, de manière à ce que l'axe des rouleaux soit perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'éprouvette.

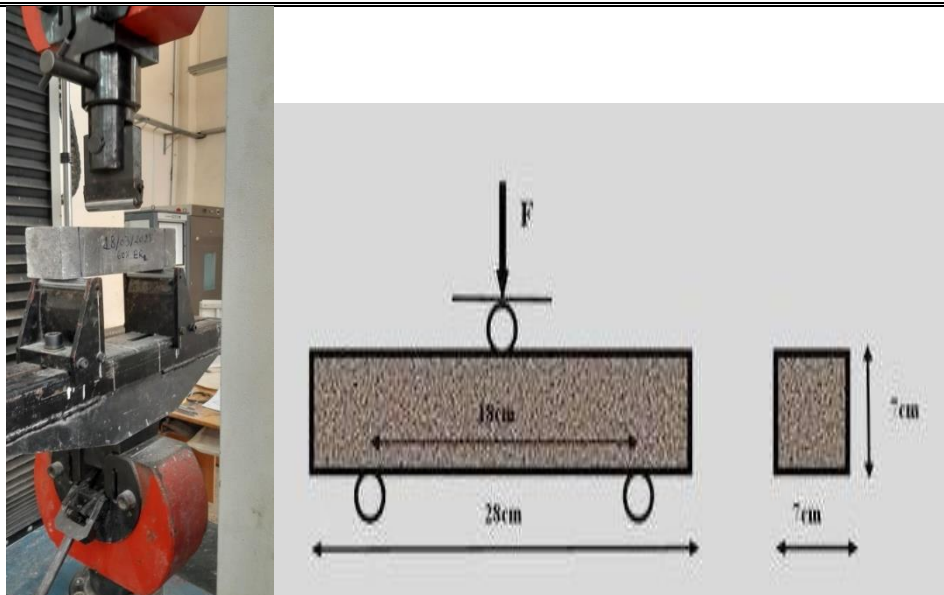
Conformément à la norme NF EN 12390-5 [Afnor, 2001], le chargement est appliqué à une vitesse constante de 0,25 mm/min jusqu'à rupture. La charge maximale au moment de la rupture est enregistrée, ainsi que la courbe contrainte force -déplacement correspondante.

La résistance en traction par flexion est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$t = (3 \times F \times l) / (2 \times b \times h)$$

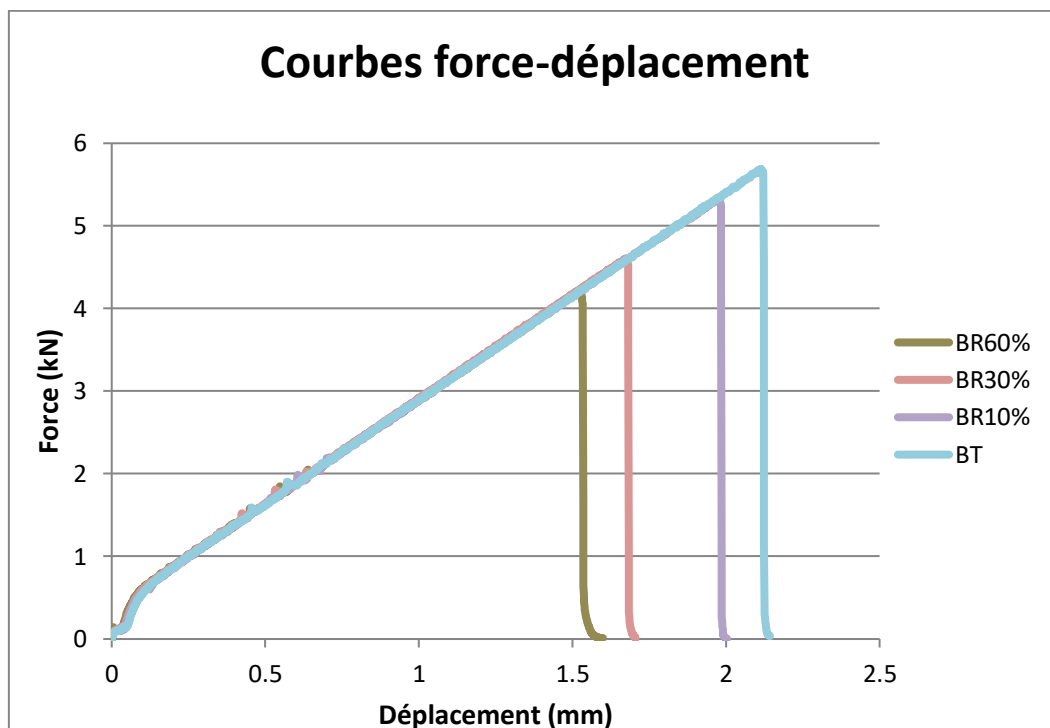
Avec :

- $F$  : charge maximale appliquée (en N),
- $l$  : distance entre les appuis (280 mm),
- $b$  : largeur de la poutre (70 mm),
- $h$  : hauteur de la poutre (70 mm).



**Figure III.11:** Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion 3 points.

✚ Résultats :



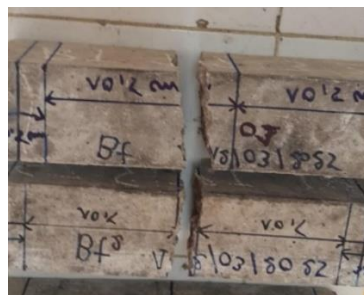
**Figure III.12 :** force applique et fonction de déplacement des éprouvettes.

• **BT :**

- La force maximale la plus élevée (~5,8 kN).
- Le déplacement est aussi le plus grand (~2,1 mm), traduisant une bonne rigidité et une résistance supérieure.

- **BR 10 % :**
  - Supporte une charge légèrement inférieure (~5,3 kN) avec un déplacement proche de 2,0 mm
  - Le comportement est très proche du témoin, ce qui confirme que 10 % de BR conserve de bonnes performances mécaniques.
  
- **BR 30 % :**
  - La charge maximale chute à environ 4,5 kN, pour un déplacement de ~1,6 mm.
  - Le matériau devient plus fragile, avec une rupture plus précoce et une rigidité réduite.
  
- **BR 60 % :**
  - C'est le plus faible en performance, rupture à environ 4,0 kN et 1,5 mm de déplacement.
  - Le béton présente une perte nette de résistance et de rigidité.

La Figure III.13 illustre la vue de la rupture observée au sein des poutres soumises à l'essai de flexion



BT



BR10%



BR30%



BR60%

**Figure III.13 :** vue rupture au sein des poutres en flexion.

Il y a la seule forme importante principale qui s'est développé jusqu'à obtenir

La rupture totale des éprouvettes

### III.3. MODELISATION DES MATERIAUX :

En élasticité linéaire, la relation contrainte-déformation se traduit par la loi de Hooke généralisée. [35]

Tandis qu'en élasticité non linéaire, cette relation se traduit par :

$$\sigma(y) = \varphi [ \varepsilon(y) ]$$

où  $\varphi$  définit le comportement réel du matériau.

- Béton :
- Béton en compression :

On admet un comportement élastique (c'est-à-dire réversible) non linéaire. On utilise les expressions proposées par Sargin :

$$\sigma = \frac{f_{cj} * (k_b * \bar{\varepsilon} + (k_b' - 1) * \bar{\varepsilon}^2)}{1 + (k_b - 2) * \bar{\varepsilon} + k_b' * \bar{\varepsilon}}$$

Avec  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_0$  et  $k_b = (E_{b0} * \varepsilon_0) / f_{cj}$  et  $E_{b0} = 11000 * \sqrt[3]{f_{ci}}$  :  
 où

✚  $\varepsilon_0$  étant la déformation du rupture sigu la contrainte correspondante :

$k_b' = k_b - 1$  pour les bétons normaux (ITB = 1 ou 2)

$k_b' = 0$  pour les bétons légers (ITB = 3 ou 4)

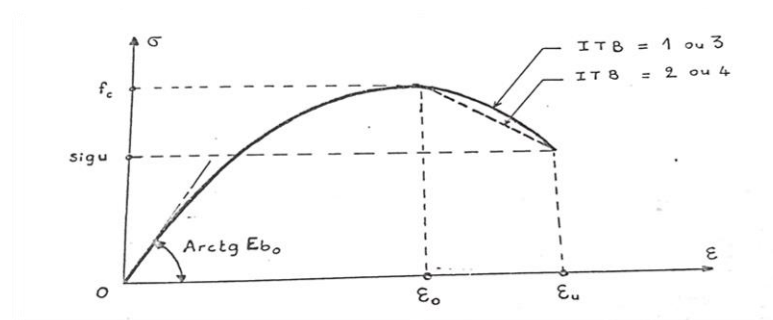


Figure III.14 :  $\epsilon_u$  étant la déformation du rupture  $\sigma_{igu}$  la contrainte correspondante [35].

### III.4. Conclusion :

Il apparaît globalement que les granulats recyclés présentent des propriétés mécaniques inférieures à celles des granulats naturels. Sur le plan physique, leur absorption d'eau et leur porosité sont plus élevées, principalement à cause de la pâte cimentaire résiduelle qui adhère à leur surface. Cette caractéristique explique la diminution de leurs performances. Cependant, un traitement visant à réduire la quantité de pâte cimentaire et à combler les pores et vides peut améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques, jusqu'à les rapprocher de celles des granulats naturels.

De la même manière, les bétons fabriqués avec des granulats recyclés montrent des performances généralement moindres que ceux produits avec des granulats naturels. Cette différence est liée à la qualité des granulats recyclés employés. Néanmoins, il est possible d'optimiser les propriétés du béton recyclé en adoptant un pourcentage de substitution approprié et en utilisant certains ajouts, comme la cendre volante, ou des fibres, afin de renforcer l'adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats recyclés.

Par ailleurs, l'ajout d'eau peut être toléré jusqu'à 10 %, ce qui entraîne une diminution équivalente d'environ 10 % de la résistance mécanique. Cette perte reste acceptable dans une logique de compromis et de valorisation des granulats recyclés. Toutefois, pour obtenir une bonne résistance et améliorer la maniabilité sans dégrader les performances mécaniques, il est préférable de recourir à un adjuvant fluidifiant adapté plutôt que d'augmenter la teneur en eau.

# **Conclusion Générale**

---

## Conclusion générale

Cette étude a permis d'analyser l'effet de la substitution des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons.

Sur le plan physique, les granulats recyclés présentent une masse volumique plus faible ( $\approx 2,2 \text{ g/cm}^3$  contre  $2,6 \text{ g/cm}^3$  pour les GN) et une absorption d'eau 2 à 3 fois plus élevée, en raison de la présence de pâte cimentaire résiduelle. Cette caractéristique entraîne une porosité accrue, ce qui impacte négativement la compacité et la durabilité du béton.

Sur le plan mécanique, les résultats montrent une tendance claire :

- Essai de compression sur éprouvettes cylindriques (10/20 et 16/32) :
  - ✓ Le béton témoin (BT) atteint les meilleures performances, avec une résistance de  $\approx 47,2 \text{ MPa}$  (16/32) et  $\approx 31 \text{ MPa}$  (10/20), traduisant un matériau rigide et homogène.
  - ✓ L'incorporation de 10 % de GR ne dégrade pas significativement la résistance ( $\approx 38,1 \text{ MPa}$  pour 16/32 et  $\approx 30 \text{ MPa}$  pour 10/20), mais réduit légèrement la ductilité.
  - ✓ À 30 % de substitution, la résistance chute d'environ 20 % ( $\approx 36,1 \text{ MPa}$  pour 16/32 et  $25 \text{ MPa}$  pour 10/20), accompagnée d'une rupture plus fragile et d'une perte nette de rigidité.
  - ✓ À 60 %, la résistance baisse fortement ( $\approx 32,6 \text{ MPa}$  pour 16/32 et  $21 \text{ MPa}$  pour 10/20), avec une déformation plus élevée (jusqu'à 0,9 %), traduisant un comportement plus ductile mais nettement moins performant.
- Essai de flexion par trois points (éprouvettes prismatiques  $28 \times 7 \times 7 \text{ cm}^2$ ) :
  - ✓ Le béton témoin atteint une charge maximale de  $\approx 5,8 \text{ kN}$  avec un déplacement de 2,1 mm, traduisant une rigidité et une résistance élevées.
  - ✓ À 10 % de GR, les performances restent proches ( $\approx 5,3 \text{ kN}$  et 2,0 mm), confirmant que ce taux de substitution conserve de bonnes propriétés.
  - ✓ À 30 %, la charge maximale diminue à  $\approx 4,5 \text{ kN}$  avec un déplacement de 1,6 mm, marquant une fragilité accrue.
  - ✓ À 60 %, les performances sont les plus faibles ( $\approx 4,0 \text{ kN}$  et 1,5 mm), traduisant une forte perte de résistance et de rigidité.

Ces résultats confirment que les bétons recyclés présentent des performances inférieures à celles du béton ordinaire, surtout au-delà de 30 % de substitution. Néanmoins, la substitution limitée ( $\approx 10 \%$ ) montre un compromis acceptable, permettant de valoriser les déchets de démolition tout en préservant les propriétés mécaniques essentielles.

## Solutions possibles et perspectives

Pour améliorer la qualité du béton recyclé et élargir ses applications, plusieurs pistes sont envisageables :

- **Limiter le taux de substitution à 20–30 %** pour les bétons structurels, afin de maintenir un bon équilibre entre résistance et durabilité.
- **Utiliser des adjuvants fluidifiants** plutôt qu'un excès d'eau pour améliorer la maniabilité, évitant ainsi une baisse de résistance.
- **Incorporer des additions minérales** (cendres volantes, fumées de silice, fillers) afin d'améliorer la compacité et l'adhérence pâte-GR.
- **Traiter les granulats recyclés** (lavage, carbonatation, imprégnation) pour réduire la porosité et améliorer leur performance mécanique.
- **Renforcer le béton avec des fibres** (métalliques ou végétales) afin de compenser la perte de ductilité et limiter la fissuration.

## *Références Bibliographiques*

## Références Bibliographiques

- [1]- Gabrysiak, F. (2007). Matériaux – Les bétons (Chapitre 4). Académie de Nancy-Metz.
- [2]- Nigri, G. (2020). Technologie du béton [Polycopié de cours]. Université 8 Mai 1945 – Guelma.
- [3]- Bouakaz, F., & Atmimou, N. (2021). Étude expérimentale d'un béton à base de granulats recyclés (Mémoire de fin d'études, Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de la Construction, Département de Génie Civi
- [4]- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 21, numéro 10, p. 601- 611.
- [5]- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. et Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 5, p. 735-742.
- [6]- Tam, V. W. Y., Gao, X. F. et Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- [7]- Kobouche, R., & Belhadj, S. (2022). Les granulats recyclés (sable recyclé) d'un béton à hautes performances : étude de la résistance mécanique (Mémoire de fin d'études, Master, Spécialité Travaux Publics, Option VOA). Université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie.
- [8]- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
- [9]- De Juan, M. S. et Gutierrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7
- [10]- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 21, numéro 10, p. 601- 611.
- [11]- Padmini, A. K., Ramamurthy, K. et Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 829-36.
- [12]- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T. et Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 5, p. 707-712

- [13]- Tarn, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9
- [14]- Tam, V. W. Y., Gao, X. F. et Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- [15]- Malesev, M., Radonjanin, V. et Marinkovic, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, volume 2, numéro 5, p. 1204-25.
- [16]- Zega C, Villagrán-Zaccardi Y, Di Maio A (2010) Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures* 43(1-2):195–202.
- [17]- De Milito, L., & Maillard, A. (2024, 12 mars). Le béton recyclé [Rapport technique, formation Conducteur·trice de travaux, 3<sup>e</sup> année]. Techni, Suisse.
- [18]- Fathifazl, G. (2007). Structural performance of Steel Reinforced Recycled Concrete. Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Carleton University.
- [19]- Kou, S., Poon, C. et Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, volume 33, numéro 2, p. 286-291.
- [20]- Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 1163-7.
- [21]- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
- [22]- Yang, K., Chung, H. ET Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, volume 105, numéro 3, p. 289-296.
- [23]- Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. et Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, volume 35, p. 421-427.
- [24]- Safiuddin, M., Alengaram, UJ., Salam, MA., Jumaat, MZ., Jaafar, FF., and Saad, HB. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Mater Res* 14(2):248–255.
- [25]- Casuccio, M., Torrijos, MC., Giaccio, G., and Zerbino, R. 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 22(7):1500–1506.

- [26]- Tavakoli, M., and Soroushian, P. 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 182-190.
- [27]- De Oliveira, M. B. et Vazquez, E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
- [28]- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. et Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 5, p. 730-745
- [29]- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T. et Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 5, p. 707-712.
- [30]- Kou, Srao, C., Poon, CS., and Wan, HW (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 36, 881–9.
- [31]- Rao, CM., Bhattacharyya, SK., Barai ,SV. 2011. Influence of field recycled aggregate on properties of concrete. *Mater Struct*, 44(1), 205–220.
- [32]- Soares, D., de Brito, J., Ferreira, J., and Pacheco, J. 2014. In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures. *Construction and Building Materials*, 71, 237–245.
- [33]- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., and Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- [34]- Ferreira, L., Barra, M. et de Brito, J. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, volume 63, numéro 8, p. 617-27.
- [35]- Bouafia, Y. (1987). Simulation numérique du comportement moyen jusqu'à rupture d'une zone de poutre : Application au béton armé ou précontraint et béton de fibres (Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie – Paris