

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2018

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

*Thème :*

**Analyse des poutres en béton armé recyclés**

**Domaine : Sciences et Technique**

**Spécialité :**

**GENIE CIVIL**

**OPTION**

**STRUCTURE**

**Par**

**Noms, Prénoms des Etudiants (es)**

**Hafiane Afaf**

**DIRECTEUR DU MEMOIRE kebaili bachir**

**,GRADE, GENIE CIVIL, U B M ANNABA**

DEVANT LE JURY

**PRESIDENT :**

**EXAMINATEURS :**

## Résumé :

Ce mémoire présente une étude expérimentale sur la résistance et la fissuration des poutres en béton armé à base de granulats recyclés.

Trois poutres (**15 x 25 x 200 cm**) ont été préparées avec la même section d'armature et trois types de bétons différents : **100% naturel**, **50% recyclé** et **100% recyclés** de classe de résistance **C29.25 / 23.31 / 19.48 Mpa**. Ayant le même rapport **E/C**.

Les poutres ont été testées en flexion 4 points sous chargement. Les résultats obtenus montrent que les poutres fabriquées en béton de granulats 100% et 50% recyclés ont des flèches et des états de fissuration significativement plus importants que la poutre en béton armé à base de granulats naturels.

Les divers résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats théoriques. Les comparaisons révèlent que les résultats de la flèche théorique n'ont pas trouvés correctement les mêmes valeurs expérimentales, avec des écarts plus importants pour les poutres à base de **100%** et **50%** de granulats recyclés par rapport à celle fabriquée à base de granulats 100% naturel. Cependant l'utilisation des granulats recyclés affecte considérablement la carte des fissurations où le réseau de fissures et leurs tailles augmentent avec le taux de substitution.



## Liste des Figures

### Figures de chapitre I :

**Figure I -1.**Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite  
**Page 3**

**Figure I. 2-** Méthodes d'amélioration du RAC **Page 7**

### Figures de Chapitre III :

**Figure III. 1** -broyage des éprouvettes **Page20**

**Figure III. 2** - criblages des granulats recyclés **Page21**

**Figure III. 3** - ciment utilisé **Page21**

**Figure III. 4** – ferrailage **Page22**

**Figure III. 5** - étuve de séchage des éprouvettes **Page23**

**Figure III. 6** -détermination de la masse volumique des granulats naturels et recyclé **Page24**

**Figure III. 7** - détermination de masse volumique absolue des granulats naturels et recyclé **Page25**

**Figure III. 8** - traçage du courbe OAB des granulats naturels de dosage  $350 \text{ kg/m}^3$  **Page33**

**Figure III. 9** - Le malaxage du béton **Page38**

**Figure III. 10** - mesure de l'affaissement au cône d'abrams **Page39**

**Figure III. 11** - essai d'affaissement au cône d'abrams **Page39**

**Figure III. 12-** mise en place de ferrailage **Page40**

**Figure III. 13** - l'huile 'moto oil ' **Page40**

**Figure III. 14-** la mise en place de béton dans le moule de la poutre **Page41**

**Figure III. 15-** la mise en place de béton dans les moules **Page41**

**Figure III. 16-** démoulage des poutres **Page42**

**Figure III. 17-** les éprouvettes **Page42**

**Figure III. 18-** Essai de compression **Page43**

**Figure III. 19-** Essai de compression **Page44**

**Figure III. 20-** Essai de flexion simple **page45**

## **Figures de Chapitre IV :**

**Figure IV.1 :** la résistance de compression **page50**

**Figure IV. 2 :** la résistance de compression **page 51**

**Figure IV.3 :** résultats de la flèche théorique et expérimental BN100% **page52**

**Figure IV.4 :** résultats de la flèche théorique et expérimental BR50% **page53**

**Figure IV.5 :** résultats de la flèche théorique et expérimental BR100% **page53**

**Figure IV.6 :** résultats de la flèche théorique **page54**

**Figure IV.7 :** résultats de la flèche expérimentale **page55**

**Figure IV.8 :** allure de flèche BR100 % **page 56**



## **Les tableaux chapitre II :**

<b>Tableau II. 1-</b> les constituantes des bétons	<b>Page 09</b>
<b>Tableau II. 2-</b> les types de ciment	<b>Page 10</b>
<b>Tableau II. 3 -</b> types des granulats recyclé	<b>Page13</b>

## **Les tableaux chapitre III :**

<b>Tableau III.1</b> : les masses volumiques des granulats	<b>Page 26</b>
<b>Tableau III.2</b> : Coefficient d’Absorption d’eau pour granulats naturels	<b>Page 28</b>
<b>Tableau III.3</b> : Coefficient d’Absorption d’eau pour granulats recyclés	<b>Page 28</b>
<b>Tableau III.4</b> : la porosité pour les granulats naturel (5 /10)	<b>Page 28</b>
<b>Tableau III.5</b> : la porosité pour les granulats naturel (10 /20)	<b>Page 29</b>
<b>Tableau III.6</b> : la porosité pour les granulats recycler (5 /10)	<b>Page 29</b>
<b>Tableau III.7</b> : la porosité pour les granulats recycler (10 /20)	<b>Page 29</b>
<b>Tableau III.8:</b> Tamisage de sable naturel	<b>Page 30</b>
<b>Tableau III.9</b> : Tamisage de sable recyclé	<b>Page 30</b>
<b>Tableau III.10</b> : tamisage de gravier naturel 5/10	<b>Page 31</b>
<b>Tableau III.11</b> : tamisage de gravier naturel 10/20	<b>Page 31</b>
<b>Tableau III.12</b> : tamisage de gravier recyclé 5/10	<b>Page 31</b>
<b>Tableau III.13</b> : tamisage de gravier recyclé 10/20	<b>Page 32</b>
<b>Tableau III.14</b> : pourcentage des granulats utilisé dans 1m <sup>3</sup> de béton ordinaire	<b>Page 33</b>
<b>Tableau III.15</b> : les volumes absolus	<b>Page 35</b>
<b>Tableau III.16</b> : composition 100% naturel	<b>Page 35</b>
<b>Tableau III.17</b> : composition 50% naturel	<b>Page 35</b>
<b>Tableau III.18</b> : Composition 50% recyclé	<b>Page 37</b>
<b>Tableau III.19</b> : Composition 100% recyclé	<b>Page 37</b>

## **Les tableaux chapitre IV:**

<b>Tableau IV. 1:</b> valeurs de l'essai compression et de l'essai de traction	<b>page49</b>
--	---------------



## Liste de symbole

BTP : bâtiment et travaux publique

EU : union européenne

C : construction

D : démolition

AN : agrégat naturel

AR : agrégat recyclé

RA : recycled aggregate

NA : natural aggregate

NAC : natural aggregate concrete

RAC : recycled aggregate concrete

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

d : diamètre le plus petit du granulat.

D : diamètre le plus grand du granulat

LNHC : laboratoire national de la habitat et de la construction a Annaba « el bouni »

Ms= masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105° C

Ma= masse de l'échantillon imbibé

Ab % : Coefficient d'Absorption d'eau des granulats

Ai: Refus cumulés en % des tamis

MF : Le module de finesse

K= valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment

Mn : la masse du béton a base d'agrégats naturels

$\rho_r$ : la masse volumique du béton recyclé

$\rho$  : la masse volumique du béton a base d'agrégats naturels

BR100 : béton recyclé 100%

BR50 : béton recyclé 50%

BN100 : béton naturel 100%

$\sigma_{bt}$  : contrainte de traction du béton

L : la distance entre appuis

P : la force de rupture

M : moment fléchissant

$I_{NF}$  : moment d'inertie non fissuré

$I_F$  : moment d'inertie fissuré

$B_{enr}$  : section d'enrobage

$f_t$  : contrainte de traction dans le béton

$F_{bt}$  : la force de traction du béton

F : la flèche

## Sommaire

1. Introduction :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2. Contexte général : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1. Contexte Européen :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.2. L'utilisation déchets de constructions et démolitions en Australie : ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3. La nécessité de recycler les déchets de constructions et de démolitions : ..	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4. Applications actuelles des agrégats recyclés et leurs limitations pour des applications plus larges dans la construction : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5. Technologie et recherche pour améliorer les propriétés RAC :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1. Introduction.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2. Le béton .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1. Définition .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3. Le béton recyclé :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.1. Fabrication de granulats recyclés :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.3. Avantages de l'agrégat recyclé :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.4. Inconvénients de l'agrégat recyclé : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.4.1. Application de l'agrégat recyclé : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.5. Propriétés de béton recyclé:.....	16
3.6. Les conséquences des granulats de béton recyclés sur le béton durci et frais :.....	17
4. Le béton armé:.....	17
4.1. Définition:.....	17
4.2. Avantages du béton armé :.....	18
4.3. Principe du béton armé :.....	18
5. L'adhérence :.....	18
1. Introduction :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2. Matériaux utilisés :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1. Les bétons :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1.1. LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1.2. Les granulats naturels :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1.3. Les granulats Recyclés : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.2.1. La Masse volumique apparente :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

3.3. Le module de finesse : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.4. Coefficient d’Absorption d’eau des granulats (Ab %): .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.4.1. Description de l’essai : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.5. La porosité : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.5.1. Description de l’essai : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4. L’analyse granulométrique : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5. Formulation des bétons .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.1. Données de bases:.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.3. Dosage de composantes:.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.3.1. Le volume absolu de l’ensemble des granulats :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.3.2. Les volumes absolus de chacun des granulats : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Granulat naturel : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Les volumes absolus des granulats : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.3.3. Les masses spécifiques de chacun des granulats : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Granulats naturels : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.4. Correction de la formulation: .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.4.1. La correction du dosage d’eau et du ciment dans la formulation de 100% recycler :	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.4.2. Composition 50% recyclé : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.4.3. Composition 100% recyclé : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.1. Affaissement au cône d’Abrasion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
8.Confection des éprouvettes:.....	41
8.1Préparation des moules : .....	41
8.2.La mise en place de béton dans les moules : .....	42
9.Les essais de caractérisation : .....	44
9.1.Essais de compression (NF EN 1290-3) : .....	44
9.1.1.Objectif de l’essai : .....	44
9.2.L’essai de traction par flexion : .....	44
9.2.1.Le principe d’essai : .....	44
9.2.2 Machine d’essai : .....	45
10.Essais expérimentiel :flexion simple : .....	45
10.1.objectif d’essai : .....	45

10.2.Machine d'essais:.....	46
10.2.1. Mode opératoire:.....	46
1. Méthodes expérimental :.....	48
1.1. Essais de caractérisation :.....	48
1.2. Résultats de l'essai de compression et de l'essai de traction par flexion :.....	48
1.2.1. Analyse du résultat de l'essai de compression :.....	49
1.2.2. Analyse des résultats de l'essai de traction par flexion :.....	50
2.1 Résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BN100%.....	51
2.2 Résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BR50%.....	51
2.3. Les résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BR100 :.....	52
2.4. Les résultats de la flèche théorique des trois poutres :.....	52
2.5. Résultats de la flèche expérimentale des trois poutres :.....	53
3. Analyse et Comparaison entre les résultats expérimentaux et les calculs théoriques de la flèche des trois poutres :.....	53
4. Calculs des flèches théoriques :.....	55
5. Etude de la fissuration :.....	66
3. Analyse de la fissuration:.....	68
Conclusion.....	70

Introduction

Général

# Introduction générale :

---

## Introduction générale :

Le monde se développe et l'urbanisme à un rythme très rapide, tout comme l'Algérie. Cet effet de l'urbanisation rapide est également vu dans l'industrie de la construction. Cependant avec l'urbanisation vient la responsabilité morale de soutenir l'environnement.

Le béton est le matériau de construction préféré pour les ingénieurs de génie civils du monde entier depuis des dizaines d'années ; il est préféré pour ses meilleures performances sa durée de vie plus longue et son faible coût d'entretien. Pour parvenir à une urbanisation rapide. Chaque année des structures plus petites sont démolies et des constructions plus récentes et plus grandes sont construites. Ces matériaux démolis (dont la majorité est généralement en béton) sont souvent déversés sur terre, cette pratique affecte la fertilité de la terre.

La vague de durabilité ayant également un impact sur l'industrie la construction, les scientifiques et les ingénieurs du monde entier recherchent des matériaux de construction durable et réutilisable un de ces matériaux et le béton granulaire recyclés.

Le recyclage des déchets de construction et de démolition (C & D) a été considéré comme une option intéressante non seulement pour réduire au minimum les flux de déchets de C & D vers les décharges, mais aussi pour atténuer l'épuisement des ressources minérales primaires.

Aujourd'hui la filière usuelle de recyclage du béton de déconstruction est sa transformation en grave à usage routier (remblai, couche de forme).

Le « retour du béton au béton » par l'usage différencié de sa phase granulat et de sa phase matrice cimentaire permettrait un recyclage optimisé permettant sa réutilisation complète en tant que matière première (secondaire) de liants hydrauliques, granulat recyclé en technique routière, mais aussi en béton routier ou en béton de structure.

Cependant, l'industrie est toujours en retard dans l'utilisation d'agrégats recyclés dans les éléments structuraux. Par conséquent, la question de recherche qui se pose jusqu'à maintenant est : « Quel sont les barrières qui affectent l'utilisation du béton granulaire recyclé comme matériau de structure? »

Le besoin d'améliorer l'utilisation du béton recyclé dans le domaine des structures nécessite d'étudier la capacité du béton recyclé à assurer une bonne adhérence avec l'acier.

Cette étude a pour objectif d'analyser des poutres en béton armé recyclé.

# **Introduction générale :**

---

**Chapitre I :**

**Etude**

**bibliographie**

## Chapitre I : Etude bibliographique

### 1. Introduction :

L'utilisation d'agrégats recyclés a été explorée pour mener à un avenir durable car elle fournit une alternative au béton naturel traditionnel. Des études ont montré que pour que l'industrie de la construction soit durable, les granulats recyclés doivent être largement utilisés et même remplacer l'agrégat naturel. Cependant, la recherche sur les granulats recyclés a découvert les lacunes de ce matériau, les facteurs limitant à son utilisation en raison de sa faible résistance. Plusieurs études de recherche tentent d'améliorer la qualité des agrégats recyclés soit en ajoutant des divers additifs ou en changeant ses méthodes de production. Cependant, l'industrie est toujours en retard dans utilisation d'agrégats recyclés dans les éléments structuraux. Par conséquent, la question de recherche qui se pose jusqu'à maintenant est : « Quel sont les barrières qui affectent l'utilisation du béton granulaire recyclé comme matériau de structure? » .

### 2. Contexte général :

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde, après l'eau. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre, afin d'adopter des méthodes s'inscrivant dans un contexte de développement durable .Il a été observé ces dernières années dans le secteur du BTP, une augmentation conséquente du nombre de constructions, qui se traduit par un besoin toujours croissant de matières premières. Or, les gisements naturels de granulats potentiellement exploitables se raréfient, et les industriels font face à une difficulté d'approvisionnement croissante [2] .

# Chapitre I : Etude bibliographique

## 2.1. Contexte Européen :

D'après une étude de la commission Européenne [stud 2005], les déchets de construction et de démolition représentent 1 tiers des déchets générés dans l'UE, soit environ 1t/hab./an. 40% d'entre eux sont réutilisés dans la production de granulats recyclés.

D'autre part, en 2005 la production de matériaux recyclés sous forme de granulats représentait 6% de la production totale de granulats utilisés dans le BTP. Le principe de recyclage se met cependant petit à petit en place. Le traitement des déchets de démolition représente aujourd'hui une vraie industrie, mais dont le profit dépend fortement de l'environnement technique, économique ,géologique et politique de la zone dans laquelle elle opère [2] .

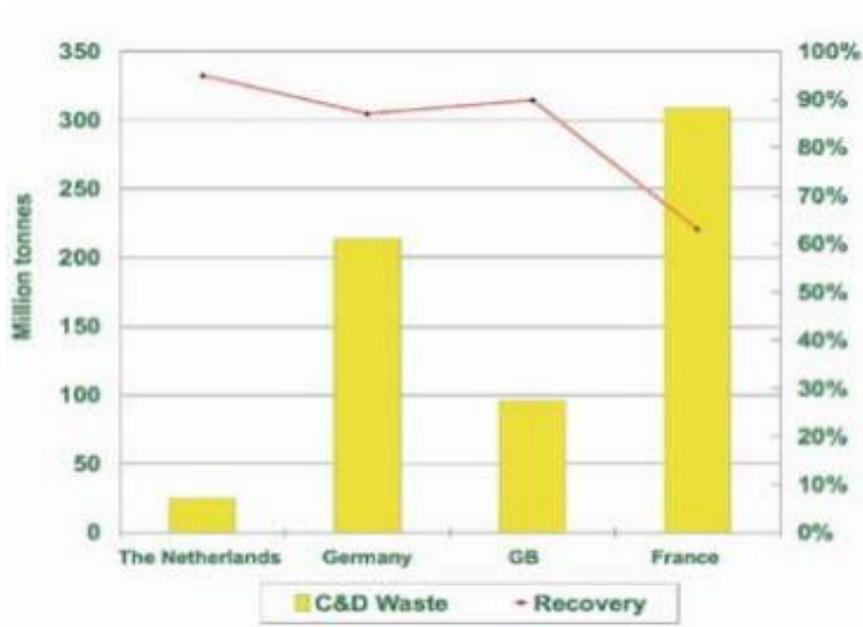


Figure I -1.Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite [2] .

## 2.2. L'utilisation déchets de constructions et démolitions en Australie :

# Chapitre I : Etude bibliographique

---

L'Autorité australienne de protection de l'environnement de la Nouvelle-Galles du Sud a réalisé une analyse des déchets sur une période de six ans [5]. Il a été découvert que le béton constitue l'un des principaux déchets de C & D.

Le recyclage du béton offre trois avantages :

- réduire le besoin de nouvelles ressources naturelles.
- réduire le transport et le coût de production; et utiliser les déchets de C et D qui seraient autrement rejetés dans les sites d'enfouissement [3].
- le recyclage du béton réduit également les dommages sur l'environnement par des techniques inadéquates d'élimination des déchets de béton [6].

Tam [6] a souligné que seulement 57% des déchets de C & D de l'Australie sont recyclés par rapport au taux de 98% du Japon. Le faible pourcentage de l'Australie est dû à quatre principaux facteurs:

- le coût initial de l'équipement nécessaire pour le recyclage du béton.
- le manque de formation et de gestion compétences.
- expérience limitée avec l'AR soutien limité [6]

Cependant, l'utilisation de AR dans le béton est limitée à certaines applications en raison de ses propriétés par rapport au béton utilisant un agrégat naturel (AN). Les bétons utilisant AR par rapport à AN ont une traction plus faible et résistance à la compression, et aussi une durabilité diminuée comme discuté ensuite [1] .

### **3. La nécessité de recycler les déchets de constructions et de démolitions :**

Les ressources naturelles sont consommées à taux alarmant pour la production de nouveaux matériaux de construction, plutôt que de recycler et de réutiliser les matériaux existants [4]. Par conséquent, la nécessité de recycler les déchets de C & D est devenue cruciale pour la durabilité de l'industrie de construction.

## **4. Applications actuelles des agrégats recyclés et leurs limitations pour des applications plus larges dans la construction :**

L'utilisation de la AR dans le béton s'est révélée être une alternative durable et économique à AN et efficace dans les composants non structuraux pour les quels la résistance n'est pas critique. Traditionnellement, RA a été utilisé dans la construction des chaussées pour fournir une alternative économique et durable à NA [7]. Exemples pratiques en Chine utilisant une proportion de mélange de béton employant une teneur en AR de 50%, ont satisfait aux mêmes exigences que les AN . Tosic et al. [8] réitèrent que les chaussées et les sous-couches routières sont les applications les plus courantes de la polyarthrite rhumatoïde. Avec seulement 1% des granulats recyclés étant utilisés dans des applications structurelles, de plus grands avantages de la RA peuvent être observés s'ils sont incorporé dans toutes les applications concrètes [8]. Par conséquent, en s'efforçant de rendre commune la AR dans toutes les applications concrètes, en particulier ceux dans les composants structuraux, les propriétés structurelles de RAC doivent d'abord être établies.

La performance du béton à l'aide de AR est soumise à plusieurs études expérimentales. Conclusions de Martínez et al.[9] ont montré que l'AR avait un effet négatif sur les propriétés du béton frais et durci, par rapport à AN.

De même, Heeralal et al. [10] ont trouvé des effets négatifs sur le béton lors de l'utilisation de RA par rapport à NA. Quiasrawi et Marie [11] a découvert que le béton utilisant des agrégats recyclés deux fois (2e génération) propriétés comparées au béton utilisant des granulats recyclés une seule fois (première génération).

Ettxeberria et al. [12] ont suggéré que l'AR devrait provenir du béton recyclé à faible résistance et qu'une limite de 30% RA ne soit pas dépassée.

Expériences de Rao et al. [13] exposé le fait que RAC est moins dense comparé au béton utilisant AN, le RAC a un avantage concurrentiel sur le CNA lorsque le béton léger est requis. Dans l'ensemble, la recherche mentionnée ci-dessus montre que le RAC est inférieur au NAC principalement en termes de force,

la force diminue au fur et à mesure que le contenu de l'AR augmente. Cependant, pour que l'industrie de la construction soit plus durable.

AR doit être largement utilisé et même remplacer AN dans les applications structurales. La section suivante traite les différentes tentatives faites par les chercheurs pour améliorer la force du RAC afin qu'il puisse être mieux utilisé dans les applications.

## **5. Technologie et recherche pour améliorer les propriétés RAC :**

Pour que le RA soit couramment utilisé dans le béton, les propriétés du RAC doivent être égales à celles du NAC.

Cependant, le Au-dessus de la recherche dans les propriétés de RAC, illustre que ce n'est pas le cas. Par conséquent, pour que cela se concrétise, les propriétés mécaniques du RAC doivent être améliorées.

Il est expliqué qu'avec les adjuvants et la qualité appropriés matériaux un mélange RAC pourrait être conçu pour des buts structuraux.

La littérature montre de nombreuses tentatives d'améliorer le RAC tel qu'illustré à la figure 1-2 et expliqué un par un dans les paragraphes suivants de cette section [1] .

Comme mentionné précédemment, Martínez et al. [9] ont mené une analyse comparative du RAC et du NAC à Cuba, et approfondi leurs recherches en expérimentant des méthodes pour améliorer les qualités du RAC pour qu'elles soient égales à celles du NAC. c'était déterminé que la charge de calcaire avec l'ajout de scories blanches dans RAC égalait le physique et mécanique propriétés de la maçonnerie conventionnelle utilisant un agrégat naturel. Le mélange RAC utilisé, contenait 3 tailles RA différentes améliorer la distribution de classement et a également contribué à améliorer les propriétés de RAC. Inversement,

Martínez et al. [9] ont souligné que l'agrégat naturel à Cuba est de moindre qualité en raison d'un manque de ressources naturelles. Par conséquent, ces les résultats sont limités, car la force du mélange proposé utilisé par Martínez et al. [9] peut ne pas égaler NAC dans d'autres emplacements utilisant une NA de haute qualité, comme Sydney.

Knoeri et Althaus [14] ont ajouté du ciment à RAC contrecarré à la qualité mécanique abaissée, qui a permis au RAC d'égaliser la force de NAC.

# Chapitre I : Etude bibliographique

---

L'utilisation de polymères a été testée pour tenter de fournir une solution aux mauvaises caractéristiques d'absorption d'eau du RAC [15]. En utilisant du silicate de sodium soluble et divers additifs à base de silicium, des polymères ont également été utilisés pour fournir une meilleure résistance à la fragmentation du RAC.

Spaeth et Tegguer [15] ont trouvé que les capacités de répulsion des polymères ont créé un fil autour de la pâte de mortier attachée à la RA. Par conséquent, on a une réduction considérable d'eau.

les caractéristiques absorbantes de la RA et renforcement de la matrice cimentaire du RAC [15]. Cependant, l'étude ci-dessus n'a pas traduit les résultats en différences de force quantifiables de RAC avec et sans additifs polymères. Et fournit l'évaluation des polymères difficiles à déterminer.

Kou et Agrela [16] ont exploré l'utilisation des adjuvants minéraux suivants pour améliorer les propriétés du RAC et NAC avec des fumées de silice, du métakaolin, des cendres volantes et du laitier granulé broyé . Il a été constaté que les fumées de silice et le métakaolin a amélioré la durabilité et les propriétés mécaniques. Alors que les cendres volantes et les laitier granulé broyé ont un effet négatif sur propriétés mécaniques; pourtant, ils ont diminué la perméabilité du béton [16]. Il a été observé que les adjuvants minéraux ont montré des améliorations plus importantes sur le RAC que sur le NAC. Comme RA sont plus poreux, une possibilité pour cela est donné, car les adjuvants de matière pénètrent beaucoup plus dans l'AR [16]. Par conséquent, il a montré une plus grande connexion de zone de transition interfaciale (ITZ) entre la RA et la pâte de mortier. Dans l'ensemble, les conclusions de Kou et Agrela [16] ont montré que le NAC sans ces adjuvants minéraux présente des propriétés mécaniques supérieures à celles du RAC contenant ces adjuvants minéraux.

Pour tenter d'augmenter l'ouvrabilité du RAC en utilisant des adjuvants réducteurs d'eau, Barbudo et al. [17] ont découvert que les propriétés mécaniques du RAC étaient également améliorées. ils ont trouvé qu'en utilisant des plastifiants et super-plastifiants un rapport eau / ciment plus faible ( $E/C$ ) avec la même maniabilité était réalisable. Les plastifiants non seulement augmentent la maniabilité, ils remplissent également le volume de vides dans le béton et améliorant la performance mécanique du béton [17]. Avec le rapport  $E/C$  inférieur obtenu, cela équivalant à un RAC avec une plus grande force et durabilité accrue.

# Chapitre I : Etude bibliographique

Tam et Tam [18] ont exploré la durabilité du RAC en utilisant une approche de mélange en deux étapes (TSMA). Le double processus d'approche de mélange se concentre sur le processus de production de béton pour améliorer les qualités de RAC, par rapport à une approche de mélange normale. Il a été constaté que l'approche de mélange en deux étapes améliorerait le RAC on termes de déformation et de perméabilité. Cela a été dû à la boue de ciment remplissant les vieilles fissures dans le vieux poreux ciment mortel sur la RA, au cours de la première étape de mélange.

En réponse à la TSMA, Kong et al. [19] ont utilisé une approche de mélange en trois étapes pour fournir plus de RAC propriétés par rapport à la TSMA. L'approche de mélange en trois étapes a été utilisée pour recouvrir la RA particules pouzzolaniques, qui ont réussi à augmenter la zone de transition interfaciale vue par la microstructure [19]. Les particules pouzzolaniques recouvrent les cristaux d'ions chlorure absorbant l'eau présents dans l'ancienne pâte de mortier collée sur la polyarthrite rhumatoïde. Par conséquence on a une diminution d'eau absorbée par l'AR. Cela indique une force accrue dans la compression et la résistance à la pénétration de RAC en utilisant l'approche de mélange en trois étapes par rapport à la TSMA.

Selon Senaratne et al [20], en ajoutant de la fibre d'acier à RA, on peut obtenir un matériau structurellement sain. Ils ont trouvé la combinaison optimale à travers des expériences comme remplacement de 30% de la RA avec l'ajout de 0,6% fibre d'acier, qui a également révélé des économies significatives lorsque les avantages environnementaux qui ont été pris en compte.

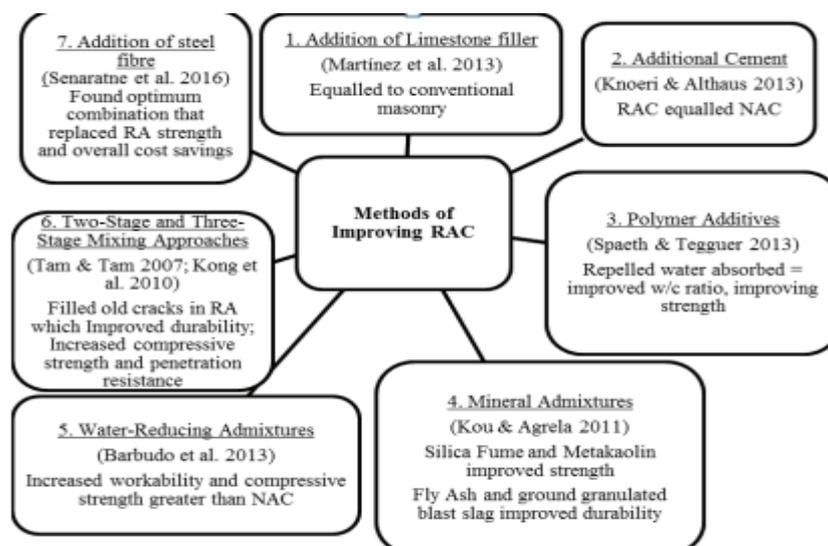


Figure I. 2- Méthodes d'amélioration du RAC [1] .





## Chapitre II :

# Généralité

## 1. Introduction

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau et un matériau qui est souvent perçu comme un lieu potentiel pour les déchets, en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclées.

## 2. Le béton

### 2.1. Définition

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants qui peut varier en fonction de ses utilisations.

Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

### 2.2. Les composants du béton

#### 2.2.1. Les granulats :

Pour le béton ordinaire les granulats utilisés sont des granulats d'origine naturelle

On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule  $d/D$ .

$d$  = diamètre le plus petit du granulats.

$D$  = diamètre le plus grand du granulats.

Les intervalles  $d/D$  et  $0/D$  sont appelés classes granulaires. Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont : les fillers, les sables, les gravillons, les gravillons, les graves.

Tableau II. 1- les constituantes des bétons

Les granulats les plus utilisés		
type	Dimensions	Caractéristiques

## Chapitre II : Généralité

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

### 2.2.2 Le ciment :

#### 2.2.2.1 Définition :

Le ciment est le liant hydraulique par excellence. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton, liant ses constituants entre eux, et lui confère certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance.

#### 2.2.2.2 Les types de ciment :

Selon les normes NF P15-301 et ENV 197-1. il y'a cinq types principaux de ciment

**Tableau II. 2- les types de ciment**

<b>Les types de ciment</b>	
<b>Le CEM I ou ciment Portland</b>	contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
<b>Le CEM II A ou B ou Ciment Portland</b>	contiennent au minimum 65 % de clinker et

## Chapitre II : Généralité

<b>composé</b>	au maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc. Les ciments CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.
<b>Le CEM III A ou B ou ciment de haut-fourneau</b>	contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker.
<b>Le CEM III C ou ciment de haut-fourneau</b>	contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker
<b>Le CEM IV A ou B est un ciment de type pouzzolanique</b>	Le CEM IV A est composé de 65 à 89 % de clinker et de 11 à 35 % d'autres constituants Le CEM IV B est composé de 45 à 64 % de clinker et de 36 à 55 % d'autres constituants.
<b>Le CEM V A ou B ou ciment composé</b>	Les CEM V A ou B sont des ciments qui contiennent entre 20 et 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes. Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections par exemple.
<b>Les CEM III et CEM V</b>	qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations et aux travaux en milieu agressif. Leur utilisation permet de réduire considérablement les émissions de CO2 grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants. Entre 2000 et 2008, la part de production de ce type de ciment est ainsi passée de 5 à 11%

### 2.2.3. Les adjuvants :

selon La norme NF EN 934-2 et le Référentiel de la marque NF "Adjuvant pour béton, mortiers et coulis.(21)

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés lors du malaxage du béton et faiblement dosés lors de la préparation (moins de 5% de la masse du béton). Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que son temps de prise ou son étanchéité.

### 2.2.4. 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, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

### 3. Le béton recyclé :

#### 3.1. Fabrication de granulats recyclés :

Le béton granulats recyclés se produire en trois étapes principales :

##### 3.1.1. Evaluation du béton source :

La première étape de la production des granulats recyclés consiste à déterminer la quantité du béton source. Les propriétés et les enregistrements du béton source comme la force la durabilité est la composition qui sont étudiés pour décider du béton source approprié.

##### 3.1.2. Ecrasement du béton démolé :

Le processus simple consiste à concasser le béton dans la taille et la qualité spécifique généralement de taille 20 mm à 50 mm .

##### 3.1.3. Enlèvement des contaminants :

Les contaminants comme l'acier d'armature les matériaux de fondation les accotements en béton bitumineux , le sol ..... etc. Sans enlever. Il peut être atteint par de nombreuses méthodes y compris le criblage ou la séparation de l'air la démolition l'utilisation de l'électro-aimant..... etc.

#### 3.2. Les granulats recyclés :

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition.

En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite,

Des granulats naturels concassés partiellement.

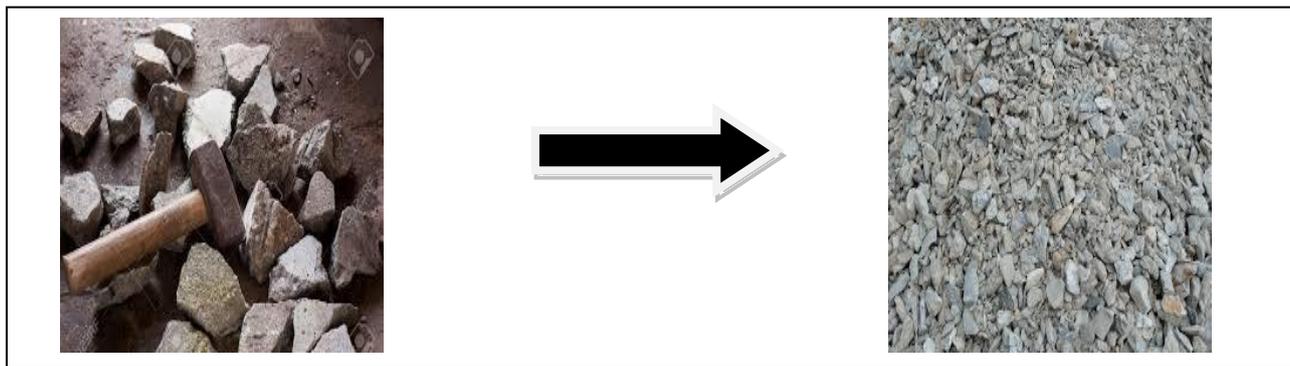
De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.

Il existe différents types de granulats :

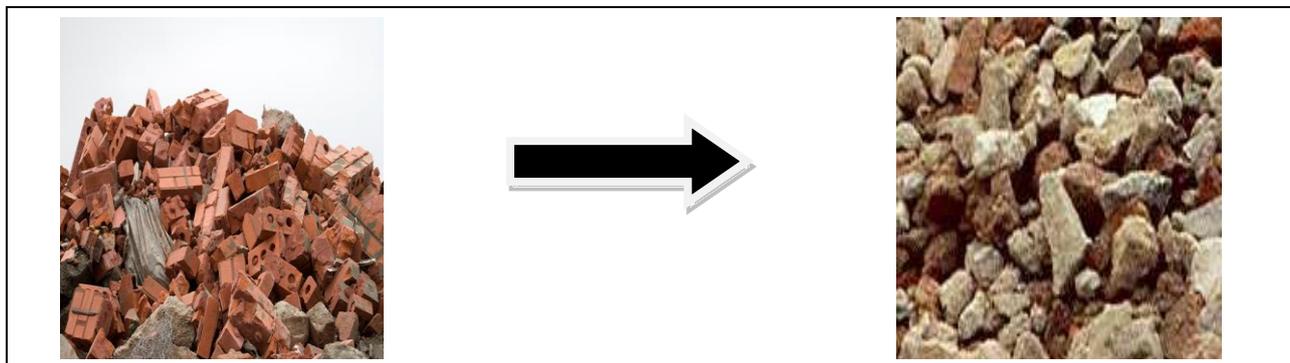
## Chapitre II : Généralité

Tableau II.3 - types des granulats recyclé

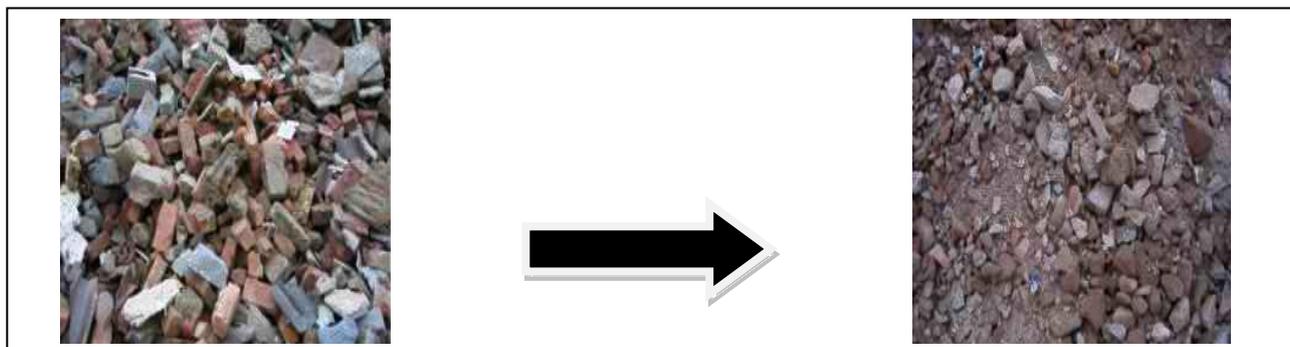
- **GRANULATS DE DEBRIS DE BETON** : Proviennent de la démolition de bâtiments (bétons ou béton armé d'acier)



- **GRANULATS DE DEBRIS DE MACONNERIES** : Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments

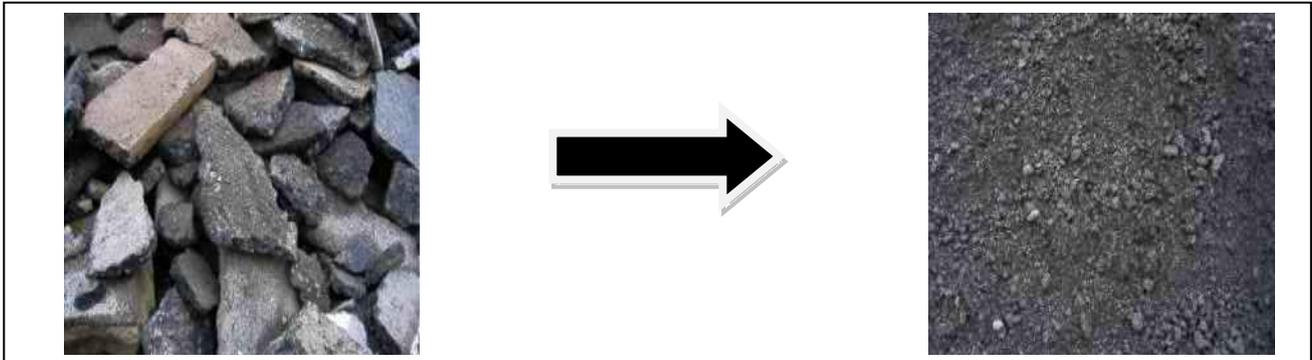


- **GRANULATS DE DEBRIS MIXTES** : Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles...)



## Chapitre II : Généralité

- **GRANULATS DE DEBRIS HYDROCARBONNES** : Proviennent de la démolition d'infrastructures et de la démolition parkings...



### 3.3. Avantages de l'agrégat recyclé :

- Réduit la quantité d'agrégats vierge à créer, donc moins d'évaluation des ressources naturelles.
- Tous en étant écrasé en particules plus petite une grande quantité de dioxyde de carbone est absorbé cela réduit la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.
- L'économie de couts d'étude ont a montré une réduction significative des coûts de construction si le béton recyclé est utilisé.
- Conserve l'espace d'enfouissement, réduit le besoin de nouvelles décharge et économise ainsi plus de coût.
- Crée plus de possibilités d'emploi dans l'industrie du recyclage.

### 3.4. Inconvénients de l'agrégat recyclé :

- Déclassements de la qualité du béton.
- Augmentation de la capacité d'absorption d'eau allant de 3 % à 9 %.
- Diminution de la résistance à la compression du béton de 10% à 30 %.
- Réduit la maniabilité du béton.

- Manque de spécification et de lignes directrices.
- Moins de durabilité, cependant peu de papier en montrant une amélioration de la durabilité en le mélangeant avec des matériaux spéciaux comme les cendres volantes.

### 3.4.1. Application de l'agrégat recyclé :

- Peut-être utilisé pour construction des gouttières, des trottoirs .....etc.
- De gros morceaux d'agrégats concassés peuvent être utilisés pour construire les revêtements qui à leur tour sont très utiles pour contrôler l'érosion des sols.
- Les gravettes de béton recyclé peuvent être utilisées comme agrégats grossiers dans le béton.
- La production du béton recyclé entraîne également la production de nombreux sous-produits ayant de nombreuses utilisations telles qu'un matériau d'amélioration du sol, un ajout de béton, un agent de remplissage d'asphalte.....etc.

### 3.5. Propriétés de béton recyclé : (Propriétés physiques par rapport à un béton traditionnel)

- Le béton recyclé ne présente pas tout à fait les mêmes propriétés que le béton classique
- On assiste à un abaissement d'élasticité (module d'élasticité diminué → augmentation des déformations)
- Un retrait plus important (accroissement des retraitements avant et après prise)
- Porosité augmentée
- Fluage augmenté (augmentation des déformations à long terme)

### 3.6. Les conséquences des granulats de béton recyclés sur le béton durci et frais :

Les granulats de béton recyclés présentent la caractéristique d'être composés de deux phases : le granulat naturel et le mortier qui l'enserme. Ce mortier est la cause des qualités moindres de ce type de granulats au regard des granulats naturels, dont les conséquences sur le béton durci sont les suivantes :

- Résistances à la compression et à la traction moindres
- Densité plus faible
- Module d'élasticité moindre
- Phénomènes de déformations différées élevés : retrait et fluage

Pour ce qui concerne le béton frais, la demande en eau totale est accrue du fait de la présence du mortier dont l'absorption d'eau est importante. La rugosité de surface (du fait du broyage) des granulats recyclés contribue elle-même à la croissance de la demande en eau totale, par une demande spécifique en eau efficace (hors absorption des granulats). Cette maîtrise de la demande en eau est la clé de la maîtrise des importants phénomènes de retrait que présentent les bétons de granulats recyclés.

Enfin, la fraction mortier des granulats de béton recyclé peuvent contenir des espèces susceptibles de provoquer des gonflements, les sulfates notamment, liés aux déchets de plâtre qui peuvent être associés au béton de démolition.

## 4. Le béton armé

### 4.1. Définition :

Le béton armé est un matériau de construction qui associe béton et barres d'acier. Il conjugue ainsi les qualités de compression du béton et la résistance à la traction de l'acier.

### 4.2. Avantages du béton armé :

- Matériau économique
- Résiste à la compression
- Il épouse toutes les formes architecturales
- Facilité de la mise en œuvre
- Se marie bien avec l'acier

### 4.3. Principe du béton armé :

Les principes du béton armé sont :

- Les efforts de compression sont absorbés par le béton (et éventuellement par l'acier).
- Les efforts de traction sont absorbés par l'acier.
- L'acier adhère au béton, ce qui permet une bonne transmission des efforts entre les deux matériaux.
- il n'y a pas de réaction chimique nuisible entre la pâte de ciment et l'acier par ailleurs le béton enrobant l'acier et le protège contre la corrosion.

### 5. L'adhérence :

S'il n'y avait pas d'adhérence entre le béton et l'acier, le matériau « béton armé » n'existerait pas.

L'adhérence est l'action des forces qui s'opposent au glissement des armatures dans le béton.

L'adhérence est un phénomène de frottement entre l'acier et le béton.

L'adhérence permet aux armatures de transmettre les efforts au béton par contact entre les deux matériaux.

# **Chapitre III :**

## **Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale**

## 1) Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre la démarche méthodologique et les dispositifs expérimentaux mis en place pour caractériser les propriétés physiques et mécaniques des bétons. où on va réaliser trois poutres en béton armé de dimensions (200\*15\*25) cm avec la méthode de substruction volumique pour trois mélanges différents : 100% recyclé, 50% recyclé et 100% recyclé avec un dosage de (350 kg/m<sup>3</sup>) de ciment.

## 2) Matériaux utilisés :

### 2.1. Les bétons :

- béton avec des agrégats naturels
- béton avec des agrégats recyclés

On a 3 mélanges de 100% de granulats naturels, 50% de granulats naturels / recyclés et 100% de granulats recyclés.

#### 2.1.1. LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS :

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, ou recyclée :

#### 2.1.2. Les granulats naturels :

Les granulats utilisés dans la fabrication de béton sont des granulats concassés à base de granulats naturels de la carrière d'el Fdjouj-Guelma, fournies par l'entreprise ENGOA « Entreprise Nationale des Grands Ouvrages d'Art ».

Les granulats utilisés dans la fabrication de notre béton sont de trois fractions :

Le sable naturel : (0-5).

Le gravier : on a utilisé deux fractions de gravier (5-10) et (10-20).

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

## 2.1.3. Les granulats Recyclés :

Les éprouvettes utilisé été fournis par le laboratoire LNHC laboratoire national de la habitat et de la construction a Annaba « el bouni »

## 2.1.4. Les étapes Pour concasser des éprouvettes :

- Les éprouvettes ne sont pas rompues totalement dans le laboratoire, pour Ecraser les éprouvettes →
- On utilise la massette pour déduire le volume des masses de béton en morceaux pour les mettre dans le broyeur
- utilise broyeur à mâchoire Pour obtenir les granulats recyclés à partir du béton



Figure III. 1 -broyage des éprouvettes

- Séparation des granulats recyclés, par les tamis de 5-10-20 mm.

Les fractions sont (0-5) ;(5-10) ;(10-20).



Figure III. 2 - criblages des granulats recyclés

### 2.1.5. Le ciment

Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. On a utilisé un CEM II/A\_M(S-L) 42.5N de densité absolue égale 3.1, fabriqué à (skikda)

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale



Figure III. 3 - ciment utilisé

## 2.2. Les armatures

Les armatures utilisées sont des barre de haute adhérence de 2 m nuance Fe E40,

De diamètre «  $\varnothing=12$  mm », avec des cadre de diamètre «  $\varnothing=8$  mm »



Figure III. 4 – ferrailage

### 3. Propriétés physiques des granulats :

#### 3.1. Le séchage des échantillons

Selon l'EN 1097-5 Les granulats utilisés doivent être séchés à l'étuve dans  $105^{\circ}\text{C} \pm 5$  pour déterminer les caractéristiques des matériaux secs.



Figure III. 5 - étuve de séchage des éprouvettes

## 3.2. Les masses volumiques :

La masse volumique, aussi nommée densité volumique de masse est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

On distingue 2 types de masse volumique : **absolue et apparente**.

Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [34, 35, 36, 37, 38].

### 3.2.1. La Masse volumique apparente :

Selon la norme NF EN 1097-3, La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

On peut déterminer la masse volumique apparente à partir :

**Mv app** : Masse volumique apparente (kg/cm<sup>3</sup>) du matériau

$$Mv \text{ app} = \frac{M_r - M_v}{V_{app}}$$

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

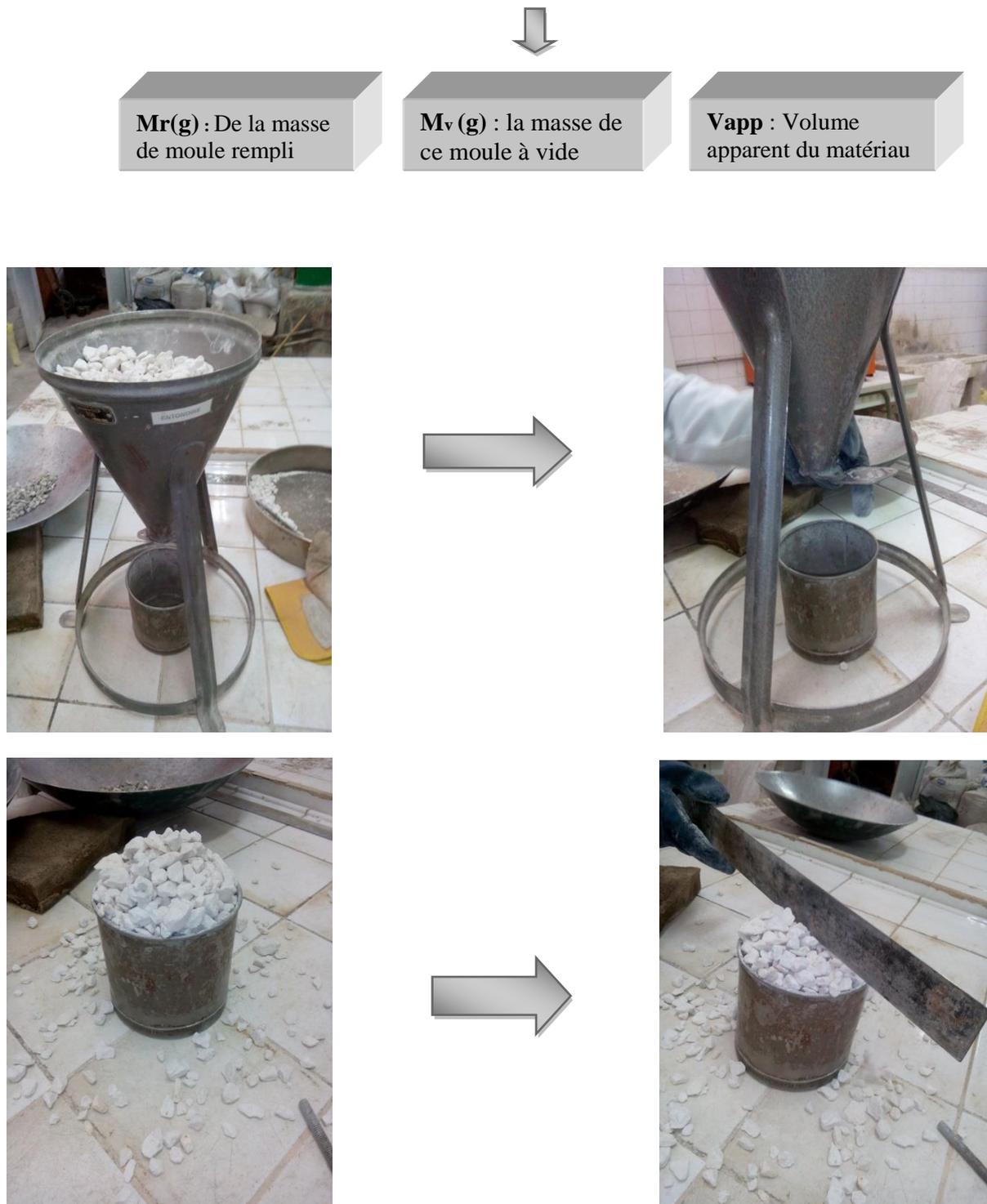


Figure III. 6 -détermination de la masse volumique des granulats naturels et recyclé

« 3 essais pour chaque types de granulat »

## 3.2.2. La Masse volumique absolue :

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, on a appliqué la méthode de l'éprouvette graduée selon la norme (NF EN 1097-3)

1/Remplir un tube gradué avec un volume d'eau connu  $V_1$



2/Peser un échantillon sec  $M_{ech}$  de granulats



3/On met l'échantillon dans le tube, on obtient un volume  $V_2$

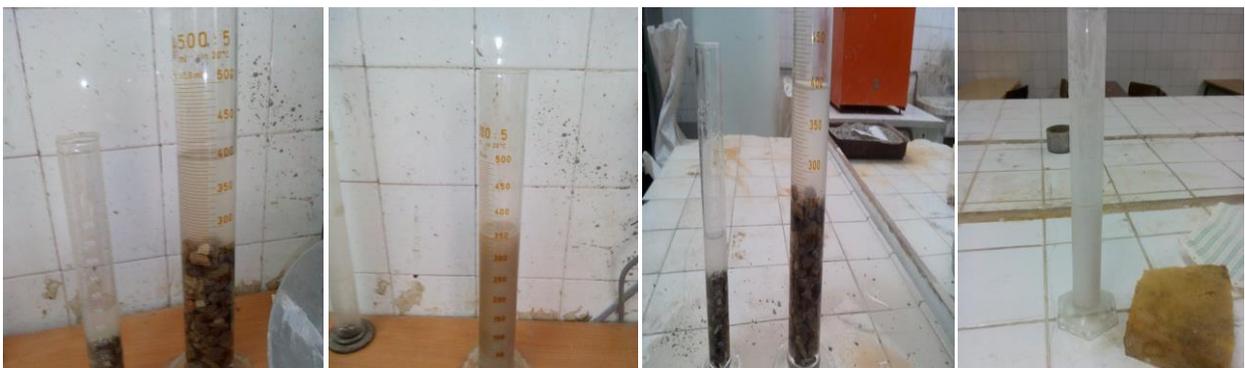


Figure III. 7 - détermination de masse volumique absolue des granulats naturels et recyclé

« 3 essais pour chaque granulat ont été fait »

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

**Tableau III.1 : les masses volumiques des granulats**

	Les granulats (mm)	Masse volumique apparente M <sub>v</sub> (g/cm <sup>3</sup> )		Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	
		M.V de chaque échantillon	La Masse Volumique moyenne		
<b>Granulats recyclés</b>	<b>Sable 0/5</b>	1.39	1.39	3	2.89
		1.42		2.83	
		1.37		2.85	
	<b>Gravier 5/10</b>	1.25	1.21	2.43	2.47
		1.33		2.50	
		1.06		2.50	
	<b>Gravier 10/20</b>	1.27	1.27	2.42	2.44
		1.28		2.50	
		1.28		2.47	
<b>Granulats naturelles</b>	<b>Sable 0/5</b>	1.71	1.70	2.63	2.67
		1.69		2.63	
		1.72		2.77	
	<b>Gravier 5/10</b>	1.52	1.52	2.77	2.79
		1.51		2.80	
		1.54		2.80	
	<b>Gravier 10/20</b>	1.52	1.54	2.77	2.81
		1.55		2.84	
		1.56		2.84	

### 3.3. Le module de finesse :

La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable comme le 1/100ème de la somme des refus exprimés en pourcentages sur les différents tamis suivants : <0.125 - 0,125 - 0,2 - 1,25 - 2 - 4mm.

On a donc :

A<sub>i</sub>: Refus cumulés en % des tamis

$$MF = \frac{0.575 + 1.472 + 3.833 + 86.347 + 95.639}{100} = \mathbf{1.87} \quad (\text{dans le cas naturel})$$

$$MF = \frac{9.929 + 38.443 + 59.24 + 93.949 + 96.264}{100} = \mathbf{2.90} \quad (\text{dans le cas recyclé})$$

MF=1.87 Ce qu'indique que le sable fin.

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

## 3.4. Coefficient d'Absorption d'eau des granulats (Ab %):

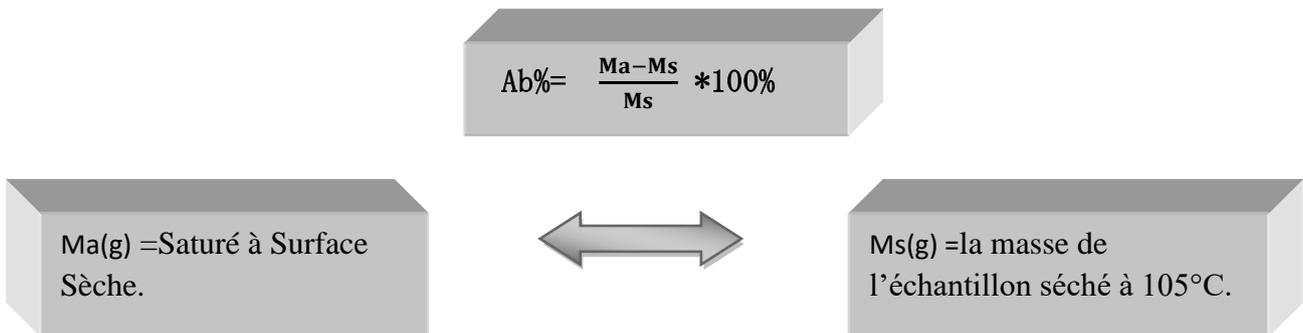
la détermination du coefficient d'absorption d'eau permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons.

On détermine un coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20° C.

Le coefficient d'absorption d'eau Ab est défini par la relation :  $Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} * 100\%$

Ms= masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105° C

Ma= masse de l'échantillon imbibé



Cet essai est réalisé selon les normes (NF P 18-554)

### 3.4.1. Description de l'essai :

- 1- Séché jusqu'à masse constante une quantité connue d'un matériau pendant 24h.
- 2- Immerger dans l'eau pendant 24h à 20°c.
- 3- Repeser ce matériau saturé en tenant compte que sa surface soit sèche.

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Tableau III.2 : Coefficient d’Absorption d’eau pour granulats naturels

Les granulats	Masse sèche Ms (g)	Masse saturé Ma (g)	$\Delta M$ (g)	Ab%
Gravier (5/10)	30	30.4	0.6	2%
Gravier (10/20)	30.4	30.7	0.5	1.644%

Tableau III.3 : Coefficient d’Absorption d’eau pour granulats recyclés

Les granulats	Masse sèche Ms (g)	Masse saturé Ma (g)	$\Delta M$ (g)	Ab%
Gravier (5/10)	29.9	33.2	3.3	11.036%
Gravier (10/20)	30	31.3	1.3	4.333%

### 3.5. La porosité :

la porosité d’un matériau permet de connaître la proportion des vides dans les matériaux. Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 18-554),

#### 3.5.1. Description de l’essai :

- pour la préparation, prélever une quantité moyenne des matériaux
- ensuite passer au séchage de l’échantillon en le portant à une température de 105°C et l’y maintenir jusqu’à masse constante
- après c’est le pesage de l’échantillon sec, soit  $M_0$  cette masse
- l’étape suivante consiste à remplir les pores de l’eau en plaçant l’échantillon dans de l’eau froide et l’y maintenir pour que l’eau rentre dans les pores
- Sortir l’échantillon imbibé peser à nouveau l’échantillon chaque 5 minute ,1h et 24h mais avant essuyer chaque surface extérieure des grains (chiffon), soit cette masse
- en déduire la porosité  $p$  qui est la variation de masse de matériau sec et l’imbibé divisé sur la masse sec de ce matériau fois cent.

Tableau III.4 : la porosité pour les granulats naturel (5 /10)

	Masse saturé Ma (g)	$\Delta M$ (g)	p%
0 minutes	30.1	0	0%
5 minutes	30.7	0.6	1.954%

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

<b>10 minutes</b>	30.7	0.6	1.954%
<b>15 minutes</b>	30.7	0.6	1.954%
<b>30 minutes</b>	30.7	0.6	1.954%
<b>1 heure</b>	30.7	0.6	1.954%
<b>24h</b>	30.7	0.6	1.954%

**Tableau III.5 : la porosité pour les granulats naturel (10 /20)**

	<b>Masse saturé Ma (g)</b>	<b><math>\Delta M</math> (g)</b>	<b>p%</b>
<b>0 minutes</b>	30.2		0%
<b>5 minutes</b>	30.7	0.5	1.628%
<b>10 minutes</b>	30.7	0.5	1.628%
<b>15 minutes</b>	30.7	0.5	1.628%
<b>30 minutes</b>	30.7	0.5	1.628%
<b>1 heure</b>	30.8	0.6	1.948%
<b>24h</b>	30.8	0.6	1.948%

**Tableau III.6 : la porosité pour les granulats recycler (5 /10)**

	<b>Masse saturé Ma (g)</b>	<b><math>\Delta M</math> (g)</b>	<b>p%</b>
<b>0 minutes</b>	30.4	0	0%
<b>5 minutes</b>	32.1	1.7	5.29%
<b>10 minutes</b>	32.7	2.3	7.01%
<b>15 minutes</b>	32.8	2.4	7.31%
<b>30 minutes</b>	33	2.6	7.87%
<b>1 heure</b>	33.5	3.1	9.25%
<b>24h</b>	33.5	3.1	9.25%

**Tableau III.7 : la porosité pour les granulats recycler(10 /20)**

	<b>Masse saturé Ma (g)</b>	<b><math>\Delta M</math> (g)</b>	<b>p%</b>
<b>0 minutes</b>	32.5	0	0%
<b>5 minutes</b>	33.1	0.6	1.81%
<b>10 minutes</b>	33.1	0.6	1.81%
<b>15 minutes</b>	33.3	0.8	2.40%
<b>30 minutes</b>	33.4	0.9	2.69%

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

<b>1 heure</b>	33.7	1.2	3.56%
<b>24h</b>	33.7	1.2	3.56%

#### 4. L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est régie par les normes "EN 933-1 et EN 933-2"

L'analyse granulométrique consiste à déterminer et à observer les différents diamètres de graine qui constituent un granulat.

Les granulats sont désignés par d et D, où d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées.

Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre

Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans les granulats

**REFUS** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

**TAMISAT** (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

**Tableau III.8: Tamisage de sable naturel**

<b>Tamis</b>	<b>Refus M(g)</b>	<b>Pourcentage de refus %</b>	<b>Pourcentage cumulé de refus %</b>	<b>Tamisât en%</b>
<b>4</b>	5.7	0.575	0.575	99.425
<b>2</b>	8.9	0.897	1.472	98.528
<b>1.25</b>	23.4	2.361	3.833	96.167
<b>0.2</b>	817.8	82.514	86.347	13.653
<b>0.125</b>	92.1	9.292	95.639	4.361
<b>&lt;0.125</b>	43.2	4.358	99.997	0.003
<b>La somme</b>	991.1	99.997		

**Tableau III.9 : Tamisage de sable recyclé**

<b>Tamis</b>	<b>Refus M(g)</b>	<b>Pourcentage de refus %</b>	<b>Pourcentage cumulé de refus %</b>	<b>Tamisât en%</b>
<b>4</b>	98.6	9.925	9.925	90.075

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

<b>2</b>	283.3	28.518	38.443	61.557
<b>1.25</b>	206.6	20.797	59.24	40.76
<b>0.2</b>	344.8	34.709	93.949	6.051
<b>0.125</b>	23	2.315	96.264	3.736
<b>&lt;0.125</b>	37.1	3.734	99.998	0.002
<b>La somme</b>	993.4	99.998		

**Tableau III.10 : tamisage de gravier naturel 5/10 :**

<b>Tamis</b>	<b>Refus M(g)</b>	<b>Pourcentage de refus %</b>	<b>Pourcentage cumulé de refus %</b>	<b>Tamisât en%</b>
<b>10</b>	150	7.590	7.590	92.410
<b>8</b>	827.1	41.899	49.489	50.511
<b>6.3</b>	606.1	30.704	80.193	19.807
<b>5</b>	278.9	14.128	94.321	5.679
<b>Fond</b>	111.9	5.668	99.989	0.011

**Tableau III.11 : tamisage de gravier naturel 10/20**

<b>Tamis</b>	<b>Refus M(g)</b>	<b>Pourcentage de refus %</b>	<b>Pourcentage cumulé de refus %</b>	<b>Tamisât en%</b>
<b>20</b>	8.9	0.223	0.223	99.777
<b>16</b>	2028.6	50.87	51.099	48.901
<b>12.5</b>	1818.3	45.602	96.701	3.299
<b>10</b>	93.1	2.334	99.035	0.965
<b>Fond</b>	38.4	0.963	99.998	0.002

**Tableau III.12 : tamisage de gravier recyclé 5/10**

<b>Tamis</b>	<b>Refus M(g)</b>	<b>Pourcentage de refus %</b>	<b>Pourcentage cumulé de refus %</b>	<b>Tamisât en%</b>
<b>10</b>	39.6	2.009	2.009	97.991
<b>8</b>	528.1	26.801	28.810	71.190
<b>6.3</b>	791.8	40.184	68.994	31.006
<b>5</b>	524.8	26.634	95.628	4.372
<b>Fond</b>	86.1	4.369	99.996	0.004

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Tableau III.12 : tamisage de gravier recyclé 10/20

Tamis	Refus M(g)	Pourcentage de refus %	Pourcentage cumulé de refus %	Tamisât en%
20	92.3	02.32	2.32	97.68
16	1181.1	29.73	32.06	67.94
12.5	1873.2	47.17	79.23	20.77
10	790.4	19.90	99.13	0.87
Fond	34.5	0.80	99.93	0.07

## 5. Formulation des bétons

On a utilisé la méthode de « **Dreux-Grise** »

### 5.1. Données de bases:

□ Type de béton : Ordinaire.

Diamètre maximal des granulats  $D_{max} = 20$  cm

Les trois classes granulaires : sable (0/5) et gravie (5/10 et 10/20).

Ouvrabilité du béton : plastique (Affaissement au cône d'Abrams, qui est le paramètre le plus important pour la mise en œuvre des bétons.

Serrage : vibration courante (Table vibrante).

Forme de granulat : concassés Dosage de ciment : 350 Kg

$K =$  valeur du terme correcteur  $K$  en fonction du dosage en ciment :  $K = +2$  dosage 350

Coefficient de compacité :  $\gamma = 0,825$  (pour  $D_{max}=20$ , vibration moyenne et béton plastique)

Avec la correction des granulats concassés  $\gamma = 0,825 - 0.03 = 0.795$

### 5.2. Courbe de référence :

On trace la référence OAB de la courbe granulométrique et on calcul les points :

- Point de l'origine (0, 0)
- Point de l'extrémité B ( $D_{max}$ , 100%)
- point de brisure A ( $X_A$ ,  $Y_A$ ) définit de notre travail comme suit :

**Point A:**

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

$$X_A = \frac{D_{max}}{2} = \frac{20}{2} = 10$$

$$Y_a = 50 - \sqrt{D + k + k_s}$$

On utilise des granulats concassé de  $D_{max} = 20$  mm et une vibration normal

Avec : dosage  $350 \text{ kg/m}^3 \rightarrow k = +2$

$K_p = 7.5$

$K_s = 6MF-15$

$K_s = 6(1.8) - 15 = -4.2$  (ordinaire)

$Y_a = 50 - \sqrt{20 + 2 + 2.4 + 7.5} = 50.827$

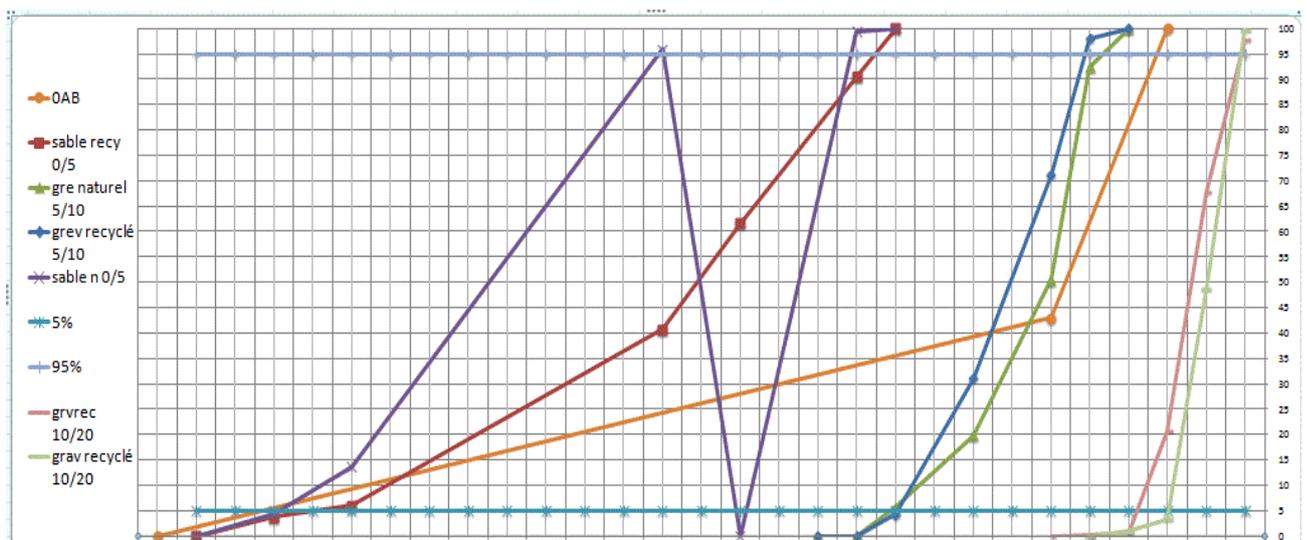


Figure III. 8 - traçage du courbe OAB des granulats naturels de dosage  $350 \text{ kg/m}^3$

## 5.3. Dosage de composantes:

Tableau III.14 : pourcentage des granulats utilisé dans  $1 \text{ m}^3$  de béton ordinaire

	pourcentage de Sable 0 /5	pourcentage de Gravies 5/10	pourcentage de Gravies 10/20
<b>Dosage 350</b>	30%	20%	50%

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

$$\sigma_{28} = G \sigma_C \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma_{\text{moy}}}{\sigma \times \sigma_C} + 0.5$$

$$m_{\text{oye}} = \sigma_{28} + 15\% \sigma_C$$

$$m_{\text{oye}} = 25 + 15\% \cdot 25 \rightarrow m_{\text{oye}} = 28.75 \text{ MPA}$$

avec : **G= cef granulaire**  $\rightarrow G= 0.5$

➤ Le volume absolu de l'eau  $\frac{C}{E}$  :

$$\frac{C}{E} = \frac{28.75}{0.5 \times 36} + 0.5 \rightarrow \frac{C}{E} = 1.66$$

$$E = \frac{C}{1.66} = \frac{350}{1.66} \rightarrow E = 210 \text{ L}$$

➤ Le volume absolue des granulats G ,S ,g :

$$1000 - 175 = 825 \text{ L}$$

$$\frac{E}{C} = 0.6 \rightarrow E = 0.6 C$$

### 5.3.1. Le volume absolu de l'ensemble des granulats :

$\gamma=0,825$  pour  $D = 20\text{mm}$ , vibration normal et béton plastique = avec la correction « des granulats concassés » $\Rightarrow \delta= 0.825-0.03=0.795$

$$1000\gamma = V_c + V_g + V_s$$

$$1000 (0.795) - \frac{350}{3.1} = V_g + V_s$$

$$V_g + V_s = 682.1 \text{ L}$$

### 5.3.2. Les volumes absolus de chacun des granulats :

**Granulat naturel :**

$$V_{s \ 0/5} = 30\% \cdot 682.1 = 204.63 \text{ L.}$$

$$V_{g \ 5/10} = 20\% \cdot 682.1 = 136.4 \text{ L.}$$

$$V_{G \ 10/20} = 50\% \cdot 682.1 = 341.05 \text{ L.}$$

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Les volumes absolus des granulats :

Tableau III.15 : les volumes absolus

	Granulats naturels (L)
Sable (0/5)	204.63 L.
Gravier (5/10)	136.42 L.
Gravier (10/20)	341.05 L.

### 5.3.3. Les masses spécifiques de chacun des granulats :

$$M = V * M_{abs}$$

Masse de ciment = 350 kg/m<sup>3</sup>

**Granulats naturels :**

- Sable (0/5) → 204.63 \* 2,67 = **546.36kg**
- Gravier (5/10) → 136.42 \* 2.79 = **380.61kg**
- Gravier (10/20) → 341.05 \* 2,81 = **958.35 kg**

Tableau III 16 : composition 100% naturel

100% naturel	1m3	75l
Ciment	350	26.25
Eau	210	15.75
sable (0/5)	546.36	40.97
gravier (5/10)	380.61	28.54
gravier (10/20)	958.35	68.29

Tableau III.17 : composition 50% naturel

50% naturel	1m3	75l
Ciment	175	13.12
Eau	105	07.87
sable (0/5)	273.18	20.48
gravier (5/10)	190.30	14.27

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

gravier (10/20)	455.30	34.14
-----------------	--------	-------

### 5.4. Correction de la formulation:

Pour obtenir le dosage correcte de ciment et d'eau ; on a corrigé ses quantités :

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, les granulats recyclés sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton afin d'une perméabilité suffisante. on doit utiliser le coefficient d'absorption des granulats au cours de coulage du béton, donc on le détermine avec la masse absorbante après 5 min de l'émergence.

Ou ajoute a la formulation du béton recycler 4% de ciment de plus que la quantité du ciment dans la formulation du béton ordinaire.

#### 5.4.1. La correction du dosage d'eau et du ciment dans la formulation de 100% recycler :

##### Dosage du ciment corrigé : (100% recycler)

$$\chi C = 4\% C$$

$$\chi C = 350 * \frac{4}{100} = 14$$

$$C_c = C + \chi C$$

$$C_c = 350 + 14$$

$$C_c = 364 \text{ kg/m}^3$$

C : quantité de ciment avant correction

C<sub>c</sub> : quantité de ciment après correction

##### Dosage d'eau corrigé : (100% recycler)

$$\frac{E}{C} = 0.6$$

$$E_c = 0.6 * C = 0.6 * 364$$

$$E_c = 218.4$$

E: quantité de ciment avant correction

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Ec : quantité de ciment après correction

### 5.4.2. Composition 50% recyclé :

$$V \text{ Sable (0/5)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{273.18}{2.67}\right) 2.89 = 295.68 \text{ m}^3$$

$$V \text{ gravier (5/10)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{190.30}{2.79}\right) 2.47 = 168.47 \text{ m}^3$$

$$V \text{ gravier (10/20)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{455.3}{2.67}\right) 2.44 = 416.07 \text{ m}^3$$

**Mn** : la masse du béton a base d'agrégats naturels

**ρr**: la masse volumique du béton recyclé

**ρ** : la masse volumique du béton a base d'agrégats naturels

**Tableau III.18 : Composition 50% recyclé :**

50% recyclé	1m <sup>3</sup>	75l
<b>Ciment</b>	182	13.65
<b>Eau</b>	109.2	8.19
<b>sable (0/5)</b>	295.68	22.17
<b>gravier (5/10)</b>	168.47	12.63
<b>gravier (10/20)</b>	416.07	31.20

### 5.4.3. Composition 100% recyclé :

$$V \text{ Sable (0/5)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{546.36}{2.67}\right) 2.89 = 591.37 \text{ m}^3$$

$$V \text{ gravier (5/10)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{380.61}{2.79}\right) 2.47 = 336.95 \text{ m}^3$$

$$V \text{ gravier (10/20)} = \left(\frac{Mn}{\rho}\right) * \rho r = \left(\frac{910.60}{2.67}\right) 2.44 = 832.15 \text{ m}^3$$

**Tableau III.19 : Composition 100% recyclé**

100% recyclé	1m <sup>3</sup>	75l
<b>Ciment</b>	364	27.30
<b>Eau</b>	218.4	16.38

## Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

sable (0/5)	591.37	44.34
gravier (5/10)	336.95	25.27
gravier (10/20)	832.15	62.41

### 6. Le malaxage du béton

D'après la norme NF EN 480-1



Figure III. 9 - Le malaxage du béton

### 7. L'ouvrabilité du béton frais

l'essai que nous avons suivi permettant la mesure de l'ouvrabilité de béton c'est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF P 18-451

#### 7.1. Affaissement au cône d'Abras

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :  
la plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;  
le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm<sup>2</sup>.

Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams ;  
une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :  
le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige

Le cône est arasé avec une tige

Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler  
L'affaissement du béton frais est mesuré

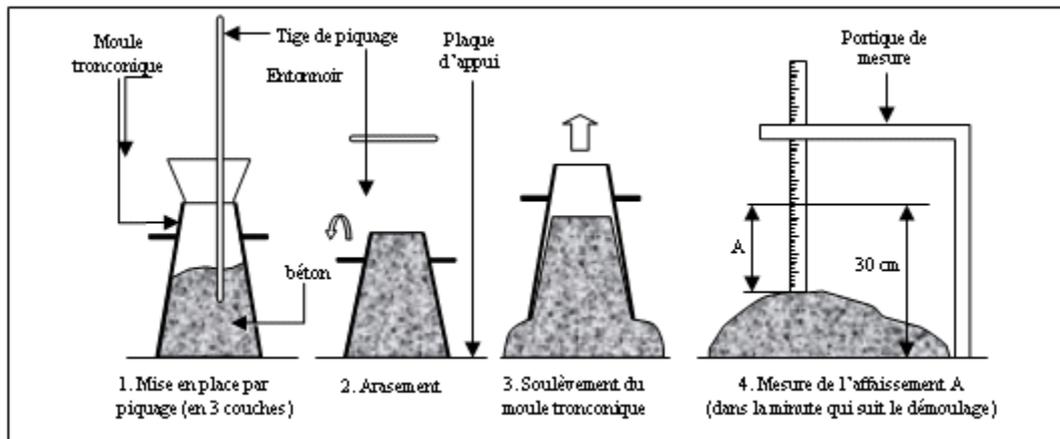


Figure III. 10 - mesure de l'affaissement au cône d'abrams

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.



Figure III. 11 - essai d'affaissement au cône d'Abrams

**Affaissement de béton 100% naturel « 16mm », dosage=350Kg/m<sup>3</sup>**

**Affaissement de béton 50% recyclé « 16.5mm », dosage=350Kg/m<sup>3</sup>**

**Affaissement de béton 100% recyclé « 17mm », dosage=350Kg/m<sup>3</sup>**

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

## 8. Confection des éprouvettes

### 8.1. Préparation des moules :

Pour les essais de flexion simple, on a préparé un moule : (2 m de longueur ; 25cm hauteur et 15cm de largeur).

La mise en place de ferrailage



Figure III. 12- mise en place de ferrailage

Pour les essais de compression, les corps des éprouvettes sont des moules cubiques de (10\*10\*10).

D'autre part, on a besoin des moules de (7\*7\*28) pour les essais de flexion.



Figure III. 13 - l'huile 'moto oil '

On met l'huile (motor oil) dans chaque éprouvettes avant la mise en place du béton pour se détache facilement

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

## 8.2. La mise en place de béton dans les moules :

Après l'obtention de l'affaissement escompté, on a rempli les moules de béton selon la norme NF P18-404, puis on a piqué avec une tige d'acier



Figure III. 14- la mise en place de béton dans le moule de la poutre



Figure III. 15- la mise en place de béton dans les moules

Après 24h, les éprouvettes ont été démoulées selon la norme NF P18-404

Pulvériser les échantillons avec de l'eau après les avoir enlevés



Figure III. 16- démoulage des poutres



Figure III. 17- les éprouvettes

## 9. Les essais de caractérisation :

### 9.1. Essais de compression (NF EN 1290-3) :

#### 9.1.1. Objectif de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

Les éprouvettes étudiées sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression.

La charge maximal atteinte est enregistrée et la résistance a la compression calculée.

La géométrie des éprouvettes utilisées : des éprouvettes cubiques de 10\*10\*10mm.



Figure III. 18- Essai de compression

# Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodologie expérimentale

## 9.2. L'essai de traction par flexion :

### 9.2.1. Le principe d'essai :

Des éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance en flexion est calculée.

### 9.2.2. Machine d'essai :

L'essai doit être réalisé au moyen d'une machine d'essais conforme à l'EN 12390-4.

#### Légende

- Rouleau de chargement (rotatif, inclinable)
- Rouleau d'appui
- Rouleau d'appui (rotatif, inclinable)

La géométrie des éprouvettes utilisée : des éprouvettes prismatiques de (7\*7\*28) mm.

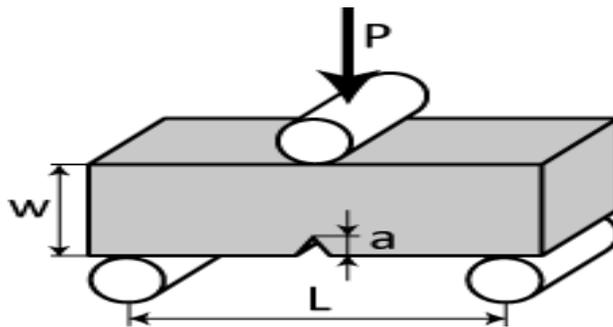


Figure III. 19- Essai de compression

## 10. Essais expérimentiel : flexion simple

### 10.1. objectif d'essai :

#### ➤ Étude comparative

Comparaison de :

a- Fissuration

a.1- Crack de fissures.

a.2- Évolutions des fissures.

b- mesure de la flèche « on utilise les comparateurs »

## 10.2. Machine d'essais

### L a dalle d'essais

#### 10.2.1. Mode opératoire

Placer la poutre du béton sur les deux appuis d'une façon symétrique

Mise en place de comparateur aux milieux de la poutre pour mesurer la flèche (f)

Le démarrage d'opération de machine

#### Méthodes expérimentales :

Les poutres ont été testées à la flexion 4 points à l'aide d'un banc d'essai pour le contrôle de la flexion. La flèche à mi-portée a été mesurée à l'aide d'un comparateur, positionné sur la fibre inférieure.



Figure III. 20- Essai de flexion simple



# **Chapitre VI : résultats et discussions**

# **Résultats et discussions**

# Chapitre VI : résultats et discussions

## 1. Méthodes expérimental :

### 1.1. Essais de caractérisation :

on a fait deux essais de caractérisation normalisés, un essai de traction sur des éprouvettes prismatique 7\* 7 \*28 et un essai de compression sur des éprouvettes cubique 10 \* 10 \*10 ces essais ont pour but de connaître la résistance à la traction et à la compression du béton.

### 1.2. Résultats de l'essai de compression et de l'essai de traction par flexion :

Les résultats obtenus par l'essai de compression et la traction par flexion sont représentés dans le tableau suivant

**Tableau IV. 1: valeurs de l'essai compression et de l'essai de traction**

	Contrainte de compression (MPa)		Contrainte de traction (MPa)	
		La moyenne		La moyenne
<b>100% naturel</b>	29.36	29.25	4.77	4.99
			4.85	
	29.14		5.35	
<b>50% recyclé</b>	23.60	23.31 20.31%	4.18	3.93 21.24%
			3.69	

## Chapitre VI : résultats et discussions

	23.02			
<b>100% recyclé</b>	19.36	19.48 33.40%	4.12	3.63  27.25%
	19.99		3.13	
	19.11			

### 1.2.1. Analyse du résultat de l'essai de compression :

On remarque d'après les résultats présenter dans la figure IV.1 ci dessous , qu'il y a une chute de résistance a la compression par rapport au béton naturelle qui est de l'ordre de 20% pour 50 % et de 33% pour un taux de remplacement de 100% ce qui est on conformité avec les recherches déjà faites, plus on introduit le recyclé plus la résistance chute .

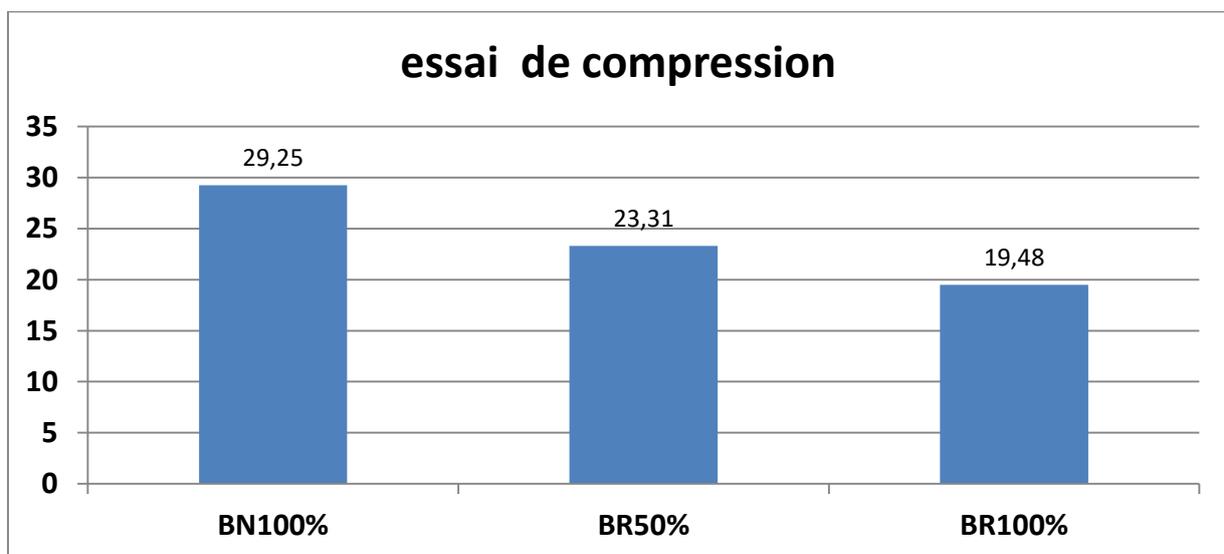


Figure IV.1 : la résistance à la compression

## 1.2.2. Analyse des résultats de l'essai de traction par flexion :

On remarque d'après les résultats présentés dans la Figure IV.1 ci-dessous, qu'il y a aussi une chute de résistance à la traction par rapport au béton naturel qui est de l'ordre de 21,24% pour 50% et de 27,25% pour un taux de remplacement de 100% ce qui explique que la résistance à la traction du béton tout comme la résistance à la compression elle dépend du taux de remplacement des graviers recyclés.

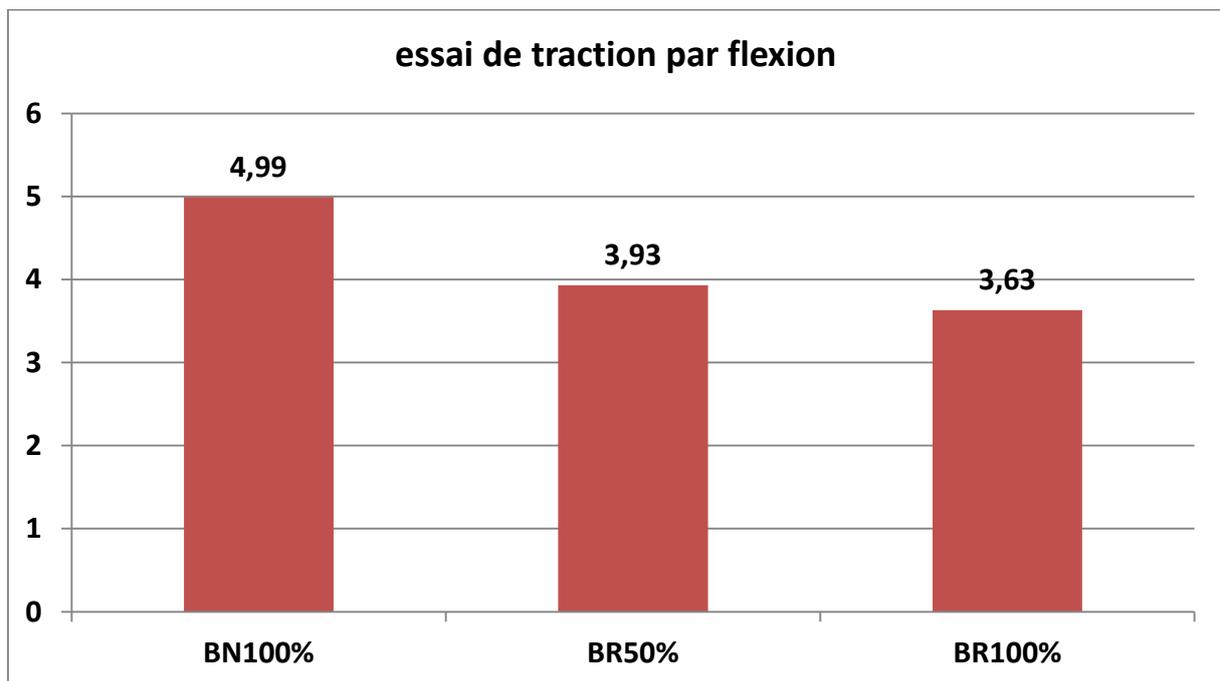


Figure IV. 2 : la résistance à la traction

## 2. Essai sur des poutres en béton armé :

Une poutre en béton à base de granulats 100% naturels et deux en béton à base de granulats recyclés, une avec un taux de substitution de 50% et une autre avec un taux de 100% de granulats recyclés ont été mises en œuvre. La section transversale est de 15x25 cm<sup>2</sup> et la longueur totale de ces poutres est de 2 m pour une portée entre appuis de 1,80 m. Les poutres sont ferrillées longitudinalement avec des armatures 2HA12.

## 2.1. Résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BN :

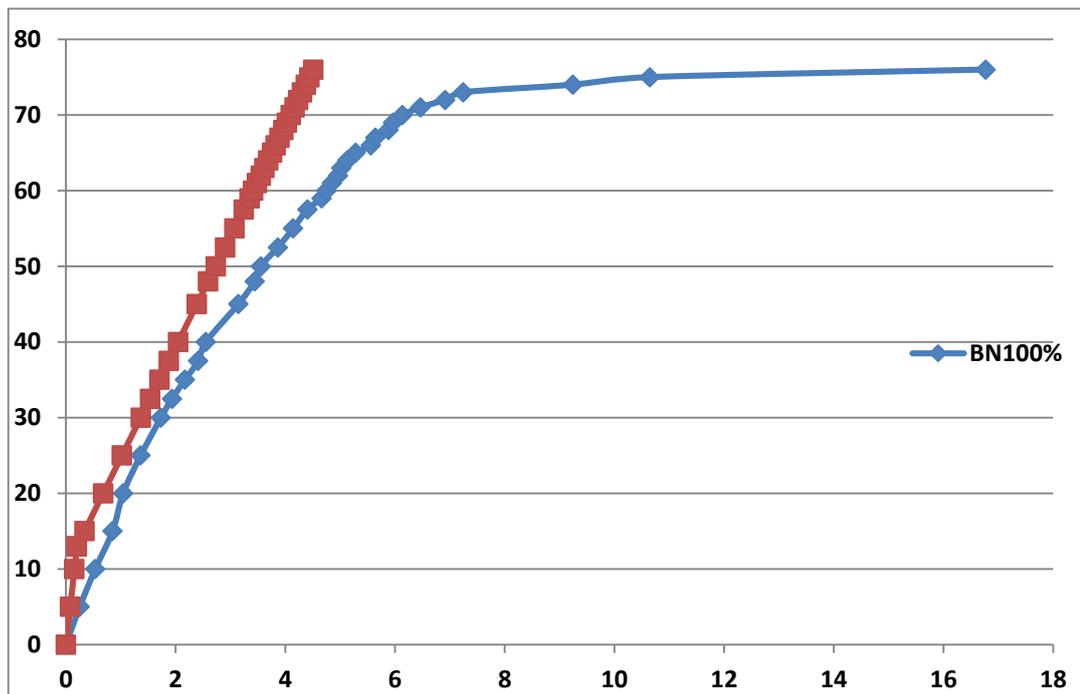


Figure IV.3 : résultats de la flèche théorique et expérimental BN100%

## 2.2. Résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BR50 :

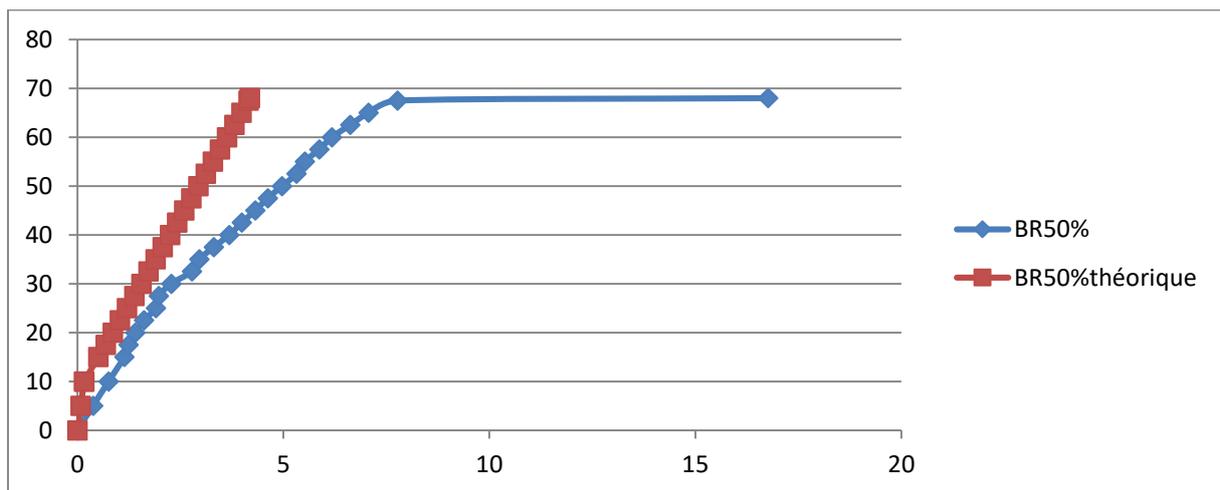


Figure IV.4 : résultats de la flèche théorique et expérimental BR50%

# Chapitre VI : résultats et discussions

## 2.3. Résultats de la flèche théorique et expérimentale de la poutre en BR100 :

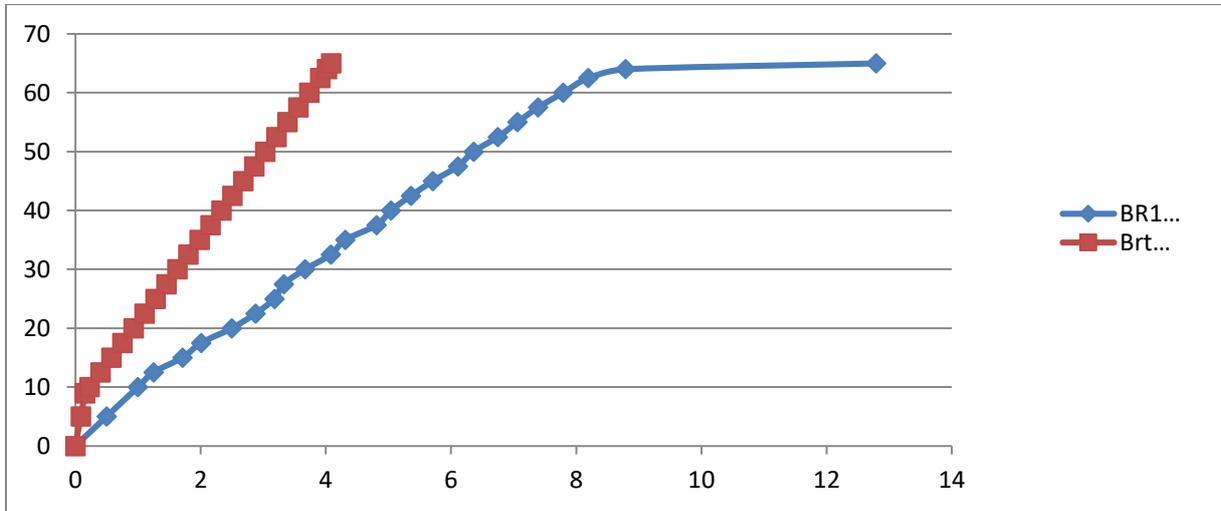


Figure IV.5 : résultats de la flèche théorique et expérimental BR100

## 2.4. Les résultats de la flèche théorique des trois poutres :

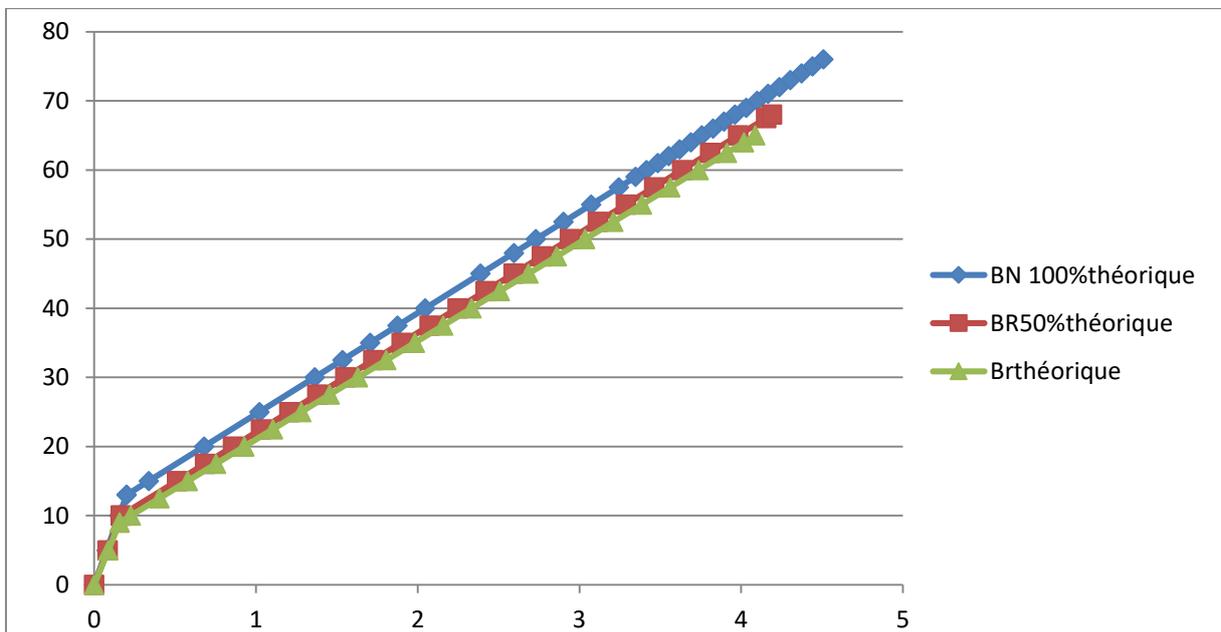


Figure IV.6 : résultats de la flèche théorique

## 2.5. Résultats de la flèche expérimentale des trois poutres :

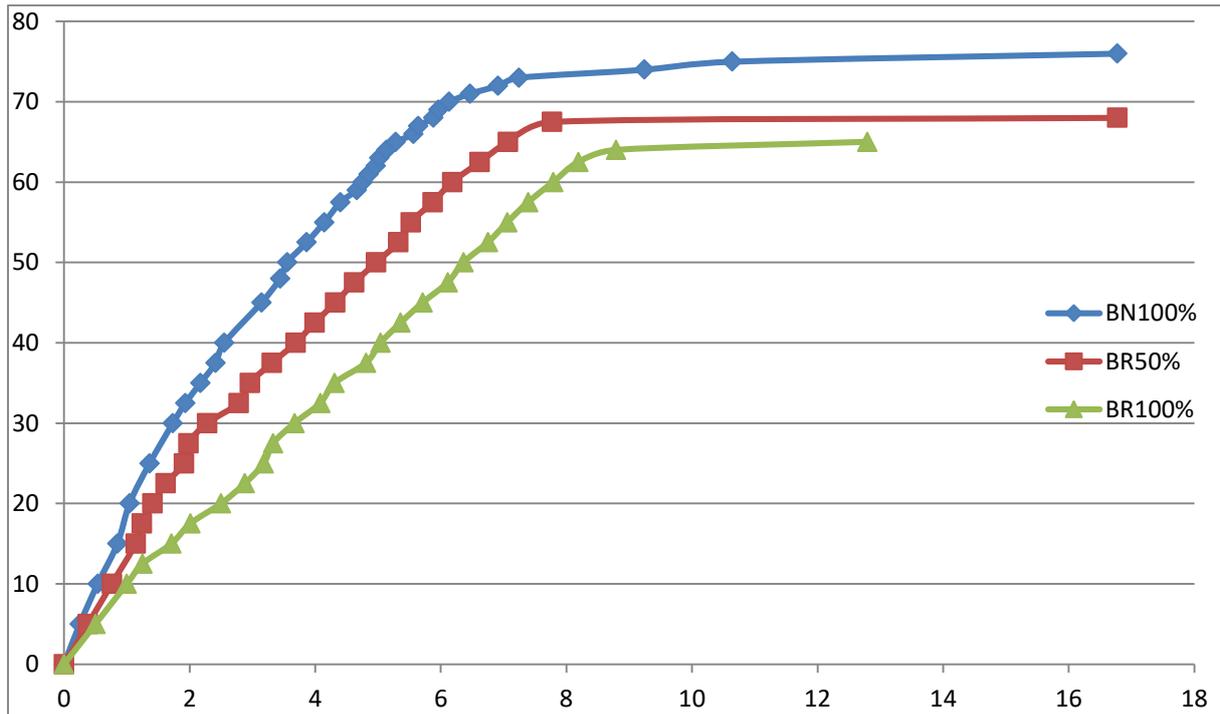


Figure IV.7 : résultats de la flèche expérimentale

### 3. Analyse et Comparaison entre les résultats expérimentaux et les calculs théoriques de la flèche des trois poutres :

L'évolution de la flèche au milieu de la travée a été suivie et les courbes sont représentées dans les figures IV.8- IV.9 ci dessous. L'allure obtenue montre que le comportement global est divisé en trois phases principales. La première phase élastique, correspond au comportement des éléments non fissurés, la deuxième phase élastique correspond au comportement des sections fissurées, tandis que la troisième est relative à la plastification.

Théoriquement les résultats de flèches sont loin des résultats expérimentaux car le module d'élasticité utiliser par le BEL est sur estimer.

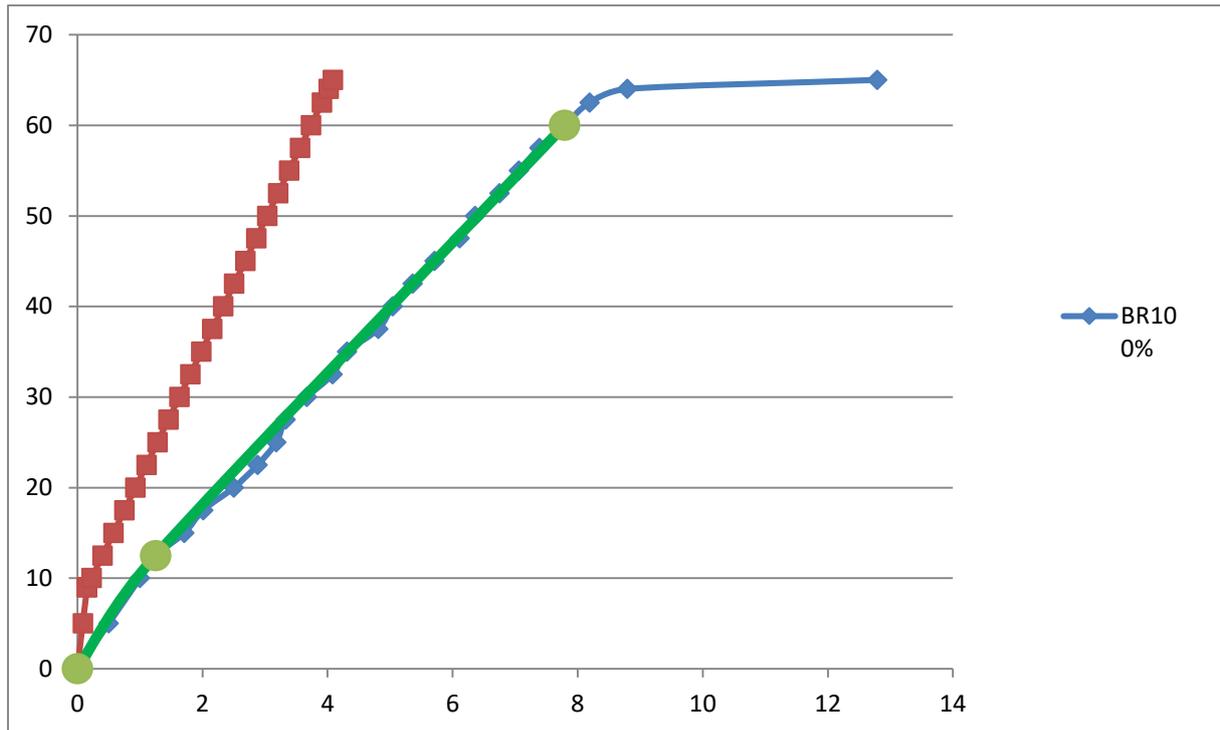


Figure IV.8 : allure de flèche BR100 %

Ceci est valable pour les trois compositions.

On constate que la flèche augmente avec l'augmentation du taux de remplacement recyclé en particulier lors de la phase 2. Cette différence s'explique d'une part par la différence des modules d'élasticité qui sont en fonction de la résistance de compression du béton et d'autre part par un état de fissuration qui est en fonction de la résistance de traction du béton ce qui reflète réellement notre allure, plus nous avons un taux de remplacement élevé plus la flèche augmente.

On constate que la charge de fissuration est plus élevée pour le béton naturel et diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Cet écart s'explique par la différence de la résistance à la traction des trois bétons.

On remarque aussi que plus le taux de remplacement diminue plus la charge de plastification augmente. Pour le BN la charge d'écoulement est de l'ordre de 74KN, 67.5KN pour BR50 et 64KN pour BR100. Comme l'indique la figure ci-dessous.

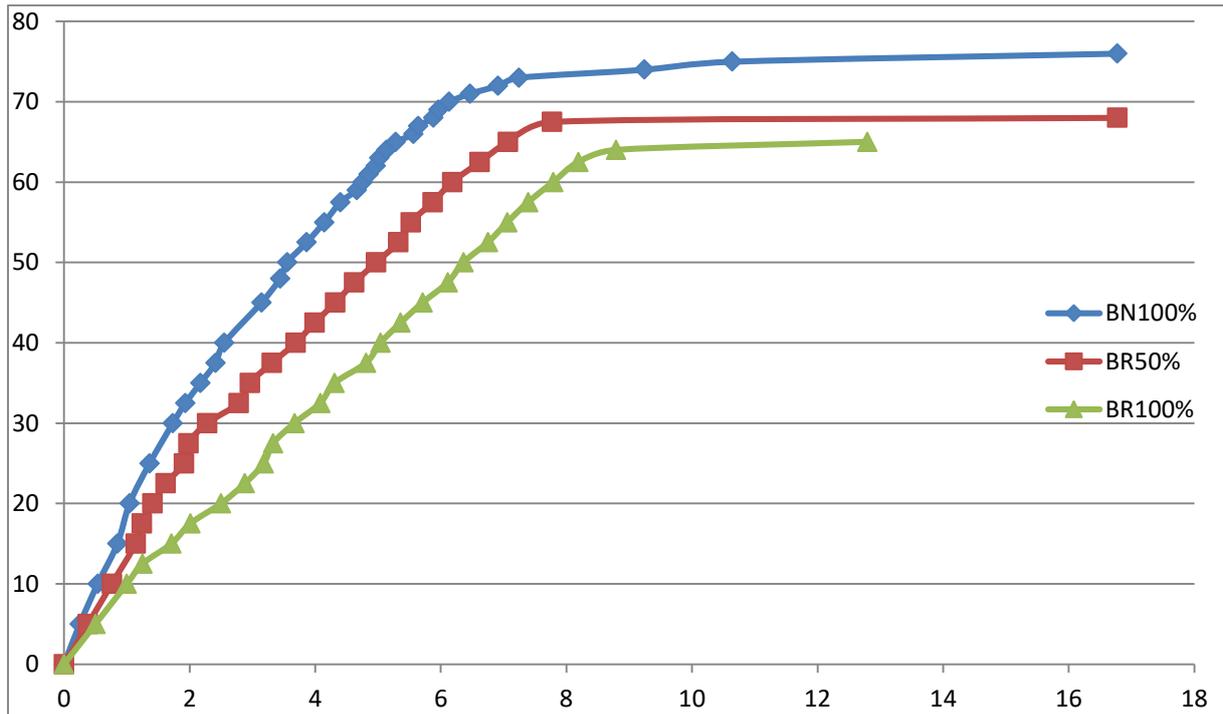


Figure IV.7 : résultats de la flèche expérimentale

## 4. Calculs des flèches théoriques :

### 1-Béton 100% naturel :

#### ➤ Calcul de flèche avec I non fissurée

#### Calcul de l'axe neutre :

$$\frac{bx^2}{2} - \frac{bhx^2}{2} - n_i \times A_s (d - x) = 0$$

$$\frac{152}{2} - \frac{15(25-x)^2}{2} - 5.9 \times 2.26(22.5 - x) = 0$$

$$388.33x - 4987.42 = 0 \rightarrow x = 12.84 \text{ cm}$$

Avec :

$$E_b = 1100^3 \sqrt{\sigma_c} = 3.38 \times 10^4 \text{ MPa}$$

## Chapitre VI : résultats et discussions

$$\triangleright n_i = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2 \times 10^5}{3.38 \times 10^4} = 5.90$$

**Calcul de I non fissurée :**

$$I_{NF} = \frac{bx^3}{3} + n_i A(d-x)^2 + \frac{b(h-x)^3}{3}$$

$$I_{NF} = \frac{15}{3}(12.84)^3 + 5.9 \times 2.26 (22.5-12.84)^2 + \frac{15(25-12.84)^3}{3}$$

$$I_{NF} = 20818.48 \text{ cm}^4.$$

- **Calcul de la contrainte de traction des éprouvettes prismatique (7\*7\*28)**

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I}$$

$$\text{Avec : } I = \frac{bh^3}{12} = \frac{7 \cdot 7^3}{12} = 200.08 \text{ cm}^4$$

$$\text{Et : } M = \frac{pl}{4}$$

$\sigma_{bt}$  : contrainte de traction du béton

L : la distance entre appuis

P : la force de rupture

M : moment fléchissant

Pour :

$$P = 5.201 \text{ Kn}$$

## Chapitre VI : résultats et discussions

$$M = \frac{P L}{4} = \frac{5.201 \times 0.21}{4} = 0.2730 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I} = \frac{0.000273 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}} = 4.77 \text{ MPa}$$

Pour :

$$p = 5.289 \text{ Kn}$$

$$M_2 = \frac{P L}{4} = \frac{5.289 \times 0.21}{4} = 0.2776 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt2} = \frac{M_2 X}{I} = \frac{0.000273 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_{bt2} = 4.85 \text{ MPa}$$

Pour :

$$p = 5.837 \text{ Kn}$$

$$M = 0.3064 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt} = 5.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bt \text{ moy}} = \frac{\sum \sigma_{bt}}{3} = 4.99 \text{ MPa}$$

**Calcul de la force du début du déclanchement de fissures :**

avec  $I = I_{NF}$  moment d'inertie fissurée

$$\sigma_{bt} = f_t$$

$$\sigma_{bt} = \frac{M f (h-x)}{I} = f_t$$

$$M f = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{h-x} = p \times a$$

$$p = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{(h-x)a} = \frac{4.99 \times 20818.48 \times 10^{-8}}{(0.25 - 0.1284) \times 0.65} = 0.01314 \text{ Mn}$$

$$p = 13.14 \text{ Kn}$$

**calcul de flèche avec  $I_{NF}$  :**

**démonstration de la formule de flèche :**

$$\frac{y_1}{2/3a} = \frac{L/4}{L/2} = \frac{1}{2}$$

$$Y_1 = \frac{2}{3} \frac{a}{2} = \frac{a}{3} \quad (1)$$

$$\frac{y_2}{a+b/4} = \frac{L/4}{L/2} = \frac{1}{2}$$

$$Y_2 = (a+b/2) \frac{1}{2} \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{p}{2} a^2 \quad y_1 = a/3$$

$$W_2 = \frac{p}{2} b \quad y_2 = \frac{a}{2} + \frac{b}{8} = \frac{4a+b}{8} = \frac{L+2}{8}$$

$$F = \sum w_i y_i / EI = (w_1 y_1 + w_2 y_2) \frac{2}{EI}$$

$$F = \left( \frac{pa^3}{6} + \frac{pab}{2} \left( \frac{a}{2} + \frac{b}{8} \right) \right) \frac{2}{EI}$$

$$F = \left( \frac{pa^3}{6} + \frac{pa^2 b}{4} + \frac{pa^2 b}{16} \right) \frac{2}{EI} = \frac{2a}{EI} \left( \frac{a^2}{3} + \frac{ab}{2} + \frac{b^2}{16} \right)$$

$$F = \frac{pa}{EI} \left( \frac{a^2}{3} + \frac{ab}{2} + \frac{b^2}{8} \right)$$

$$F = \frac{pa}{EI} \frac{8a^3 + 12ab + 3b^2}{24} \quad (I)$$

$$F = \frac{pa}{24EI} (12a^2 + 3b^2 + 12ab - 4a^2)$$

$$F = \frac{pa}{24EI} (3(4a^2 + b^2 + 4ab) - 4a^2)$$

$$F = \frac{pa}{24EI} (3(2a + b)^2 - 4a^2)$$

$$F = \frac{pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (II)$$

Avec  $F = F_{NF}$  la flèche avec  $I_{NF}$

$$F_{NF} = \frac{p a (3L^2 - 4a^2)}{48 EI}$$

$$F_{NF} = \frac{p \times 10^{-3} \times 65 \times 10 (3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 3.3892 \times 10^4 \times 20818.48 \times 10^4} = P \ 0.0154$$

➤ **Calcul de la flèche avec I fissurée :**

**Calcul de l'axe neutre :**

$$\frac{bx^2}{2} - \frac{b(h-x)^2}{2} - n_i \times A_s (d - x) = 0$$

$$\frac{15x^2}{2} - \frac{15(25-x)^2}{2} - 5.9 \times 2.26(22.5 - x) = 0$$

$$7.5x^2 + 13.33x - 300.01 = 0$$

$$X = 5.49 \text{ cm}$$

**Calcul de I fissure :**

$$I_f = \frac{bx^3}{3} + n_i A(d-x)^2$$

$$\frac{15(5.49)^3}{3} + 5.9 \times 2.26 (22.5 - 5.49)^2$$

$$I_f = 4685.40 \text{ cm}^4$$

### Calcul de la flèche avec I fissurée

$$F = \frac{p \times 10^3 \times 65 \times 10 (3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 3.3892 \times 10^4 \times 4685.4 \times 10^4} = p0.0684$$

$$F = P \mathbf{0.0684}$$

### 2-Béton 50% recyclés :

➤ Calcul de flèche avec I non fissurée :

### Calcul de l'axe neutre :

$$\frac{bx^2}{2} - \frac{b(h-x)^2}{2} - n_i \times A_s (d - x) = 0$$

$$\frac{15x^2}{2} - \frac{15(25-x)^2}{2} - 6.364 \times 2.26(22.5 - x) = 0$$

$$389.38x - 5011.1 = 0 \rightarrow \mathbf{x = 12.86 \text{ cm}}$$

$$\text{Avec } E_b = 1100^3 \sqrt{\sigma_c} = 3.1422 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$\triangleright n_i = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2 \times 10^5}{3.1422 \times 10^4} = 6.364$$

### Calcul de I non fissurée :

$$I_{NF} = \frac{bx^3}{3} + n_i A (d-x)^2 + \frac{b(h-x)^3}{3}$$

$$I_{NF} = \frac{15}{3}(12.86)^3 + 6.364 \times 2.26 (22.5-12.86)^2 + \frac{15(25-12.86)^3}{3}$$

$$I_{NF} = 20939.58 \text{ cm}^4.$$

- Calcul de la contrainte de traction des éprouvettes prismatiques (7\*7\*28)

## Chapitre VI : résultats et discussions

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I}$$

$$\text{Avec : } I = \frac{bh^3}{12} = \frac{7 \cdot 7^2}{12} = 200.08 \text{ cm}^4$$

$$\text{Et } M = \frac{pl}{4}$$

$$P = 4.568 \text{ KN}$$

$$M_1 = \frac{4.568 \times 0.21}{4} = 0.239 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I} = \frac{0.000239 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}} = 4.18 \text{ MPa}$$

$$\text{Pour } p = 4.026 \text{ Kn}$$

$$M_2 = \frac{P_2 L}{4} = \frac{4.026 \times 0.21}{4} = 0.211 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt2} = \frac{M_2 X}{I} = \frac{0.000211 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_{bt2} = 3.69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bt \text{ moy}} = \frac{\sum \sigma_{bt}}{3} = 3.93 \text{ MPa}$$

**Calcul de la force du début du déclanchement de fissures :**

$$\sigma_{bt} = f_t$$

$$\sigma_{bt} = \frac{Mf(h-x)}{I} = f_t$$

$$Mf = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{h-x} = p \times a$$

$$p = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{(h-x)^a} = \frac{3.93 \times 20939.58 \times 10^{-8}}{(0.25 - 0.1286)^{0.65}} = 0.01042 \text{ Mn}$$

$$p = 0.01042 \text{ Mn}$$

$$p = 10.42 \text{ Kn}$$

**calcul de flèche avec  $I_{NF}$  :**

avec  $I = I_{NF}$  moment d'inertie fissurée

$$F_{NF} = \frac{p a (3L^2 - 4a^2)}{48 EI}$$

$$F_{NF} = \frac{p \times 10^3 \times 65 \times 10 (3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 3.1422 \times 10^4 \times 20939.58 \times 10^4} = P * 0.0165 \text{ mm}$$

➤ **Calcul de la flèche avec  $I$  fissurée :**

**Calcul de l'axe neutre :**

$$= \frac{bx^2}{2} + n_i A x - n_i (A \times d) = 0$$

$$\frac{15x^2}{2} + 6.364 \times 2.26x - 6.346 (2.26 \times 22.5) = 0$$

$$7.5x^2 + 14.38x - 323.40 = 0$$

$$X = 5.67 \text{ cm}$$

**Calcul de  $I$  fissure :**

$$I_F = \frac{bx^3}{3} + n_i A (d-x)^2$$

$$I_F = \frac{15 \times (5.67)^3}{3} + 6.364 \times 2.26 (22.5 - 5.67)^2$$

$$I_F = 4982.72 \text{ cm}^4$$

**Calcul de la flèche avec  $I$  fissurée :**

$$F_F = \frac{p a(3L^2 - 4a^2)}{48 EI}$$

$$F_F = \frac{p \times 10^3 \times 65 \times 10(3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 3.1422 \times 10^4 \times 4982.72 \times 10^4} = p \times 0.0694$$

$$F_F = P \mathbf{0.0694 \text{ mm}}$$

### 2-Béton 100% recyclés :

#### ➤ Calcul de flèche avec I non fissurée

#### Calcul de l'axe neutre :

$$\frac{bx^2}{2} - \frac{b(h-x)^2}{2} - n_i \times A_s (d - x) = 0$$

$$\frac{15x^2}{2} - \frac{15(25-x)^2}{2} - 6.757 \times 2.26(22.5 - x) = 0$$

$$390.27x - 5031.09 = 0 \rightarrow \mathbf{x = 12.89 \text{ cm}}$$

Avec :

$$E_b = 1100 \sqrt[3]{\sigma_c} = 2.95 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow n_i = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2 \times 10^5}{2.26 \times 10^4} = 6.757$$

#### Calcul de I non fissurée :

$$I_{NF} = \frac{bx^3}{3} + n_i A(d-x)^2 + \frac{b(h-x)^3}{3}$$

$$I_{NF} = \frac{15}{3}(12.89)^3 + 6.757 \times 2.26 (22.5 - 12.89)^2 + \frac{15(25 - 12.89)^3}{3}$$

$$I_{NF} = 20998.57 \text{ cm}^4.$$

## Chapitre VI : résultats et discussions

- Calcul de la contrainte de traction des éprouvettes prismatiques  
(7\*7\*28)

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I}$$

$$\text{Avec : } I = \frac{bh^3}{12} = \frac{7 \cdot 7^3}{12} = 200.08 \text{ cm}^4$$

$$\text{Et } M = \frac{pl}{4}$$

Pour : P= 4.5 KN

$$M_1 = \frac{4.5 \times 0.21}{4} = 0.236 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{M X}{I} = \frac{0.000236 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}} = 4.12 \text{ MPa}$$

Pour : p= 3.411 Kn

$$M_2 = \frac{P L}{4} = \frac{3.411 \times 0.21}{4} = 0.179 \text{ Kn.m}$$

$$\sigma_{bt2} = \frac{M_2 X}{I} = \frac{0.000179 \times 0.035}{200.08 \times 10^{-8}}$$

$$\sigma_{bt2} = 3.13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bt \text{ moy}} = \frac{\sum \sigma_{bt}}{3} = 3.63 \text{ MPa}$$

Calcul de la force du début du déclanchement de fissures :

$$\sigma_{bt} = f_t$$

$$\sigma_{bt} = \frac{Mf(h-x)}{I} = f_t$$

$$Mf = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{h-x} = p \times a$$

## Chapitre VI : résultats et discussions

$$p = \frac{\sigma_{bt \text{ moy}} \times I}{(h-x)a} = \frac{3.63 \times 20998.57 \times 10^{-8}}{(0.25 - 0.1289)0.65} = 0.008963 \text{ Mn}$$

$$p = 0.008963 \text{ Mn}$$

$$p = 8.96 \text{ Kn}$$

**calcul de flèche avec  $I_{NF}$  :**

$$F_{NF} = \frac{p a (3L^2 - 4a^2)}{48 EI}$$

$$F_{NF} = \frac{p \times 10^3 \times 65 \times 10 (3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 2.95 \times 10^4 \times 20998.57 \times 10^4} = P \times 0.0174 \text{ mm}$$

➤ **Calcul de la flèche avec  $I$  fissurée :**

**Calcul de l'axe neutre :**

$$= \frac{bx^2}{2} + n_i A x - n_i (A \times d) = 0$$

$$\frac{15x^2}{2} + 6.757 \times 2.26x - 6.757(2.26 \times 22.5) = 0$$

$$7.5x^2 + 15.25x - 343.23 = 0$$

$$X = 5.82 \text{ cm}$$

**Calcul de  $I$  fissure :**

$$I_F = \frac{bx^3}{3} + n_i A (d-x)^2$$

$$I_F = \frac{15 \times (5.82)^3}{3} + 6.757 \times 2.26 (22.5 - 5.82)^2$$

$$I_F = 5229.96 \text{ cm}^4$$

**Calcul de la flèche avec  $I$  fissurée :**

$$F_F = \frac{p a (3L^2 - 4a^2)}{48 EI}$$

$$F_F = \frac{p \times 10^3 \times 65 \times 10 (3 \times 1800^2) - (4 \times 650^2)}{48 \times 2.95 \times 10^4 \times 5229.96 \times 10^4} = p \times 0.0702$$

$$F_F = P \mathbf{0.0702 \text{ mm}}$$

### 5. Etude de la fissuration :

Les schémas de fissuration, tracés à la fin des essais de flexion comme l'illustre les Figures ci dessous , sont similaires d'une façon globale pour les trois poutres,. on peut remarquer que les fissures dues au moment fléchissant qui sont des fissures entre les points d'application de la charge apparaissent en premier après en on remarque une créations de fissures inclinées près des appuis ces fissures sont due à l'effort tranchant apparaissent à des charges inférieures pour les poutres BR100 et BR50 par rapport aux poutres fabriquées du béton BN. Il a également été constaté que le nombre de fissures augmente on fonction d'augmentation du taux de substitutions. Cet état d'endommagement plus marqué est accompagné d'une diminution de l'espace entre les fissures, d'une augmentation de la largeur de la zone fissurée et pour finir d'une augmentation de la hauteur des fissures.



Figure IV.9 : résultats final de la poutre 100% naturel « écoulement 74 KN »



Figure IV.10 : résultats final de la poutre 50% recyclé « écoulement 67.5 KN »



Figure IV.11 : résultats final de la poutre 100% recyclé « écoulement 64KN »

## 6. Analyse de la fissuration :

$$B_{\text{enr}} \times f_t = F_{\text{bt}}$$

Avec :  $B_{\text{enr}}$  = section d'enrobage

$f_t$  = contrainte de traction dans le béton

$F_{\text{bt}}$  = la force de traction du béton

$$\tau_s \times 2\pi \times \Phi \times L_{\text{min}} = F_{\text{bt}}$$

$$B_{\text{enr}} \times f_{\text{bt}} = \tau_s (2\pi\Phi) L_{\text{min}}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{B_{\text{enr}} \times f_t}{\tau_s (2\pi\Phi)} \times \frac{\frac{\Phi}{4}}{\frac{\Phi}{4}}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{f_t \times \frac{\Phi}{4}}{\tau_s \frac{(2\pi\frac{\Phi}{4})}{B_{\text{enr}}}} = \frac{f_t \times \Phi}{4\tau_s \times \varpi}$$

Avec :  $\tau_s = 0.6 \psi^2 f_t$  selon le BAEL91

$\psi = 1.5$  ( armature HA)

$$\varpi = \frac{A_s}{B_{\text{enr}}}$$

$$B_{\text{enr}} = (6.2 \times 15) = 93 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2.26 \text{ cm}^2$$

$$\varpi = \frac{2.26}{93} = 2,43\%$$

$$L_{\text{min}} = \frac{f_t \times 12}{4 \times 0.6 \times 2.25 \times f_t \times 0.02} = 91.44 \text{ mm}$$

$$L_{\text{min}} = 91.44 \text{ mm}$$

# Chapitre VI : résultats et discussions

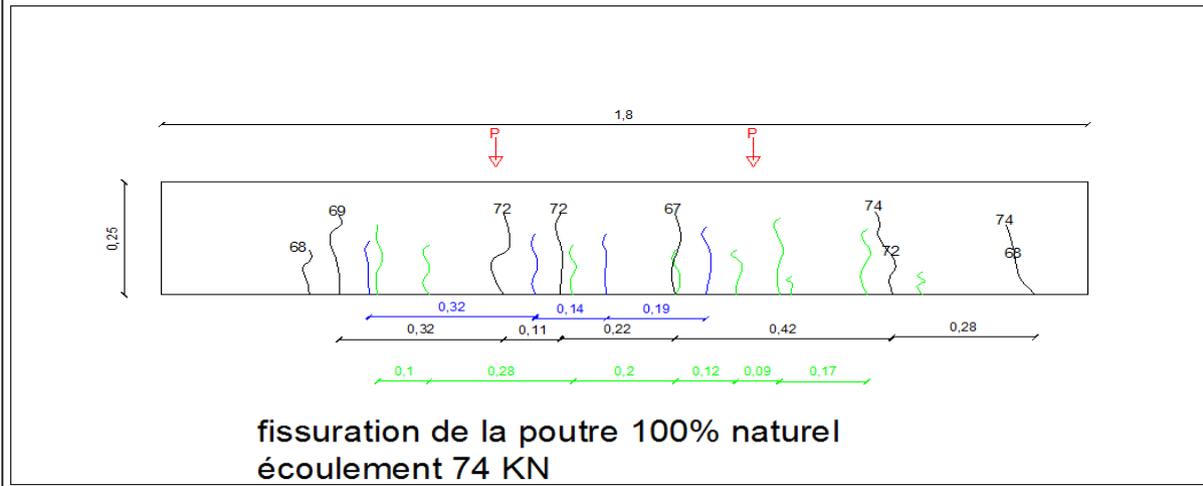


Figure IV.12 : dessin de fissure la poutre 100% naturel

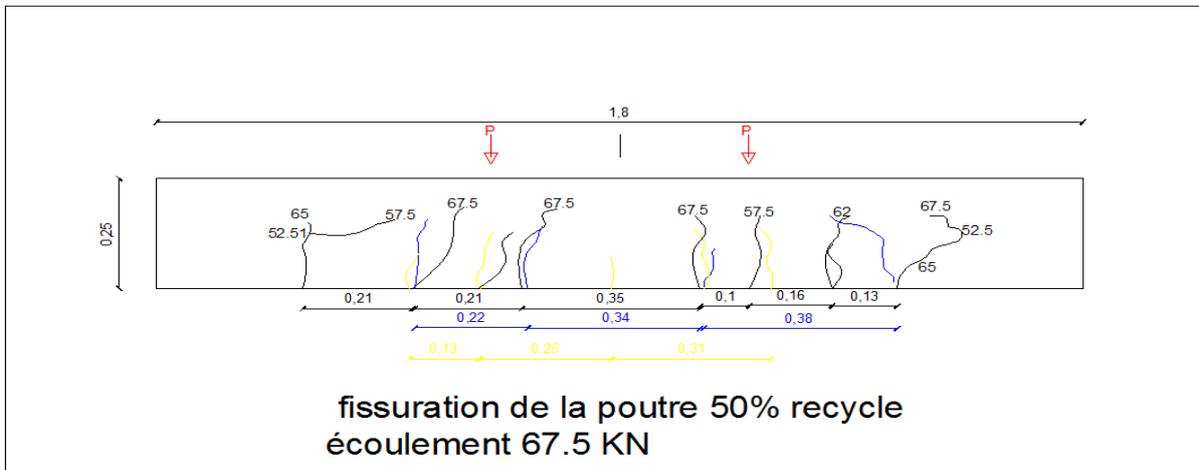


Figure IV.13 : dessin de fissure la poutre 50% recyclé

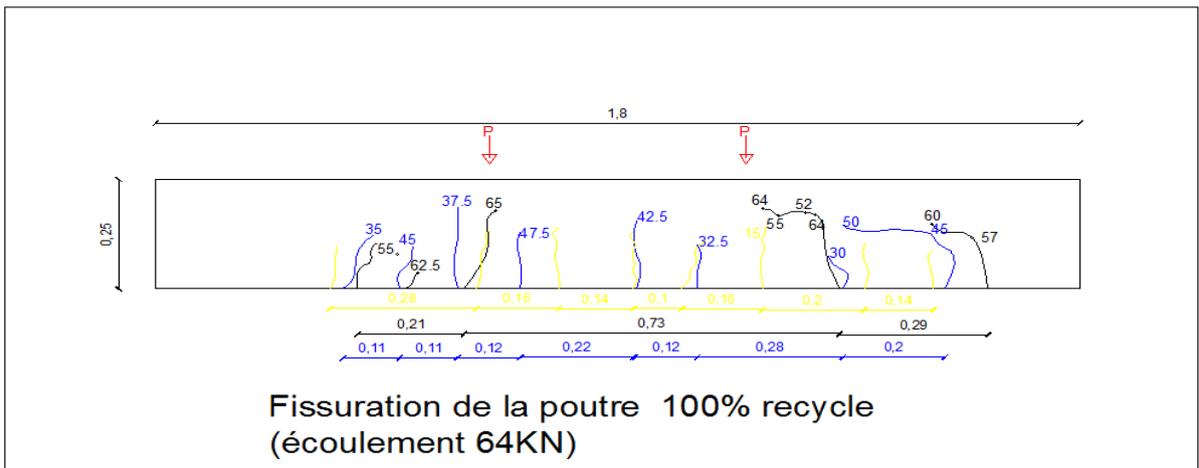


Figure IV.14 : dessin de fissure la poutre 100% recyclé

Expérimentalement, on a pu remarquer que l'écartement entre deux fissures était égal à 1.8 fois celui déterminé théoriquement.

$$L_{\text{moy}} = 1.8 L_{\text{min}}$$

## Chapitre VI : résultats et discussions

---

### **Conclusion :**

On se basant sur les résultats expérimentaux obtenue dans le cadre du présent travail on peu conclure que :

-b les poutres en béton de graviers recyclés on montré une résistance légèrement inferieur ou poutre fabriqué a base d'agrégats naturels et une flèche plus importante .

# Références

---

## 1. References:

- [1] Sepani Senaratne , Gregory Lambrousis, Olivia Mirza, Vivian W. Y. Tam and Won-Hee Kang School of Computing, Engineering and Mathematics, Western Sydney University, Australia. Recycled concrete in structural applications for sustainable construction practices in Australia Sepani Senaratne et al. / Procedia Engineering 180 ( 2017 ) 751 – 758.
- [2] Cléo Laneyrie. Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température du béton des granulats recyclés. Génie civil. Université de Cergy Pontoise, 2014. Français. .
- [3] V. Tam, "Economic comparison of concrete recycling: A case study approach," Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, pp. 821-8, 2008.
- [4] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," Construction and Building Materials, vol. 68, pp. 501-516, 10/15/ 2014.
- [5] Department of Environment and Climate Change NSW, "Report into the Construction and Demolition Waste Stream Audit 2000-2005," Department of Environment and Climate Change NSW, Ed., ed. 59–61 Goulburn Street: Department of Environment and Climate Change NSW, 2007.
- [6] V. Tam , "Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries," Journal of Cleaner Production, vol. 17, pp. 688–702, 2009.
- [7] X. Li, "Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications," Resources, Conservation and Recycling, vol. 53, pp. 107-12, 2009.
- [8] N. Tošić, S. Marinković, T. Dašić , and M. Stanić, " Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use," Journal of Cleaner Production, vol. 87, pp. 766-76, 2015.

# Références

---

- [9] I. Martínez, M. Etxeberria, E. Pavón, and N. Díaz, "A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 384-92, 12// 2013.
- [10] M. Heeralal, P. Rathish Kumar, and Y. V. Rao, "FLEXURAL FATIGUE CHARACTERISTICS OF STEEL FIBER REINFORCED RECYCLED AGGREGATE CONCRETE (SFRRAC) " *Architecture and Civil Engineering*, vol. 7, pp. 19-33, 2009.
- [11] H. Quiasrawi and I. Marie, "Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates," *Journal of Cleaner Production*, vol. 37, pp. 243-8, 2012.
- [12] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 735-42, 2007.
- [13] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya , and S. V. Barai, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete," *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 205-20, 2011.
- [14] C. Knoeri, E. Sanyé-Mengual, and H. Althaus, "Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, pp. 909-18, 2013.
- [15] V. Spaeth and A. Djerbi Tegguer, "Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 2, pp. 143-152, 12// 2013.
- [16] S.-c. Kou, C.-s. Poon, and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 788-95, 9// 2011.
- [17] A. Barbudo, J. de Brito, L. Evangelista, M. Bravo, and F. Agrela, "Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, pp. 93-8, 11/15/ 2013.
- [18] V. Tam and C. Tam, "Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach," *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 3592-602, 2007.

# Références

---

- [19] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang, and J. Jiang, "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 701-8, 5// 2010.
  
- [20] S. Senaratne, D. Gerace, O. Mirza, V. Tam, and W. Kang, "The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2318-2327, 2016.