

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB – BLIDA-  
كلية سعد دحلب- البليدة



Faculté de Technologie  
كلية التكنولوجيا

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
دائرة الهندسة المدنية

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

مذكرة نهاية التدرج

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN GÉNIE CIVIL

OPTION:

STRUCTURE RÉPARATION ET COUT DE CONSTRUCTION

THÈME

**PERFORMANCE DU MORTIER A BASE  
DES FINES RECYCLEES**

PRÉSENTÉ PAR :

YAHIA AISSA WISSAM Pr. KENAI. S

Dr. MENADI. B

ENCADRÉ PAR :

PROMOTION 2013

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## المخلص

استخدام الركام المعاد استعماله في الإسمنت لتصنيع الخرسانة و المونة تقدم تطور اقتصادي و بيئي لا يمكن إنكاره.

الاسمنت الذي يحتوي على إضافات (الجيرية التوف... الخ) يتم إنتاجها في عدة مصانع الاسمنت في الجزائر مطابقة لمعايير الأوروبية. بحوث قد أجريه لدراسة تأثير هاته الإضافات الإسمنتية على الخواص الفيزيكي و ميكانيكية و الاستدامة على المدى الطويل. مع ذلك فقد تم القيام بعدد قليل من الدراسات على الخرسانة بالإسمنت المضاف عليه الركام معاد استعماله و مدى تأثيره الاستدامة على المدى الطويل.

الغرض الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير غرامات المعاد تدويرها على عجينة الأسمنت (التمزق والزمن الأخذ وتحليل أداء المونة (المقاومة) على المدى، استبدال 15، 30 و 45% من الاسمنت مع الغرامات المعاد تدويرها، ومقارنة مع المونة المرجعية. وأظهرت النتائج أن غرامات تلعب دورا في تطوير قوة ضاغطة ولكن هذا لا يزال أقل من المونة المرجعية.

**كلمات المفاتيح :** المونة . الغرامات المعاد تدويرها. الركام معاد استعماله . الخرسانة. قوة الضغط

## RESUME

L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication des mortiers et bétons offrent des avantages économiques et écologiques indéniables. Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'effet des granulats recyclés en substitution partielle ou totale aux granulats naturels sur la performance des mortiers et béton. Cependant, peu d'études ont été faites sur la performance des mortiers à base de fines de granulats recyclés comme substitution partielle au ciment. Le but principal de ce travail est d'étudier l'influence des fines recyclées sur la pate de ciment (consistance et délai de prise) à l'état frais et analyser la performance des mortiers (résistance) à l'état durci, en substituant 15, 30 et 45% de ciment par des fines recyclées. Les résultats ont montré que les fines jouent un rôle dans l'hydratation et le développement de la résistance à la compression mais cette dernière reste toujours inferieur au mortier de référence.

**Mots clés :** Mortier, fines recyclées, granulats recyclés, ciment, temps de prise, consistance, résistance à la compression.

## ABSTRACT

The use of recycled aggregates in the fabrication of concrete offers economic and ecological advantages. The use of recycled aggregates as a partial or total substitution to natural aggregates in mortar and concrete has been well studied. However, few studies have been conducted on the effect of recycled fines as a substitution to cement on the properties of mortar and concrete. The main purpose of this study is to analyze the influence of recycled fines on the cement paste (consistency and setting time) and analyze the performance of mortars (compressive strength) in the hardened state. Cement was substituted partially at 15, 30 and 45% by weight of cement with recycled fines. The results showed that recycled fines contribute to the hydration and the development of compressive strength but this is still less than the reference mortar.

**Key words:** Mortar, recycled fines, recycled aggregates, cement, setting time, consistency, compressive strength.



## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil de l'université Saad Dahleb de Blida.

Je remercie tout t'abord mes deux encadreurs Pr. KENAI Said et Dr.MENADI Belkacem pour m'avoir dirigé et pour leur aide très précieuse ainsi que pour leurs patience et disponibilité.

Je tiens à remercier aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire :

- Le chef de département et tout le personnel de département de chimie industriel de l'université Saad Dahleb de Blida ;
- Mlle DEBBIH Amina
- Monsieur Abdalkadar ;
- Mes collègues : Ayoub, Louanasse, Charchour, Kahina, Siham, Ahmad, Lotfi, Abdalkadar, Salam.

# ***TABLE DES MATIERES***

Résumé	
Remerciement	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations et des notations	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
❖ Les objectifs.....	2
❖ Plan de travail.....	2
<b>Chapitre I : Revue bibliographique performance de béton à base de granulats recyclés.</b>	
I.1) Généralité.....	3
I.2.) Provenances des granulats recyclés.....	3
I.3.) Elaboration et Produits issus du recyclage.....	4
I.3.1.) Elaboration.....	5
I.3.2.) Produits issus du recyclage.....	5
I.4.) Valorisation et procédés de recyclage des granulats.....	6
I.4.1.) Définition.....	6
I.4.2.) Technique de recyclage.....	7
I.4.2.1.) Procédés du recyclage.....	7
I.4.2.2.) La chaîne du recyclage.....	7
a. Collecte de déchets.....	7
b. Transformation.....	8
c. Commercialisation et consommation.....	8

I.4.3.) Impacts du recyclage sur l'environnement.....	8
I.5.) La filière Recyclage des granulats.....	9
I.5.1.) Production et répartition des granulats dans le BTP.....	10
I.5.2.) Emploi des granulats recyclés dans la construction.....	13
I.6.) Caractéristiques des granulats recyclés.....	13
I.6.1.) La granulométrie.....	14
I.6.2.) L'équivalent de sable.....	15
I.6.3.) Masse Volumique.....	16
I.6.4.) Absorption d'eau.....	18
I.6.5.) dureté.....	19
I.6.6.) porosité.....	21
I.6.7.) Mortier de liaison.....	23
I.7.) Propriétés et dosage du béton frais à base de granulats recyclés.....	24
I.7.1.) Ouvrabilité.....	24
I.7.2.) Problème des fines du sable recyclé.....	24
I.7.3.) Temps de prise.....	25
I.8.) Propriétés mécaniques du béton dur.....	26
I.8.1.) Quantité d'eau pour affaissement constant.....	26
I.8.2.) Résistance à la compression et à la traction.....	27
I.9.) Conclusion.....	34

## **Chapitre II: Matériaux et procédures expérimentales**

II.1.) Introduction.....	35
II.2.) Caractérisation des matériaux.....	35
II.2.1.) Ciment.....	35
II.2.1.1.) CPJ-CEM II /A 42.5 R.....	35
II.2.1.2.) CPJ -CEM II/A 32.5R.....	36
II.2.2.) Granulats naturels.....	36
II.2.2.1.) Sable naturelle.....	36
II.2.2.1.1) Sable de Baghlia.....	36
II.2.2.1.2.) Sable de Bouguezoul.....	37
II.2.2.2.) Sable normalisé.....	39
II.2.3.) Eau de gâchage.....	40

II.2.4.) Les fines recyclés.....	40
II.3.) Fabrication des éprouvettes de mortier.....	41
II.4.) Concassage et broyage des fines.....	43
II.5.) Essais sur la pate de ciment.....	45
II.5.1.) Essai de consistance.....	45
II.5.2.) Essai de prise.....	46
II.6.) Essais sur mortiers.....	47
II.7.) Récapitulatif et variables étudiées.....	49

### **Chapitre III: Analyse et discussions des résultats**

III.1.) Introduction.....	51
III.2.) Essai sur pâte de ciment.....	51
III.2.1.) Influence des fines et de type de ciment sur la consistance.....	51
III.2.2.) Temps de début et fin de prise des ciments composés utilisés.....	53
III.3.) Résistance à la compression.....	55
III.3.1) Résistance à la compression de mortier a base de ciment 42,5.....	55
III.3.2) Résistance à la compression de mortier à base de ciment 32,5.....	58
III.3.3.) Comparaison entre les deux types de sable.....	60
III.3.4.) Effet de la classe de ciment sur la résistance.....	61
III.4.) Conclusion.....	62

### **Conclusions générales et recommandations.....63**

#### **Références bibliographiques**



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Provenances des granulats recyclés .....	4
<b>Figure I. 2</b> : Cycle de vie granulats recyclés issus de déconstruction .....	10
<b>Figure I.3</b> : Production de GR 1989 – 2009 .....	11
<b>Figure I.4</b> : Répartition par origine des granulats.....	12
<b>Figure I.5</b> : Répartition suivant la destination .....	4
<b>Figure I.6</b> : forme des granulats recyclés.....	14
<b>Figure I.7</b> : Courbes granulométriques des granulats recyclés.....	14
<b>Figure I.8</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et Recyclés.....	17
<b>Figure I.9</b> : Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton .....	22
<b>Figure I.10</b> : Rapport E/C des bétons partiellement composé des granulats de béton pour des dosages de ciment respectifs 300, 350,400kg/m <sup>3</sup> .....	26
<b>Figure I.11</b> : Evolution de la résistance en compression en fonction des échéances pour le Bétons à différentes combinaisons granulaires .....	27
<b>Figure I.12</b> : Résistance à la compression des bétons à base des granulats de béton Concassé.....	28
<b>Figure I.13</b> : Développement de la résistance des bétons à base des agrégats de béton de démolition.....	28

<b>Figure I.14:</b> L'effet de béton concassé sur la résistance à la compression (S)	29
<b>Figure I.15:</b> Variation de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours	29
<b>Figure I.16:</b> Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires	31
<b>Figure I.17:</b> Résistance à la compression du béton à granulats recyclés	32
<b>Figure I.18:</b> Résistance à la traction du béton à granulats recyclés	32
<b>Figure I.19:</b> Résistance à la traction du béton à 0, 30 et 100% de granulats fins recyclés	33
<b>Figure I.20 :</b> Module d'élasticité pour 0, 30 et 100% de remplacement des granulats recyclés	33
<b>Figure II.1:</b> sable de Baghlia	37
<b>Figure II.2</b> Sable de Bouguezoul	37
<b>Figure II.3.</b> La courbe granulométrique du sable naturel (mélange)	39
<b>Figure II.4 :</b> sable normalisé	39
<b>Figure II.5:</b> Courbe granulométrique de sable normalisé	40
<b>Figure II.6:</b> Organigramme de fabrication de fines recyclées	41
<b>Figure II.7 :</b> Malaxeur à axe vertical	41
<b>figure II.8:</b> Opération pour déterminer le mortier normal	42
<b>Figure II .9 :</b> Mise en moule du mortier	42
<b>Figure II .10:</b> Table à chocs	42

<b>Figure II.11:</b> Démoulage d'éprouvette.....	43
<b>Figure II.12 :</b> les éprouvettes dans le bac d'eau.....	43
<b>Figure II.13:</b> machine de concassage.....	43
<b>Figure II.14 :</b> Broyeur à boules.....	43
<b>Figure II.15 :</b> fines (non broyée/broyée).....	44
<b>Figure II.16 :</b> Principe de préparation de la pate .....	45
<b>Figure II.17 :</b> Appareil de Vicat.....	46
<b>Figure II.18:</b> dispositif pour l'essai de compression du mortier .....	48
<b>Figure II.19 :</b> essai de compression sur mortier.....	48
<b>Figure II.20:</b> Organigramme de la procédure expérimentale.....	50
<b>Figure III.1 :</b> Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de taux de substitution des fines.....	52
<b>Figure III.2 :</b> Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment 32.5 en fonction de taux de substitution des fines.....	52
<b>Figure III.3 :</b> Evolution de temps de prise en fonction de taux de substitution des fines.....	53
<b>Figure III.4 :</b> Evolution de temps de prise en fonction de taux de Substitution des fines .....	54
<b>Figure III.5 :</b> Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 42.5 et sable naturel.....	57
<b>Figure III.6 :</b> Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 42.5 et sable normalisé.....	57
<b>Figure III.7 :</b> Evolution de la résistance à la compression du mortier à base	

de ciment 32.5 et sable naturel.....	59
<b>Figure III.8</b> : Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 32.5 et sable normalisé.....	59
<b>Figure III.9</b> : influence du type de sable sur la résistance pour 15% de fines.....	60
<b>Figure III.10</b> : influence de la classe de ciment sur la résistance pour 15% de fines.....	61

# ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau I.1</b> : Normes d'utilisation des matériaux issus de la démolition.....	6
<b>Tableau I.2</b> : Equivalent de sable et module de finesse.....	15
<b>Tableau I.3</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.....	16
<b>Tableau I.4</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats Naturels Recyclés.....	16
<b>Tableau I.5</b> : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés.....	19
<b>Tableau I.6</b> : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés...	20
<b>Tableau I.7</b> : Los Angeles des agrégats à base de béton à différent rapport E/C.....	28
<b>Tableau I.8</b> : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés.....	30
<b>Tableau II.1</b> : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment(42,5).....	35
<b>Tableau II.2</b> : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment (32.5).....	36
<b>Tableau II.3</b> : Caractéristiques principales de Sable Baghlia.....	37
<b>Tableau II.4</b> : Caractéristiques principales de Sable de Bougezoul.....	38
<b>Tableau II.5</b> : Caractéristiques principales de sable naturel.....	38
<b>Tableau III.1</b> : Consistances normale des ciments étudiés.....	51
<b>Tableau III.2</b> : délais de prise (début et fin) des ciments étudiés.....	53
<b>Tableau III.3</b> : Résistance à la compression à base de ciment 42,5.....	56
<b>Tableau III.4</b> : Résistance à la compression à base de ciment 32,5.....	58



# *Introduction générale*

# Introduction générale

---

## ❖ INTRODUCTION GENERALE

L'épuisement des gisements naturels de granulats et matériaux pour la fabrication du ciment et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Le recyclage des matériaux de construction est la solution plus prometteuse. Le recyclage permet non seulement de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement.

Les déchets de démolition représentent un gisement important suite aux différentes catastrophes qu'ont connu le pays et leur valorisation est indispensable. La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne [1,2]. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasé dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir.

En Algérie, la totalité de la production du béton dans le bâtiment et les travaux publics est composée seulement de granulats d'origine naturelle. Par ailleurs, les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la déconstruction du vieux bâti sont en quantité croissante. Ils sont utilisés en remblai ou mis-en décharge sauvage causant un impact sur l'environnement.

Dans la fabrication du ciment et afin de réduire le dégagement de  $CO_2$  et réduire la consommation de l'énergie des ajouts cimentaires naturelles ou de déchets industriels comme le laitier, les ce cendres volantes, la fumée de silice, le calcaire et la pouzzolane naturelle sont couramment utilisés.

Plusieurs travaux ont été réalisés en Algérie et à travers le monde pour analyser l'effet de substitution partielle ou totale des granulats naturels par des granulats recyclés sur la performance des bétons et mortiers. Cependant, peu d'études ont été réalisées sur la performance des mortiers et bétons avec substitution partielles du ciment par des fines de béton recyclés.

# Introduction générale

---

## ❖ Les objectifs

Le but principal de ce travail est de valoriser les fines issues de broyage d'un béton recyclé sur les propriétés physiques et mécaniques d'un mortier ordinaire. Le ciment a été partiellement substitué par des fines à des différents taux de substitution en poids de ciment.

## ❖ Plan de travail

Ce travail de recherche s'inscrit dans une logique qui vise à résoudre la problématique expliquée ci-dessus et de ce fait, il est présenté selon la manière suivante :

- ✚ Une introduction générale est donnée en premier lieu. Dans le premier chapitre on donne une synthèse bibliographique sur des granulats recyclés, de leur production à leur utilisation, ainsi que caractéristiques des granulats recyclés.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à la partie expérimentale proprement dite réalisée sur des éprouvettes en mortier. Une description détaillée des matériaux utilisées est aussi donnée. La procédure expérimentale adoptée est aussi expliquée dans ce chapitre.
- ✚ Dans le troisième chapitre, on présente l'analyse et discussion des résultats expérimentaux.
- ✚ Enfin ce travail est achevé par une conclusion regroupant les principaux résultats de cette étude ainsi que des recommandations pour des futurs travaux.

## ***Chapitre I :***

# ***Revue bibliographique performance du béton à base des granulats recyclés***

### **I.1.) Généralités**

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. Afin de préserver l'environnement, de nombreux professionnels se sont intéressés aux déchets provenant de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments comme matières premières de ces bétons. Malgré de nombreuses études de recherche pour une éventuelle utilisation dans des formulations de nouveaux bétons, les granulats recyclés trouvent peu d'application en Algérie en tant que granulats de béton. Néanmoins des Pays voisins comme la France ou encore le Danemark ont adopté des normes pour la fabrication de béton de granulats recyclés.

### **I.2.) Provenances des granulats recyclés**

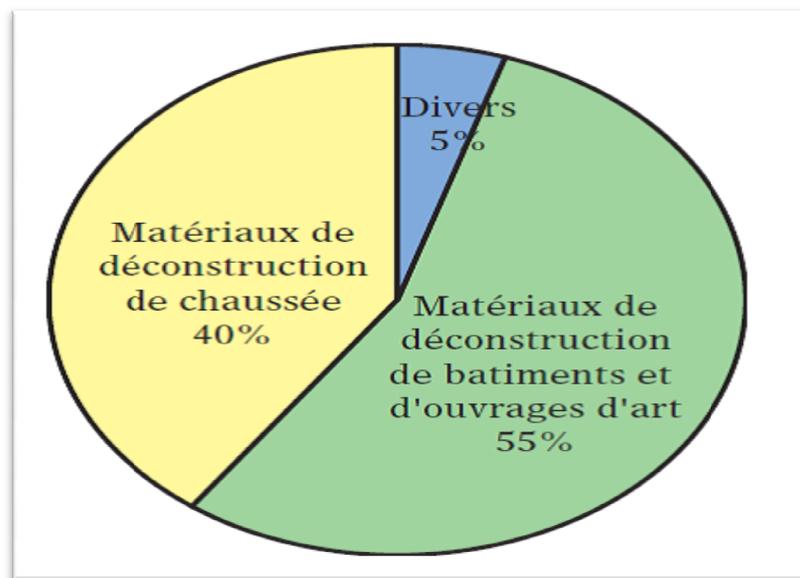
Les granulats de béton sont le gravier et le sable recyclés produits par le concassage des blocs de béton issus de la démolition. L'activité du BTP en France engendre, par an, 350 millions de tonnes de déchets. Selon le Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux (LERM), on estime à 31 millions de tonnes les matériaux de déconstruction issus des chantiers de bâtiments et répartis comme suit :

- Démolition : **17,3 millions de tonnes**
- Construction neuve : **2,3 millions de tonnes**
- Réhabilitation : **11,4 millions de tonnes.**

Par matériaux de démolition, on entend des produits très divers qui ne sont pas tous recyclables pour obtenir des granulats utilisables en BTP et donc nécessitent une sélection. Ces matériaux de démolition peuvent être classés en quatre catégories selon leurs natures:

- Les matériaux de déconstruction de bâtiments et ouvrages d'art, constitués de bétons armés ou non, sans enduit, ni plâtre, ni amiante, ou autres déchets industriels spéciaux.

- Les matériaux de déconstruction de chaussées constitués de matériaux traités ou non aux liants hydrauliques, de matériaux traités aux liants hydrocarbonés, d'anciens blocages, de bordures en béton ou pierre naturelle etc.
- Des mélanges de matériaux composites (ossatures en béton, maçonnerie, ...) avec de faibles teneurs en plâtres, bois, plastique,
- Des mélanges hétérogènes avec des teneurs en matières indésirables (plâtres, bois, plastique) supérieures à 10 %.



**Figure I.1** : Provenances des granulats recyclés [3]

### **I.3.) Elaboration et production**

Les matériaux bruts sélectionnés font l'objet d'une élaboration pour obtenir divers produits :

- Produits "primaires" : Graves et cailloux.
- Produits "secondaires" : Sables et gravillons.

### **I.3.1.) Elaboration**

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont les suivantes :

- Sélection et stockage des produits bruts. Le stockage peut éventuellement être sélectif si l'installation traite plusieurs des familles décrites précédemment.
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (B.R.H.), à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille, à retirer les impuretés les plus grosses.
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un dé ferrailage électromagnétique.

Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné, à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné, à retirer les impuretés (bois, papiers, plastiques) résiduelles.

Eventuellement un concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire.

### **I.3.2.) Produits issus du recyclage**

Les produits résultant des centres de recyclage sont de natures différentes allant des graves non calibrées aux granulats classés tels que sables et gravillons, en passant par diverses qualités de graves. Les productions observées sur différents centres de recyclage figurent dans le tableau ci-dessous, ainsi que les normes permettant de les classer. L'essentiel de la production est constitué par des graves 0/D et par des sables, des gravillons et des cailloux.

**Tableau I. 1** : Normes d'utilisation des matériaux issus de la démolition.

Type de matériaux	Norme	Installation
Matériau de pré-criblage	NF P 11-300	Toute installation avec scalpage avant concassage
Grave non calibrée	NF P 11-300	Concassage primaire sans criblage
Grave 0/D	XP P 18-540 et NF P 11-300 ou NF P 98-129	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Sable	XP 18-540	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Gravillons et cailloux	XP P 18-540	

### I. 4.) Valorisation et procédés de recyclage des granulats

#### I.4.1.) Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse.

D'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- -recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

### **I.4.2.) Technique de recyclage**

#### **I.4.2.1.) Procédés du recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « Organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du Carburant tel que le biogaz.

#### **I.4.2.2.) La chaîne du recyclage**

##### **a. Collecte de déchets**

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

### **b. Transformation**

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

### **c. Commercialisation et consommation**

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés.

Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

### **I.4.3.) Impacts du recyclage sur l'environnement**

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- Chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

### **I.5.) La filière Recyclage des granulats**

Le recyclage des granulats issus de démolition et leur réutilisation dans la construction relève des récentes préoccupations de la protection de l'environnement et de la gestion des ressources naturelles limitées de notre planète. Et comme indiqué plus haut il importe de réussir à exploiter le maximum des 130 millions de déchets produits par le BTP.

Démolir, c'est abattre un quartier, un immeuble, une usine, un ouvrage d'art... Le résultat, c'est un tas de matériaux de construction : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers... Ce tas est plus ou moins composite suivant la nature des ouvrages démolis et l'âge de leur construction.

Selon une étude réalisée par le Syndicat national des producteurs de granulats de recyclage, avec la participation financière de l'ADEME et publiée dans la revue "Mines et Carrières - Industrie Minérale" de novembre 1992.

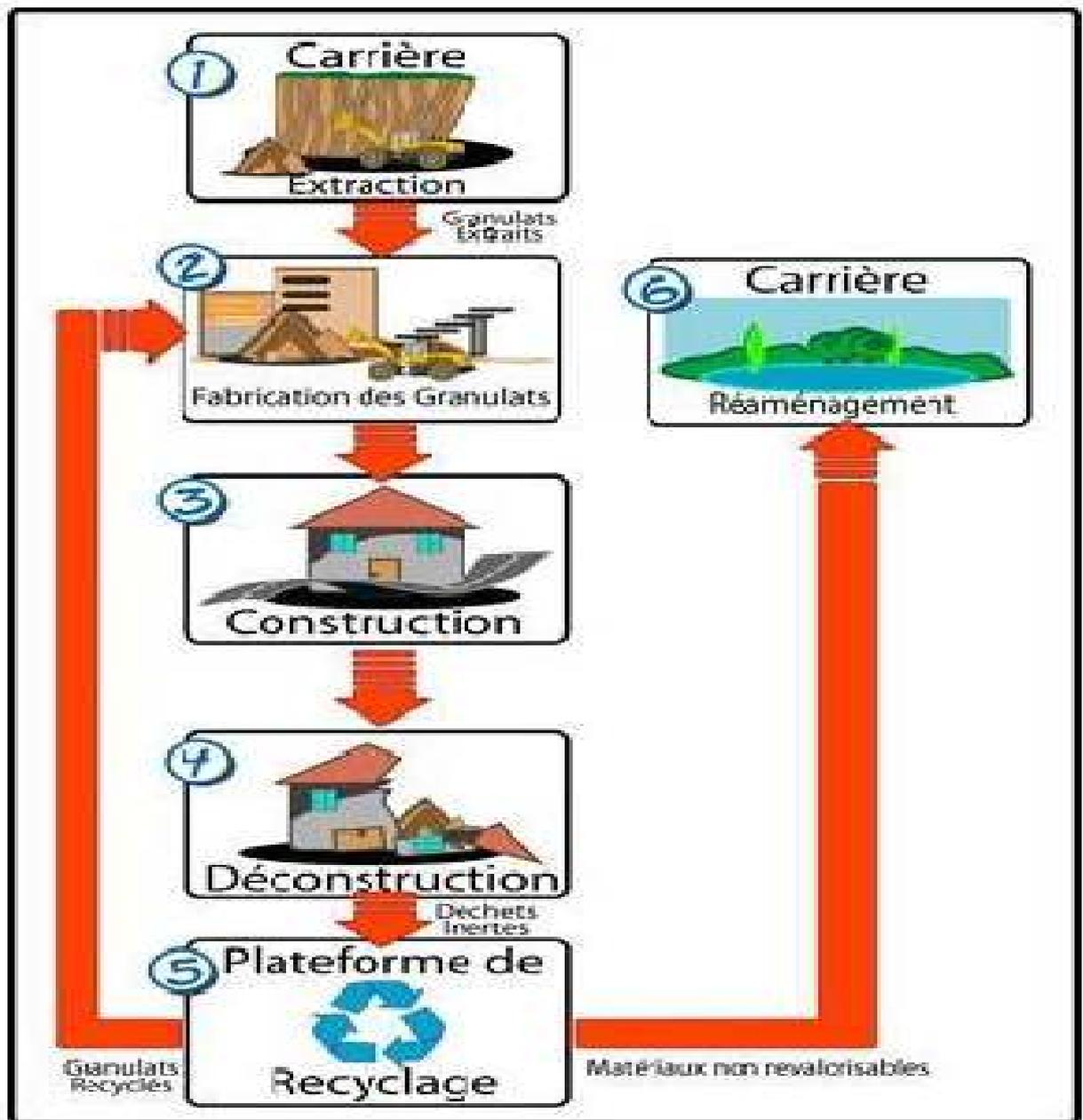


Figure I. 2 : Cycle de vie granulats recyclés issus de déconstruction.[3]

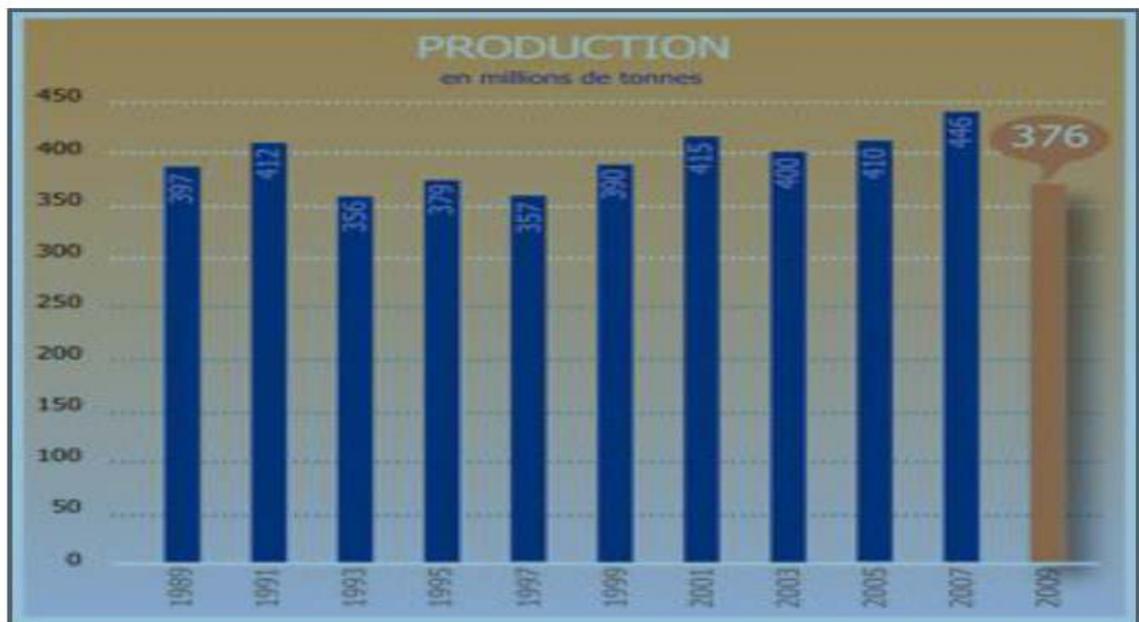
### I.5.1.) Production et répartition des granulats dans le BTP

On distingue trois sources de granulats :

- Les granulats extraits dans les carrières de roches massives,
- Les granulats provenant des carrières de roches meubles (et des extractions marines),
- Les granulats recyclés.

Le volume de granulats produit reflète les besoins du marché français de la construction. La France n'importe et n'exporte que des quantités réduites (moins de 10 millions de tonnes). La production en granulats a varié au cours des vingt dernières années entre 350 millions de tonnes et 450 millions de tonnes environ.

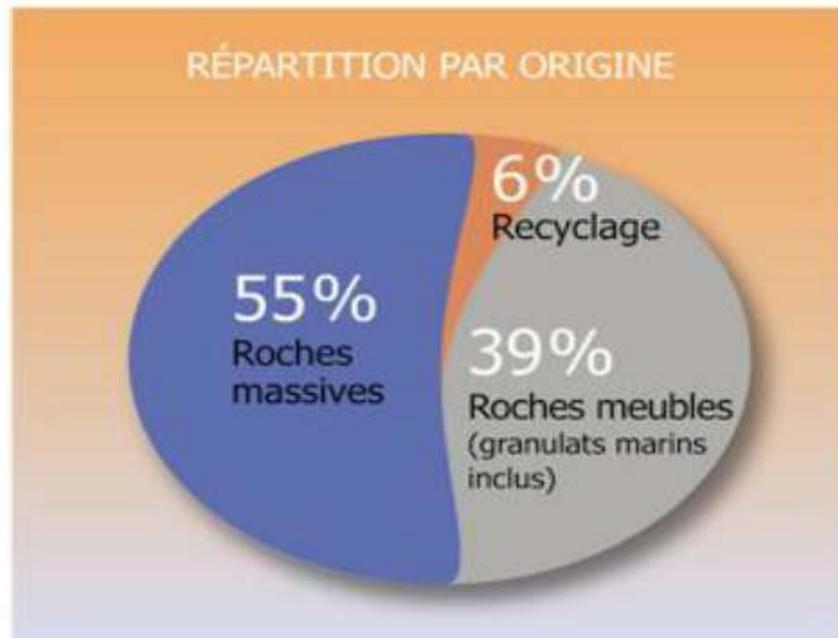
Le secteur des travaux publics et des VRD représente près de 80 % du total des besoins en granulats. Le secteur du bâtiment (hors VRD) représente environ 20 % de la consommation de granulats.



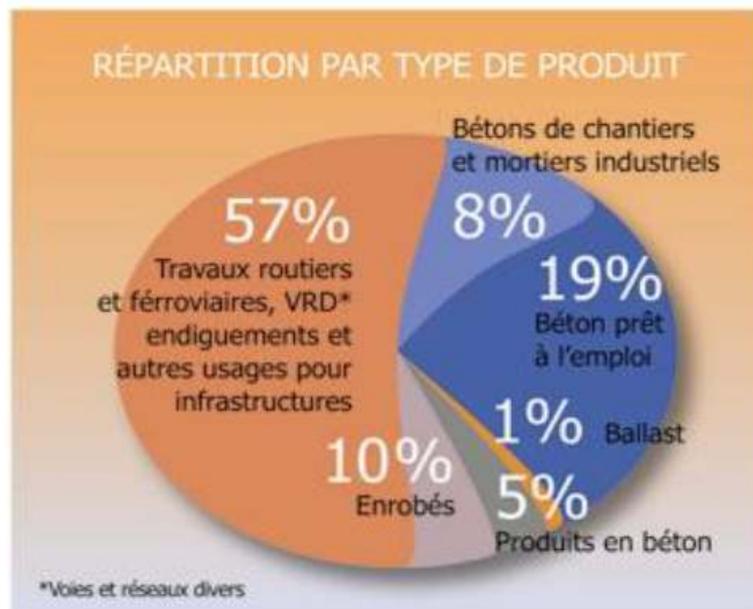
**Figure I.3** : Production de GR 1989 – 2009 (UNPG – Portrait économique)

Le graphique ci-contre montre la répartition des granulats selon leur destination d'utilisation selon l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG). On peut observer ci-dessous, les origines de production des granulats dans la construction et remarquer que le recyclage n'en produit que 6%. Sur les 376 millions de tonnes de granulats produits en France en 2009, les granulats recyclés représentent 21 millions de tonnes, soit 6 % du total. Cette proportion peut paraître faible. Mais ce chiffre ne prend pas en compte la totalité de la consommation des matériaux recyclés et valorisés. Ce chiffre de 21 millions de tonnes correspond en effet seulement à la quantité de granulats retraités par les Plates-formes de recyclage des producteurs de granulats.

Si l'on y ajoute les matériaux recyclés directement sur les chantiers ou ceux qui vont d'un chantier de démolition à un chantier de travaux publics, la proportion de matériaux valorisés n'est plus de 6 %, mais de 10, 15 ou même 20 % selon les régions.



**Figure I.4 :** Répartition par origine des granulats [4]



**Figure I.5:** Répartition suivant la destination [4]

### **I.5.2.) Emploi des granulats recyclés dans la construction**

Les granulats de recyclage ont deux types d'emploi:

- 75 à 80% sont employés en l'état (sables gravillons, graves ou cailloux),
- 20 à 25% sont utilisés dans la fabrication de graves traitées au liant hydraulique (sables, gravillons, graves 0/20 mm).

La consommation de ces matériaux dans la construction de bâtiments (radiers, bétons de fondation...) n'est pas significative. Ils sont destinés essentiellement à la réalisation d'ouvrages de génie civil, notamment les VRD, canalisations, chaussées à faible ou moyenne circulation, pistes diverses.

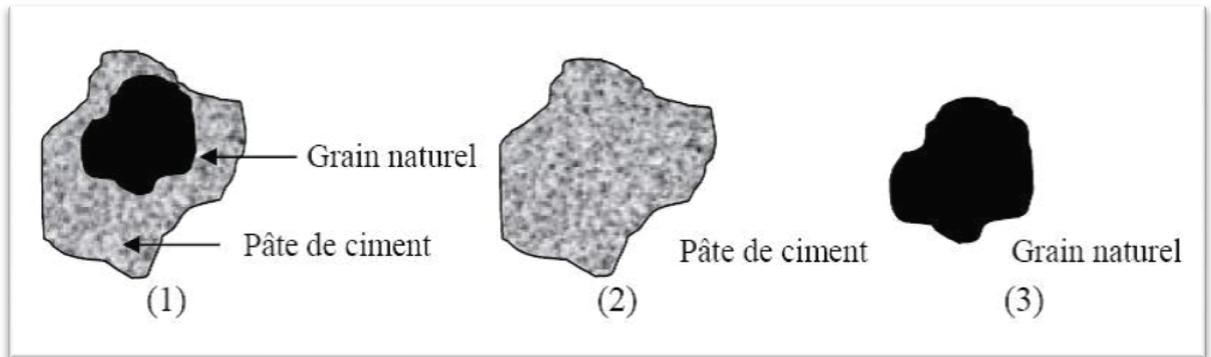
### **I.6.) CARACTERISTIQUES DES GRANULAT RCYCLES**

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du Béton.

Pour obtenir une bonne qualité de béton contenant des granulats recyclés, il faut que ces derniers soient aussi de bonne qualité. Les propriétés acceptables des granulats sont un élément de base pour un béton recyclé de qualité. Cependant, les proportions adéquates de mélange et la méthode de production sont aussi importantes pour avoir la qualité recherchée du béton.

Les granulats recyclés, fabriqués à partir des déchets de démolition des constructions, ont plusieurs formes (Figure I.6)

- (1) Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment.
- (2) Une pâte de ciment seule.
- (3) Un grain de gravier naturel.



La présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats complique la caractérisation exacte des granulats recyclés. Cette présence est inévitable et les propriétés physico mécaniques des granulats de démolition seront dépendantes du volume de mortier collé aux granulats [5]. HANSEN [7] a montré que la quantité du mortier attaché aux granulats est proportionnelle à la fraction fine et elle croit en fonction de la résistance du béton concassé.

### I.6.1.) La granulométrie

Les courbes granulométriques des granulats recyclés ont la même distribution granululaire que les granulats naturels (Figure I.7).

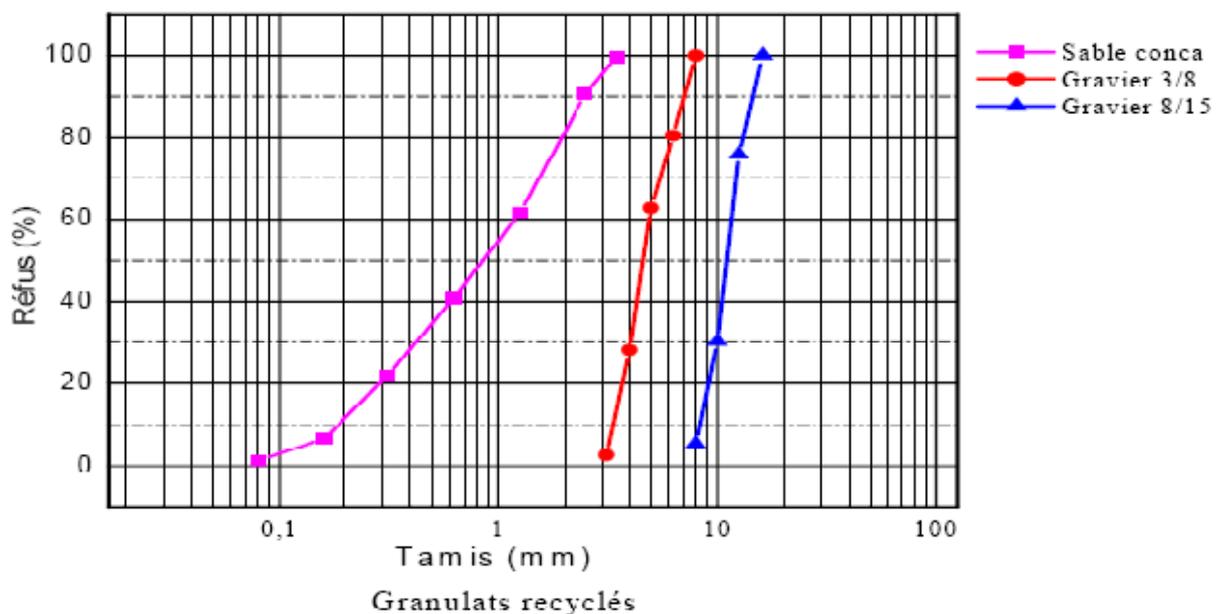


Figure I.7: Courbes granulométriques des granulats recyclés [6].

DEBIEB [8] a trouvé que le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel et il est Constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi Qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

DOUARA et al [6] ont trouvé que le module de finesse du sable recyclés (2,69) est Inférieur à celui de sable naturel (3,47). Par contre, DEBIEB [8] a constaté que le module de finesse de sable recyclé est supérieur à celui de naturel (3,33 et 2,72) respectivement. Des résultats similaires ont été reporté par GASTI [9], dont un module de finesse de 5,80 a été trouvé pour le sable recycle et de 2,59 pour le sable naturel.

### **I.6.2.) Equivalent de sable (Es)**

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable. Les impuretés Peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit L'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée. DOUARA et al [7] ont observé que le sable concassé recyclé ayant une propreté de l'ordre de 92 % supérieure à celle du sable concassé naturels 83%. Cette différence est due à la présence des fines autour des Grains de sable (Tableau 2-1). Des résultats similaires ont été trouvé par DEBIEB [8] ( $E_s = 78,8\%$  pour le sable naturel et  $E_s = 84\%$  pour le sable recyclé), mais cette remarque n'est Pas valable pour le  $E_{sv}$  d'où il a trouvé ( $E_{sv} = 90,6\%$  pour le sable naturel et  $E_{sv} = 84,8\%$  Pour le sable recyclé).

**Tableau I.2:** Equivalent de sable et module de finesse [7]

		<i>S.C.N</i>	<i>S.C.R</i>
<i>Equivalent de sable [%]</i>	<i>Visuel</i>	83.13	91.47
	<i>Avec piston</i>	82.81	90.65
<i>Module de finesse</i>		3.47	2.69

Par contre, BERREDJEM et ARABI [5] ont trouvé un ES de l'ordre (65,4%) pour le sable recyclé, une valeur inférieure à celle d'un sable roulé (82,4%) et un sable naturel concassé (81,9%).

**I.6.3.) Masse volumique**

Une chute de la masse volumique des granulats recyclés qui sont assez peu compacte et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au gravier naturel a été reporté (Tableau I.3).

**Tableau I.3:** Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [6]

	Granulats naturels	Granulats de béton recyclés
Mv apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1600	1244
Mv absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2650	2500

Les masses volumiques (apparente et absolue) diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire [6]. Aussi, les granulats naturels et les granulats recyclés ayant des masses volumiques absolues semblables. Par contre, les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieures à celles des granulats naturels (Tableau I.4).

**Tableau I.4:** Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [10]

	<i>Granulats Naturels</i>			<i>Granulats Recyclés</i>		
	<i>8/15</i>	<i>3/8</i>	<i>S.C.N</i>	<i>8/15</i>	<i>3/8</i>	<i>S.C.R</i>
<i>Mv<sub>a</sub></i>	1.33	1.36	1.30	1.18	1.22	1.18
<i>Mv<sub>s</sub></i>	2.46	2.54	2.65	2.43	2.56	2.52

Une diminution des masses volumiques absolues et apparentes a été observée sur le sable (SR) et le gravier (GR) recyclé en comparant avec les sables et les graviers naturels (Figure 2-3).

Les masses volumiques des granulats recyclés sont nettement plus faible que celles Des granulats naturels [8]. Des résultats similaires ont été rapportés par GASTI [9] et PANI et al [11]. Cette diminution peut être expliquée par la présence des pores dans les Granulats recyclés. Selon HADJIEVA.Z [12], la masse volumique du béton source des Granulats recyclés peut influencer la masse volumique de ces dernières, avec un rapport E/C inférieur à 0,70.

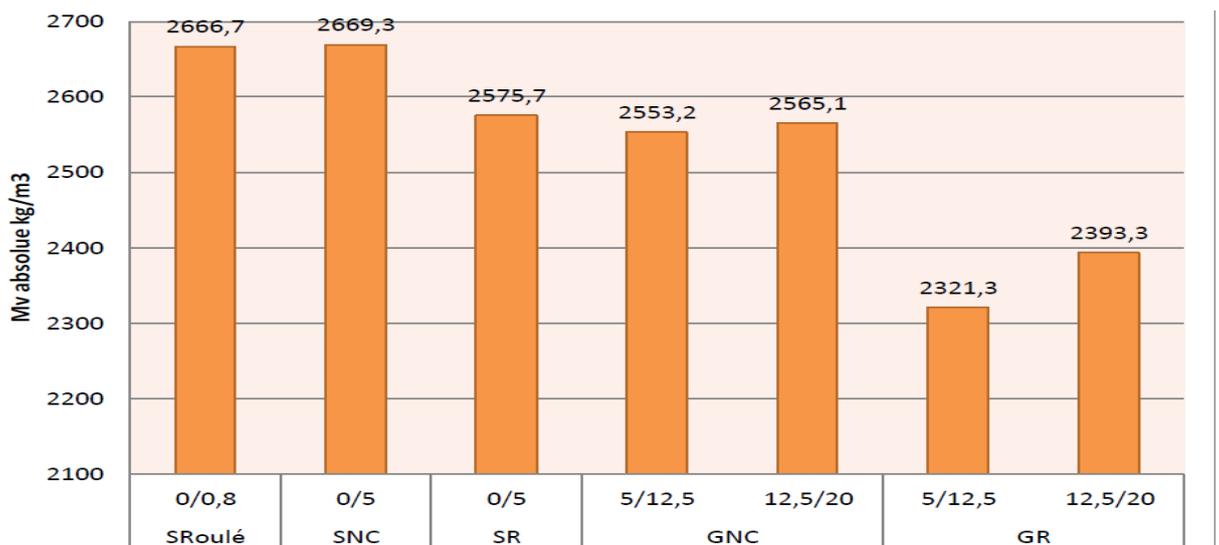
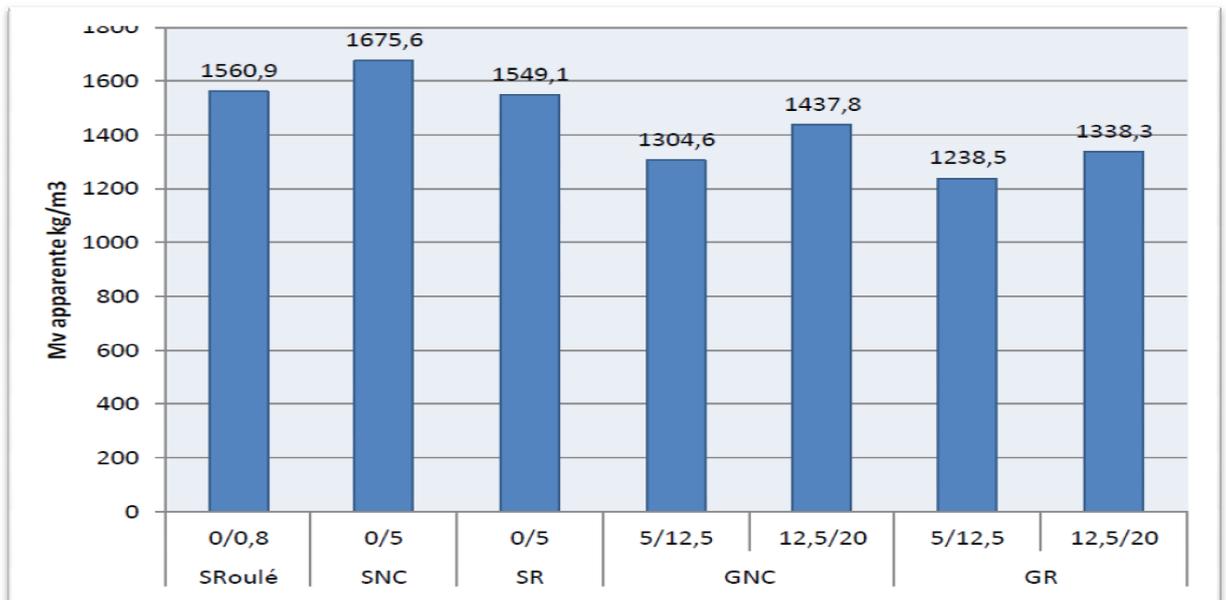


Figure I.8: Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [6].

### **I.6.4.) Absorption d'eau**

Le coefficient d'absorption d'eau ( $A_b$ ) représente la capacité d'absorption d'eau d'un Granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. La propriété principale des Granulats recyclés est la capacité élevée d'absorption d'eau en comparaison avec les Granulats naturels. Ceci est dû à la présence de la pâte du ciment autour d'un granulat Recyclé [13]. Les bétons des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau plus importante, pour maintenir le même affaissement (étalement), par rapport à un béton à base de granulats naturel [14].

Le taux élevé de l'absorption d'eau des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels complique la mise en oeuvre d'un tel béton de granulats recyclés (Tableau I.5).

Une valeur élevée du coefficient absorption d'eau (environ de 7%) a été trouvé pour les granulats recyclés en comparaison avec les granulats naturels (environ de 1%)

(Tableau I.6).

Des résultats similaires ont aussi été observés par d'autres chercheurs ( $A_{bGN} = 1,3\%$  et  $A_{bGR} = 6\%$ ) [10]. TU et al [15] ont trouvé un coefficient d'absorption d'eau égal à 5% pour les gros granulats recyclés et à 10% pour les fines recyclés, contre 1% pour les fines naturelles. DEBIEB [64] a trouvé que un coefficient d'absorption de 6 et 4,92% pour le gravier recyclés de fraction granulaire (14/20) et (4/14) respectivement, l'absorption de sable reste la plus élevé ( $A_b=9,20\%$ ). PANI et al [11] ont obtenu un coefficient d'absorption du gravier (4/16) recyclé supérieur à celui du gravier naturel. On peut conclure que le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés est toujours supérieur à celui des granulats naturels. Ce coefficient est proportionnel à la dimension des granulats.

**Tableau I.5:** Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [6]

	Sable roulé	Sable Naturel concassé	Sable recyclé	Gravier naturel concassé		Gravier recyclé	
	0/0,8	0/5	0/5	5/12,5	12,5/20	5/12,5	12,5/20
Absorption (%)	0,50	1,91	7,09	0,73	0,46	6,25	5,36

**Tableau I.6:** Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [7]

	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	8/15	3/8	8/15	3/8
Absorption (%)	0,81	0,91	5,65	6,60

### **I.6.5.) dureté**

La résistance à la fragmentation (dureté) est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le Principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Le coefficient Los Angeles représente la Proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, Plus la résistance des gravillons est élevé. Le coefficient de Los Angeles trouvé pour les Granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturel.

Les agrégats acceptables pour la production du béton doivent avoir un coefficient de Los Angles < à 50% selon la norme américaine .ASTM C-33 et de 30 à 45% selon la norme Britannique BS 882. 1201. partie 2.

Le tableau suivant (Tableau I.7), résume les travaux de Hansen et Narud [7] sur des agrégats à base de béton à différent rapport E/ C.

**Tableau I.7** Los Angeles des agrégats à base de béton à différent rapport E/ C [16]

Type d'agrégats	Taille (mm)	Los - Angles (%)
<b>Gravier naturel</b>	4/8	25.9
	8/16	22.7
	16/32	18.8
<b>Agrégats recyclés (E/C=0.40)</b>	4/8	30.1
	8/16	26.7
	16/32	22.4
<b>Agrégats recyclés (E/C=0.70)</b>	4/8	32.6
	8/16	29.2
	16/32	25.4
<b>Agrégats recyclés (E/C=1.20)</b>	4/8	41.4
	8/16	37.0
	16/32	31.5
<b>Agrégats recyclés</b>	<5	-

On remarque que Los Angles pour les agrégats recyclés varie de 22 à 40%. D'autres chercheurs [17, 18, 19] ont reporté un Los Angles des agrégats du même ordre de grandeur de 20 à 35%.

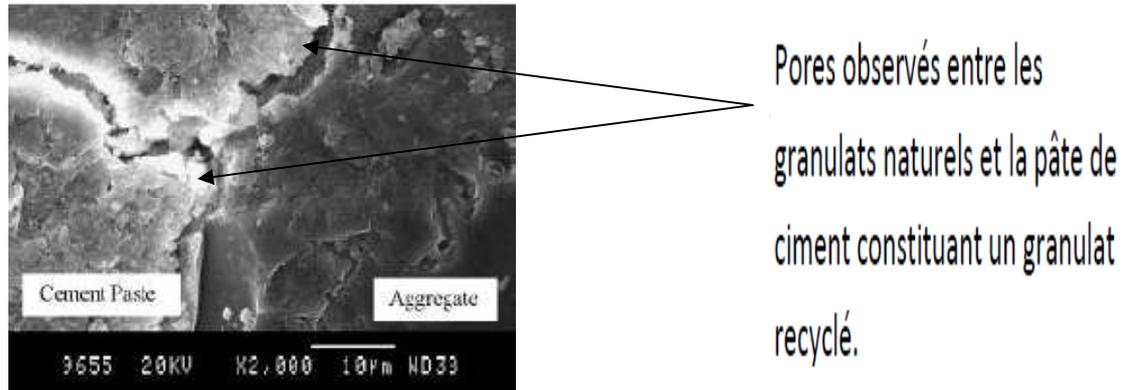
Hasaba et autres [7], ont trouvé que le coefficient de Los - Angles des agrégats recyclés 5/25 mm varie de 23.0 % pour les agrégats issus d'un béton original à grande résistance jusqu'à 24.6 % pour agrégats issus d'un béton original à faible résistance. Donc on peut dire que les granulats recyclés ont un coefficient Los Angles acceptable pour la confection du béton.

### **I.6.6.) La Porosité**

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption.

La forte capacité d'absorption des granulats recyclés est liée une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [20].

Grâce à des analyses microscopiques, Tam et al. ont décrit la géométrie de la porosité de granulats recyclés. Des pores sont présents entre les granulats naturels et la pâte de ciment selon eux. Ces pores fragilisent le matériau et limitent l'emploi de ces granulats recyclés dans la fabrication des bétons. [21].



**Figure: I.9** : Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton [21]

Ces pores engendrent une forte porosité des bétons de granulats recyclés [21]. L'absorption des bétons recyclés augmente proportionnellement avec le taux de granulats recyclés, tandis que la densité des bétons décroît légèrement. [22].

Des problèmes de durabilité des bétons de GRB sont directement liés à la capacité d'absorption et donc à la porosité des bétons de GRB. En effet, un grand nombre de phénomènes agressifs comme l'alcali-réaction, le gel-dégel... sont favorisés lorsque l'absorption des bétons est élevée [23].

Le comportement hydrique des bétons recyclés serait assimilable à celui des bétons à base de granulats naturels. Grâce à une détermination de la porosité globale des bétons de GRB, il a été montré que l'absorption initiale de ces bétons (absorption au bout d'un jour de cure) est 7 fois plus élevée que celle d'un béton classique [23]. Ce résultat souligne une proportion en volume plus importante des pores capillaires dans des bétons de GRB.

D'autres études notent l'importance du volume des gros pores dans la répartition porométrique des bétons recyclés. [24].

Il semblerait que le béton de granulats recyclés et le béton mixte possèdent un volume de pores plus important qu'un béton classique.

Néanmoins, la remontée capillaire d'un béton mixte semble être nettement plus élevée (1,6 fois plus importante) que les autres bétons (classique et recyclé) [25]. Le béton mixte semble posséder davantage de pores communicants que le béton recyclé et classique.

### **I.6.7.) Mortier de liaison**

Le pourcentage de vieux mortier attaché aux particules de gravier naturel dans les agrégats recyclés, croît en fonction de la résistance du béton original.

La présence de ce mortier a été mise en évidence par des chercheurs par un essai simple, qui consiste à mettre les agrégats recyclés avec un ciment coloré rouge dans un coffrage cubique. Après durcissement, le cube est coupé en tranches puis ciré. Le mortier attaché aux particules de gravier naturel dans les agrégats recyclés peut être distingué clairement entre les particules de gravier originales et la matrice de ciment rouge [7]

Le pourcentage de mortier attaché aux particules de graviers naturels est estimé entre 25 à 35 % pour les agrégats recyclés 16/32 mm, autour de 40% pour 8/16 mm et de 60% pour le reste de 4/8 mm [26].

Selon d'autres chercheurs, par exemple Hasaba et autres [27], ce mortier est de 35.5, 36.7 et 38.4% respectivement pour un béton original de résistance à la compression de 24, 41 et 51 MPa.

### **I.7.) Propriétés et dosage du béton frais à base d'agrégats recyclés**

#### **1.7.1.) Ouvrabilité**

La masse du mortier d'un béton ancien qui recouvre la surface des gros agrégats recyclés et leurs angularités, sont deux facteurs critiques qui influencent considérablement la consistance du béton recyclé. Toute fois, la confection, la mise en œuvre et l'aspect des bétons de recyclage sont très comparables à ceux des bétons ordinaires.

Logiquement, compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces agrégats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui du béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont trouvé une ouvrabilité comparable à celle du béton d'agrégats naturels si uniquement les gros granulats sont recyclés. Par contre, l'introduction de granulats fins recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité.

Selon certains travaux [7, 17], la demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5% pour le de gros granulats recyclés et jusqu'à 15% pour le béton à base de gros et fins granulats recyclés.

Une augmentation de 21% en eau de gâchage est reportée pour un béton à gros et fins granulats recyclés dont l'absorption est de 25% [28]. Si les gros et fins agrégats recyclés sont de la brique cuite, la demande en eau supplémentaire peut atteindre 20% [29, 30, 31]

#### **1.7.2.) Problème des fines du sable recyclé**

Ce besoin en eau est également lié à la granulométrie du sable recyclé. En effet, la littérature permet de conclure que les parties fines des granulats recyclés réduisent l'ouvrabilité du béton [7].

Plusieurs études ont permis de cibler le problème des fines des granulats recyclés en comparant l'ouvrabilité d'un béton constitué de 100% de granulats recyclés (béton recyclé) à celle d'un béton de gravillons, graviers recyclés et de sable naturel (béton mixte). Il en ressort que le besoin en eau d'un béton recyclé est plus important que celui d'un béton mixte, soit 5 % d'eau supplémentaire. [7]. Le remplacement de fines recyclées par le sable naturel facilite la mise en œuvre des bétons.

Des études de formulations ont été effectuées afin d'utiliser un adjuvant afin de réduire l'apport en eau [25].il a été montré que la quantité d'adjuvant nécessaire pour obtenir des valeurs similaires d'affaissement est plus importante pour un béton de granulat recyclé que pour un béton mixte et un béton classique.

Les fines des granulats recyclés influent donc sur le comportement rhéologique des bétons.

Les fines, tout comme les éléments grossiers des granulats recyclés, sont constituées de granulats naturels concassés (ici en l'occurrence des fines provenant du concassage des granulats naturels) et de pâte de ciment relativement friable (des fines issues du ciment hydraté).

Il serait ainsi intéressant d'identifier la part qui provoque la rigidification importante du béton recyclé: fines de granulats naturels concassés ou fines de pâte de ciment.

En effet, dans le cadre de l'étude d'un béton à faible impact environnemental, l'utilisation d'une quantité d'eau plus importante n'est pas à souhaiter. En outre ce besoin en eau supplémentaire aura pour conséquences de diminuer les résistances mécaniques du béton.

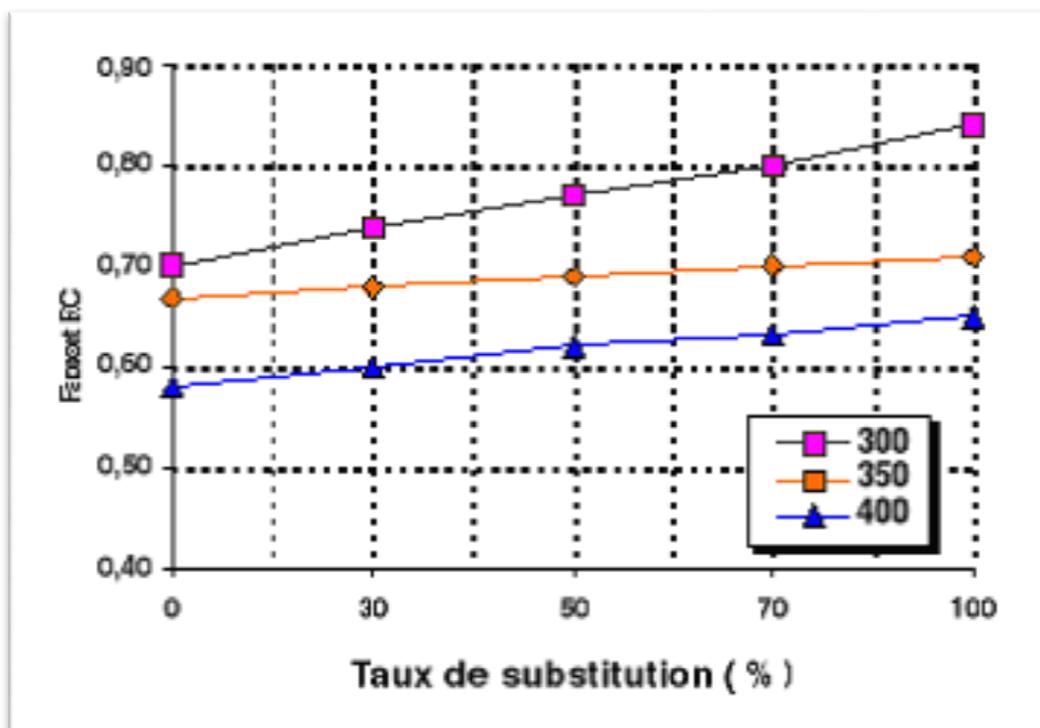
### **I.7.3.) Temps de prise**

La réduction du rapport eau efficace/ciment, et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés est un facteur de diminution du temps de prise [7], mais l'usage de super plastifiant agit dans le sens inverse.

## I.8.) Propriétés mécaniques du béton durci

### I.8.1.) Quantité d'eau pour affaissement constant

La quantité d'eau réellement utilisée (eau de gâchage) pour assurer un affaissement Constant (50 à 90 mm) s'accroît suivant le taux de substitution en granulats recyclés. Cela se traduit par la présence de l'ancien mortier qui recouvre les granulats provenant du Concassage de béton qui est caractérisé par sa forte absorption d'eau (6%) et sa forte Porosité et par conséquent une baisse de résistance (Figure I.10)



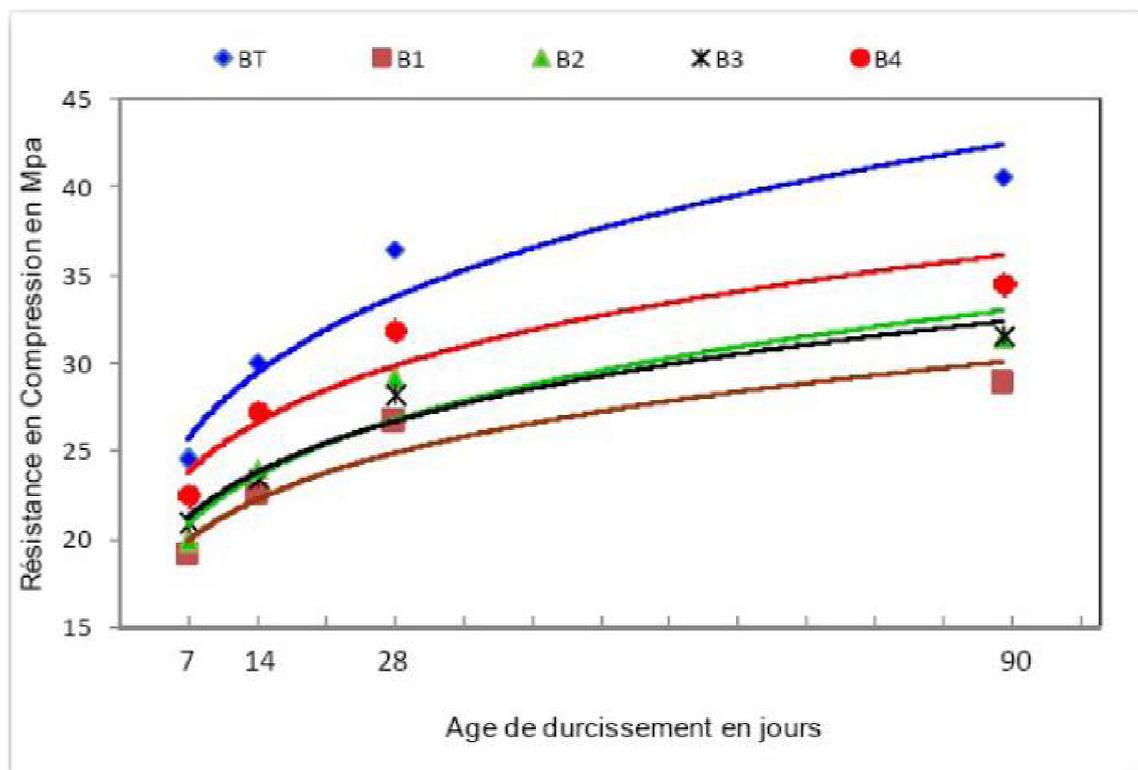
**Figure I.10:** Rapport E/C des bétons partiellement composés des granulats de béton pour des dosages de ciment respectifs 300, 350, 400 kg/m<sup>3</sup> [10].

### I.8.2.) La résistance à la compression et à la traction

L'utilisation des granulats recyclés a permis d'obtenir un béton de résistance Caractéristique à 28 jours bien supérieurs à 20 MPa (Figure I.11).

D'autre part, les bétons à base de 30% de béton concassé présentent une chute de Résistance de 11, 8 et 6% respectivement pour un dosage de ciment de 300, 350 et 400 kg/m<sup>3</sup> (Figure I. 12). Pour les bétons à 100% d'agrégats de béton concassé la perte de Résistance commence par 20% à jeune âge et arrive à l'ordre de 23% à 180 jours [10].

L'évolution de la résistance suivant l'âge des bétons à base des agrégats recyclés se Comporte d'une manière analogue que celle du béton conventionnel (Figure I. 13). KHATIB [33] ont trouvés que la résistance à la compression du béton de granulats recyclés diminue Les 7 premiers jours, et présente une résistance à la compression similaire quelque soit le Pourcentage du béton concassé utilisé. A 28 jours, la résistance est équivalente pour le Béton contenant 25 à 75% des granulats recyclés mais elle est inférieure pour un Pourcentage de 100% du granulat recyclé (Figure I.14).



**Figure I.11:** Evolution de la résistance en compression en fonction des échéances pour les Bétons à différentes combinaisons granulaires [5].

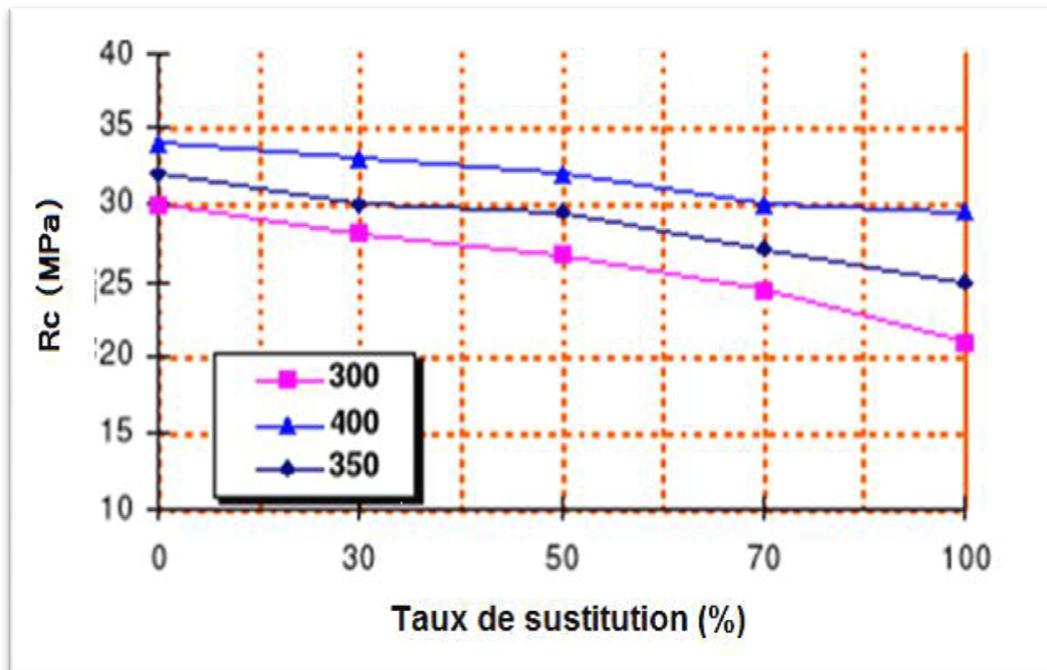


Figure I.12: Résistance à la compression des bétons à base des granulats de béton concassé[10]

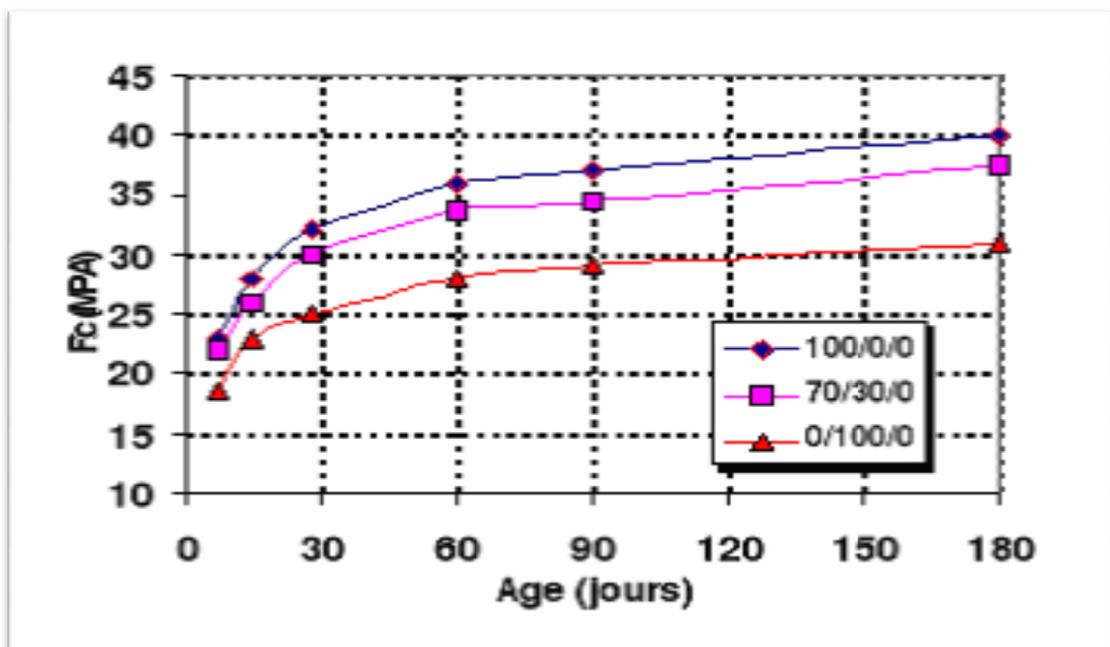


Figure I.13: Développement de la résistance des bétons à base des agrégats de béton de démolition [10].

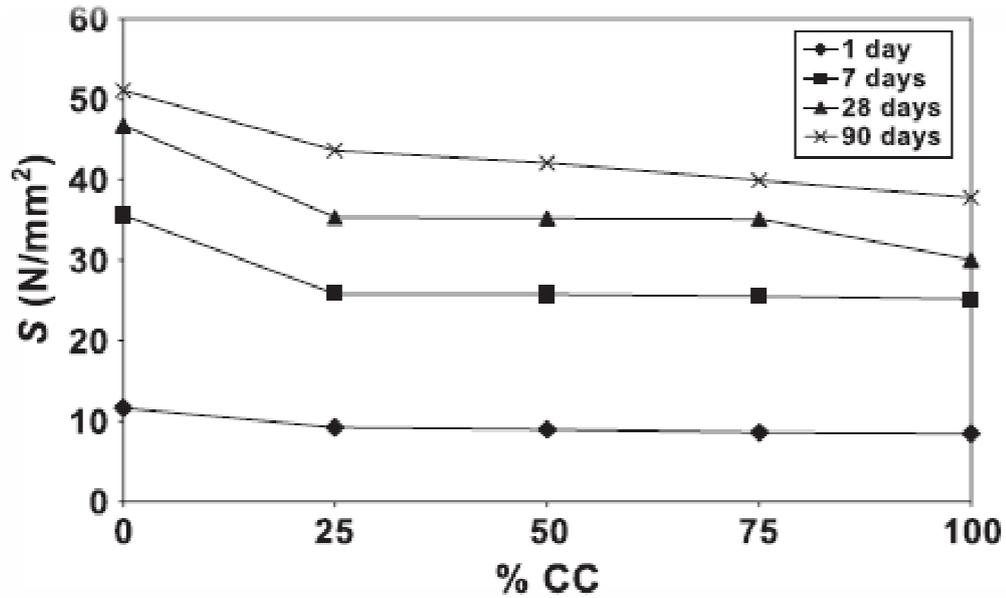


Figure I.14: L'effet de béton concassé sur la résistance à la compression (S) [33].

D'autres auteurs, le béton avec 100% de gravier recyclé présente une réduction de résistance à la compression de 20 à 25% par rapport à celle du béton conventionnel à 28 jours, avec le même rapport E/C ( $E/C=0,5$ ) et le même dosage en ciment ( $325 \text{ kg/m}^3$ ) [34]. Ce béton nécessite une quantité importante du ciment pour atteindre une résistance à la compression comparable.

Par contre, la substitution de seulement 30% de granulats fins recyclés n'affecte pas la résistance à la compression (Figure I.15)

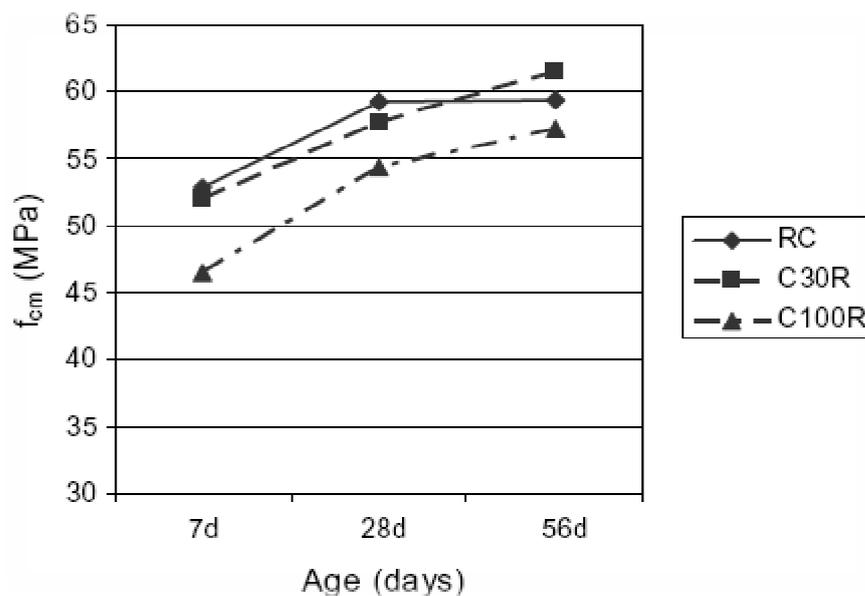


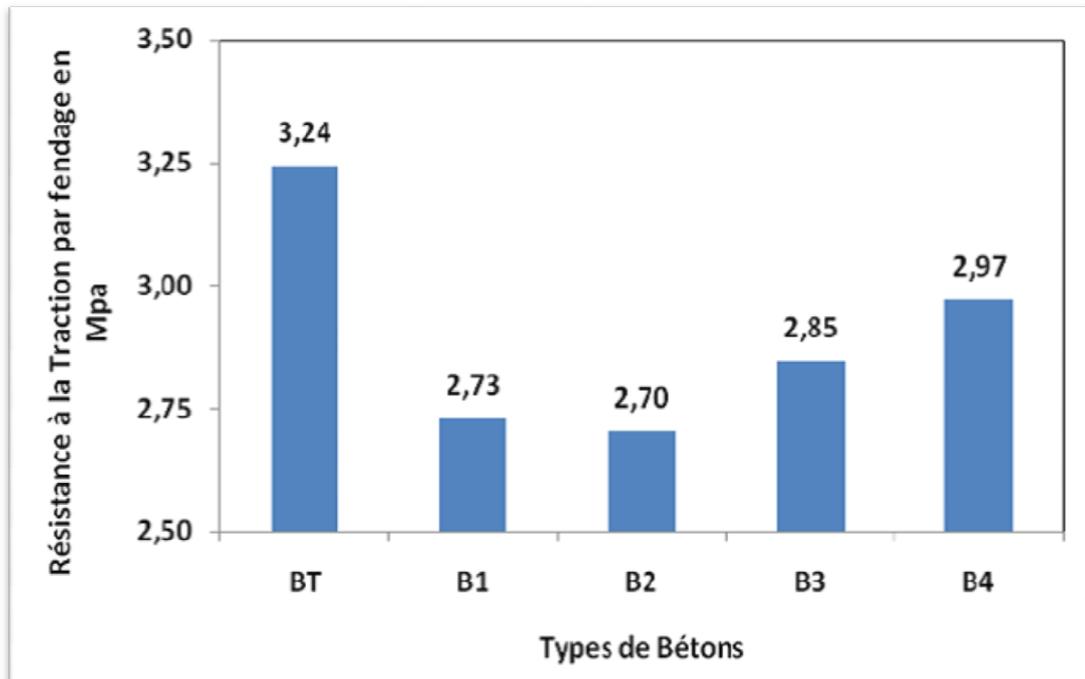
Figure I.15: Variation de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours [35].

## Chapitre I: Performance du béton à base des granulats recyclés

L'écart de résistance en traction entre les bétons naturels et recyclés est assez faible par rapport à celui observé en compression. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important dans la résistance à la traction car la rugosité des granulats recyclés est très importante et par conséquent a amélioré l'adhérence pâte granulat (Tableau I.8 et Figure I.16).

**Tableau I.8:** Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [5]

<i>Composants</i>	<i>Unité</i>	<i>Types de Béton</i>				
		<i>BT</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>
CEM II 42,5	kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350	350
Sable Roulé	kg/m <sup>3</sup>	627	--	--	--	--
Sable Naturel		--	837	--	818	--
Sable Recyclé		--	--	667	--	588
Gravier Naturel 5/12,5	kg/m <sup>3</sup>	565	400	--	--	493
Gravier Naturel 12,5/20		630	542	--	--	720
Gravier Recyclé 5/12,5		--	--	380	317	--
Gravier Recyclé 12,5/20		--	--	620	571	--
Eau: Calculée	litres	193	163	163	193	193
Ajoutée		0	63	52	22	43
Totale		193	226	215	215	236
Affaissement au cône	cm	6,5	7,5	6,5	8,0	7,5



**Figure I.16:** Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires [5].

La perte de la résistance à la traction et à la compression due à l'utilisation des granulats recyclés, est plus significative dans un béton à faible résistance que dans un béton à haute résistance. La résistance à la compression du béton dont sont issues les granulats recyclés affecte sensiblement la résistance à la compression et à la traction du béton recyclé (Figure I.17 et I.18).

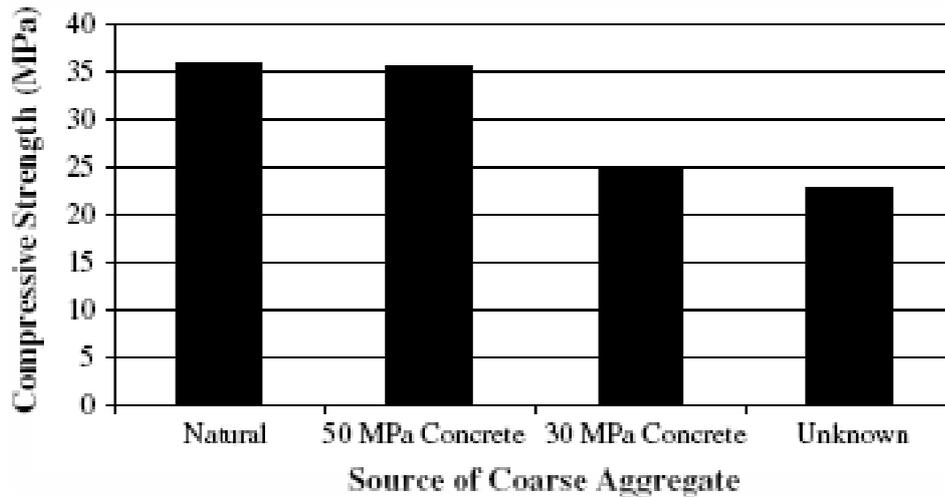


Figure I.17: Résistance à la compression du béton à granulats recyclés [23].

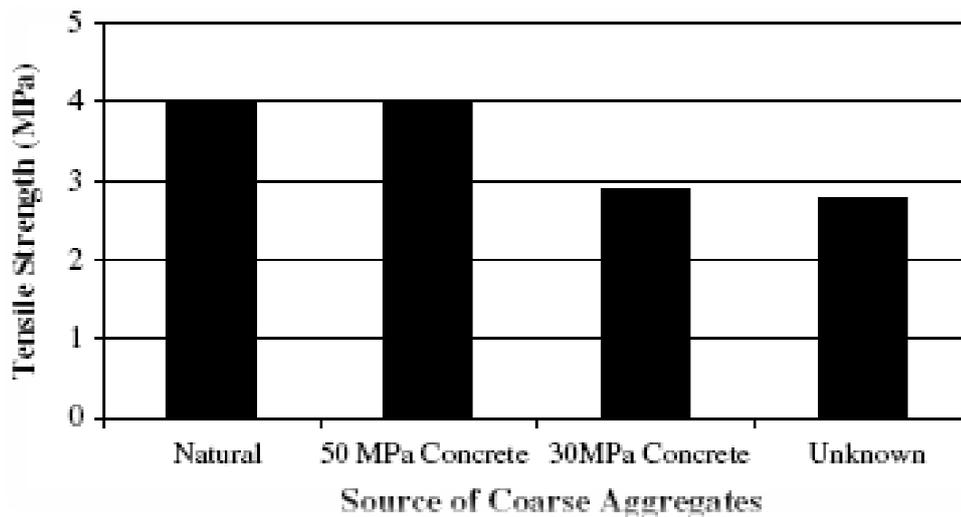


Figure I.18: Résistance à la traction du béton à granulats recyclés [23].

La résistance à la traction diminue avec l'augmentation du rapport de substitution des granulats fins recyclés dans le béton. Cependant les valeurs obtenues restent acceptable jusqu'à un taux de substitution de 30% (Figure I.19). Et comme la résistance à la compression du béton est affecté par la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés et le module d'élasticité est en fonction de cette résistance, donc ce dernier est aussi affecté. Le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés dans le béton, mais cette diminution est acceptable pour un pourcentage maximal qui égale à 30% (Figure I.20).

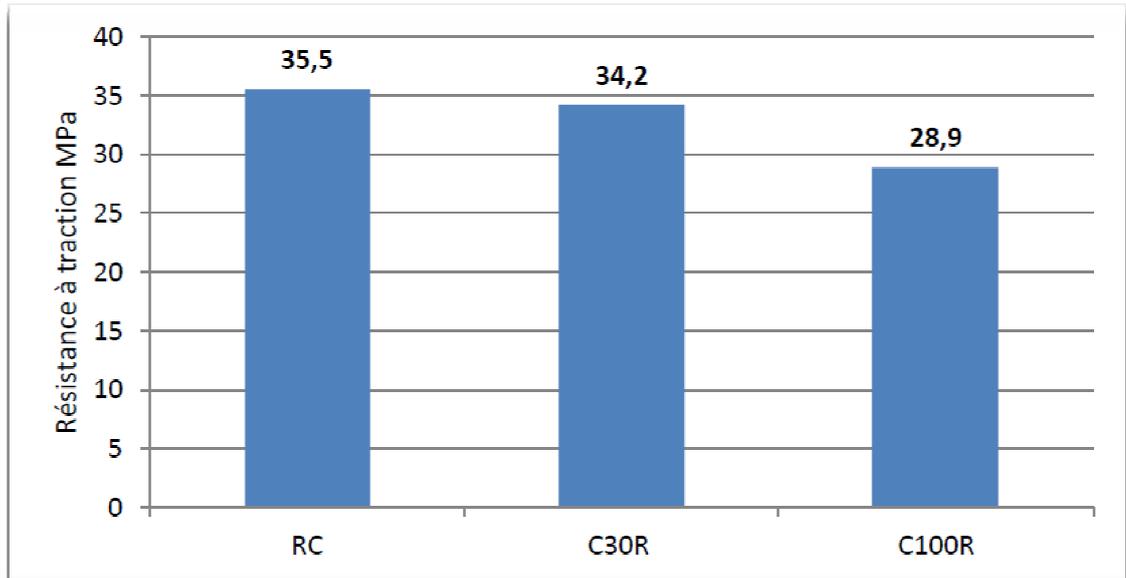


Figure I.19: Résistance à la traction du béton à 0, 30 et 100% de granulats fins recyclés[35].

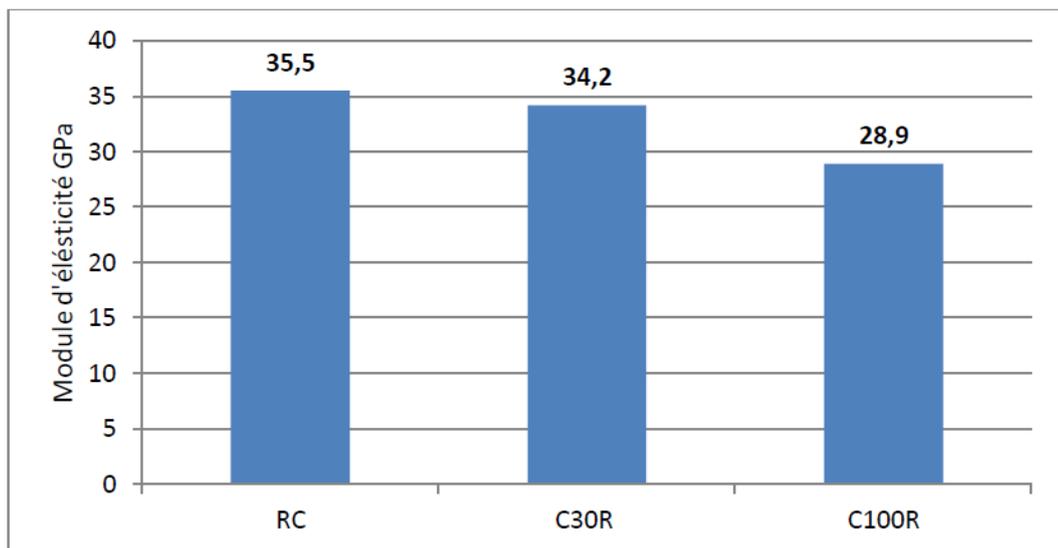


Figure I.20 : Module d'élasticité pour 0, 30 et 100% de remplacement des granulats recyclés [35].

KOU et al [36], ont montré qu'un béton de granulats recyclés présente une résistance à la compression inférieure à celle d'un béton de granulats naturel et une résistance élevée à la traction, après 5 ans de cure dans l'eau. De 28 jours à 5 ans, l'augmentation de la résistance à la compression et à la traction pour le béton à base de granulats recyclés est supérieure à celle du béton à base de granulats naturels. De plus, le béton préparé avec 100% de granulats de béton concassé a une faible porosité (Une diminution de 45% entre 28 jours et 5 ans).

### **I.9.) Conclusion :**

La valorisation de ces granulats issus du recyclage présente un intérêt d'ordre économique et environnemental. Le réemploi de ce matériau dans la fabrication de béton contribuerait à la diminution des coûts de transports des granulats et des déchets de démolition.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci diminuerait l'épuisement des ressources naturelles.

Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés des granulats recyclés de béton en fonction de leur origine (qualité du béton parent,...) ce qui facilitera leur valorisation en tant que granulats à béton.

***Chapitre II :***  
***Matériaux Et Essais***

## **CHAPITRE II : Matériaux et essais**

### **II.1.) Introduction**

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble du contexte expérimental qui a servi de support à cette thèse. Une description détaillée des matériaux utilisés est donnée. Un aperçu sur les essais expérimentaux ainsi que la préparation des mélanges et les variables étudiées sont donnés.

### **II.2.) Matériaux utilisés**

#### **II.2.1.) Le ciment**

Deux types de ciments composés «CPJ-CEM II» ont été utilisés dans notre étude expérimentale :

##### **II.2.1.1.) CPJ-CEM II /A 42.5 R**

Provenant de la cimenterie de CIBA LAFARGE à M'silla en Algérie. Ce ciment est un ciment Portland composé de 90% de clinker et de 10% de calcaire, sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa , une masse volumique de 3050 kg/m<sup>3</sup> et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3000 cm<sup>2</sup>/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM II (42,5).

<i>Composition chimique (%)</i>									
<i>CaO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MgO</i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>PAF</i>	<i>RI</i>
63,40	21,06	3,60	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	2,53	0,65
<i>Composition minéralogique (%)</i>									
<i>C<sub>3</sub>S</i>		<i>C<sub>2</sub>S</i>		<i>C<sub>3</sub>A</i>		<i>C<sub>4</sub>AF</i>			
67,40		9,89		1,98		13,59			

**II.2.1.2.) CPJ -CEM II/A 32.5R**

Ce ciment est un ciment Portland contient au moins 65 % du clinker et au plus 35 % d'autres constituants, une masse volumique absolue et apparente de  $3.07 \text{ kg/m}^3$  et  $1.41 \text{ Kg/m}^3$  respectivement, sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 32,5 MPa. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ciment sont présentées sur le tableau II.2.

**Tableau II.2** : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM II (32.5)

<i>Composition chimique (%)</i>							
<i>Silice (SiO<sub>2</sub>)</i>	<i>Chaux (CaO)</i>	<i>Magnésie (MgO)</i>	<i>Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</i>	<i>Oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</i>	<i>Sulfates (SO<sub>3</sub>)</i>	<i>Matieres organiques</i>	<i>Perte au feu</i>
21.88	63.65	0.21	6.69	4.14	1.59	/	1.90
<i>Composition minéralogique (%)</i>							
<i>C<sub>3</sub>S</i>		<i>C<sub>2</sub>S</i>		<i>C<sub>3</sub>A</i>		<i>C<sub>4</sub>AF</i>	
41.76		31.76		10.74		12.57	

**II.2.2.) Les granulats naturels**

**II.2.2.1) Le sable naturel**

Trois types de sable sont utilisés dans cette étude :

**II.2.2.1.1) Sable de Baghlia :**

Est un sable roulé de forme arrondie, de classe granulaire (0/5) mm, provenant de la wilaya de Boumerdes (Figure II.1). Les caractéristiques principales du sable utilisé sont présentées dans le tableau II.4.



**Figure II.1 :** Sable de Baghlia.

**Tableau II.3 :** Caractéristiques principales de Sable Baghlia

Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2563	
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1619	
Coefficient d'absorption(%)	0.69	
Humidité(%)	2.23	
Equivalent de sable (%)	A vue (ESV)	90.47 %
	A piston (ESP)	87.30 %
Composition(%)	57	
Module de finesse (M.F)	3.32	

**II.2.2.1.2.) Sable de Bougezoul :**

est un sable fin de classe granulaire (0/3) mm, provenant de la wilaya de Médéa (figure II.2).les principales caractéristiques du sable utilisé sont présentées dans le tableau II.5



**Figure II.2 :** Sable de Bougezoul

**Tableau II.4** : Caractéristiques principales de Sable de Bougezoul

Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2500	
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1410	
Coefficient d'absorption(%)	0.56	
Humidité(%)	1.14	
Equivalent de sable (%)	A vue (ESV)	70.65 %
	A piston (ESP)	67.63 %
Composition(%)	43	
Module de finesse (M.F)	2.11	

Nous avons mélangé les deux sables pour obtenir un mélange de module de finesse entre 2.2 et 2.8, les caractéristiques des deux sables sont présentées dans le tableau II.6, ainsi que la courbe granulométrique est donnée par la figure II.3.

**Tableau II.5**: Caractéristiques principales de sable naturel.

Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	1531	
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	2584	
Coefficient d'absorption(%)	0.64	
Humidité(%)	2.07	
Equivalent de sable (%)	A vue (ESV)	80.15 %
	A piston (ESP)	77.08 %
Composition(%)	100	
Module de finesse (M.F)	2.8	

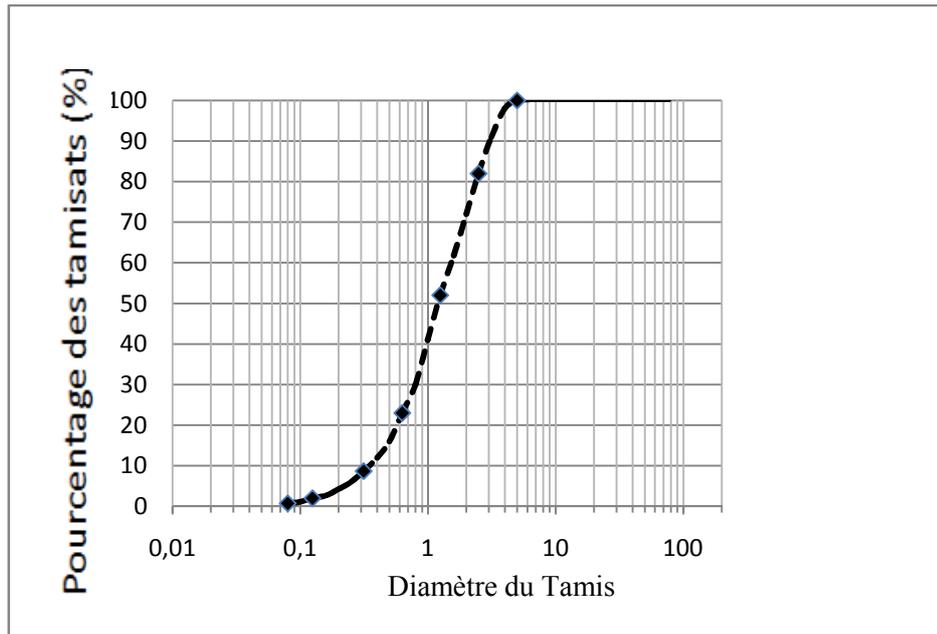


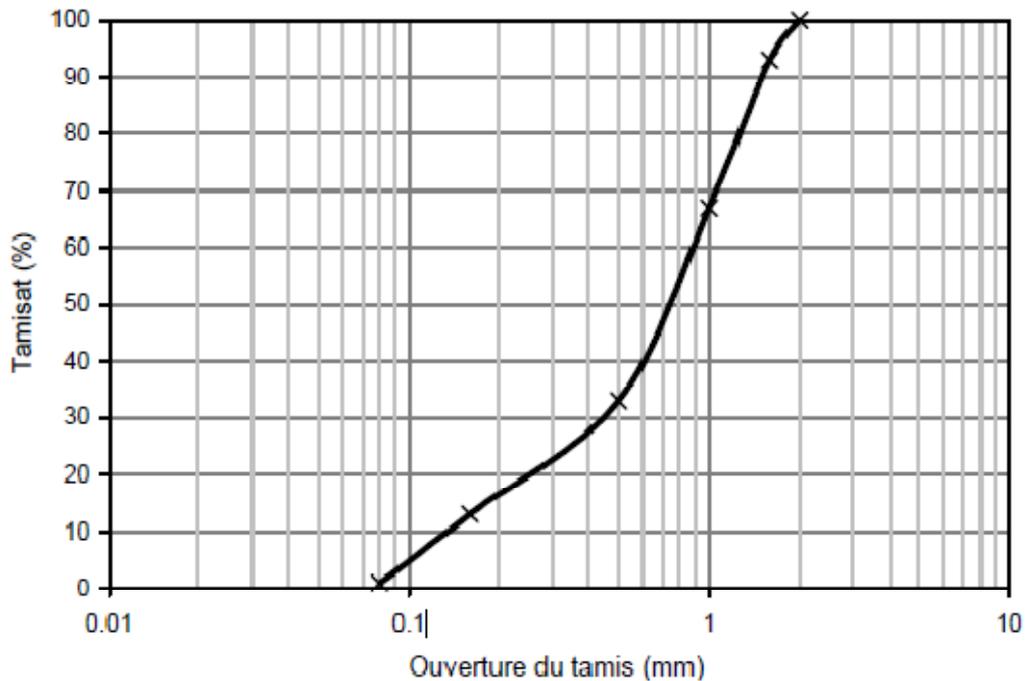
Figure II.3 : La courbe granulométrique du sable naturel (mélange).

### II.2.2.2) Sable normalisé

Le sable utilisé pour la confection des éprouvettes en mortier est un sable normalisé (Figure II.4) conforme à la norme EN 196-1. La courbe granulométrique de ce sable est représentée sur la figure II.5



Figure II.4 : sable normalisé.



**Figure II.5:** Courbe granulométrique de sable normalisé.

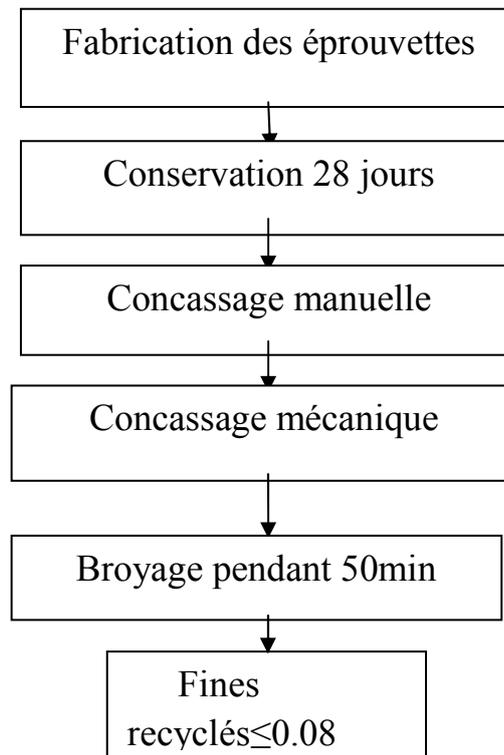
### II.2.3) Eau de gâchage

L'eau potable du robinet de laboratoire est utilisée dans la confection du mortier.

### II.2.4.) Les fines recyclées

Les fines recyclées ont été obtenues par un concassage et criblage des éprouvettes de 40 mm x 40 mm x 160 mm, en mortier.

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire et conservées pendant 28 jours dans l'eau afin de subir un concassage préliminaire qui a été fait manuellement, et un concassage final à l'aide d'un concasseur mécanique. Le broyage des fines a été fait à l'aide d'un broyeur à boules pendant 50 minutes. Le matériau broyé est passé à travers des tamis pour obtenir des fines  $\leq 0.08$ .



**Figure II.6:** Organigramme de fabrication de fines recyclées.

### **II.3) fabrications des éprouvettes de mortier**

La confection du mortier est réalisée conformément à la norme EN 196-1.

Les matériaux ont été malaxé mécaniquement au moyen d'un malaxeur à axe vertical selon la norme NF P 15- 471.



**Figure II.7 :** Malaxeur à axe vertical.

La procédure est comme suit :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivants. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

**Figure II.8:** Opération pour déterminer le mortier normal.

Les éprouvettes utilisées pour la confection des mortiers sont de forme prismatique  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Les éprouvettes sont moulées immédiatement après la préparation du mortier (figure. II .9) et afin d'assurer les vibrations, on a utilisé la table à choc (Figure II.9).



**Figure. II .9 :** Mise en moule du mortier.



**Figure. II .10:** Table à chocs.

Après le démoulage (figure II.11), Les éprouvettes sont conservées par l'immersion dans un bac d'eau dont la température moyenne est de 20°C( figure II.12)



**Figure II.11:** Démoulage d'éprouvette.  
d'eau.



**Figure II.12 :** les éprouvettes dans le bac.

### II.4.) Concassage et broyage des fines

Les fines recyclées sont préparées au niveau de notre laboratoire par le concassage (figure II.13) ; puis broyées à l'aide d'un broyeur à boules (Figure II.14). Jusqu'au avoir des diamètres inférieurs à 80 $\mu$ m.



**Figure II.13:** Concasseur à mâchoire.



**figure. II.14 :** Broyeur à boules.



Figure II.15 : fines (non broyée/broyée).

### II .5.) Essais sur la pâte de ciment

#### II.5.1.) Essai de consistance

La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité.

Pour apprécier la consistance des deux types de ciments composés, on a effectué l'essai avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN-196-3.

- **Objectif de l'essai**

Déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage qui définit une telle consistance dite «Consistance normalisée».

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

- **Principe de l'essai**

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

- **Conduite de l'essai**

- Peser 500 g de ciment

- 125 g d'eau

## CHAPITRE II : Matériaux et essais

- Verser l'eau dans le récipient du malaxeur puis ajouter le ciment en un temps compris entre 5 et 10 s .La fin du versement du ciment donne le temps 0;
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s ;
- Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s;
- Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente ;
- Remplir le moule tronconique de la pâte fabriquée et araser la face supérieure ;
- Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser la sonde au contact de la pâte ;
- Régler l'index des graduations au point 0
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale. La sonde s'enfoncera plus ou moins profondément dans la pâte.
- Noter l'indication de l'index sur la graduation après immobilisation de la partie mobile
- Si l'épaisseur mesurer est supérieure à 7 mm ; il n'y a pas assez d'eau
- Si l'épaisseur mesurer est inférieure à 5 mm ; il y a trop d'eau
- La pâte sera de consistance normalisée si l'épaisseur  $d = 6 \text{ mm} \pm 1$

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente

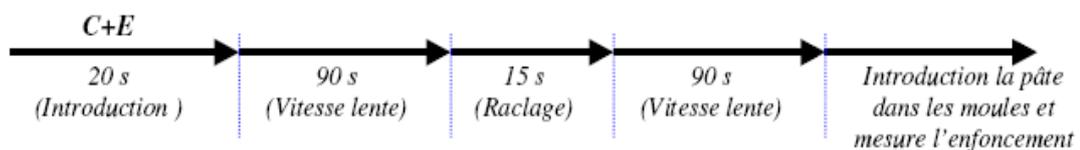


Figure II.16 : Principe de préparation de la pate.

### II .5.2.) Essais de prise

#### Objectif de l'essai

- Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés conformément à la norme EN 196 -3.

#### • Principe de l'essai

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérée, l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que

$$d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.



Figure II.17 : Appareil de Vicat.

#### • conduite de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3 :

- confectionner une pâte normalisée comme il est indiqué au II.5.1. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
- Remplir le moule tronconique, et raser la face supérieure ;
- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;

- Quand le moment supposé du début de prise s'approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale
- Relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- si l'arrêt se produit à une distance  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$  ; La prise est commencée ;
- si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$
- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base ;

### II .6.) Essais sur mortiers

- **Objectif de l'essai**

Le but de l'essai est de connaître les résistances à la compression du mortier à l'âge 1, 3,7 et 28 jours, confectionné avec les différents types de ciments étudiés

- **Principe de l'essai**

Soumettre l'éprouvette étudiée à une charge croissante jusqu'à la rupture. En déduire la résistance à la compression (charge de rupture / section de l'éprouvette

- **Conduite de l'essai**

On a effectué des essais mécaniques sur des éprouvettes prismatiques en mortier normalisé de 1350g de sable,270g d'eau et 450g de ciment CPA avec une substitution chaque fois de 15% 30% et 45% des différentes fines préparées.

Les éprouvettes prismatiques (4x4x16) ont été conservées dans l'eau à une température environ 20°C; puis écrasées à 1jours, 3jours, 7jours et 28jours. Après avoir optimisé la quantité des fines en substitution avec la quantité de ciment, en effectuant des essais mécaniques.

La résistance à la compression est calculée par la moyenne arithmétique entre trois (03) mesures, cette résistance set donnée par la relation :

$$f_c = \frac{F}{S}$$

Où :  $f_c$  : La résistance à la compression (MPa).

$F$  : charge de rupture (N).

$S$  : section de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ )



Figure II.18: dispositif pour l'essai de compression du mortier

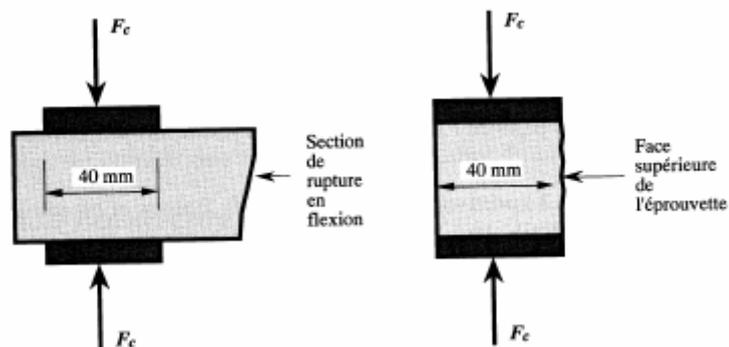


Figure II.19 : essai de compression sur mortier

Pour cet essai plusieurs conditions doivent être remplies :

- Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être bien planes, et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.
- La ligne d'application de la force doit coïncider avec l'axe de l'éprouvette.

## ***CHAPITRE II : Matériaux et essais***

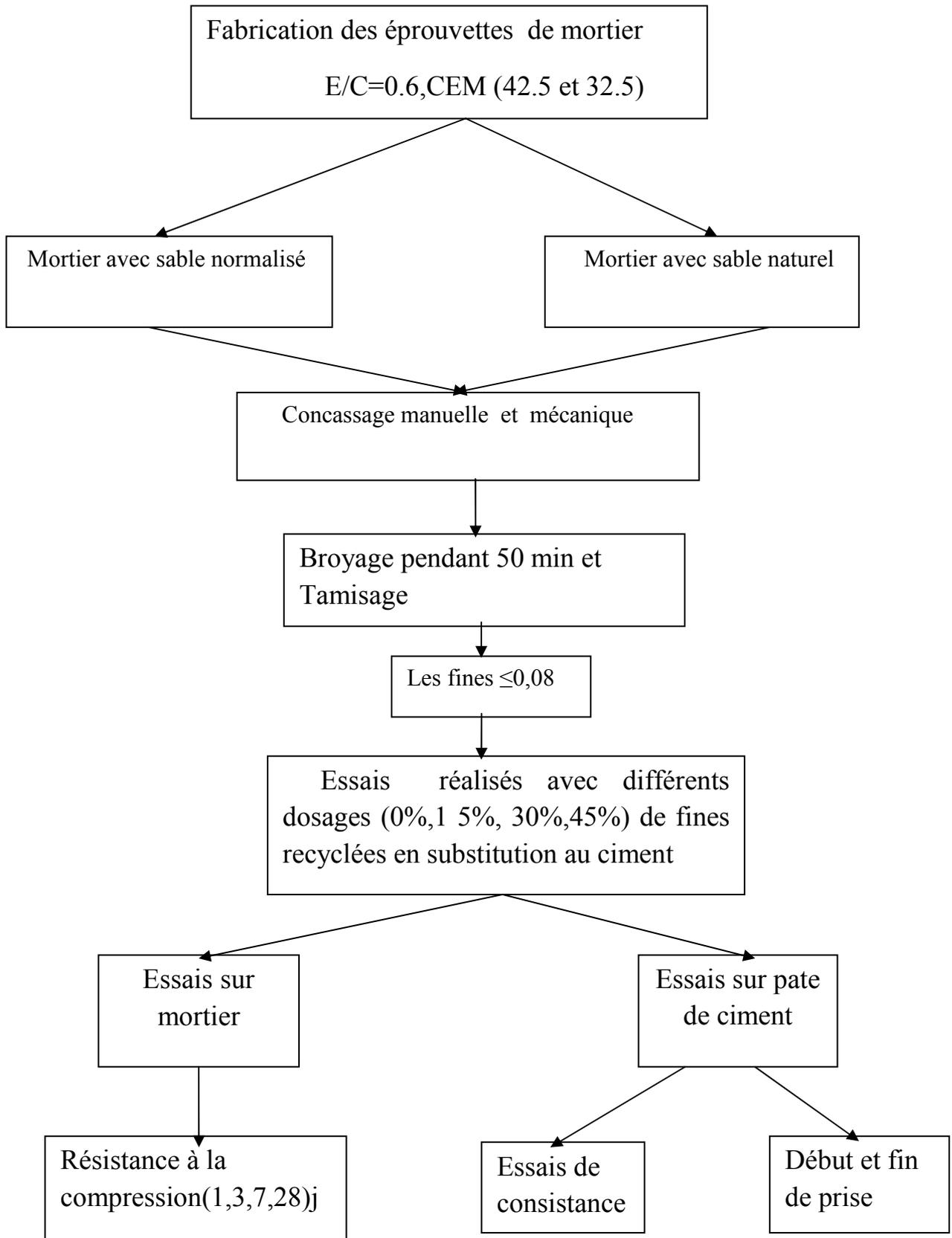
---

- La vitesse de la force d'application doit croître régulièrement, afin d'éliminer les effets de chocs et de fluage.

### **II.7.)RECAPITULATIF ET VARIABLES ETUDIEES**

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé et les variables étudiées. Ce travail a été fait en plusieurs étapes :

- Deux types de mortiers seront étudiés, un à base de sable naturel, le deuxième est à base de sable normalisé et chaque mortier avec deux différent types de ciment (**CPJ-CEM II/A 42.5R** et **CPJ-CEM II/A 32.5 R**).
- Concassage et préparation des fines recyclées
- une substitution de (0%, 15% ,30%,45%) en poids du ciment par les fines recyclées.
- Essaie sur pate de ciment (prise et consistance).
- Essaie sur mortier à l'état durci (essaie de compression).



**Figure II.20:** Organigramme de la procédure expérimentale.

# **Chapitre III :Analyse et Discussions des Résultats**

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

---

### III.1.) Introduction

Après avoir vu dans le chapitre précédent les caractéristiques principales des matériaux utilisés, ainsi que les méthodes d'essai, nous nous proposons dans ce chapitre de présenter les démarches et les procédures pour réaliser un mortier à base de fines recyclées et le comparer avec un mortier de référence, Ainsi que les résultats d'influence de substitution de ciment par les fines en nature et quantité.

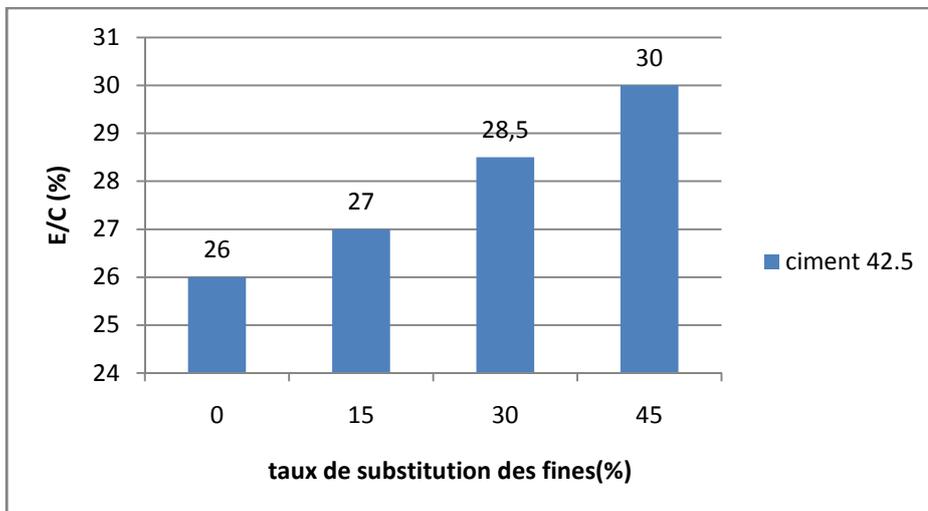
### III.2.)Essaie sur pate de ciment

#### III.2.1.) Influence des fines et de type de ciment sur la consistance

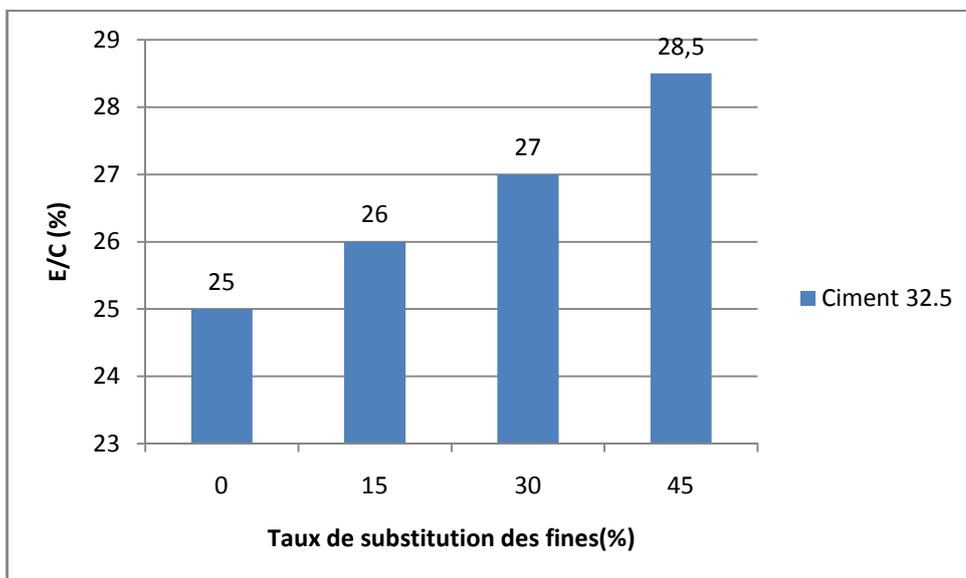
Les mesures de la consistance normale sur la pâte de ciment sont regroupées dans le tableau III.1. la teneur en eau est généralement comprise entre 26 et 32% de la masse de ciment [34], ici on remarque que les deux types de ciment composés étudiés ont des consistances normales situées entre 25 et 30%.

**Tableau III.1** : Consistances normale des ciments étudiés

Substitution des fines en %	Consistance (%)	
	Ciment 42.5	Ciment 32.5
0	26	25
15	27	26
30	28.5	27
45	30	28.5



**Figure III.1 :** Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment 42.5 en fonction de taux de substitution des fines.



**Figure III.2 :** Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment 32.5 en fonction de taux de substitution des fines.

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

D'après les résultats obtenus figures III.1, III.2, on remarque que l'augmentation du taux de substitution des fines sur la pâte de ciment a un double effet :

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant.
- L'augmentation de la quantité d'eau nécessaire est proportionnelle au pourcentage des substitutions des fines.

On remarque aussi que la distribution des fines du mortier substituées, a une Influence prédominante sur la demande en eau du ciment, ceci se traduit par :

- une augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement.
- une grande proportion de vides que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte de ciment (porosité élevée).

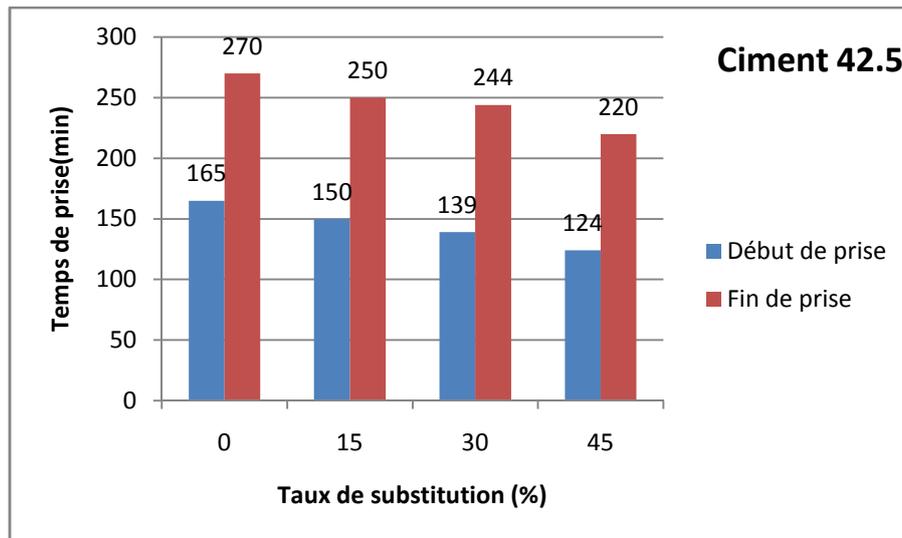
### III.2.2.) Temps de début et fin de prise des ciments composés utilisés

On a étudié dans cette partie l'effet de la variation de la quantité des fines ajoutées au ciment à différents pourcentages 0, 15, 30 et 45%. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

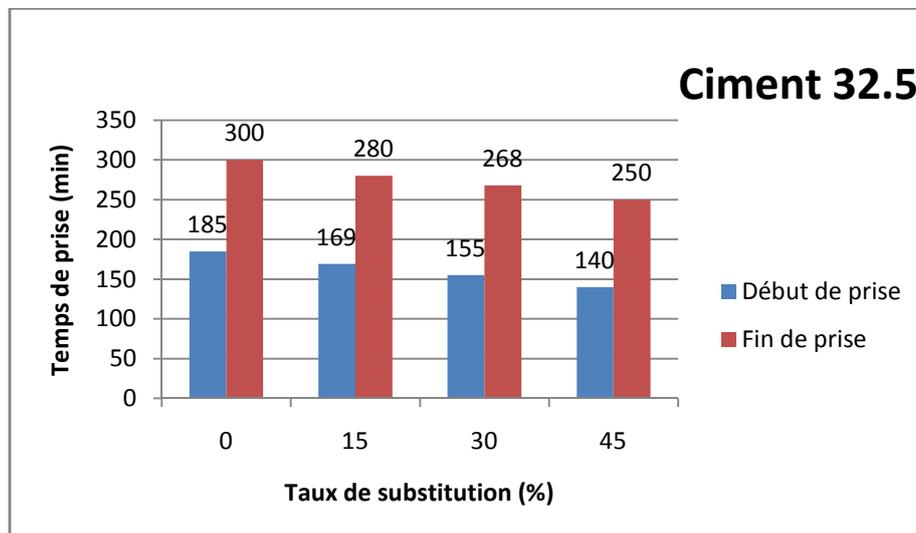
**Tableau III.2** : délais de prise (début et fin) des ciments étudiés.

Substitution des fines en (%)	Temps de prise du ciment 42.5 en (min)		Temps de prise du ciment 32.5 en (min)	
	Début de prise	Fin de prise	Début de la prise	Fin de prise
0	165	270	185	300
15	150	250	169	280
30	139	244	155	268
45	120	220	130	245

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats



**Figure III.3 :** Evolution de temps de prise en fonction de taux de substitution des fines.



**Figure III.4 :** Evolution de temps de prise en fonction de taux de substitution des fines.

Les figures III.3 et III.4 Présentent le début et la fin de prise des pates du ciment composé utilisés. Les deux ciments ont présenté un début de prise reste conforme aux normes (un

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

minimum de 60 minutes pour un ciment de classe de résistance 42.5 et 90minutes pour le ciment 32.5 [27].

Le temps de prise pour les ciments avec 15, 30 ,45% d'ajout des fines a diminué par rapport au ciment sans fine recyclés. Cela s'explique que les particules très fines adhèrent aux autres et activent le phénomène de prise de la pate de ciment.

Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant doit de plus en plus rapide en fonction de l'augmentation de la quantité d'ajout. Par conséquent les cristaux de CSH (élément responsable du phénomène de durcissement de la pâte) existent en grande quantité aux très jeunes âges.

### III.3.) Résistance à la compression

#### III.3.1) Résistance à la compression de mortier a base de ciment 42.5

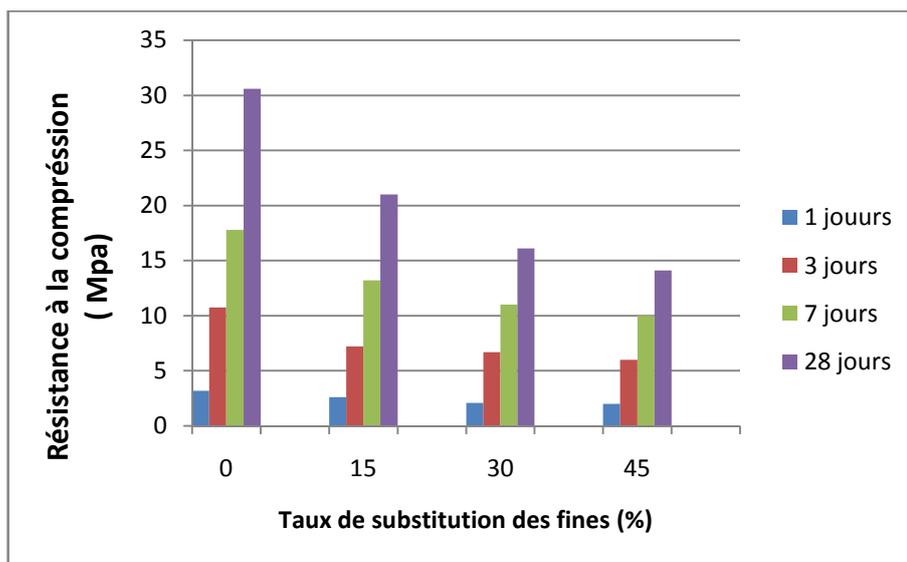
Les éprouvettes testées sont de dimensions 40mm x 40mm x 160mm. Les résistances à la compression ont été réalisées à 1, 3,7 et 28 jours aux différents dosages taux de substitution (0%, 15%, 30%, 45%) de ciment par les fines recyclés ainsi que les deux types de sable. Les différents résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants.

**Tableau III.3** : Résistance à la compression à base de ciment 42.5.

Type de sable	Substitution des fines en %	Résistance à la compression(MPa)			
		1 j	3 j	7 j	28 j
Sable naturel	0	3.2	10.75	17.8	30.6
	15	2.6	7.2	13.2	21

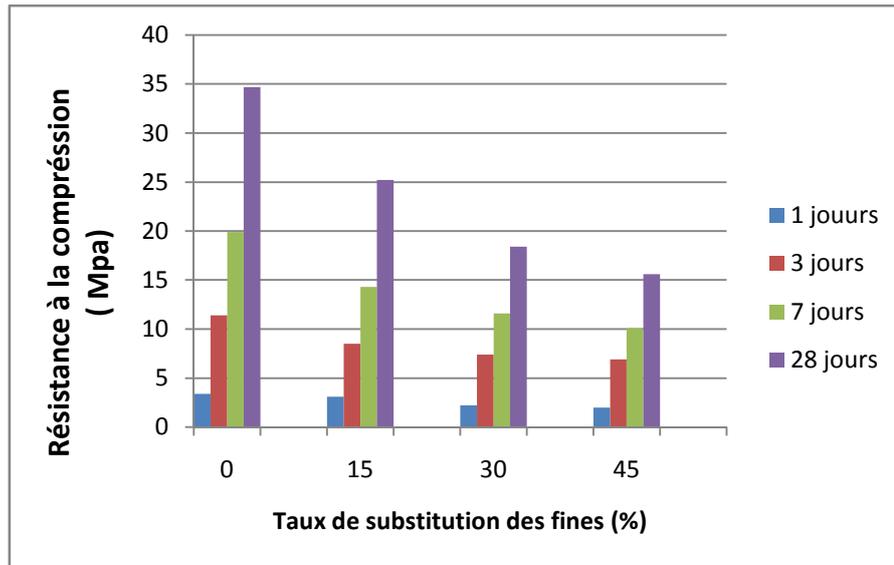
## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

	30	2.1	6.7	11	16.1
	45	2	6	10	14.1
Sable normalisé	0	3.4	11.4	19.9	34.7
	15	3.1	8.5	14.3	25.2
	30	2.2	7.4	11.6	18.4
	45	2	6.9	10.1	15.6



**Figure III.5 :** Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 42.5 et sable naturel.

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats



**Figure III.6 :** Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 42.5 et sable normalisé.

La résistance à la compression des mortiers recyclés évolue au cours du temps d'une façon similaire que le mortier témoin; cependant, elle chute en fonction du pourcentage de substitution en fines recyclées.

Au jeune âge (1, 3 et 7 jours), plus le dosage en fines augmente plus la résistance à la compression diminue pour les deux sables, le développement de la résistance est supérieur pour le 15% de fines par rapport à 30 et 45% des fines.

La chute de la résistance à la compression à 28 jours à base de sable normalisé était environ de 25 à 30% quand le taux de substitution de fines recyclées est de 15%.

-Pour un mortier à base de sable naturel, la diminution de résistance est de l'ordre de 30 à 35% lorsqu'on substitue 15% de poids de ciment.

Cette chute de la résistance à la compression s'explique sans doute par le pourcentage de fines recyclées qui sont beaucoup plus porteuses de la poussière de concassage et de mortier inerte.

### III.3.2) Résistance à la compression de mortier à base de ciment 32.5

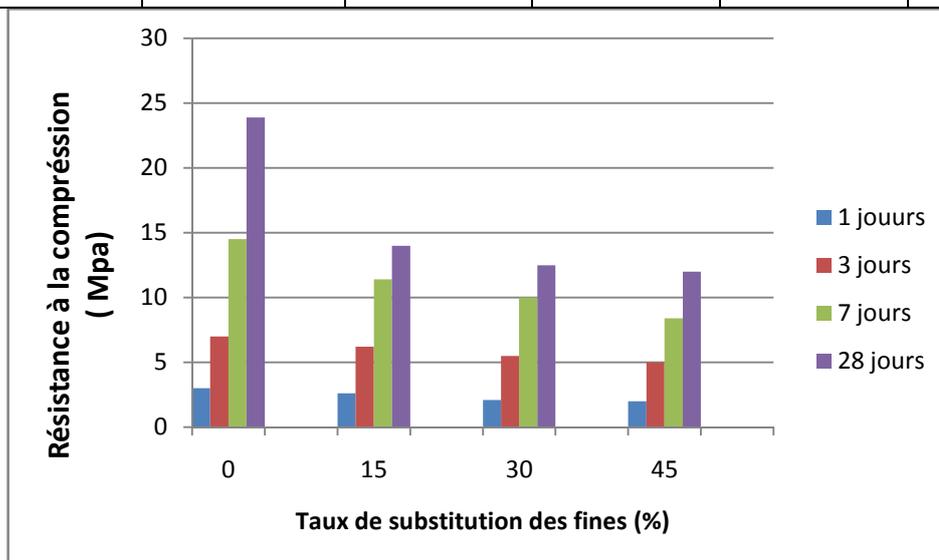
Les résultats de la résistance à la compression de mortiers à base des deux types de sable sont présentés respectivement dans le tableau III.4.

**Tableau III.4 :** Résistance à la compression à base de ciment 32.5

Type de	Substitution	Résistance à la compression(MPa)

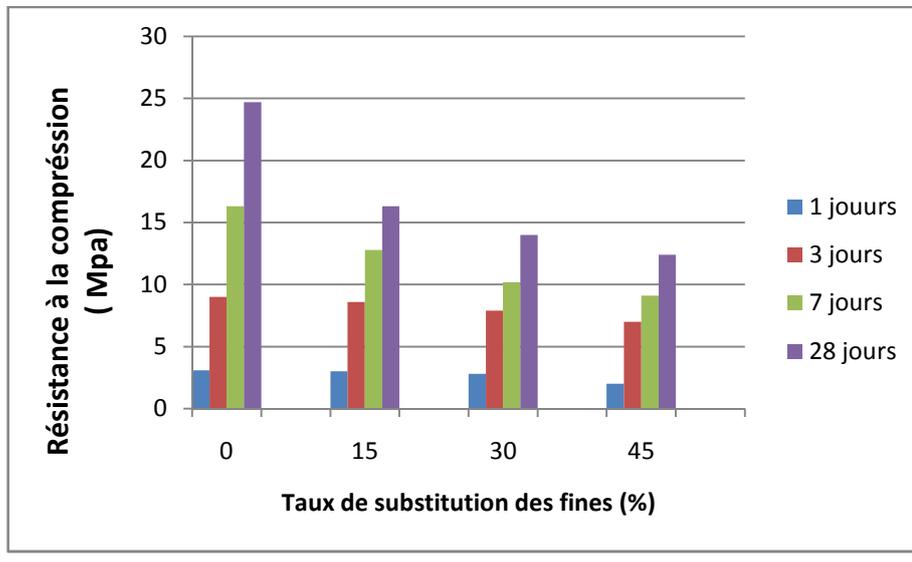
## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

sable	des fines en %	1 j	3 j	7 j	28 j
Sable naturel	0	3.0	7	14.5	23.9
	15	2.6	6.2	11.4	14
	30	2.1	5.5	10	12.5
	45	2	5	8.4	12
Sable normalisé	0	3.1	9	16.3	24.7
	15	3	8.6	12.8	16.3
	30	2.8	7.9	10.2	14
	45	2	7	9.1	12.4



## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

**Figure III.7 :** Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 32.5 et sable naturel.



**Figure III.8 :** Evolution de la résistance à la compression du mortier à base de ciment 32.5 et sable normalisé.

On constate d'après la figure III.7 et III.8 que plus le taux de substitution de fines aux différents jours augmente, plus la Résistance à la compression du mortier à base de ciment 32.5

- A jeune âge, toutes les substitutions par les fines donnent des résultats plus faibles que le mortier de référence.
- La chute de résistance à la compression à 28 jours, le mortier à base de sable normalisé était environ de 35 à 40% pour la substitution de 15% de fines.
- Pour un mortier à base de sable naturel, la diminution de résistance est de l'ordre de 30 à 35% lorsque la substitution est de 15% de poids de ciment.

## CHAPITRE III : Analyse et Discussions des Résultats

Ces différentes remarques sont dues probablement au fait que les fines recyclées utilisées comme élément de substitution ne comportent pas de ciment non hydraté qui puisse compenser la substitution effectuée.

### III.3.3.) Comparaison entre les Types de Sable

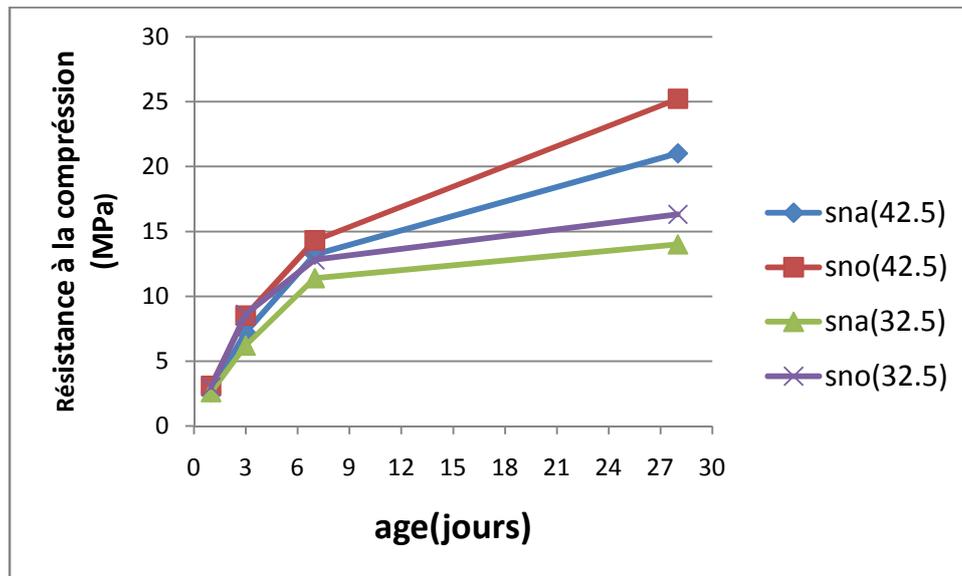


Figure III.9 : influence du type de sable sur la résistance pour 15% de fines

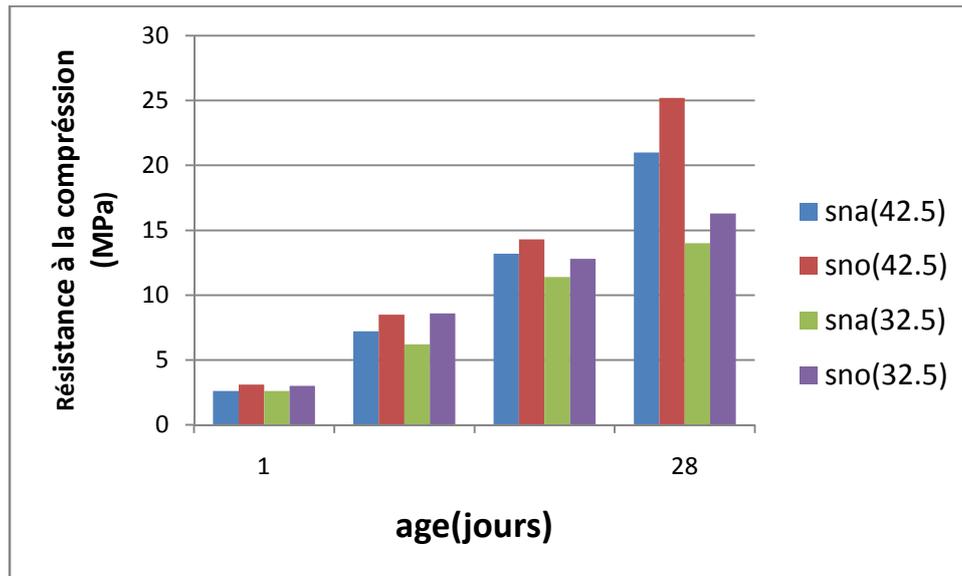
La figure III.9 illustre la comparaison de la résistance à la compression pour les deux sables.

-On constate que la résistance du mortier à base de sable normalisé est toujours supérieure à celle du mortier à base de sable naturel quelque soit la quantité des fines substituées.

-Les fines jouent un rôle dans le développement de la résistance à la compression mais cette dernière reste toujours inférieure à celle du mortier de référence pour des pourcentages de 15,30, et 45% de substitution de ciment. Ces différentes remarques sont dues au fait que les fines recyclées utilisées comme élément de substitution comportent la présence aléatoire du vieux mortier collé aux ajouts.

Ceci peut être expliqué par la présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats complique la caractérisation exacte des fines recyclés. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécaniques des granulats de démolition seront dépendantes du volume de mortier collé aux granulats

### III.3.4.) Effet de la classe de ciment sur la résistance



**Figure III.10** : influence de la classe de ciment sur la résistance pour 15% de fines

D'après les résultats d'écrasement, on remarque :

Une augmentation des résistances à la compression en fonction de l'âge.

Toutes les substitutions par les fines donnent des résultats plus faibles que le témoin pour les deux types de ciments.

Les valeurs de résistance à la compression du mortier à base de ciment 42.5 sont nettement supérieures à celles du mortier à base de ciment 32.5.

La chute de résistance à la compression est due aux modifications des paramètres qui l'influencent négativement, ces paramètres sont l'augmentation de l'absorption d'eau à cause de la porosité élevée des granulats et faibles résistances d'anciens mortiers attachés aux fines recyclées qui gênent le bon déroulement d'hydratation.

### III.4.) Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation des fines substituées par des ciments composés influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- L'augmentation de taux de substitution de ciment par les fines recyclées dans la pâte, engendre une augmentation de rapport E/C afin d'avoir une consistance normale.
- Les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation des pourcentages d'ajouts des fines.
- L'influence de la classe de ciment aux ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (Pâte de ciments, mortiers) diffère d'un ciment à un autre (type et nature de l'ajout minéral).
- L'incorporation du sable normalisé joue un rôle très positif dans l'amélioration de la résistance mécanique à la compression.
- Le taux de substitution de 15% donne les meilleurs résultats pour la résistance à la compression des mortiers.

***Conclusions générales  
et recommandations***

## Conclusions générales et recommandations

---

### ❖ Conclusions Générales

L'étude expérimentale réalisée dans la cadre de ce mémoire sur l'effet des fines recyclées sur la performance nous amènent aux conclusions suivantes :

- L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication des bétons offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets de démolition pour préserver l'environnement.
- La récupération des fines potentiellement utilisables dans la production de ciment ou un autre liant hydraulique, aura sûrement un impact sur la réduction de la production de CO<sub>2</sub> attribuée aux cimenteries.
- La consistance normale des deux ciments utilisés est comprise entre 25 et 30%.
- L'augmentation de la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une consistance normale est proportionnelle au pourcentage des fines substituées.
- Le recyclage des fines contribuera à diminuer le temps de début et de fin de prise
- Le début de prise varie de 2 heures à 3 heures et 5 minutes. Néanmoins, il reste conforme à la norme qui exige le temps minimum de début de prise 60 minutes pour un ciment de classe de résistance 42.5 et 90 minutes pour le ciment 32.5.
- La substitution de 15% de ciment par des fines recyclées permet d'obtenir un mortier de résistance acceptable et faire ainsi une économie de ciment.

### ❖ Recommandations

Le travail réalisé est limité et nous proposons de le poursuivre par d'autres investigations complémentaires :

- La détermination d'autres caractéristiques tel que, le module d'élasticité, le retrait et le fluage.
- L'utilisation combinée de fines recyclées avec d'autres ajouts minéraux tels que les fillers calcaire ou les fumées de silice dans la formulation du mortier.
- Etude de quelques aspects de durabilité mécaniques des mortiers à base des fines recyclés.

# Références

## REFERENCES

[1] Rao A., Jha K.N. Misra S. 2007, 'Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete', Resource conservation and Recycling (2007), pp 71-81.

[2] Khalaf FM, DeVenny Alan S. 2004 'Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review'. ASCE J Mater Civil Eng 2004:331-40.

[3] Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux en Ile de France.

[4] Gaweka HAGER « **Etude du comportement mécanique à chaud** »

[5] Berredjem L. et Arabi N., « Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : Formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recycles », SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing countries ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp. 255-262.

[6] Douara T.H., Benhouana M. et Nezerghi B., « Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et des granulats naturels », SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing countries, ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp. 289-294.

[7] Hansen T.C., "Recycling of demolished concrete and masonry", RILEM Report 06, Published by E & FN Spon, London, 1992.

[8] Debieb F., "Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates", Thèse de Doctorat de l'USTHB, Algérie, 2007, 163 pages.

[9] Gasti T., « Caractérisations et formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés », Mémoire de Magister de l'Université Yahia Fares – Médéa, 2010, 112 pages.

[10] Hachana AK., Benaichi E., Mezguiche B. et Melles M., « Etude des bétons à base des agrégats des déchets de démolition », Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2008.

[11] Pani L., Francesconi L. and Concu G., « Influence of replacement percentage of recycled aggregate on recycled aggregate concrete properties », fib Symposium PRAGUE 2011, pp.1-10.

[12] Hadjieva Zaharieva R., “Durabilité des bétons à base de granulats recyclés”, Thèse de Doctorat de l’Université d’Artois, France, 1998.

[13] Grdic Z.J., A. Topilic-Curcic G., Despotovic I.M. and Ristic N.S., « Properties of self compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate », Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, pp. 1129-1133.

[14] Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., “Influence of recycled aggregate on strength properties of concrete”, Construction and Building Materials, 2009, Vol. 23, pp. 1163-1167.

[15] Tu T-Y., Chen Y-Y. and Hwang C-L., “ Properties of HPC with recycled aggregates”, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, pp. 943-950

[16] QUEBAUD.M ,COURTIAL.M &BU YLE-BODIN.F ”Le recyclage des matériaux de démolition “, Matériaux et structure, travaux, n°721 ,FRANCE , Juin1996.

[17] TORII,KAWMURA.M,TAKEMOTO.K & HASABA.S, ”Applicability of recycled concrete aggregate as an aggregate for concrete pavement”, Transaction of the Japan concrete institute,Vol 6 1984 pp.133-140

[18] VALLI.F, ”Rerecycling of concrete”, Congress Proceedings, Recycling R’97,Vol 2,Geneva, Switzerland, 1997,pp.71-76.

[19] MAULTZSCH.M,MELIMANN.G & WINKLER, “The substitution of natural aggregates by processed building rubble for high grade concrete”, Congress Proceedings on recycling R’ 99,Vol 3, Geneva, Switzerland, 1999, pp199-204.

[20] Katz A., “Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete”, Cement and concrete research, **33** (5), pp. 703-711, 2003.

[21] Tam V.W.Y., Wang K. and Tam C.M., “Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis”, *Journal of Hazardous Materials*, **152** (2), pp. 703-714, 2008.

[22] Gómez-Soberón J.M.V., “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, *Cement and concrete research*, **32** (8), pp. 1301-1311, 2002.

[23] Wirquin, « Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés, *Materials and Structures*, **33** pp. 403-408, 2000.

[24] Courard L., Kenai S., Debieb F and Degeimbre R., “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, **32** (6), pp. 421-426.

[25] Braymand S., « Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons », Thèse de Doctorat, 2010: Nantes.

[26] BARRA.M DE OLIVEIRA & VAZQUEZ.E, “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete”, *Waste management*, Vol 16, No-3, 1996, pp113-117.

[27] Hansen T.C., “Recycling aggregates and recycling aggregate concrete”, *Second state -of-the art report developments 1945-1985. Materials and structures*, 1986, vo. 19, n°111, pp201-246.

[28] CSTC, ”Recyclage du béton”, CSTC, Rapport final de la biennale, Bruxelles, 1979-1981.

[29] NEWMAN.AJ, ”The utilization of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete”, *Department of scientific and industrial research*, UK, 1995.

**[30]** HOBBS.G, CILINS R.J, BLACKWELL B.Q& ATKINSON C.J, "Practical demonstration of the recycling on a building contract", Congress Proceedings on Recycling R'97, Vol. 2, Geneva, Switzerland, 1997, pp. 47-52

**[31]** DEVENNY.A & KHALAF F.M? "The use of crushed brick as coarse aggregates in concrete", Masonry international, Vol12,n°3, 1999, pp.81-84.

**[33]** Khatib J.M., "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, pp. 763-769.

**[34]** Etxeberria M., Vazquez E., Mari A. and Barra M., "Influence of amount of recycled aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", Cement and Concrete Research, 2007, Vol. 37, pp. 735-742.

**[35]** Evangelista L. de Brito J., "Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, 2007, Vol. 29, pp. 397-401.

**[36]** Kou S.-C., Poon C.-S. and Etxeberria M., " Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete", Cement and Concrete Composites, 2011, Vol. 33, pp. 286-291.