

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHSCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

Faculté de Génie Civil



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

EN GÉNIE CIVIL

Spécialité : Construction

Par : AZZAZ RAHMANI Abdessamed

Thème

Propriétés Rhéologiques et Physico Mécaniques des bétons à base d'Agrégats Recyclés à Partir des Débris de Béton Démoli

Soutenu publiquement le 19/05/2012 devant le jury composé de:

Mme.F.KHARCHI, Professeur, USTHB, Présidente.

M.M.CHEMROUK, Professeur, USTHB, Directeur de mémoire.

M.B.MENADI, Maitre de conférences A, USD Blida, Examineur.

M.N.OUDJIT, Maitre de conférences A, USTHB, Examineur.

M.F.DEBIEB, Maitre de conférences A, Univ. Médéa, Examineur.

M.S.SI TAYEB, Directeur de la recherche et du développement, COSIDER, Invité.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieu le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

J'adresse mes sincères remerciements à mon enseignant et directeur de mémoire Monsieur M.CHEMROUK, Professeur à l'USTHB, pour ses nombreux conseils, son aide précieuse et sa compréhension durant l'élaboration de cette recherche.

Je tiens à remercier Madame Fattoum KHARCHI, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance. Je voudrais vivement remercier Messieurs Mohamed-Nadjib OUDJIT, Farid DEBIEB et Belkacem MENADI qui ont accepté d'examiner mon travail.

Ma gratitude va également au directeur de laboratoire de Génie Civil et Géomatériaux à l'Université de Blida, Monsieur Said KENAI, qui m'a autorisé à faire la partie expérimentale de cette recherche.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe de SIKA Algérie, qui a contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture de superplastifiant (Tempo 12) et la fumée de silice.

Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants de la PG de la Faculté de Génie Civil à l'USTHB pour leurs patiences et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur savoir pour assurer notre formation.

Je remercie tous mes collègues de travail, Kouider Djelloul Omar, Bouguechtouli Smail, Allali Mohamed ELamine, Debbih Amina, Hammat Siham, pour leur aide et leur gentillesse spontanée et pour tous les moments que nous avons traversé ensemble sans oublier de remercier tous mes amis de promotion.

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille, à mes chers frères, ma sœur et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable.

Je terminerai en remerciant tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'industrie du béton en général nécessite des quantités importantes en agrégats. Ces quantités ne peuvent être disponibles sans avoir recours aux exploitations de gisements importants en carrières de production d'agrégats qui absorbent et donc font disparaître des montagnes toutes entières. Ces exploitations se font sans doute au détriment de l'équilibre écologique avec des conséquences néfastes sur notre environnement. La fracture de la roche par l'explosif et les poussières dégagées par les stations de concassage ont des effets désastreux immédiatement apparents sur notre environnement et son système écologique. Dans le même temps, des catastrophes, naturelles ou causées par l'être humain, provoquent des destructions importantes dans le patrimoine bâti ; le séisme du 21 Mai 2003 en Algérie a provoqué des dégâts inestimables dans le bâti. Dans certains cas, les démolitions sont le résultat du développement d'une région ou d'un pays sous prétexte de politiques de régénération, de revitalisation ou de modernisation. Les débris de démolition qui résultent de toutes ces situations polluent l'environnement et constituent des obstacles insurmontables à tout développement durable pour les générations futures. La réflexion autour de l'exploitation massive de ces débris de construction, pour à la fois soulager l'environnement des décharges nuisibles et le protéger des multiples agressions d'extraction de roches et de matériaux en grandes quantités, est désormais engagée dans beaucoup de pays développés. C'est dans ce sens que l'on se propose d'investiguer un **béton fait d'agrégats recyclés à partir des débris de béton démoli**. Le travail consiste à étudier les propriétés rhéologiques et physico mécaniques de ce nouveau béton 'partiellement récupéré' afin d'explorer son utilité comme matériau de structure.

Dans la première partie de ce travail et après une introduction générale pour poser la problématique et tracer les objectifs à atteindre à travers cette recherche, une revue bibliographique est présentée afin de récolter le maximum d'information sur le thème. Cette revue bibliographique consiste en une étude sur l'identification, la valorisation et le recyclage des déchets d'une manière générale en vue de protéger l'environnement. Parmi les déchets à recycler, une attention particulière est faite sur les agrégats pour à la fois produire du béton pour l'industrie de la construction et soulager l'environnement d'une pollution solide non biodégradable. Dans la deuxième partie, une étude expérimentale est entreprise et qui consiste en la confection et la démolition de deux types de béton ; un béton à hautes performances de résistance à la compression avoisinant les 75 MPa et un béton ordinaire de résistance avoisinant les 30 MPa. Ces bétons démolis ont ensuite été recyclés pour être utilisés comme agrégats de bétons nouvellement confectionnés avec des taux de recyclage variant de 0 à 100%. L'évolution de la résistance avec l'âge et sa variation aussi bien en compression qu'en traction en fonction du taux de recyclage est investiguée et comparée au béton initial pris comme témoin. Les résultats obtenus montrent que pendant que le béton ordinaire diminue de résistance avec l'augmentation du taux de substitution d'agrégats recyclés, atteignant une diminution de l'ordre de 20%, le béton à hautes performances ne diminue pas de résistance avec l'utilisation d'agrégats recyclés à partir d'un BHP démoli ; la résistance obtenue pour un béton fait à 100% d'agrégats recyclés à partir d'un BHP est la même que celle du BHP témoin. Ceci est valable aussi bien en compression qu'en traction. Ceci est en fait dû à la qualité de la pâte de ciment du BHP, très résistante et qui ne s'effrite pas ; quand le béton est démoli, elle se comporte comme un gros agrégat. A l'inverse en béton ordinaire, une fois concassée, la pâte de ciment durcie s'effrite et absorbe beaucoup d'eau au mélange et donc ne se comporte pas comme une grosse particule d'agrégat mais plutôt comme un filler fin.

Abstract

The concrete industry in general necessitates huge quantities of aggregates. These quantities can't be available without having recourse to the exploitation of important fields for aggregate production quarries which absorb and hence put down complete mountains entirely. These quarry exploitations affect the ecological equilibrium, inducing serious consequences on our environment. The rock fracture with the explosives and the dust liberated by the quarry stations have disastrous effects, immediately apparent on the environment and its ecological system. At the same time, catastrophes, natural or man-made, provoke important destructions on the built patrimony; the earthquake of the 21st May 2003 in Algeria induced inestimable damages in the building sector. In some cases, the demolitions are the results of the development of a region or a country for reasons of renewal, revitalization or modernization policies. The demolition debris which results from these situations pollute the environment and constitute insurmountable obstacles for any sustainable development for the future generations. The reflection around the massive exploitation of these demolished construction debris, for at the same time releasing the environment from this harmful debris dumping and protect it from the multiple aggression for rock quarries and huge quantities of aggregate extractions, is henceforth engaged in many developed countries. It is in this direction that the present work attempts to investigate a **concrete made with aggregates recycled from the debris of a demolished concrete**. The work consists of studying the rheological and physic-mechanical properties of this new concrete 'partially recuperated' in the aim of exploring its use as a structural material.

In the first part of this work, and after a general introduction to set up the field of enquiry and define the objectives to be reached through this research work, a literature review is presented so that a maximum information could be collected on the topic. This literature review consists of a study on the identification, the valorization and the recycling of the dumping wastes in general in the aim of protecting the environment. Among the dumping waste to be considered for recycling, a particular attention is made for the aggregates in the aim of producing concrete for the construction industry and at the same time relieving the environment from a solid non-biodegradable dumping pollution. In the second part, an experimental study is carried out consisting of fabricating and demolishing two types of concrete; a high performances concrete of an average of 75 MPa compression strength and an ordinary concrete of 30 MPa average compression strength. These demolished concretes were then recycled and used as aggregates for concretes newly confectioned with recycled rates varying from 0 to 100%. The strength gain with age and its variation in compression as well as in tension with the % rate of recycled aggregates used is investigated and compared to the initial concretes taken as reference. The results obtained show that while ordinary concrete reduces in strength with an increase in the substitution rate of recycled aggregates, reaching a reduction of 20% , high performances concrete does not reduce in strength with the use of aggregates recycled from demolished HPC; The strength obtained from 100% BHP recycled aggregates is the same as that of the reference BHP concrete (without any recycled aggregates). This was the case for compression as well tension. This is in fact due to better quality hardened cement paste of HPC, very strong and which does not crumble away; after the crushing of concrete, the HPC cement paste becomes as a coarse aggregate. To the contrary, in ordinary concrete, once the concrete is crushed, the hardened cement paste crumbles away and absorbs a lot of water on mixing and hence does not behave as a coarse aggregate, but rather as fine filler.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures et des tableaux	
Liste des symboles et des abréviations	
Introduction générale	1
Problématique et objectifs de la recherche	1
Plan de travail.....	2
Chapitre 1 : La valorisation des déchets – Etude bibliographique	
1.1 Introduction	3
1.2 Historique de la valorisation des déchets	3
1.3 Origine de la production de déchets	6
1.4 Différentes types de déchets	7
1.4.1 Les déchets inertes	7
1.4.2 Les déchets industriels banals (DIB)	7
1.4.3 Les déchets ménagers et assimilés	8
1.4.4 Les déchets dangereux (spéciaux)	8
1.5 Gestion des déchets	10
1.5.1 Définition	10
1.5.2 Politique de la gestion des déchets	10
1.5.3 Principes de gestion des déchets	11
1.5.4 Techniques de gestion des déchets	13
1.6 Recyclage des déchets	13
1.6.1 Définition	13
1.6.2 Législation européenne relatives aux déchets	14
1.6.3 Technique de recyclage	15
1.6.3.1 Procédés du recyclage	15
1.6.3.2 La chaîne du recyclage	15
1.6.4 Impacts du recyclage sur l'environnement	16
1.7 Déchets utilisés comme granulats du béton	16
1.7.1 Laitiers	16
1.7.1.1 Laitier de haut fourneau	16
1.7.1.2 Laitier d'acier	17
1.7.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques	17
1.7.2.1 Mâchefer	17
1.7.2.2 Scories de sole	18
1.7.2.3 Cendres volantes	18
1.7.3 Béton récupéré	18

1.7.4 Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières	19
1.7.5 Déchets divers	19
1.7.5.1 Déchets de mines de charbon	19
1.7.5.2 Verre de récupération	20
1.7.5.3 Pneus usages	20
1.7.5.4 Résidus d'incinérateurs	21
1.7.5.5 Boues rouges	21
1.7.5.6 Argile cuite	21
1.7.5.7 Sciure de bois	22
1.7.6 L'Activité du recyclage des matériaux de construction et de démolition	22
1.7.6.1 Intérêt du recyclage des déchets de construction et de démolition	22
1.8 Déchets en Algérie	26
1.8.1 Les déchets de construction	27
1.8.2 La problématique des déchets de constructions	27
1.8.2.1 Résultats des travaux du Centre de recherche intégrée du bâtiment	27
1.8.2.2 Localisation des déchets de construction dans la partie ouest d'Alger ..	28
1.8.2.3 Décharges (ou zones de gravats) de déchets de construction	28
1.8.3 Déchets de chantiers générés en phase de réalisation	30
1.8.4 Déchets de démolition et de réhabilitation	30
1.8.5 Déchets de fabrication de matériaux de construction	31
1.8.6 Impact du séisme du 21 mai 2003	31
Chapitre 2 : Granulats et bétons recyclés – Etude bibliographique	
2.1 Introduction	33
2.2 Matériel de production	34
2.2.1 Concasseur à mâchoire	35
2.2.2 Concasseur d'impact (percussion)	36
2.2.3 Concasseur à cône (giratoire)	36
2.2.4 Concasseur à marteaux	37
2.3 Concassage et tri sélectif.	38
2.3.1 Déconstruction sélective et tri	38
2.3.2 Elaboration des granulats recyclés	39
2.3.3 Élimination des polluants	40
2.4 Aspects Réglementaires et normatifs	41
2.4.1 Les normes granulats	41
2.4.2 Autres caractéristiques: identiques aux granulats naturels	43
2.5 Les caractéristiques d'ancien mortier	43
2.5.1 La densité	44
2.5.2 Absorption d'eau	45
2.5.3 La porosité	46
2.5.4 La résistance mécanique	48
2.6 Le béton à base de granulats recyclés	49
2.6.1 Le Bétons recyclés à l'état frais et durcissant	49
2.6.2 Masse volumique à l'état frais	50
2.6.3 Rhéologie du béton à l'état frais (valeur initiale et évolution)	50

2.6.4 Temps de prise	51
2.6.5 Problème des fines du sable recyclé	51
2.6.6 Les Propriétés mécaniques du béton durci	51
2.6.6.1 La résistance à la compression	51
2.6.6.2 La résistance à la traction	53
2.6.6.3 Le module d'élasticité	53
2.7 Conclusion	54
Etude expérimentale	
Chapitre 3 : Matériaux et procédure expérimentales	
3.1 Introduction	56
3.2 Matériaux utilisés	56
3.2.1. Ciment	56
3.2.2. Les granulats naturels et recyclés	57
3.2.2.1. Identification	57
3.2.2.2. Granulométrie :	60
3.2.2.3. Forme des grains	60
3.2.2.4. Masse volumique et porosité	62
3.2.2.5. Absorption d'eau	62
3.2.2.6. Propreté.....	63
3.2.2.7. Résistance mécanique (dureté/Los Angeles)	63
3.2.3. L'eau de gâchage	63
3.2.4. Les adjuvants	64
3.2.4.1. Les superplastifiants	64
3.2.5. L'ajout minéral (fumé de silice)	64
3.3 Formulation des bétons	66
3.4 Modes opératoires des essais	67
3.4.1. Eprouvettes	67
3.4.1. Eprouvettes	68
3.4.2. Gâchage et malaxage	68
3.4.3. Essais sur béton frais	69
3.4.3.1. Affaissement au cône d'Abrams	69
3.4.3.2. Mesure de la densité réelle du béton frais	70
3.4.3.3. Confection et conservation des éprouvettes	71
3.4.4. Essais sur béton durci	72
3.4.4.1. Essai de compression	72
3.4.4.2. Essai de traction par flexion	73
3.5 Récapitulatif du programme des essais réalisés	74
Chapitre 4 : Analyses et discussions des résultats	
4.1 Introduction	76
4.2 Granulats	76
4.2.1 Analyse granulométrique des granulats	76
4.2.2. Formes des grains et état de surface.....	78
4.2.3. Masse volumique	79
4.2.4. Absorption d'eau.....	80

4.2.5. La propreté.....	81
4.2.6. Resistance mécanique (dureté/Los Angeles)	82
4.3 Béton frais	83
4.3.1. L'ouvrabilité et la densité.....	83
4.4 Béton durci.....	85
4.4.1. Propriétés physiques et mécaniques du béton durci	85
4.4.1.1. Masse volumique	85
4.4.1.2. Résistance à la compression.....	86
4.4.1.3. Résistance à la traction	90
Conclusion Générale et Perspectives	93
Références	95

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des Figures :

Figure 1.1 :	Compositions des déchets utilisés dans les constructions	8
Figure 1.2 :	La stratégie d'étude conduisant à la valorisation des sous-produits ou à la stabilisation des déchets	9
Figure 1.3 :	Production totale des déchets en Europe par secteur	11
Figure 1.4 :	Débouchés du granulat recyclé au Pays-Bas	24
Figure 1.5 :	Déchets de construction à Bab El Oued	28
Figure 1.6 :	Construction après démolition à Birkhadem	31
Figure 2.1 :	Compositions des granulats recyclés de béton	33
Figure 2.2 :	Concasseur à mâchoire	35
Figure 2.3 :	Concasseur d'impact (percussion).	36
Figure 2.4 :	Concasseur à cône (giratoire).	37
Figure 2.5 :	Concasseur à marteaux	38
Figure 2.6 :	Courbes granulométriques de graves recyclées en sortie de concasseurs à mâchoires et à percussion	39
Figure 2.7 :	Les appareillages d'élimination des impuretés	40
Figure 2.8 :	Schéma du procès de traitement mécanique et thermique des déchets de démolition	41
Figure 2.9 :	le pourcentage en poids de la pâte de ciment d'ancien mortier attaché aux granulats recyclés	44
Figure 2.10 :	Corrélation entre l'absorption d'eau et la porosité relative des granulats recyclés	46
Figure 2.11 :	Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton	47
Figure 2.12 :	Distribution porométrique, bétons à 28 jours	48
Figure 2.13 :	Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles	49

Figure 2.14 :	Le développement de la résistance à la compression avec substitution des gros granulats recyclés.	52
Figure 2.15 :	Le développement de la résistance à la compression avec substitution des gros et fins granulats fins recyclés	52
Figure 2.16 :	Comparaisons entre bétons fabriqués à partir de granulats naturels et recyclés	54
Figure 3.1 :	Procédure de préparation des granulats recyclés	58
Figure 3.2 :	concasseur à mâchoires	58
Figure 3.3 :	Tamiseuse électrique	60
Figure 3.4 :	Caractérisation de la forme des granulats en fonction du coefficient d'aplatissement et celui d'élongation.	62
Figure 3.5 :	échantillon du fumé de silice utilisé	65
Figure 3.6 :	malaxeur de béton utilisé à axe vertical	68
Figure 3.7 :	Compactage du béton à l'aide d'une table vibrante	69
Figure 3.8 :	Essai d'affaissement (cône d'Abrams)	70
Figure 3.9 :	Les différentes moules utilisées pour chaque gâché	71
Figure 3.10 :	Mode de Conservation des éprouvettes	72
Figure 3.11 :	Dispositif de l'essai de compression simple	73
Figure 3.12 :	Essai de traction par flexion à 3 points	74
Figure 3.13 :	Organigramme des essais réalisés sur les deux types de bétons	75
Figure 4.1 :	Courbe granulométrique des sables naturels et recyclés	76
Figure 4.2 :	Courbe granulométrique des graviers (3/8) naturels et recyclés	77
Figure 4.3 :	Courbe granulométrique des graviers (8/15) naturels et recyclés	77
Figure 4.4 :	forme de granulats recyclés	78
Figure 4.5:	La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons (l'état frais)	84

Figure 4.6 :	La variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons.	84
Figure 4.7 :	La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons (l'état durci)	86
Figure 4.8 :	Evolution de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction du taux de substitution en gravier concassé.	88
Figure 4.9 :	Evolution de la résistance à la compression du béton à haute performance en fonction du taux de substitution en gravier concassé.	89
Figure4.10 :	Evolution de la résistance à la traction du béton ordinaire en fonction du taux de substitution en gravier concassé	91
Figure 4.11 :	Evolution de la résistance à la traction du béton à hautes performances en fonction du pourcentage de substitution en gravier concassé	92

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 :	Taux de recyclage en Europe	23
Tableau 1.2 :	Données européennes sur le recyclage des chaussées de béton et d'asphalte	24
Tableau 1.3 :	Les pourcentages des déchets de construction	29
Tableau 1.4 :	Quantité des déchets mis en décharge	30
Tableau 2.1 :	coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels et recyclés	45
Tableau 3.1 :	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM II/A 42.5	56
Tableau 3.2:	Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé	57
Tableau 3.3 :	Les quantités des granulats après concassage	59
Tableau 3.4 :	Identification des granulats naturels et recyclés utilisés	59
Tableau 3.5:	Caractéristique du superplastifiant utilisé	64
Tableau 3.6 :	Caractéristique du la fumée de silice.	65
Tableau 3.7 :	Composition des bétons étudiés	67
Tableau 3.8 :	Répartition des éprouvettes pour chaque pourcentage	68
Tableau 4.1 :	Forme des granulats utilisés	79
Tableau 4.2 :	Masse volumique des granulats utilisés	79
Tableau 4.3 :	Pourcentage d'absorption d'eau des granulats utilisés	81
Tableau 4.4 :	Pourcentage des impuretés et équivalent de sable des différents granulats	82
Tableau 4.5 :	Dureté des granulats utilisés	82
Tableau 4.6 :	Propriétés des bétons à l'état frais	83
Tableau 4.7 :	Propriétés des bétons à l'état durci	85
Tableau 4.8 :	La résistance à la compression de béton ordinaire	87
Tableau 4.9 :	La résistance à la compression de béton à haute performance	87

Tableau4.10 :	La résistance à la traction de béton ordinaire	90
Tableau4.11 :	La résistance à la traction de béton à haute performance	90

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

a	La cote de la section carrée de l'éprouvette
BO	Béton ordinaire
BHP	Béton à haute performance
e	Epaisseur du granulat
E	Eau
E/C	Eau/Ciment
ES _v	Equivalent de sables à vue
ES _p	Equivalent de sable à piston
G	Gravier
GR _{BO}	Granulats recyclés à partir des débris de concassage du BO
GR _{BHP}	Granulats recyclés à partir des débris de concassage du BHP
L	Longueur du granulat
l	Largeur du granulat
M _e	La masse du récipient vide
MF	Module de finesse
M _r	La masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle)
M _v	Le moment de la rupture enregistré
MV _{mort}	Masse volumique du mortier ancien
MV _{nat}	Masse volumique des granulats recyclés
MV _{recyc}	Masse volumique des granulats naturels
P	Coefficient d'aplatissement
q	Coefficient d'élongation

R_c Résistance à la compression

R_f Résistance à la flexion

S Sable naturels

SR_{BO} Sable recyclés à partir des débris de concassage du BO

SR_{BHP} Sable recyclés à partir des débris de concassage du BHP

L Laitier de haut fourneau

V Volume du récipient

ρ_b la densité du béton frais

$\sigma_{t, fl}$ la résistance à la traction par flexion

σ_{abs} Masse volumique absolue

σ_{app} Masse volumique apparente

Introduction générale

Introduction

Une demande accrue de granulats naturels s'est accentuée ces dernières années pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Le stock disponible de ces granulats ne satisfait plus cette demande et le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison d'une réglementation rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires,...). Par ailleurs, les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la déconstruction du vieux bâti sont en quantité croissante et ne sont éliminés que par l'utilisation en remblai ou mis en décharges sauvages, causant un impact sur l'environnement. Ce dernier constitue un paramètre essentiel du développement durable et sa préservation passe obligatoirement par le recyclage des gravats.

Problématique

L'industrie du béton nécessite des quantités importantes en agrégats. En effet, en Algérie, des millions de tonnes de mètres cubes d'agrégats sont utilisés dans le domaine de la construction.

Le grand projet d'autoroute Est-Ouest à lui seul a nécessité environ soixante millions de tonnes selon les estimations du ministère des travaux publics. Cette quantité ne peut être disponible sans avoir recours à l'exploitation de gisements importants en carrières de production d'agrégats, qui absorberont et donc feront disparaître des montagnes toutes entières. Cette exploitation se fera sans doute au détriment de l'équilibre écologique avec des conséquences néfastes sur notre environnement. La fracture de la roche par l'explosif et les poussières dégagées par les stations de concassage ont des effets désastreux immédiatement apparents sur notre environnement et son système écologique. Des étendues de vergers, poumons d'oxygène pour les être vivants de la terre, ont été la proie de ces poussières.

Dans le même temps, des catastrophes, naturelles ou causées par l'être humain, provoquent des destructions importantes dans le patrimoine bâti ; le séisme du 21 Mai 2003 en Algérie ou le tout récent qui vient de dévaster HAÏTI en 2010 ont provoqué des dégâts inestimables dans le bâti. Dans certains cas, les démolitions sont le résultat du développement d'une région ou d'un pays sous prétexte de politiques de régénération, de revitalisation ou de modernisation.

Les débris de démolition qui en résultent de toutes ces situations polluent l'environnement et constituent des obstacles insurmontables à tout développement durable pour les générations futures. La réflexion autour de l'exploitation massive de ces débris de construction, pour à la fois soulager l'environnement des décharges nuisibles et le protéger des multiples agressions d'extraction de roches et de matériaux en grandes quantités, est désormais engagée dans beaucoup de pays développés. En Algérie, la politique de récupération d'une manière générale est très timide en se limitant à quelques rejets de la consommation ; les matériaux de construction récupérés sont carrément inexistant malgré le besoin accru dans ce domaine.

C'est dans ce sens que nous nous proposons de travailler sur un béton fait d'agrégats recyclés à partir des débris de béton démolis. Le travail consistera à étudier les propriétés rhéologiques et physico mécaniques de ce nouveau béton 'partiellement récupéré' afin d'explorer son utilité comme matériau de structure. L'aptitude et la fréquence de réutilisation du matériau recyclé constituent des paramètres importants de cette étude.

Plan de travail

Le travail commencera par une recherche bibliographique exhaustive afin de récolter le maximum d'information sur le thème, qui est relativement récent. Ceci passe inévitablement par l'étude des ingrédients du mélange béton en général et de ceux du béton à confectionner en particulier.

Durant la deuxième partie, des essais préliminaires pour formuler deux bétons de 30 MPa et de 75 MPa seront entrepris. Ces bétons seront caractérisés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci, puis démolis par concassage pour en produire des agrégats recyclés. Ces agrégats seront étudiés puis utilisés pour en confectionner un autre béton qui, à son tour, sera étudié pour en définir ses propriétés rhéologiques et physico-mécaniques.

Enfin, nous finirons notre travail par une conclusion générale et des recommandations futures.

Chapitre : 1

Valorisation des déchets

1.1. Introduction

Depuis le début des années 1990, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation collective. La question des déchets est quotidienne et touche chaque individu tant sur le plan professionnel que familial. En tant que consommateur, jeteur, usager du ramassage des ordures ménagères, et trieur de déchets recyclables, citoyen ou contribuable, chacun peut et doit être acteur d'une meilleure gestion des déchets. Des gestes simples permettent d'agir concrètement pour améliorer le cadre de vie et préserver le bien-être de chacun : chaque citoyen peut jeter moins et jeter mieux.

Différentes lois, notamment celles du 15 juillet 1975 et 3 juillet 1992 [1], regroupées et inscrites dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets:

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets,
- Organiser le transport des déchets,
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie,
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique,
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels ultimes.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de déchets et les principales techniques de traitements ou d'éliminations à travers le monde, ainsi le recyclage et réutilisation des déchets dans le domaine de génie civil.

1.2. Historique de la valorisation des déchets

Pendant la préhistoire, les hommes se contentent de laisser leurs déchets dans la nature. Essentiellement des restes de nourritures, ceux-ci se décomposent selon le cycle naturel et sont produits en petite quantité. Le problème des déchets apparaît avec le développement des villes où les ordures s'entassent sur la voie publique.

En 1185, incommodé par la puanteur, Philippe Auguste fait paver les principales rues de Paris. Pendant le Moyen-Âge, les décrets royaux se succèdent pour améliorer la gestion des déchets.

Il faut attendre le XIXe siècle pour que l'hygiène publique devienne un véritable sujet de préoccupation. La révolution arrive avec le préfet de la Seine Eugène Poubelle qui met en

place un premier arrêté le 24 novembre 1883 obligeant les propriétaires parisiens à mettre à disposition à chacun de leurs locataires un récipient destiné aux ordures ménagères. Par glissement sémantique, ces récipients prennent vite le nom de « poubelles ».

C'est dans les 1^{ère} années de la décennie 70 du XXe siècle que parallèlement à l'émergence d'une conscience des problèmes posés par le développement économique des sociétés modernes se discernent les problématiques liées aux déchets générés par ces économies.

Commandé en 1970 et publié en 1972 au Massachusetts Institute of Technology, le rapport Meadows, titré "The Limits to Growth" et traduit en français sous le titre : "Halte à la croissance ?" est le premier rapport du Club de Rome. Il porte sur les limites de la croissance et ses conséquences sur l'épuisement des ressources naturelles.

Tenue sous l'égide de l'Organisation des Nations unies à Stockholm en Suède, du 5 au 16 juin 1972, et préparée par les professeurs René Dubos et Barbara Ward par le rapport Nous n'avons qu'une terre, la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain (CNUEH), mieux connue sous le nom de Conférence de Stockholm (aussi nommé 1er sommet de la Terre), a placé pour la première fois les questions écologiques au rang des préoccupations internationales. Les participants ont adopté une déclaration de 26 principes et un vaste plan d'action, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), pour lutter contre la pollution. Cette institution est la plus haute autorité environnementale au sein du système des Nations Unies [2]. Si la notion de déchet n'apparaît pas distinctement dans la déclaration finale de la réunion de Stockholm, il est noté dans le principe 6, que : "Les rejets de matières toxiques ou d'autres matières doivent être interrompus de façon à éviter que les écosystèmes ne subissent des dommages graves ou irréversibles." et dans le principe 7, que : "Les États devront prendre toutes les mesures possibles pour empêcher la pollution des mers par des substances qui risquent de mettre en danger la santé de l'homme, de nuire aux ressources biologiques et à la vie des organismes marins, de porter atteinte aux agréments naturels ou de nuire à d'autres utilisations légitimes de la mer". La Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets autrement nommée Convention de Londres, est adoptée la même année [3]. Elle a pour objectif d'empêcher l'évacuation incontrôlée de débris en mer susceptible de mettre en danger la santé humaine, les organismes marins, l'environnement maritime, ou pouvant interférer avec les autres activités maritimes. Elle désigne comme

déchets et autres matières matériaux et substances de tout type, de toute forme et de toute nature et organise la "sévérité" du contrôle en fonction de la dangerosité des produits.

Le 15 juillet 1975, est arrêtée la Directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets [4], elle constitue le socle à partir duquel va s'intégrer la politique européenne de développement. De fait, les principes sont posés : invoquant la poursuite de l'un des objectifs de la Communauté qui est la protection du milieu et l'amélioration de la qualité de la vie, il est d'emblée spécifié que : toute réglementation en matière d'élimination des déchets doit avoir comme objectif essentiel la protection de la santé de l'homme et de l'environnement contre les effets préjudiciables causés par le ramassage, le transport, le traitement, le stockage et le dépôt des déchets.

Des orientations sont prises : favoriser la récupération des déchets et l'utilisation des matériaux de récupération afin de préserver les ressources naturelles c'est-à-dire, la valorisation, "supportée conformément au principe dit du «pollueur-payeur».

Le cadre est dessiné : la directive entend par déchet toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou a l'obligation de se défaire en vertu des dispositions nationales en vigueur. Elle exclut d'ores et déjà :

- les déchets radioactifs;
- les déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales, ainsi que de l'exploitation des carrières;
- les cadavres d'animaux et les déchets agricoles suivants : matières fécales et autres substances utilisées dans le cadre de l'exploitation agricole;
- les eaux usées, à l'exception des déchets à l'état liquide;
- les effluents gazeux émis dans l'atmosphère;
- les déchets soumis à des réglementations communautaires spécifiques.

La directive européenne 75/442/CEE est notamment suivie en 1978 de la directive 78/319/CEE du Conseil relative aux déchets toxiques et dangereux. En 1984 de la directive 84/631/CEE du Conseil, relative à la surveillance et au contrôle dans la Communauté des transferts transfrontaliers de déchets dangereux et, en 1988, de la résolution du Conseil, concernant les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux vers les pays tiers [4].

En 1987, l'Acte unique européen représente un tournant dans la politique environnementale de l'UE. Pour la première fois, celle-ci fait son apparition dans les

Traités communautaires. L'Acte y ajoute trois nouveaux articles (article 130R, 130S et 130T du traité CE) qui permettent à la Communauté de préserver, protéger et améliorer la qualité de l'environnement, contribuer à la protection de la santé des personnes et assurer une utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles. Cependant, si le Conseil arrête les mesures concernant l'aménagement du territoire, l'affectation des sols. Il est précisé que la Communauté n'intervient en matière d'environnement que lorsque cette action peut mieux être réalisée au niveau communautaire qu'au niveau des États membres (principe de subsidiarité), et il exclut nommément de ses compétences la gestion des déchets ainsi que la gestion des ressources hydrauliques.

En 1992 le Traité sur l'Union européenne autrement dit traité de Maastricht confère à l'environnement le rang de "politique européenne".

En 1999 le Traité d'Amsterdam renforce la base juridique de la protection environnementale et inscrit parmi les missions de la Communauté le principe de développement durable défini 12 ans plus tôt dans le rapport Brundtland comme un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs [10]. Les articles 130R, 130S et 130T du traité CE sont confirmés dans l'article 174 qui précise que la politique de l'Union est fondée sur les principes de précaution et d'action préventive, sur le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement et sur le principe du pollueur-payeur.

Le sixième Programme Communautaire d'Action pour l'Environnement intitulé "Environnement 2010 : notre avenir, notre choix" couvre la période allant du 22 juillet 2002 au 21 juillet 2012. Il vise, entre autres, la réduction de la quantité finale des déchets, c'est-à-dire hors valorisation, de 20% d'ici 2010 et de 50% d'ici 2050 [4].

1.3. Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- Chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- Economiques : les produits en une durée de vie limitée ;

- Ecologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets [5].

1.4. Différentes types de déchets

Les utilisables en génie civil sont les déchets inertes, les déchets ménagers et sous produit industriels. Les différents types de déchets sont :

1.4.1. Les déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets minéraux non pollués. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets proviennent des activités de construction, de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...).

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve :

- le béton,
- les briques,
- les tuiles,
- les céramiques,
- les carrelages,
- les matériaux à base de gypse.

1.4.2. Les déchets industriels banals (DIB) :

Ensemble des déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers-cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc.

1.4.3. Les déchets ménagers et assimilés

Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets solides produits par les ménages sur leur lieu d'habitation. Ils regroupent : les ordures ménagères, les déchets d'emballage recyclables en verre, les déchets encombrants issus des ménages et les déchets végétaux.

1.4.4. Les déchets dangereux (spéciaux)

Les déchets spéciaux sont des déchets qui, en raison de leur composition ou de leurs propriétés, présentent un danger pour la santé humaine ou pour l'environnement.

Ce type de déchet doit donc subir un ensemble de traitements appropriés pour en réduire la toxicité et le risque de contamination. Ils nécessitent donc des filières spécifiques de collecte, transport, traitement, recyclage et élimination.

Les différents types de déchets spéciaux :

On distingue différents types de déchets spéciaux en fonction de leur origine :

- Les déchets ménagers spéciaux (DMS) produits par les ménages comme les aérosols, produits de jardinage, produits de bricolage, thermomètre au mercure, etc.
- Les déchets industriels spéciaux (DSI) produits par l'industrie lourde et les entreprises, comme les mâchefers, boues d'épuration, solvants, déchets phytosanitaires, etc.
- les déchets d'activités de soins à risque infectieux et assimilés (DASRIA) produit les centres de soins hospitaliers et vétérinaires, comme les seringues, milieux de culture, fragments anatomiques, pansements, etc.

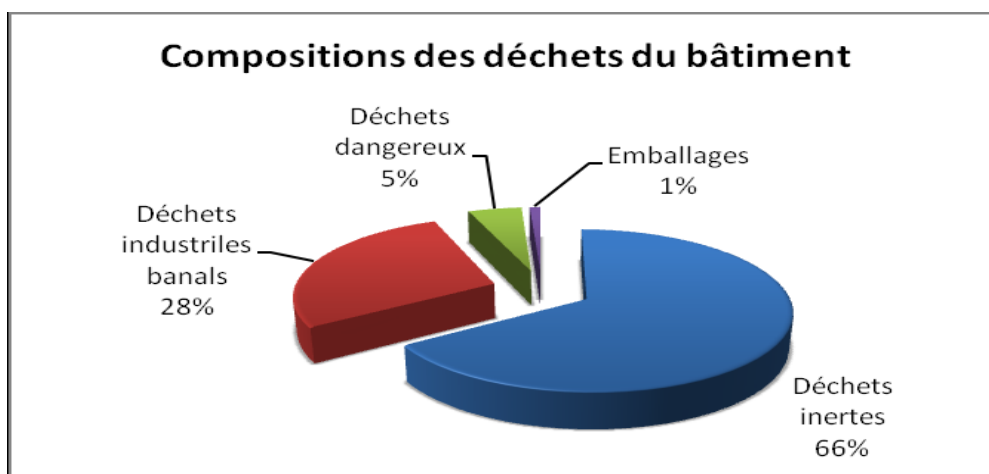


Figure1.1 : Compositions des déchets utilisés dans les constructions [8].

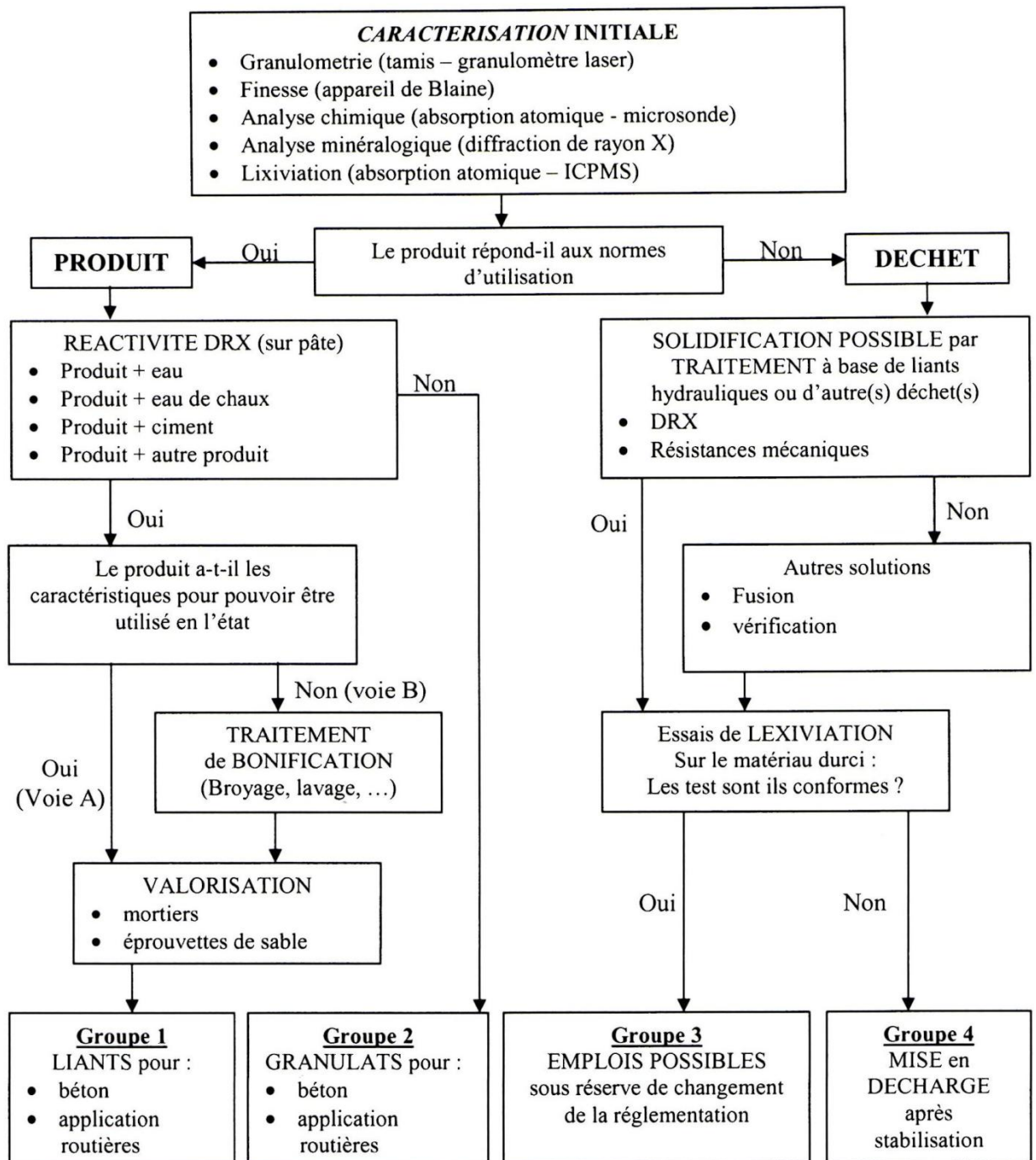


Figure1.2 : Organigramme développer en LMDC –Toulouse et présentant la stratégie d'étude conduisant à la valorisation des sous-produits ou à la stabilisation des déchets [8].

1.5. Gestion des déchets

1.5.1. Définition

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tout les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant. La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité.

1.5.2. Politique de la gestion des déchets

S'il n'est pas possible de supprimer la production de déchets, sous produits ou résidus industriels ou urbains, il convient alors de définir les meilleures conditions de valorisation.

C'est dans ce contexte, que le monde s'est penché, il y a une cinquantaine d'années sur le problème de gestion des déchets.

La quantité de déchets produits chaque année dans l'Union Européenne est estimée à 3 milliards de tonnes [6]. La Figure 1.3 illustre la production totale des déchets en Europe en 2002 par secteur.

Les déchets doivent être gérés dans les conditions nécessaires pour en limiter les effets négatifs sur l'air, le sol, la flore, la faune, éviter les inconvénients par le bruit et les odeurs d'une façon générale, éviter de porter atteinte à l'environnement et à la santé de l'homme. La gestion des déchets doit être effectuée prioritairement par la voie de la valorisation ou, à défaut, par la voie de l'élimination.

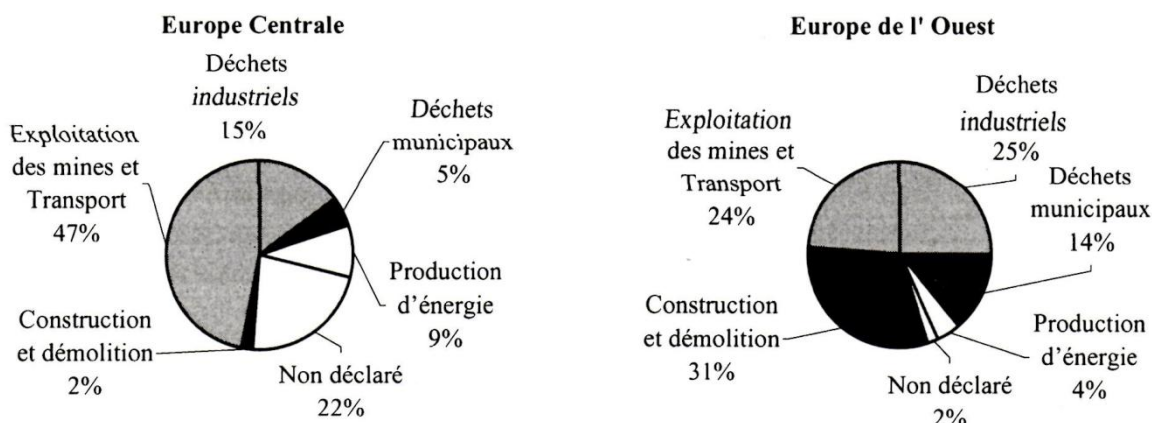


Figure 1.3 : Production totale des déchets en Europe par secteur [6].

Dans ce contexte, la politique de gestion des déchets s'articule autour de trois axes fondamentaux :

- Réduire le flux des déchets à la source;
- Accroître la récupération et la valorisation en procédant de différentes manières;
- Le recyclage, qui consiste à refaire le même produit que le produit initial ;
- La réutilisation, qui consiste à fabriquer un autre produit que celui qui a donné naissance au déchet ;
- Le réemploi, qui consiste à prolonger la durée de vie d'un produit ;
- La régénération, qui consiste à redonner au déchet les qualités et propriétés du produit initial par un ou plusieurs procédés adaptés ;
- La valorisation énergétique, par incinération ;
- Eliminer et traiter proprement le déchet pour qu'il n'ait plus d'impact négatif sur l'environnement.

Cette troisième étape est l'étape ultime et n'intervient que si toutes les autres possibilités ont été envisagées. Suivant les pays, les taux de recyclage et de valorisation atteints varient, en fonction des politiques qui sont menées auprès des citoyens et des industriels (Figure 1.3).

1.5.3. Principes de gestion des déchets

Il y a plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- Réduire
- Réutiliser
- Recycler

La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changé d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : utiliser au maximum les matériaux et générer le minimum de rebuts.

Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un « quatrième R » : « Repenser », qui implique que le système actuel a des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "re-pensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile : afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. Plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées (Paye quand tu jettes : Pay As You Throw - PAYT) qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains.

L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets. Une autre approche, plus controversée, est de considérer la réduction de l'utilisation de substances toxiques. On s'intéresse ici à réduire l'utilisation de substances toxiques, alors même que la tendance est plutôt à la hausse. Cette approche, dans laquelle c'est le principe de précaution qui est mis en avant, rencontre une vive opposition des industries chimiques. Ils accusent cette démarche de stigmatiser les produits chimiques. Certains états américains, comme le Massachusetts, le New Jersey et l'Oregon ont mis en place des politiques de réduction des déchets toxiques [7].

1.5.4. Techniques de gestion des déchets

Traditionnellement, la gestion des déchets urbains, industriels et commerciaux consistait à les récupérer puis à les stocker. Une fois collectée, divers traitements peuvent être appliqués aux déchets. Le but de ces traitements peut être de réduire la dangerosité des déchets, de revaloriser les matériaux par le recyclage, de produire de l'énergie à partir des déchets, ou encore réduire leur volume, pour pouvoir en disposer plus facilement.

Les méthodes de récupération varient beaucoup entre les différents pays et régions, et il serait impossible de les décrire tous. Par exemple en Australie la plupart des foyers urbains ont une poubelle de 240 litres qui est vidée chaque semaine par les autorités locales. Beaucoup de régions, surtout dans les pays les moins développés, n'ont pas de systèmes structurés de récupération des déchets.

Dans les agglomérations canadiennes le tri sélectif est la méthode la plus répandue de récupération des déchets et/ou des recyclables et des déchets organiques suivant un planning défini. Dans certaines régions rurales les habitants amènent leurs ordures dans des lieux de collecte. Les déchets ainsi récoltés sont ensuite transportés vers une décharge régionale.

Les méthodes de stockage varient aussi beaucoup. En Australie, la méthode la plus courante de stockage des déchets solides est la décharge, car le pays est vaste et la densité de population est faible. À l'opposé au Japon il est plus fréquent d'incinérer les déchets car le pays est petit et la place est rare.

1.6. Recyclage des déchets

1.6.1. 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. L'un des exemples qui illustre ce procédé est celui de la fabrication de bouteilles neuves avec le verre de bouteilles usagées. 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 1970, 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 quatre *R* :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- Réparer, qui signifie tous les procédés de préparation d'un objet usé à un nouvel usage,
- 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.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 à 870 kg/an/personne du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

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

1.6.2. Législation européenne relatives aux déchets

En 2007, la production, le stockage, le traitement et le recyclage des déchets est désormais encadré en Europe par une législation de plus en plus élaborée. L'incinération des déchets dangereux est l'objet de la Directive n° 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000. Le stockage de déchets industriels spéciaux est définie par la Directive n°1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets et la Décision de la Commission n° 2000/532/CE du 3 mai 2000 et la Décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux. L'élimination des déchets industriels spéciaux est fixée par d'autres textes. La qualité de l'air est protégée par le Règlement du Parlement européen et du Conseil CE

2037/2000 du 29 juin 2000 sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, et par la Décision du Conseil du 25 avril 2002 qui est l' Approbation, au nom de la Communauté européenne, du protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques et l'exécution conjointe des engagements qui en découlent [5].

1.6.3. Technique de recyclage

1.6.3.1. 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.

1.6.3.2. 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.

1.6.4. 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 ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu) ;
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

1.7. Déchets utilisés comme granulats du béton

1.7.1. Laitiers

1.7.1.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant [9]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans

inconvenient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.

1.7.1.2. Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé.

1.7.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

1.7.2.1. Mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le

béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

1.7.2.2. Scories de sole

Ces résidus constituent environ 2.5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton[9].

1.7.2.3. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage.

À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40MN/m² et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m³. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger [9].

1.7.3. Béton récupéré

Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. L'épuisement des sources courantes de granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et

les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent l'usage du béton récupéré. Les débris de chaussées en béton sont déjà utilisés pour la construction de la couche de fondation de nouvelles chaussées.

La résistance à la compression et le module d'élasticité du béton renfermant des granules recyclés est inférieure à ceux du béton ne contenant que des granulats ordinaires. Les différences sont encore plus grandes à des rapports eau-ciment inférieurs. Le fait de remplacer les fines du béton recyclé par du sable n'améliore pas pour autant la résistance du béton. Le béton qui contient des fines provenant de béton récupéré doit avoir un rapport eau / ciment plus élevé étant donné qu'il contient une plus grande proportion de particules de ciment hydraté. L'addition de réducteurs d'eau et une teneur en ciment plus élevée augmentent la résistance du béton.

Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui du béton de référence. L'importance du retrait est fonction de la superficie totale; dans le cas des granulats recyclés, on s'attend à ce que la superficie soit plus élevée à cause de la présence de pâte de ciment.

La tenue au gel et au dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granules ordinaires[9].

1.7.4. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclavé ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition.

1.7.5. Déchets divers

1.7.5.1. Déchets de mines de charbon

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger. La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés

dans les granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets [9].

1.7.5.2. Verre de récupération

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours [9].

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulats pour le béton.

1.7.5.3. Pneus usages

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macrofissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [10].

1.7.5.4. Résidus d'incinérateurs

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides.

Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins [9].

1.7.5.5. Boues rouges

Les boues rouges proviennent de l'extraction de l'alumine de la bauxite. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules. Chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

La production de granules légers synthétiques à partir de boues rouges peut poser certaines difficultés parce que les boues rouges fondent seulement à des températures élevées et se ramollissent dans une gamme de températures assez restreinte. De plus, les gaz émis pendant le ramollissement ne sont pas toujours suffisants pour produire le gonflement. Dans certains cas, des granulats légers ont été fabriqués avec des additifs tels les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la pierre ponce.

1.7.5.6. Argile cuite

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [9].

1.7.5.7. Sciure de bois

Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable. La sciure provenant du chêne rouge, du sapin de Douglas, du peuplier du Canada, de l'érable, du bouleau ou du cèdre rouge donne des bétons à faible résistance alors que la sciure d'épinette ou de pin rouge donne des bétons dont les propriétés sont acceptables [9].

1.7.6. L'Activité du recyclage des matériaux de construction et de démolition contextes et références

1.7.6.1. Intérêt du recyclage des déchets de construction et de démolition :

Des contraintes écologiques et économiques imposent de plus en plus la nécessité de remplacement partiel des matériaux classiques utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics par des matériaux locaux de substitution.

Dans ce contexte, les granulats recyclés issus de la construction et de la démolition, présentent un intérêt particulier, car leur valorisation permet de résoudre le manque de granulats naturels, de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes et, dans le même temps, de réduire les volumes mis en décharge.

L'intérêt économique du recyclage des matériaux de démolition et de construction est conditionné par trois facteurs essentiels :

- le coût des granulats naturels ;
- les charges et les taxes relatives à l'évacuation des produits de démolition et de construction ;
- les coûts de transports.

Afin de préserver l'environnement, les tendances économiques mondiales vont dans le sens de l'augmentation des deux premiers coûts. Le Pays-Bas et la Finlande sont les premiers pays ayant commencé à appliquer en 1990 les taxes relatives à l'évacuation des produits de démolition et de construction, les autres pays de l'Union Européenne ont commencé à appliquer ces mêmes taxes durant la période 1993-2000. Actuellement, les taxes relatives à l'évacuation des produits de démolition et de construction en Pays-Bas et en Finlande sont respectivement de 79 € et de 15 € par tonne [6].

L'épuisement des gisements des granulats naturels à proximité des grandes agglomérations (les plus importants consommateurs en granulats) engendre également un accroissement

très important des frais de transport dans le prix des granulats naturels. Par conséquent, des économies importantes peuvent être réalisées sur le plan du transport, car les entreprises de recyclage sont implantées près des métropoles.

En France, une distance de 20 km a été relevée comme la limite au-dessus de laquelle les granulats recyclés deviennent compétitifs par rapport aux granulats naturels [11].

Torring et Lauritzen estiment que 400 millions tonnes de débris de béton, de brique et de pierre sont produits annuellement dans le monde entier et que 75% de ces débris sont du béton [12].

La valorisation des déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation et connaît un développement assez important. A titre d'indication, le taux de recyclage dans certains pays d'Europe pour l'année 1995 est résumé dans le tableau 1.5 suivant :

Tableau 1. 1: Taux de recyclage en Europe [13]

Pays	Débris recyclés (millions t/an)	Part de recyclage dans la production de débris (%)	Part de recyclage dans la consommation de granulat (%)
Pays-Bas	7,7	64,2	6,1
UK	7,2	14,8	2,5
Belgique	2,3	30,3	2,6
Danemark	14,9	24,0	3,6
France	3	9,0	0,7
Espagne	0,5	3,7	0,2

Hendricks a mis en évidence que la production et l'utilisation actuelles des agrégats recyclés (issus de béton et de briques) en Europe est proche de 11 % et 10% respectivement et estime qu'en 2015 ces quantités augmenteront à 15% et 14% [14].

Un rapport récent de Oikonomou [15], résume l'expérience de certains pays européens dans le domaine du recyclage des chaussées de béton et d'asphalte (Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Données européennes sur le recyclage des chaussées de béton et d'asphalte[15]

Pays	Année	Matériau	en millions de tonnes	
			Production	Utilisation
Suisse	1999	Chaussée d'asphalte	0,8	0,76
Danemark	1997	Déchets de démolition	1,5-2	Petites quantités
		Béton	1,06	0,9
		Chaussée d'asphalte	0,82	0,82
		Matériaux céramiques	0,48	0,33
Allemagne	1999	Chaussée d'asphalte	12	6
		Autres matériaux de routes	20	11
		Déchets de démolition	23	4
		Déchet de C&D	9,2	9,2

La majorité des granulats recyclés trouvent jusqu'à présent des débouchés dans le secteur routier [16] par exemple Pays-Bas (Figure 1.4), ce qui explique pourquoi leur production reste timide dans plusieurs pays. En plus, l'utilisation des granulats recyclés dans le béton est contrariée, non seulement par les normes et les réglementations, mais aussi par la méfiance des usagers en raison de leurs aspects et de leur caractère de 'déchets'.

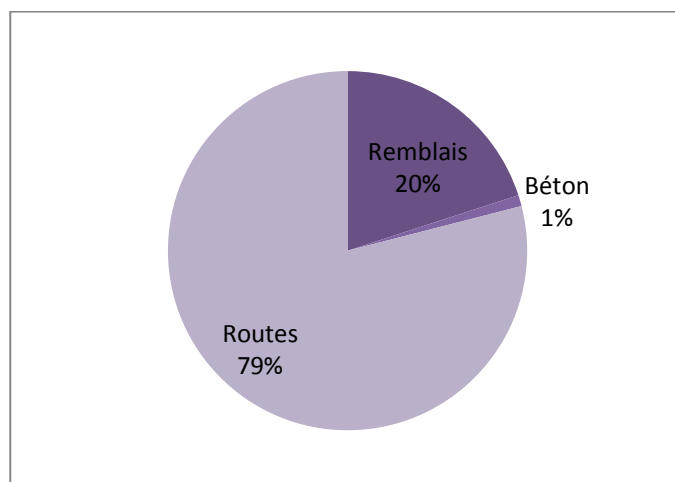


Figure 1. 4: Débouchés du granulat recyclé au Pays-Bas [16].

La Belgique produit chaque année environ 1000 kg de déchets de démolition et de construction par habitant. Cette masse de gravats se compose de 40% de béton, 41% de maçonnerie, 12% d'asphalte et 7% d'autres [17]. Dans le granulat recyclé, on distingue le granulat d'asphalte, le granulat de béton et le granulat de maçonnerie. Le résidu est composé des sables de criblage et de concassage qu'il faut considérer comme des sous-produits.

L'application des techniques de démolitions sélectives de "déconstruction" permet d'améliorer la qualité des matériaux recyclés en augmentant la quantité des matériaux de démolition et de construction et de favoriser ainsi leur valorisation.

On peut distinguer trois types de recyclage [18]:

- le recyclage in situ : les installations de recyclage sont mobiles et ils s'effectuent sur le chantier de démolition ;
- le recyclage sélectif : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ;
- le recyclage en site fixe : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site.

L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des granulats recyclés. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple, la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

En revanche, la possibilité de retrait de certaines impuretés est réduite et la qualité des granulats est irrégulière. De ce fait, le champ d'utilisation des granulats ainsi fabriqués reste limité.

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles.

En général, les installations fixes sont les plus élaborées, car elles sont les plus 'puissantes': elles peuvent traiter des matériaux de démolition et de construction variés en produisant des granulats dont la caractérisation est bien contrôlée. Les procédés techniques de production des granulats recyclés influent considérablement sur la qualité du granulat recyclé.

Le schéma de production des granulats recyclés peut être assimilé à celui utilisé pour la

production des granulats naturels concassés (réception des matériaux à traiter, scalpage, concassage et criblage).

Du fait de la nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage- criblage :

- Stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;
- Prétraitement : réduction des gros éléments, cisailage des ferrailles ;
- Déferrailage (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;
- Des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.).

1.8. Déchets en Algérie

Les conclusions et recommandations de l'étude de BET allemand Kittelberger (chargé à l'étude relative au projet de contrôle de la pollution dans le Grand Alger) remise fin 1996, qui a porté sur une aire de 53 communes, pratiquement celles constituant l'actuelle Wilaya d'Alger (à l'exclusion des communes de Ouled Chebel, Tessala el Merdja et Sidi Moussa), ont abouti à la proposition de quatre stratégies [19].

La quantification des déchets a donné les résultats suivants:

- Déchets de voirie: 40.000 t/an;
- Déchets de marchés: 80.000 t/an;
- Déchets ménagers: 657.000 t/an;
- Déchets de commerces: 80.000 t/an;
- Déchets des administrations: 90.000 t/an.

Les estimations des quantités de déchets au niveau de la wilaya d'Alger ont été présentées comme suit:

- Estimation de la quantité d'ordures ménagères:

Année	1994	1995	2000	2005
Quantité (t/j)	1.394,5	1.449,5	1.694,9	1.919,6

- Estimation de la quantité de déchets assimilables aux ordures ménagères:

Année	1994	1995	2000	2005
Quantité (t/j)	565,3	576,0	592,8	611,9

- Estimation de la quantité totale des déchets urbains:

Année	1994	1995	2000	2005
Quantité (t/j)	1.959,8	2.025,7	2.287,6	2.531,2

Au niveau national, la production des déchets spéciaux se présente comme suit:

- Production de déchets spéciaux: 325.100 t/an;
- Déchets industriels spéciaux stockés (à 2001): 2.000.000 tonnes, dont:
 - hydrocarbures (raffinage du pétrole, transport...): 34%,
 - chimie: 23%,
 - sidérurgie et métallurgie:16%,
 - secteur des mines: 13%.

1.8. 1. Les déchets de construction

Selon les estimations effectuées par une étude du CNERIB (Centre National d'Etude et de Recherche Intégrée en Bâtiment), la zone du projet PAC produirait entre 300 à 500.000 t/an de déchets inertes (dont près de 12% d'acier et 40% de béton), déversés dans des dépotoirs sauvages et des zones de gravats couvrant des dizaines d'hectares de terres agricoles de la zone du projet PAC. Le séisme de mai 2003 aurait engendré plus 2,5 millions de tonnes de déchets inertes. Mis à part le remblayage, la valorisation de déchets de construction est quasi inexistante (concassage de pierres, béton et bitume, recyclage des métaux, bois...).

1.8.2. La problématique des déchets de constructions

1.8.2.1. Résultats des travaux du Centre de recherche intégrée du bâtiment (CNERIB)

En complément à une enquête nationale menée à travers le questionnaire, une enquête de proximité a été menée, toujours dans la cadre de cette étude, au niveau des communes de Chéraga, Douéra, Beni-Messous et Souidania de la Wilaya d'Alger. Il a été constaté qu'au niveau de ces communes, les déchets de construction et de démolition ne semblent pas être

la préoccupation majeure des autorités locales, tout en reconnaissant l'enjeu que représentent ces déchets et la nécessité urgente d'agir pour leur prise en charge sur tous les plans: réglementation, gestion et valorisation.

1.8.2.2. Localisation des déchets de construction dans la partie ouest d'Alger

Dans le but d'établir une carte de localisation des déchets de construction dans une partie de l'ouest algérois, il a été constaté que les déchets sont rejetés aux abords de routes et le plus souvent à la sortie des agglomérations (aucune surveillance ni contrôle). Alors que les déchets émanant du secteur public sont généralement déversés dans les zones de gravats autorisées, les particuliers et les entreprises privées rejettent leurs déchets de démolition ou de réhabilitation de manière anarchique.



Figure1.5: Déchets des constructions à Bab El Oued.

1.8.2.3. Décharges (ou zones de gravats) de déchets de construction dans la Wilaya d'Alger

Il existe, dans la région d'Alger, deux décharges pour déchets de construction qui sont en exploitation depuis 2 ans. L'une est située à l'ouest, la décharge pour gravats de Staoueli, et l'autre à l'Est d'Alger, au Hamiz. Ces sites transformés en décharges de gravats sont d'anciennes carrières désaffectées. Vu leur emplacement géographique, ces décharges sont sensées recevoir tous les déchets de construction de la Wilaya [19].

Leur exploitation a été confiée à l’Etablissement public ASROUT (Assainissement et routes), établissement public sous la tutelle de la Wilaya d’Alger:

- La quantité de déchets mise dans ces décharges depuis leur mise en service représente environ, pour chaque décharge, 10% de leur capacité totale.
- De nombreux opérateurs préfèrent économiser le coût du transport en se débarrassant de leurs déchets le plus près possible de leur production, au risque de payer une hypothétique amende, sans souci de l’environnement.
- Les déchets réceptionnés ne sont pas triés à la source et ne le seront pas au niveau des décharges, qui servent de lieu de stockage de déchets de construction (zones de gravats).
- Des projets d’installation de traitement par concassage de ces déchets sont à l’étude.

L’entreprise exploitante des deux décharges est actuellement à la recherche de solutions technico-économiques lui permettant de valoriser ces déchets et d’augmenter ainsi la durée d’exploitation des décharges par préservation de l’espace.

La décharge de Staoueli a fait l’objet d’un suivi qui a donné une composition suivante (sur la base de l’observation de la nature et l’évaluation quantitative des déchets arrivant sur la décharge pendant une semaine. Faute de pont bascule, donc de pesage, ces évaluations restent approximatives).

Tableau 1.3: Les pourcentages des déchets de construction

Type des déchets	% en poids
Béton armé ou non	2,7
Débris maçonnerie: parpaing- Briques	20,0
Terre d’extraction + gravats	7,5
Pierre naturelle	29,5
Bois	17,3
Métal	8,0
Bitume, asphalte	7,3
Plâtre	0,5
Céramiques, tuiles	3,0
Plastiques	3,6
Papier	0,6

1.8.3. Déchets de chantiers générés en phase de réalisation

L'estimation de ces déchets peut être déterminée en considérant que lors de la réalisation d'un logement, celui-ci peut engendrer une quantité de déchets d'environ 5% du poids total de la bâtisse. En partant de l'hypothèse du poids moyen d'un logement (type F3) d'environ 130 tonnes (y compris le poids des fondations), on obtiendra ainsi 6,5 tonnes de déchets par logement. Pour une livraison moyenne de 150 000 logements/an, on aura un total d'environ 1 million de tonnes de déchets inertes. Les divers équipements d'accompagnement, infrastructures scolaires, administratives, hospitalières et autres, représentent un nombre d'équivalent logement égal au tiers du nombre des logements réalisés, ils génèrent annuellement environ 0,33 millions supplémentaires de tonnes de déchets annuels.

1.8.4. Déchets de démolition et de réhabilitation

Leur quantité se situe aux alentours de 5 à 10% du chiffre global des déchets de construction produits annuellement.

Tableau 1.4: Quantité des déchets mis en décharge

Type de déchets mis en décharges	Quantité en millions de tonnes /an
Déchets issus de chantiers de bâtiment	1,330
Déchets issus de travaux de transformation de logements	0,113
Déchets issus de démolition, réhabilitation	0,400
Déchets issus de la fabrication des matériaux de construction	0,350
TOTAL	2,200

Des travaux de modification et/ou d'extension sont souvent exécutés sur des logements individuels. Par exemple, si on considère que 30% (soit 45.000 logements pour une livraison moyenne de 150 000 logements/an) subissent ce genre de transformations, et que chacun de ces logements produit en moyenne 2,5 tonnes de déchets, on obtiendra l'équivalent de 112.500 tonnes de déchets à mettre en décharge [19].

1.8.5. Déchets de fabrication de matériaux de construction

La fabrication de ces éléments (produits de terre cuites et parpaings de ciment) n'est pas soumise à des contrôles externes et leur processus de fabrication vieillissant n'est plus performant. Cette situation entraîne donc des pertes importantes en matière qui varient, selon les usines, de 5 à 10% de la production totale de ces éléments.

1.8.6. Impact du séisme du 21 mai 2003

Les estimations ci-dessus ne concernent pas les déchets provenant des constructions endommagées par le séisme du 21 mai 2003 qui a touché les constructions des wilayas du centre (Boumerdès, Alger et Tizi-ouzou). Cette catastrophe naturelle a engendré des quantités importantes de débris et gravats de constructions. Ce violent séisme a généré des dizaines de milliers de tonnes de déchets de construction.



Figure1.6: Construction après démolition à Birkhadem.

Selon les données fournies par le CNERIB :

Estimatif des tonnages des déchets produits à Boumerdès et Alger:

- tonnage moyen d'un logement démoli: 130 tonnes par unité de logement (F3 en moyenne),
- nombre de logements démolis à Boumerdès: 16.000 (tonnage produit: 2.080.000 tonnes),

- nombre de logements démolis à Alger: 4.000 (tonnage produit: 520.000 tonnes), soit un total d'au moins 2,5 millions de tonnes de déchets inertes, dont:
- 1 million de tonnes de béton,
- 30.000 tonnes d'acier.

Les déchets de construction de la wilaya de Boumerdès sont en grande partie mis en décharge dans des zones de gravats situées en bordure de mer et dans toutes les villes durement touchées par le séisme, à savoir Boumerdès, Zemmouri, Thenia, Bordj Ménaël, Corso, Boudouaou,A Alger, les déchets sont répartis en plusieurs endroits notamment à la Rassauta, près de Rouiba. Les superficies globales occupées par les dépotoirs de ce type de déchets est d'au moins 100 hectares soit un kilomètre carré et ce, sur l'ensemble de la zone du PAC.

Les dépotoirs ainsi créés dénaturent le paysage notamment le littoral, abîment des zones boisées et les terres agricoles. Dans la plupart des cas, ces dépôts de gravats se transforment en véritables décharges où sont déversées des ordures ménagères et autres détritiques.

Le risque sismique n'engendre pas de pollutions chimiques ou biologiques mais il est source de poussières qui persistent longtemps après les dégâts occasionnés par les secousses. La mauvaise gestion des déchets de démolition et leur évacuation ne fait qu'augmenter les désagréments des populations affectées.

Une hypothèse peut être émise quant au risque sismique qui pourrait constituer un facteur aggravant pour la pollution des nappes aquifères par les lixiviats de décharges publiques situées sur des sols qui subiraient des fissurations. En outre, après des secousses de forte sismicité, les zones sinistrées connaissent des problèmes d'évacuation des ordures ménagères pendant une certaine période, ceci nécessite des mesures sanitaires spécifiques notamment au niveau des camps de toiles des sinistrés.

Chapitre : 2

Granulats et béton recyclés

2.1. Introduction

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne [20] [21]. 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. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits : «Granulats Recyclés », et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : « Béton Recyclé ».

Cependant, les granulats recyclés fabriqués par les déchets de démolition des constructions dont plusieurs déchets autre que le béton tels que : le plâtre, la brique, le bois, le plastique, les métaux, les papiers etc. Après la séparation et le tamisage on peut les utiliser comme substitue des gros granulats naturels dans le béton.

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

En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont [22], [23], [24] :

- Des granulats naturels concassés partiellement,
- De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.



Figure 2.1: Compositions des granulats recyclés de béton [22].

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente. En effet, le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial appelé béton parent dans la littérature [24].

Les propriétés de la pâte de ciment sont à l'origine des éventuelles mauvaises propriétés des granulats recyclés constatées [22]. En effet, les propriétés physiques des granulats recyclés dépendent de la quantité et la qualité de pâte de ciment présente sur les granulats concassés [25].

Des études montrent que la densité de ces granulats recyclés est plus faible ou encore que leur capacité d'absorption est plus élevée [24].

De plus, leurs propriétés mécaniques s'avèrent être moins bonnes que celles des granulats naturels [22]. La qualité de la pâte de ciment du béton parent est primordiale dans la définition des propriétés des granulats recyclés selon les auteurs.

2.2. Matériel de production :

D'une façon générale, les déchets inertes de démolition peuvent être traités dans des installations spécialement conçues à cet effet. Elles peuvent être de trois types [26]:

- Mobile : les installations sont montées sur remorque ou semi-remorque et peuvent être transportées aisément d'un lieu d'intervention à un autre,
- Semi-mobile : les installations sont montées sur des structures métalliques et peuvent être déplacées sans problème moyennant des engins de manutention appropriés,
- Fixes : les installations sont montées sur fondations.

Le choix du type d'installations dépend essentiellement des quantités disponibles à un endroit donné. Il va de soi que les installations semi-mobile et fixe peuvent avoir des capacités limites plus importantes que les installations mobiles. Elles sont aussi mieux équipées afin de produire un recyclés de qualité. Les éléments principaux d'une installation de recyclage de déchets de démolition et de construction sont les suivants :

- Réception des matériaux à traiter ;
- Concassage (primaire et éventuellement secondaire ;
- Extraction du fer par bande électromagnétique ;

- Séparation des matériaux légers : papier, carton, caoutchouc, matière plastique, ...etc ;
- Criblage suivant la granulométrie désirée.

Généralement, les matériaux réceptionnés sont stockés selon leur qualité et leur facilité de traitement .ils sont composé à 93% de matériaux propres et à 60% de béton propre.

Il existe des modes de traitement spécifiques de certains déchets de voiries. Le retraitement au ciment des chaussées en place est, par définition, une amélioration ou une remise en état de la fondation existante [27], il présente avantage environnemental considérable d'éviter complètement le transport en assurant le traitement complet sur le site.

Le choix des concasseurs à utiliser est très important : la qualité, la quantité et la granulométrie des granulats recyclés en dépendent en partie. Pour la fragmentation des déchets qui est souvent réalisée en une ou plusieurs étapes, différents types de concasseurs appelés aussi broyeurs ou granulateurs peuvent être envisagés.

2.2.1. Concasseur à mâchoire

Avec ce type de concasseur, le matériau est cassé par pression entre deux mâchoires, une fixe et l'autre en mouvement. Ce concasseur a tendance à produire des agrégats de forme plate (surtout pour la maçonnerie). Il est, de ce fait, peu indiqué comme concasseur secondaire par contre, c'est le type de concasseur qui produit le moins de particules fines (10 % max).

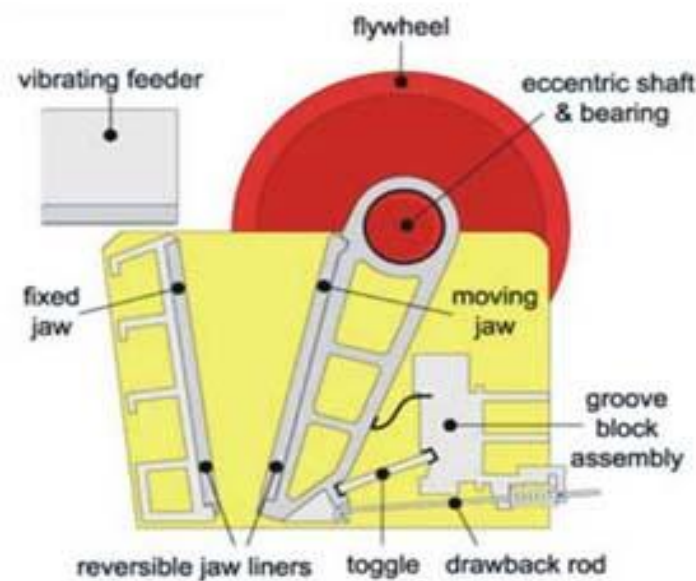


Figure 2.2: Concasseur à mâchoire.

2.2.2. Concasseur d'impact (percussion)

Le concasseur d'impact écrase des matériaux par la force d'impact. Lorsque les matériaux entrent dans la zone du contrecoup, ils sont écrasés en raison de la grande vitesse d'impact du coup de la barre et sont jetés pour l'écrasement secondaire. Et puis, les matériaux seront tirés une nouvelle fois à la barre pour le troisième écrasement. Ce processus reprend jusqu'au moment où les matériaux sont écrasés à la taille requise et déchargés par l'ouverture en bas de la machine. La taille et la forme du produit fini peuvent être changées par l'ajustement d'écart entre l'impact et le support de rotor. La machine utilise un dispositif de l'auto-évaluation de sécurité dans le cadre en arrière, lorsque d'autres objets ne peuvent pas être écrasés dans la cavité de concassage, le dispositif peut être cassé, et l'espace entre le rotor et les plaques s'élargisse, les objets seront contraints de sortir de la machine par le rack d'impact à l'avant et l'arrière de la machine.

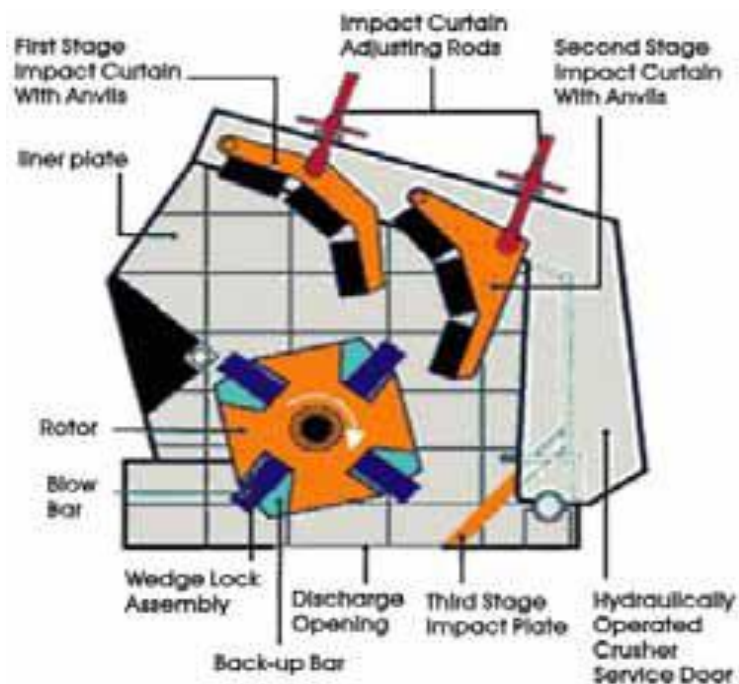


Figure 2.3: Concasseur d'impact (percussion).

2.2.3. Concasseur à cône (giratoire)

Le concasseur consiste en un cadre d'équipement, un dispositif de transmission, arbre excentrique creux, roulement en forme de cuvette, cône de concassage, la station des ressorts de pression hydraulique pour réglage de l'ouverture de décharge. Quand il

fonctionne, le moteur pousse l'arbre excentrique à tourner par un axe horizontal et une paire d'engrenage.

L'axe du cône d'écrasement se balance avec la force de l'arbre excentrique afin que la surface du mur de concassage soit à proximité de la surface du mur de mortier de temps en temps. De cette façon, les minerais et les pierres seront pressés, tordu et écrasé.

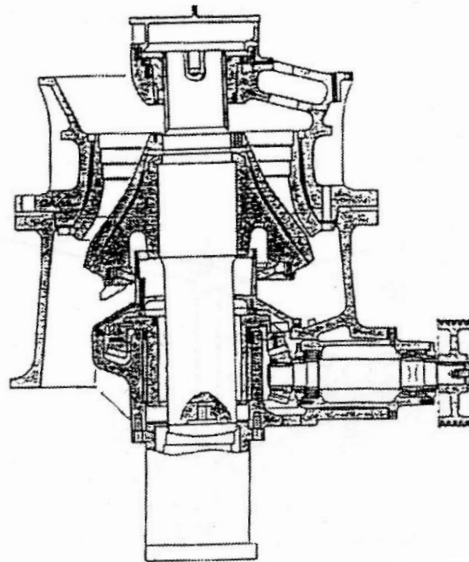


Figure 2.4: Concasseur à cône (giratoire).

2.2.4. Concasseur à marteaux

La partie principale de travail du concasseur à marteaux est le rotor avec des marteaux. Le rotor composé de l'arbre principal, disque, culasse d'arbre et des marteaux. Le moteur pousse les rotors à tourner à grande vitesse dans la cavité de concassage.

Les matériaux entre par l'ouverture d'alimentation, et ils sont broyés par les marteaux à grande vitesse. Il y a un crible sous le rotor, les matériaux avec la taille plus petite que la maille de l'écran seront éliminés et les autres sont laissés pour être encore concassés jusqu'à atteindre la taille standard. La taille du produit final peut être ajustée en changeant le crible. L'espace entre les rotors et la plaque du crible peut également être ajustée en fonction de différentes conditions.

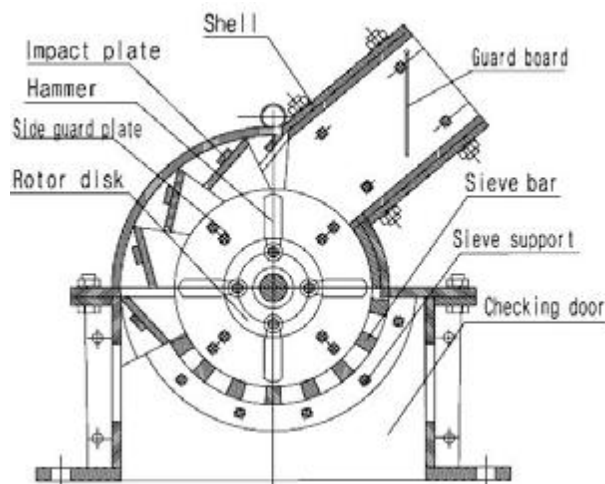


Figure 2.5: Concasseur à marteaux.

2.3. Concassage et tri sélectif

Les méthodes de production des granulats recyclés doivent distinguer la phase de déconstruction et la phase d'élaboration. L'une et l'autre font appel à des procédés devant être adaptés d'une part à l'ouvrage « ressource » et d'autre part au matériau récupéré. Le choix de ces procédés conditionne les propriétés du matériau et les performances du produit fabriqué ultérieurement.

2.3.1. Déconstruction sélective et tri

De nombreuses études ont permis de démontrer la faisabilité technique et économique de la déconstruction sélective [28].

Les déchets inertes représentent théoriquement 94% des déchets de l'activité déconstruction mais en réalité, ce taux n'est que de 60% car certains déchets non inertes ne peuvent être séparés des autres : restes de plâtre sur les bétons, présence d'éléments de second œuvre comme le bois et les plastiques qui n'ont pu être retirés des murs [29]. Or à ce jour, si la valorisation du béton pur atteint un taux de 77,7%, le taux de recyclage des déchets inertes en mélange atteint tout juste les 12% [30]. Cette situation devrait être améliorée car les plans de gestion des déchets du BTP recommandent de faire réaliser un diagnostic déchets de l'ouvrage à démolir. [31,32]. De plus la Directive européenne 2008/98/CE impose d'atteindre l'objectif de 70% en poids pour le réemploi des déchets non dangereux de construction et de démolition d'ici 2020. C'est aussi par la conception

des nouveaux ouvrages en prenant en compte leur future déconstruction et par le tri que l'on pourra améliorer le taux de recyclage [33,34].

Bien que réel, le surcoût induit par la déconstruction sélective (accroissement de la durée de la déconstruction, multiplication des opérations et augmentation de la main-d'œuvre), n'est plus, dans beaucoup de cas, un obstacle car aujourd'hui toute déconstruction doit être précédée d'un audit avec inventaire systématique et complet des matériaux et identification des filières locales de recyclage. L'existence de ces filières locales justifie une déconstruction fine et un tri poussé [29].

2.3.2. Elaboration des granulats recyclés

L'élaboration des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que les installations pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Un prétraitement spécifique doit cependant être exécuté. Il consiste à réaliser le cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments.

Le concasseur à percussion présente une meilleure réduction de la granulométrie (avec moins d'éléments fins) et facilite la séparation des armatures du béton mais l'usure du matériel est importante et la granulométrie d'entrée limitée [35]. Il permet également d'obtenir une meilleure cubicité du matériau sortant [18].

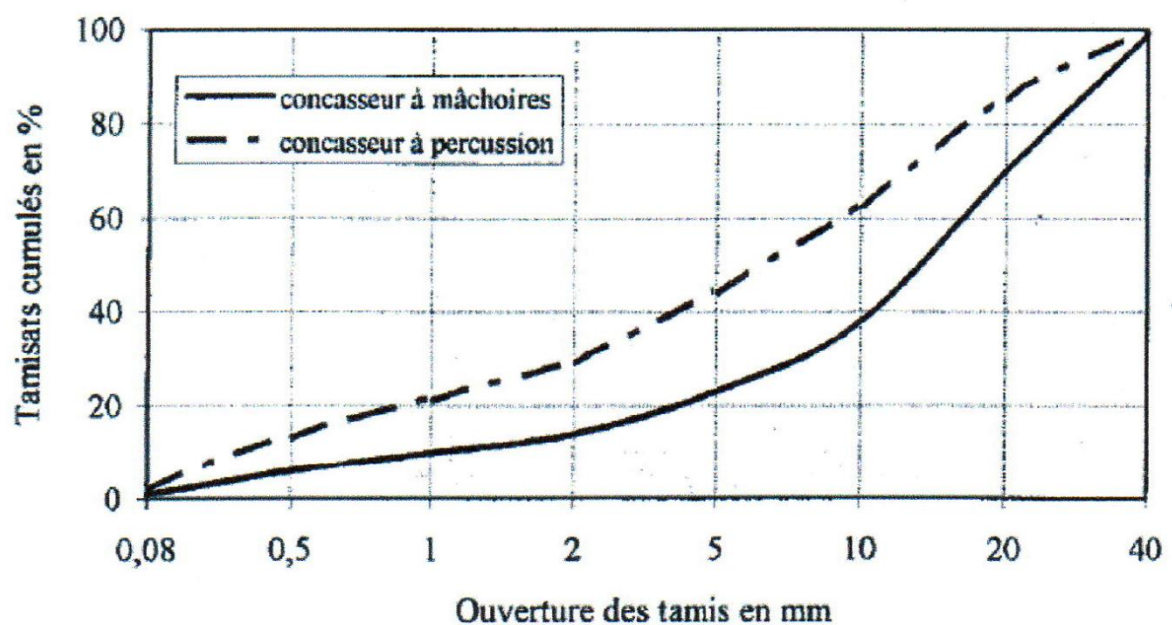


Figure 2.6: Courbes granulométriques de graves recyclées en sortie de concasseurs à mâchoires et à percussion [18].

2.3.3. Élimination des polluants

En ce qui concerne les appareillages spécifiques à l'amélioration des granulats recyclés, on trouve tous les appareillages ou méthodes permettant d'éliminer les impuretés. Ces impuretés sont principalement du métal (élimination manuelle ou par séparateur magnétique), du bois (élimination par voie humide), du plâtre (tri manuel), du carton ou papier, du plastique (élimination par air). L'élimination des contaminants légers peut se faire par flottation du type « Aquamator » [18].

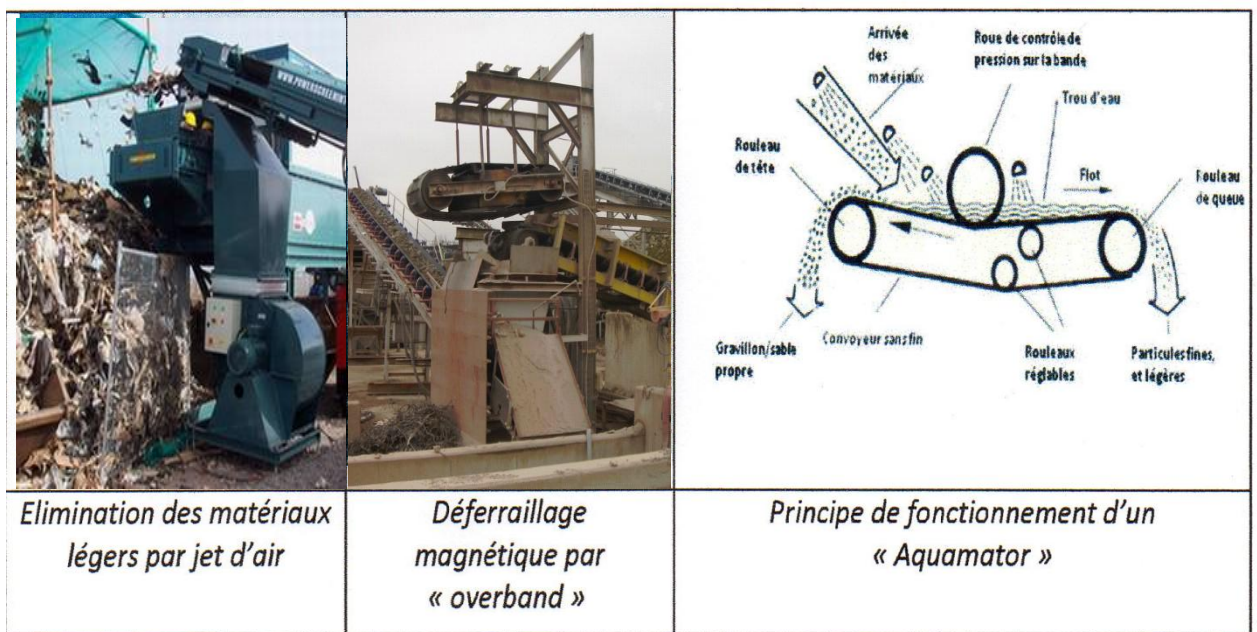


Figure 2.7 : Les appareillages d'élimination des impuretés.

Pour l'élaboration des granulats recyclés, il décrit, en fonction des entrants et de l'usage souhaité pour les granulats recyclés, les matériels nécessaires pour les élaborer.

La plus grande difficulté actuelle concerne la séparation des grains de leur gangue de mortier. Des méthodes plus innovantes sont en cours de développement dans différents pays. En Allemagne, une méthode a été développée pour séparer le mortier des granulats à l'aide d'impulsions sonores générées par des décharges électriques en milieu aqueux [36]. Une méthode thermique est également testée [36]. Des travaux similaires, menés par Larbi [37], ont porté sur le traitement thermique de granulats siliceux. Ils montrent qu'un traitement à une température supérieure à 600°C permet d'abaisser la teneur en pâte de

ciment de 55% à 5%. Wan et al [38], propose des lavages, applicables à des granulats de type siliceux dans des milieux acides dilués : HCl, H₂SO₄ et H₃PO₄. Enfin, il est proposé également de s'affranchir de « désordres » dus à la présence du mortier (absorption) en réalisant une imprégnation du granulat recyclé par un polymère (alcool de polyvinyle) pendant 24 heures [39].

Il faut toutefois souligner que ces méthodes n'ont pas été appliquées à l'échelle industrielle.

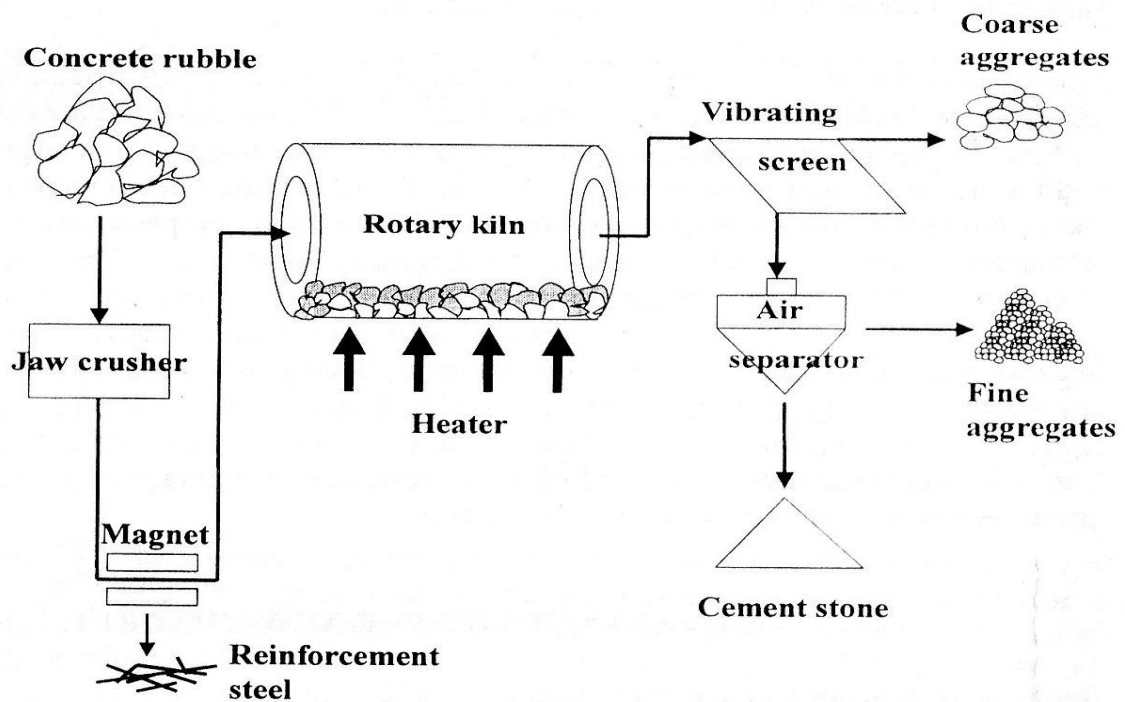


Figure 2.8 : Schéma du procès de traitement mécanique et thermique des déchets de démolition [36].

2.4. Aspects Réglementaires et normatifs

2.4.1. Les normes granulats

Les normes européennes sur les granulats traitent des granulats recyclés dans les normes d'essais et dans les normes de spécifications. La plupart des normes d'essais sur granulats naturels s'appliquent également aux granulats recyclés, mais certaines normes d'essais ont été développées spécifiquement pour répondre aux problématiques particulières aux granulats recyclés.

La classification des constituants des granulats recyclés (NF EN 933-11, 2009) [40] permet de classer les constituants principaux (béton, granulats non liés, briques, ...) et les polluants (bois, verre, plastique, ...) en fonction de leur pourcentage en masse. Pour les éléments légers (flottants), ceux-ci sont mesurés en volume (cm^3/kg). Cette norme vient en remplacement de la classification pétrographique des granulats naturels [41].

La teneur en sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1, 2010) [42] a été développée dans l'article 10.2 de la norme NF EN 1744-1 sur la base d'un essai français préexistant. Elle permet de déterminer la présence de plâtre dans les granulats recyclés.

La teneur en chlorures solubles dans l'acide (NF EN 1744-5, 2007) [43] permet de prendre en compte les chlorures présents en surface du granulat recyclé et ceux présents dans la phase mortier du granulat recyclé.

Certains constituants des granulats recyclés sont susceptibles de modifier le temps de prise du béton (accélération ou retard); une norme d'essai a été mise au point [44], pour quantifier ces modifications.

En ce qui concerne les autres caractéristiques des granulats, la plupart des méthodes de mesure doivent être examinées pour vérifier s'il est nécessaire de les adapter aux granulats recyclés. C'est le cas pour la plupart des caractéristiques liées à la durabilité (gel/dégel, alcali-réaction, retrait au séchage,...) mais aussi d'autres essais plus classiques comme l'analyse granulométrique, le Los Angeles, l'absorption d'eau,... [45].

Pour les granulats pour bétons, la norme de spécifications [46], introduit des exigences sur les granulats recyclés en ajoutant des catégories pour certains essais (LA, MDE, ...) à celles existantes pour les granulats naturels et en faisant référence aux essais des 4 normes spécifiques aux granulats recyclés.

Pour les granulats pour mortier, la norme de spécifications [47], n'a pas été modifiée et n'offre donc pas la possibilité d'utiliser des granulats recyclés.

En ce qui concerne la norme française de codification des granulats (XP P 18-545, 2008) [48], si elle incorpore déjà les granulats recyclés dans le champ d'application, seul l'essai supplémentaire de teneur en sulfates solubles dans l'eau est spécifié. Elle est actuellement en cours de révision (NF P 18-545, 2010) [49], pour introduire toutes les spécificités relatives aux granulats recyclés et devrait paraître dans le courant de l'année 2011. Pour les

usages béton, les spécifications retenues dans la version soumise à l'enquête concerneront les teneurs suivantes :

- Rcu: teneur en béton, mortier, granulats non liés et matériaux routiers traités aux liants hydrauliques ;
- Rb: teneur en briques, tuiles, autres éléments de terre cuite et en béton cellulaire
- Ra: teneur en enrobés ;
- XRg: teneur en matériaux autres non flottants: plâtre, plastique, bois, métal, et en verre ;
- FL: teneur en éléments flottants (mesurée en volume).

Ainsi que les sulfates solubles dans l'eau, les chlorures solubles dans l'acide (valeur à déclarer) et la modification du temps de prise.

2.4.2. Autres caractéristiques: identiques aux granulats naturels

Les produits entrant dans la fabrication du béton sont soumis à l'actuelle directive produits de construction (89/106/CE), qui sera remplacé prochainement par une réglementation européenne. Ce nouveau texte introduit l'exigence d'utilisation durable des ressources naturelles au travers des produits constitutifs du béton (granulats, ciments, ...). Cette réglementation préconise en particulier la réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition ainsi que la durabilité des ouvrages de construction. L'ensemble des normes harmonisées de produits constitutifs du béton sera revu à l'aune de cette réglementation.

2.5. Les caractéristiques d'ancien mortier

Les granulats recyclés de béton diffèrent principalement des granulats naturels en ce qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. La détermination de la quantité de cette dernière dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de concasseur utilisé pour le concassage : le concasseur à mâchoire élimine mieux la pâte d'ancien ciment que le concasseur à percussion [18].
- Le concassage secondaire contribue à une réduction énorme de la pâte de ciment.
- La qualité d'ancien béton : le pourcentage de vieux mortier attaché aux particules de gravier naturels dans les granulats recyclés croît en fonction de la résistance du béton originale.

Des chercheurs ont trouvé que le pourcentage de la gangue d'ancien mortier de ciment d'environ 35.5% ,36.7% et 38.4% respectivement pour un béton originale de résistance à la compression de 24Mpa, 41Mpa et 51Mpa [50].

Selon Hansen [50], le pourcentage de la pâte de ciment d'ancien mortier attaché aux granulats recyclés décroît quant les dimensions des granulats croient.

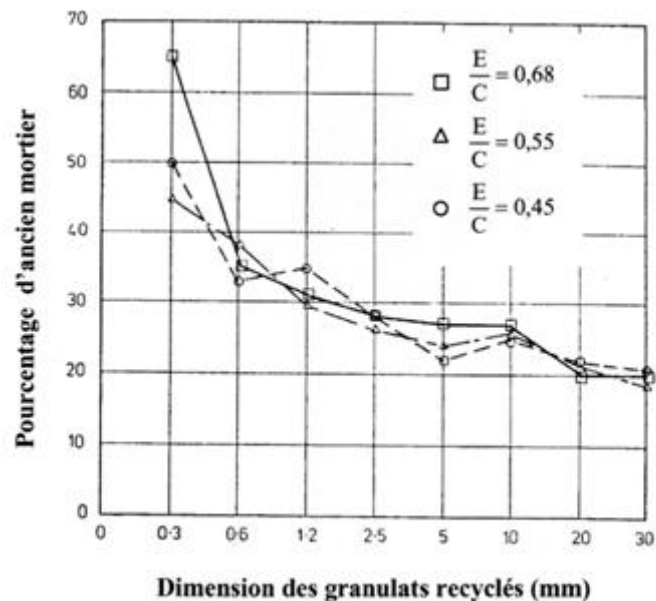


Figure 2.9 : le pourcentage en poids de la pâte de ciment d'ancien mortier attaché aux granulats recyclés [50].

2.5.1. La densité

Puisque les granulats contiennent des pores, communicants ou non, le terme densité doit être défini avec précision. La densité absolue correspond au volume de matériau solide excluant tout les pores et peut par conséquent être définie comme le rapport de la masse de solide à la masse d'un volume égal d'eau distillée sans gaz, tous deux étant pris à une température donnée.

Les masses volumiques des granulats naturels varient généralement entre 2000 à 3000 kg/m³, par contre la densité des granulats recyclés à base de béton démoli est inférieure de l'ordre 19% pour les granulats fins et 5% pour les gros granulats [51].

Cette chute est due principalement à la densité faible d'ancien mortier attaché aux granulats recyclés.

Kenai et al [52], ont trouvé que la masse volumique des granulats recyclés est de l'ordre 2505 kg/m³ pour le gravier et de 2533 kg/m³ pour le sable recyclés, indépendamment de

la qualité du béton original dont les masses volumiques de gros et fins granulats naturels étaient respectivement de 2822 kg/m³ et 2987 kg/m³.

D'autres études menées sur le sujet [53,54], ont révélé des valeurs de masses volumiques entre 2300 kg/m³ et 2500 kg/m³ pour les gros granulats recyclés et entre 2000 kg/m³ 2300 kg/m³ pour les fins granulats recyclés.

2.5.2. Absorption d'eau

Les granulats recyclés de bétons ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption d'eau. Cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent [22], [25].

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions des bétons de granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels.

Dans le tableau 2.1, sont résumés quelques résultats des études antérieures sur le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés.

Tableau 2.1 : coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels et recyclés

	Coefficient d'absorption d'eau (%)			
	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	gros	fins	gros	fins
Yanagibashi et al [55]	0,79	-	2,73	-
Evangelista-brito [56]	-	0,8	-	13,1
Bélen Gonzalez [57]	1,95	-	5,01	-
Fonseca [58]	1,3	-	6,1	-
Cabral [59]	1,22	0,42	5,65	7,55
Mulder [60]	1,13	1,49	6,8	8,16
Debieb et al [61]	0,37	0,28	4,92	9,20
Debieb –Kenai [62]	1,5	1	11,5	14
S.C.Kou- C.S.Poon [54]	-	0,88	-	11,86
Shi-Cong Kou et al [53]	1,12	-	7,42	-
Berredjem-Arabi [63]	0,73	1,91	6,25	7,09

Cette absorption est bien évidemment la conséquence de la présence de la pâte de ciment, mais plus particulièrement de sa structure alvéolaire [63]. En effet, la pâte de ciment est reconnue pour être un matériau poreux. Les interstices ont tendances à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment.

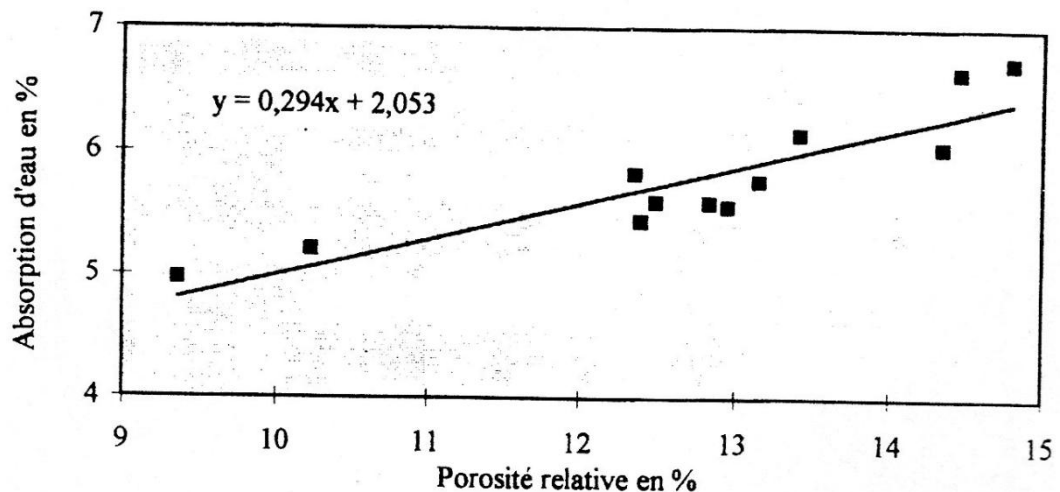


Figure 2.10: Corrélation entre l'absorption d'eau et la porosité relative des granulats recyclés [18].

L'absorption élevée des granulats recyclés peut influencer négativement sur les propriétés du béton à base des granulats recyclés. Par conséquent les différentes normes limitent le pourcentage d'absorption d'eau de 5 à 10%. La norme française NF P18-554 [76] limite le taux d'absorption d'eau à 5%, la norme ISO 6783 donne une limite de 10% pour les granulats recyclés, tandis que la norme japonaise prescrit 7% pour les gros granulats et 13% pour les fins recyclés.

2.5.3. La porosité

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des granulats recyclés est liée à 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 [64].

Grâce à des analyses microscopiques, Tam et al [65], 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.

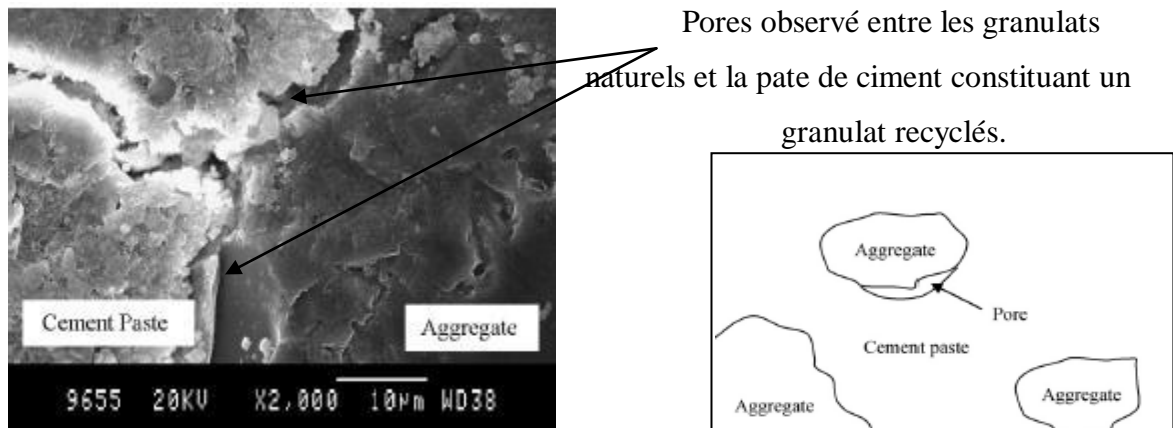


Figure 2.11: Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton [65].

Ces pores engendrent une forte porosité des bétons de granulats recyclés [65]. L'absorption des bétons recyclés augmente proportionnellement avec le taux de granulats recyclés, tandis que la densité des bétons décroît légèrement [66].

Des problèmes de durabilité des bétons de granulats recyclés sont directement liés à la capacité d'absorption et donc à la porosité des bétons de granulats recyclés. En effet, un grand nombre de phénomènes agressifs comme l'alcali-réaction, le gel-dégel... sont favorisés lorsque l'absorption des bétons est élevée [67].

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 granulats recyclés, 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 [67]. Ce résultat souligne une proportion en volume plus importante des pores capillaires dans des bétons de granulats recyclés.

D'autres études, notent l'importance du volume des gros pores dans la répartition porométrique des bétons recyclés [60].

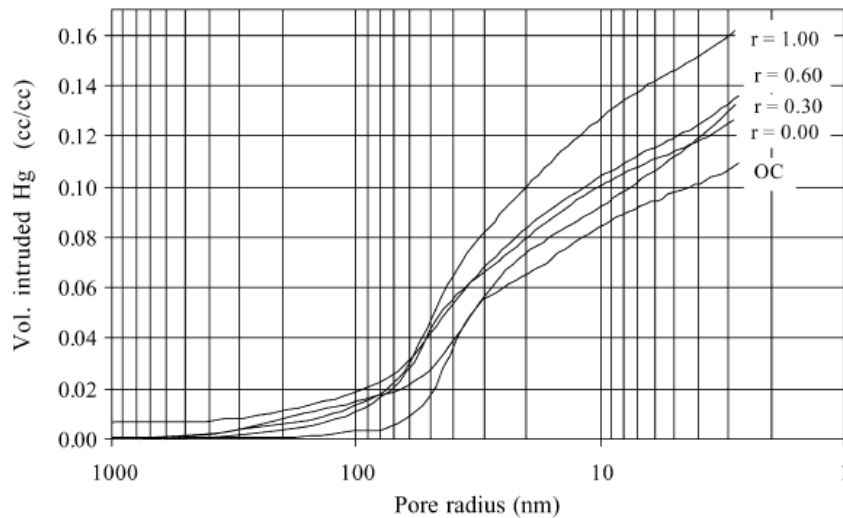


Figure 2.12: Distribution porométrique, bétons à 28 jours ($r=1$: béton composé de 100% de GR; $r=0,60$: béton de 60% de GR ; $r=0,30$: béton de 30% de GR ; $r=0,0$: béton de 0% de GR [67]

2.5.4. La résistance mécanique

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles (LA). Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient Los Angeles est faible, plus la résistance des gravillons est élevée.

Debieb et al [52], ont trouvé que le coefficient de Los-Angeles des granulats recyclés, est de l'ordre de 34% pour les granulats 7/14mm et de 36% pour les granulats 14/20mm, par contre la dureté des granulats naturels des deux classe granulaire étaient respectivement de 22% et 24%.

D'autres recherches menées sur le sujet, ont trouvé des valeurs de Los Angeles comprise entre 34 à 38% pour les granulats recyclés et entre 23 à 30% pour les granulats naturels [64, 72], ces résultats restent acceptables par rapport à la limite exigée par la norme NF P18-573 qui est de 40%.

La présence d'ancien mortier dans les granulats recyclés réduit la résistance aux chocs, à l'usure et au gel [18 ,68].

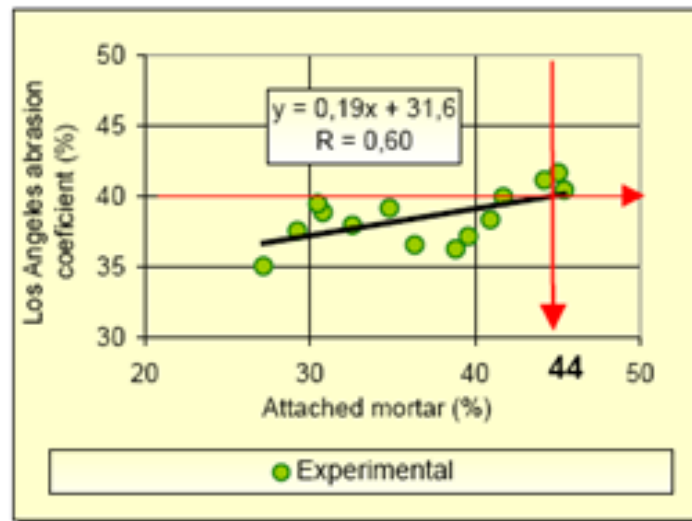


Figure 2.13 : Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles [68].

2.6. Le béton à base de granulats recyclés

2.6.1. Le Bétons recyclés à l'état frais et durcissant

Par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de granulats recyclés présentent des particularités de formulation :

- La masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier ;
- La granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- Les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace ;
- Cette demande en eau efficace peut être traitée soit par un volume de pâte plus élevé (se traduisant par un supplément d'eau de 5 à 15 % d'après la littérature [50]), soit par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants utilisés en réducteur d'eau, soit enfin par une combinaison de ces deux stratégies ;
- La demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés. Dans les cas où les granulats sur stock ne sont

pas saturés en eau, une reprise d'eau des granulats dans le mélange intervient dans les heures qui suivent le malaxage. Pendant le durcissement, en cas d'auto-dessiccation, un mouvement inverse de l'eau (des granulats vers la matrice) peut intervenir ;

- Quelle que soit la stratégie de formulation, l'obtention d'une résistance finale passe par des rapports eau/liants égaux ou plus faibles qu'avec des granulats naturels, et implique des dosages en liants neufs plus importants, sans parler des liants anciens qui viennent encore augmenter la proportion de pâte de ciment durcie dans le mélange final ;
- Enfin, le béton peut contenir en quantité notable certaines espèces génératrices de gonflement, et notamment les sulfates, résidus de plâtre adhérent à certains granulats recyclés – même si ces matériaux sont, en principe, écartés des stocks destinés à la réutilisation.

Les connaissances disponibles sur les relations entre la composition des bétons et leurs propriétés d'usage laissent ainsi augurer d'un certain nombre de tendances, qu'on énumère dans les paragraphes suivants. Ces tendances sont parfois confirmées par la littérature, alors que cette dernière est encore rare pour certaines propriétés.

2.6.2. Masse volumique à l'état frais

Elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 kg/m³ [58].

2.6.3. Ouvrabilité du béton :

Si l'on substitue des granulats naturels par des granulats recyclés, on constate une perte de maniabilité. Cependant, la formulation est généralement mise au point avec un objectif de consistance initiale (exprimée sous forme d'affaissement au cône). Tout l'éventail des valeurs d'affaissement est a priori envisageable avec des matériaux recyclés, avec des dosages en eau plus forts que pour les bétons ordinaires. Par contre, les possibles phénomènes d'absorption d'eau différée par les granulats (dont l'essentiel se produit dans les 15 premières minutes de la vie du béton) et l'utilisation d'adjuvants, en présence d'impuretés diverses modifiant la chimie de l'hydratation précoce, augmentent le risque de perte rapide de maniabilité [61]. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par

immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation en béton prêt-à-l'emploi [50]. Enfin, dans les cas où l'on utilise des superplastifiants, il faut s'attendre à des valeurs de viscosité plastique plus élevées que dans les bétons ordinaires, sauf si les mélanges contiennent beaucoup de fines.

2.6.4. 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 [50], mais l'usage de superplastifiant agit dans le sens inverse.

2.6.5. Problème des fines du sable recyclé

L'absorption d'eau élevée des sables recyclés conduit à une augmentation du rapport E/C, 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 [50].

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. [50]. Le remplacement de fines recyclées par le sable naturel facilite la mise en œuvre des bétons.

Des études de formulations ont été effectuées [70], afin d'utiliser un adjuvant afin de réduire l'apport en eau. Il a été montré que la quantité d'adjuvant nécessaire pour obtenir des valeurs similaires d'affaissement est plus importante pour un béton de granulats recyclés que pour un béton mixte et un béton classique.

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

2.6.6. Les Propriétés mécaniques du béton durci

2.6.6.1. La résistance à la compression

C'est la contrainte maximale admissible pour un matériau soumis à une charge d'écrasement.

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels.

Kenai et al [52], ont trouvé une diminution de la résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 10% à 20% lors du remplacement de 100% des gros granulats recyclés, et 10% à 30% lors de substitution des granulats fins recyclés, et jusqu'à 35% pour le béton à base de gros et fins granulats recyclés.

Les figures suivantes montrent l'évolution de la résistance à la compression des différents mélanges.

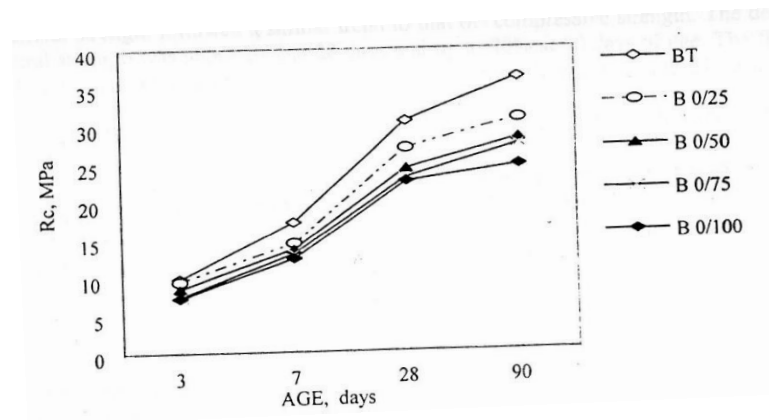


Figure 2.14 : Le développement de la résistance à la compression avec substitution des gros granulats recyclés.

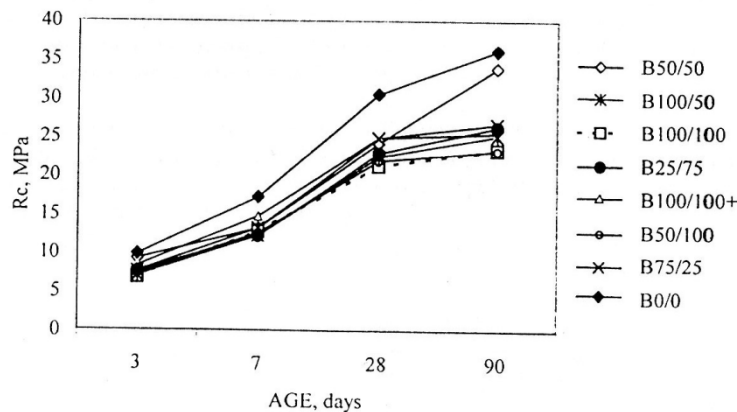


Figure 2.15 : Le développement de la résistance à la compression avec substitution des gros et fins granulats fins recyclés [52].

Cette réduction de la résistance à la compression est due principalement à la présence d'ancien mortier dans les granulats recyclés qui affecté l'hydratation du ciment.

Par contre Hansen [50] a remarqué que la résistance des granulats recyclés soit un facteur limitatif, ce n'est pas le facteur déterminant des bétons à base des granulats recyclés.

De façon générale les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend: Du taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et de sable inférieur à 30% [54], des paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C et de la qualité du béton de démolition dont les granulats sont issus.

2.6.6.2. La résistance à la traction

Les résultats issus des essais de traction uniaxiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [39].

Zaharieva et al [71], Ont montré que la réduction de la résistance à la traction du béton à base des granulats recyclés est de l'ordre 20 à 40% par rapport au béton à base des granulats naturels, par contre d'autres chercheurs comme Hansen et Ravindraradjah [50,72], ont trouvé que la résistance à la traction des deux bétons (naturels et recyclés) est comparable.

2.6.6.3. Le module d'élasticité

Par rapport aux bétons à base de granulats naturels, le module d'élasticité des bétons à base de granulats recyclés reste plus faible par rapport aux bétons témoins.

Plusieurs chercheurs ont trouvé que la chute de module d'élasticité des bétons à base de granulats recyclés est d'environ 15 à 40% par rapport aux bétons à base des granulats naturels [50, 71,72].

La baisse de module d'élasticité du béton à base de granulats recyclés est due aux anciens mortiers attaché aux granulats recyclés, qui diminué le module élastique de ces derniers.

Zaharieva et al [71], ont justifié cette diminution aussi par le développement des microfissures dans les granulats lors de concassage.

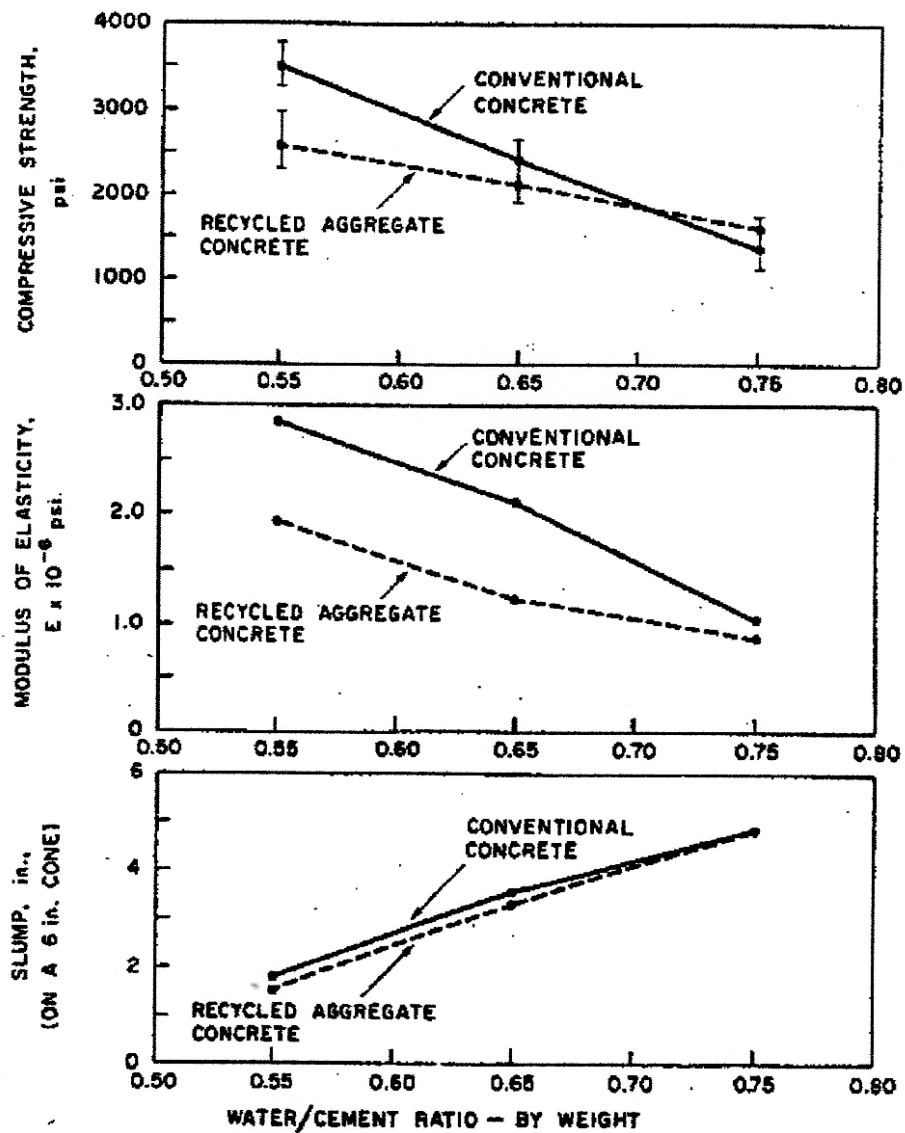


Figure 2.16 : Comparaisons entre bétons fabriqués à partir de granulats naturels et recyclés

[26]

2.7. 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.

Etude expérimentale

Chapitre : 3

Matériaux et procédures expérimentales

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout d'abord à la présentation des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition de béton à base de granulats recyclés et ensuite, les méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre étude expérimentale.

3.2. Matériaux utilisés

Le comportement du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges et les proportions avec lesquelles ils entrent dans les compositions.

Le béton est constitué de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants ou d'ajouts. Les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux d'études sont également présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais.

3.2.1. Ciment

Dans la présente étude, nous avons utilisé un seul type de ciment pour confectionner les éprouvettes des bétons. Le ciment utilisé est un ciment portland artificiel de type CEM II/A 42.5 N, produit par la cimenterie de M'SILA de la société Lafarge, qui est un ciment apte à être utilisé pour la fabrication des bétons à hautes performances. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM II/A 42.5

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
61,74	20,92	5,33	3,43	1,58	1,83	/	/	1,65	1,35
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S		C₃A		C₄AF			
61,50		16		7,25		11,00			

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida, les résultats d'identification sont donnés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé

Essai	CEM II/A
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m^3)	1200
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m^3)	3020
Finesse SSB (cm^2/g)	3200
Temps de début de prise (heure, minute)	2h50
Temps de fin de prise (heure, minute)	3h50
Résistance à la compression (N/mm^2)	
2 jours	18,50
7 jours	33,00
28 jours	43,00

3.2.2. Les granulats naturels et recyclés

En ce qui concerne les granulats, il faut faire une distinction entre les granulats naturels et les granulats recyclés.

3.2.2.1. Identification

Les granulats naturels utilisés proviennent tous de la fragmentation de roches calcaires. Afin de récupérer des granulats recyclés, les éprouvettes en béton de granulats naturels (BO et BHP) sont d'abord après testées en compression, et ensuite concassées à l'aide d'un concasseur à mâchoires (Figure 3.2). Le béton concassé est ensuite tamisé pour donner des granulats destinés à la fabrication des bétons à bases des granulats recyclés.

Les granulats recyclés à partir des débris de concassage du béton ordinaire servent à la confection d'un béton ordinaire à base d'agrégats recyclés. Ceux recyclés à partir des débris de concassage du béton à haute performance servent à confectionner un béton à haute performance à base d'agrégat recyclés.

La procédure de concassage et la préparation des granulats recyclés sont présentées dans la figure suivante :

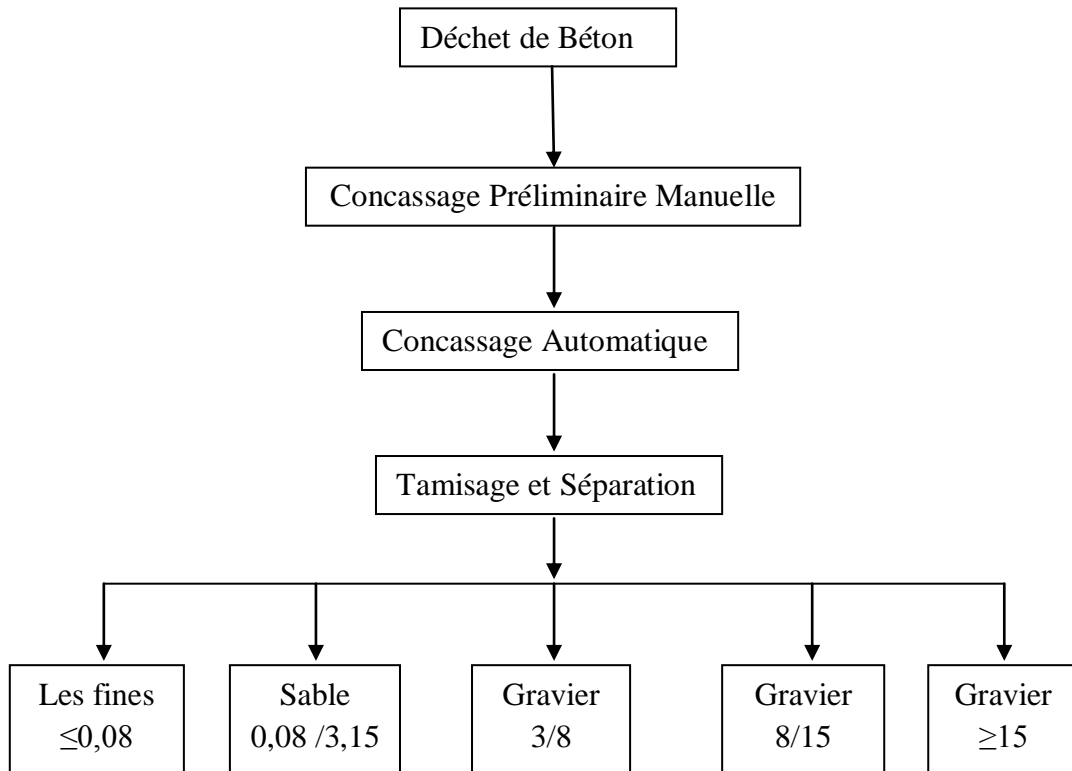


Figure 3.1 : Procédure de préparation des granulats recyclés.



Figure 3.2 : concasseur à mâchoires.

Après le concassage des deux types de béton (BO et BHP) les différentes quantités des granulats recyclés utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Les quantités des granulats après concassage.

	Granulats à base BO (Kg)	Granulats à base BHP (Kg)
Quantité total	246,75 (100%)	279,4 (100%)
Gravier 3-8	63,55 (25,75%)	79,85 (28,6%)
Gravier 8-15	144,7 (58,6%)	162,15 (58%)
Sable 0-3	38,5 (15,6%)	37,4 (13,4%)

Quatre classes de granulats naturels, et trois autres de granulats recyclés sont utilisées.

Le tableau 3.4 résume leur identification. Les gros et fins granulats recyclés sont de deux types :

GR_{BO} : granulats recyclés à base de béton ordinaire.

GR_{BHP} : granulats recyclés à base de béton à haute performance.

Tableau 3.4 : Identification des granulats naturels et recyclés utilisés.

	Type	Classe (mm)	Code	Nature	Source
Naturels	Granulat	15- 25	GN 15/25	Calcaire concassé	Carrière : Bouzegza
	Granulat	8-15	GN 8/15	Calcaire concassé	Carrière : Alger
	Granulat	3-8	GN 3/8	Calcaire concassé	Carrière : Alger
	Sable	0-3	SN 0/3	Calcaire concassé	Carrière : Baghlia
Recyclés	Granulat	8-15	GR _{BO} 8/15	Béton ordinaire concassé	Fabriqué en laboratoire
	Granulat	2,5-8	GR _{BO} 3/8	Béton ordinaire concassé	Fabriqué en laboratoire
	Sable	0-2,5	SR _{BO} 0/3	Béton ordinaire concassé	Fabriqué en laboratoire
	Granulat	8-15	GR _{BHP} 8/15	BHP concassé	Fabriqué en laboratoire
	Granulat	2,5-8	GR _{BHP} 3/8	BHP concassé	Fabriqué en laboratoire
	Sable	0-2,5	SR _{BHP} 0/3	BHP concassé	Fabriqué en laboratoire

3.2.2.2. Granulométrie :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un échantillon. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide des tamis, emboîtés les un sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains sont obtenu par vibration de la colonne de tamis [NF P18-560] [73].



Figure 3.3 : Tamiseuse électrique

3.2.2.3. Forme des grains :

La forme des grains et leurs états de surface dépendent en grande partie de la technologie de concassage, ces caractéristiques ont une influence considérable sur les propriétés

physiques et mécaniques du béton. Ils peuvent être caractérisés par les coefficients ou les paramètres suivants :

- **Coefficient de cubicité** : plus il est élevé, plus régulière est la forme des granulats
- **Coefficient d'aplatissement** : le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Il est déterminé par un double tamisage d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrée utilisée pour l'étude de la granulométrie. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles. Le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58. La norme NF P 18-561 [74] définit les modalités de sa mesure.
- **Angularité** : elle représente l'état des sommets et des arrêts des grains.
- **Sphéricité** : elle correspond à l'écart entre la forme d'une particule et celle de sphère équivalente.
- **Rugosité** : les grains sont lisses ou rugueux, l'appréciation est qualitative.

Le but ici est de caractériser la sphéricité (ou cubicité) des gros granulats utilisés (naturel et recyclés). La forme des granulats est caractérisée par un indice de forme, mesuré par la méthode de pied à coulisse selon la norme anglaise (BS 812 :100) [75].

Quatre catégories (cubique 'équadimensionnelle', plate, allongée, plate et allongée) sont définies en fonction d'aplatissement ($P=e/l$) et du coefficient d'élongation ($q=l/L$), avec :

e = épaisseur (petit axe), l =largeur (axe intermédiaire) et L =longueur (grand axe).

La figure 3.4 illustre les formes des granulats.

L'analyse est faite sur trois échantillons de 100 pierres pour chaque calibre, on mesure pour chaque pierre son plus grand épaisseur e , sa plus grande largeur l et sa plus grande longueur L pour chaque échantillon la somme des e sur la somme des l nous donne P et la somme des l sur la somme des L nous donne q . la mesure de p et q finale pour chaque calibre est la moyenne de mesures sur les trois échantillons.

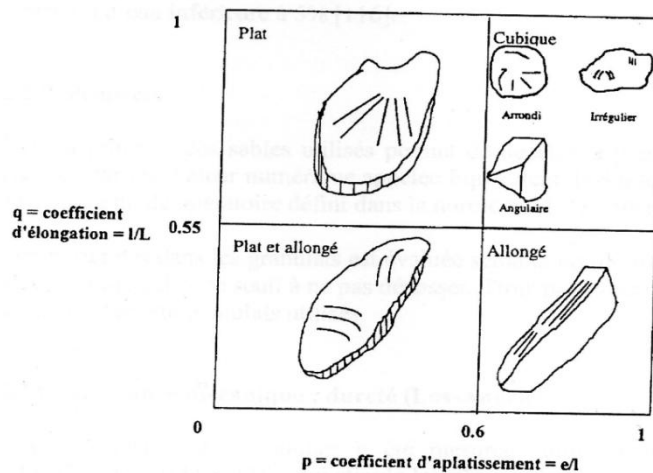


Figure 3.4: Caractérisation de la forme des granulats en fonction du coefficient d'aplatissement et celui d'élongation.

3.2.2.4. Masse volumique et porosité

Les masses volumiques réelles et apparentes sont mesurées conformément aux normes européennes (NF P18-554 et 18-555) [76] [77]. La masse volumique apparente : C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume par contre la masse volumique réelle ou absolue : c'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume plein d'eau. Les masses volumiques dépendent du tassement, de la forme et de la granulométrie des grains.

La porosité c'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage.

La porosité des granulats courants est en général très faible. Cependant, la porosité est importante dans le cas des granulats légers et recyclés.

La mesure de la porosité se fait selon la norme (NF P 18-554 et 18-555) [76] [77].

3.2.2.5. Absorption d'eau

Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger [5].

Les granulats recyclés se différencient des granulats naturels essentiellement par leur structure poreuse. La porosité ouverte élevée des granulats recyclés entraîne une forte

capacité d'absorption d'eau. L'absorption d'eau des granulats est mesurée suivant la norme européenne (NF P 18-554 et 18-555) telle que :

$$\text{coefficient d'absorption} = \frac{(\text{masse humide} - \text{masse seche})}{\text{masse seche}}$$

3.2.2.6. Propreté

L'analyse de la propreté de sable utilisés permet de déceler la présence d'éléments fins est caractérisée par une valeur numérique appelé équivalent de sable (ES), l'essai est réalisé conformément au mode opératoire défini dans la norme (NF P 18-598) [78].

La teneur en impureté dans les granulats est évaluée selon la norme française (NF P 18-591) [79], limite à 3% le seuil à ne dépasser. Trois prélèvements différents ont été réalisés pour chaque type de granulats utilisés.

3.2.2.7. Résistance mécanique (dureté/Los Angeles)

La dureté (Los Angeles) des granulats c'est un essai de résistance aux impacts, basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs.

L'essai est réalisé conformément à la norme française (NF P 18-573) [80].

3.2.3. L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [81], qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

3.2.4. Les adjuvants

3.2.4.1. Les superplastifiants

Un seul type d'adjuvant a été employé durant notre étude, un superplastifiant de haut réducteur d'eau de la nouvelle génération à base de copolymère acrylique, commercialisé sous le nom 'SIKA VISCOCRETE TEMPO 12', fourni par la société Sika Algérie.

Les caractéristiques physiques du superplastifiant sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.5. Caractéristique du superplastifiant utilisé.

	Adjuvant
Densité	1,06
Extrait sec	30,20 \pm 1,3%
PH	6,00 \pm 1
Couleur	Brun clair
Forme	Liquide
Teneur en ion cl	0,1%
Teneur en Na ₂ O	\leq 1%

3.2.5. L'ajout minéral (fumé de silice):

Nous avons utilisé comme un ajout minéral la fumée de silice, cette dernière provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique, elle est formée de particules sphérique contenant au moins 85% en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse de 15000 à 25000 m²/kg, ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Mais son dosage est limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton.

La fumée de silice utilisée dans notre recherche est un produit densifiée mécaniquement destiné pour les bétons à hautes performances, béton à très hautes performance et béton résistant aux milieux agressifs commercialisés sous le nom 'SIKA S95' (figure 3.5), sa composition chimique est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau 3.6 : Caractéristique du la fumée de silice

Eléments	SiO ₂	Na ₂ O	SiC	Al ₂ O ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
% pondéral dans la fumée de silice	95	0,60	1,50	1,00	1,00	1,50	1,00	0,10



Figure 3.5 : échantillon de la fumé de silice utilisée.

La fumée de silice 'SIKA S95' confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Améliore les performances mécaniques à long termes : résistance en compression, flexion et traction ;
- Augmente le module d'élasticité ;
- Réduit le fluage ;
- Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion ;
- Améliore la durabilité aux milieux agressifs ;
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction ;
- Facilite le pompage de tous les bétons même peu dosé en ciment ;
- Réduit les risque de ségrégation.

Les caractéristiques physiques de la fumée de silice utilisée sont :

Masse volumique apparente : 0,65.

Masse volumique réelle est : 2,24.

La surface spécifique : 230 000 cm²/g.

3.3. Formulation des bétons

3.3.1 Formulation du béton

La formulation du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment, en eau et en adjuvant, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées et en particulier, l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité.

Dans le but d'étudier les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des bétons à base d'agrégats recyclés, nous avons examiné deux type de béton l'un est ordinaire et l'autre de haute performance, alors la méthode de composition des deux bétons sont différentes. Le premier qui est un béton ordinaire a été formulé par la méthode Dreux-Gorisse [82], tandis que le deuxième qui est un béton à hautes performances a été formulé par la méthode Dreux-Gorisse pour l'optimisation de squelette granulaire et l'analyse expérimentale et les recommandations de la littérature pour l'optimisation de la pâte liante.

Les compositions des deux bétons étudiés à base différents rapport E/C sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.7. Composition des bétons étudiés

Désignation des composants.		Dosages pondéraux des constituants (kg /m ³).	
		Ciment de M'sila (Lafarge).	
		E/C = 0.6	E/C = 0.35
Ciment		350	450
Fumée de silice		/	45
Superplastifiant		/	6.75
Eau de gâchage		210	157.5
Sable	Fin	108	115
	Grossier	436	461
Gravier	3/8	117	190
	8/15	405	882
	15/25	763	/

3.4. Modes opératoires des essais :

3.4.1. Eprouvettes :

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, deux types d'éprouvettes ont été utilisés :

- Eprouvettes de forme cubique de dimensions (15x15x15) cm³, pour les essais de compression, selon la norme (NF P 18-406) [83]
- Eprouvettes de forme prismatique de dimension (7x7x28) cm³ selon la norme (NF P 18-407) [84] Pour les essais de traction par flexion.

Tableau 3.8. Répartition des éprouvettes pour chaque pourcentage.

Type de moule	Âge (jours)	Nombre d'éprouvettes confectionnées.	
		E/C = 0.35	E/C = 0.6
Cubique (150x150x150) cm.	3	03	03
	7	03	03
	14	03	03
	21	03	03
	28	03	03
	56	03	03
Prismatique (7x7x28) cm.	7	03	03
	28	03	03
	56	03	03

3.4.2. Gâchage et malaxage

Après la préparation des quantités des matériaux utilisés, les constituants du béton ont été introduits par ordre décroissant de granulométrie dans le malaxeur (Figure 3.6), ce dernier est un malaxeur rotatif à axe vertical de capacité 50 litres, qui assure le mélange des constituants par simple rotation de la cuve suivant un axe vertical.

Le temps de malaxage est de 03 minutes dont 01 minute de malaxage à sec des granulats et de ciment, puis 02 minutes de malaxage humide, après ajout d'eau conformément à la norme NF P 18-404 [86].



Figure 3.6 : malaxeur de béton utilisé à axe vertical.

Après la préparation des mélanges du béton, les moules ont été remplis et compactés mécaniquement à l'aide d'une table vibrante (Figure 3.7). Après coulage, les éprouvettes ont été protégées de la dessiccation par un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Toutes les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures.



Figure 3.7 : Compactage du béton à l'aide d'une table vibrante

3.4. 3. Essais sur béton frais:

3.4. 3.1. Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (NF P 18-451) [85]. C'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de hauteur 300 mm, diamètre supérieur 200 mm et de diamètre inférieur 100 mm.

Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égal volume. Chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 16 mm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie. Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de va et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse; des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettent de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement. La valeur de l'affaissement est exprimée en cm.



Figure3.8: Essai d'affaissement (cône d'Abrams)

3.4.3.2. Mesure de la densité réelle du béton frais:

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'une éprouvette graduée de volume V et de masse M_e , puis en remplissant cette dernière avec le béton et on mesure la masse total soit M_r , puis on calcule la masse volumique avec la formule suivante :

$$\rho_{\text{b frais}} = \frac{(M_r - M_e)}{V}$$

Avec :

M_r : est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle).

M_e : est la masse du récipient vide.

ρ : est la densité du béton frais et V le volume de l'éprouvette.

3.4.3.3. Confection et conservation des éprouvettes

Pour la confection de toutes nos éprouvettes, nous avons adopté la procédure suivante :

Avant le remplissage des moules, on applique un lubrifiant sur les parois pour éviter toute cohésion de la pâte, le remplissage des éprouvettes se fait en deux couches vibrées pendant 7 secondes pour les éprouvettes cylindriques et 4 secondes pour les éprouvettes prismatiques.

La vibration a été effectuée sur une table vibrante.

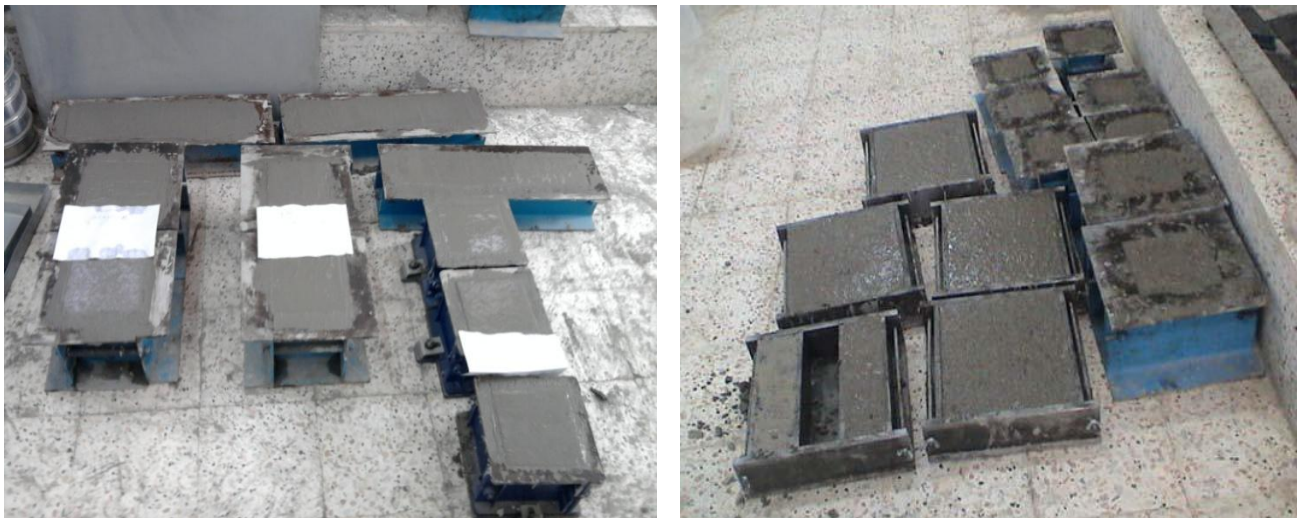


Figure 3.9 : Les différents moules utilisés pour chaque gâché.

La norme (NF P 18-404) [86] (Bétons, Essais d'études, de conservation et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes) fixe les conditions de conservation des éprouvettes destinées à être essayées à la compression : d'abord pendant vingt-quatre heures dans un local maintenu à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, puis dans l'eau à la même température ou en chambre humide, d'humidité relative supérieure ou égale à 95 %. Toutes ces indications sont importantes et doivent être suivies à la lettre. Toutes les extrémités des éprouvettes cylindriques sont surfacées avant l'essai selon le procédé normalisé (NF P 18-416) [87], afin d'obtenir des surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices des éprouvettes.



Figure 3.10 : Mode de Conservation des éprouvettes.

3.4. 4. Essais sur béton durci :

3.4. 4.1. Essai de compression :

La résistance à la compression est la propriété la plus fréquemment mesurée sur béton durci. Afin de vérifier cette dernière nous avons utilisés des éprouvettes cubiques $15 \times 15 \times 15$ cm pour les essais de compression à 3, 7, 14, 21,28 et 56 jours. L'essai de résistance à la compression des bétons a été effectué selon la norme (NF P 18-406) [83], à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 3000 kN (Figure 3.11). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture, les résultats de la résistance en compression est correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure 3.11 : Dispositif de l'essai de compression simple.

3.4.4.2. Essai de traction par flexion (module de rupture):

Cet essai permet de reproduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent dans les ouvrages : la flexion.

Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points.

La résistance à la traction est obtenue en appliquant la formule de la résistance des matériaux :

La formule de la RDM pour le calcul de la contrainte de flexion est donnée comme suit :

$$R_f = \frac{M}{I} y$$

Avec :

M : moment de flexion, $M = \frac{PL}{4}$ ($L = 3a$)

I : moment d'inertie de la section transversale, $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre, $y = \frac{a}{2}$ d'où :

$$R_f = \frac{9P}{2a^2}$$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);

a : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

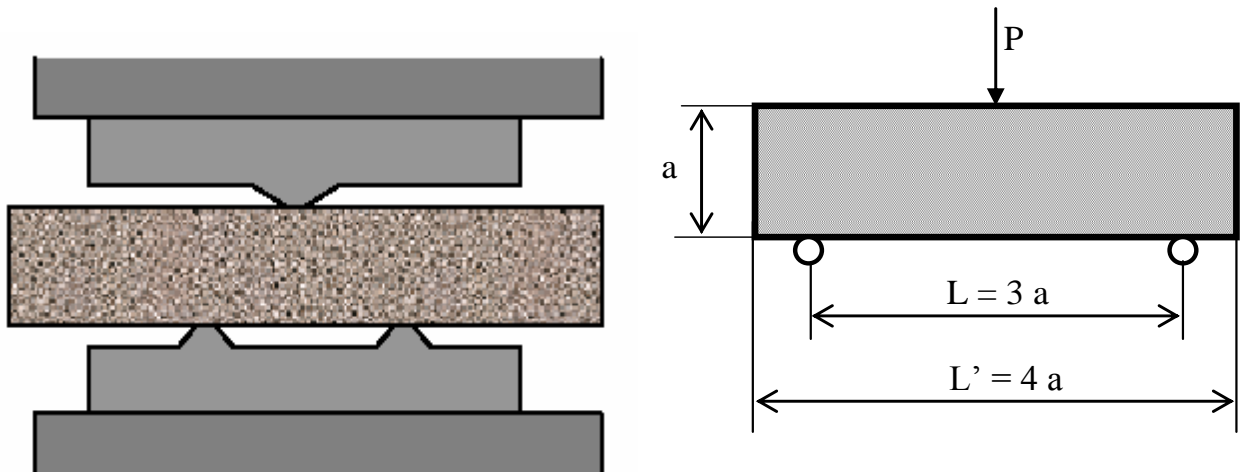


Figure 3.12 : Essai de traction par flexion à 3 points.

3.5 Récapitulatif du programme des essais réalisés

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

- Concassage et préparation des granulats recyclés.
- Formulations des bétons (BO et BHP) substitués partiellement ou totalement de 50%, 75% et 100% des gros granulats recyclés.
- Essais des bétons à l'état frais (ouvrabilité et masse volumique).
- Essais des bétons à l'état durci (essais de compression et de traction par flexion).

La Figure 3.13 récapitule les étapes et les essais réalisés dans cette partie.

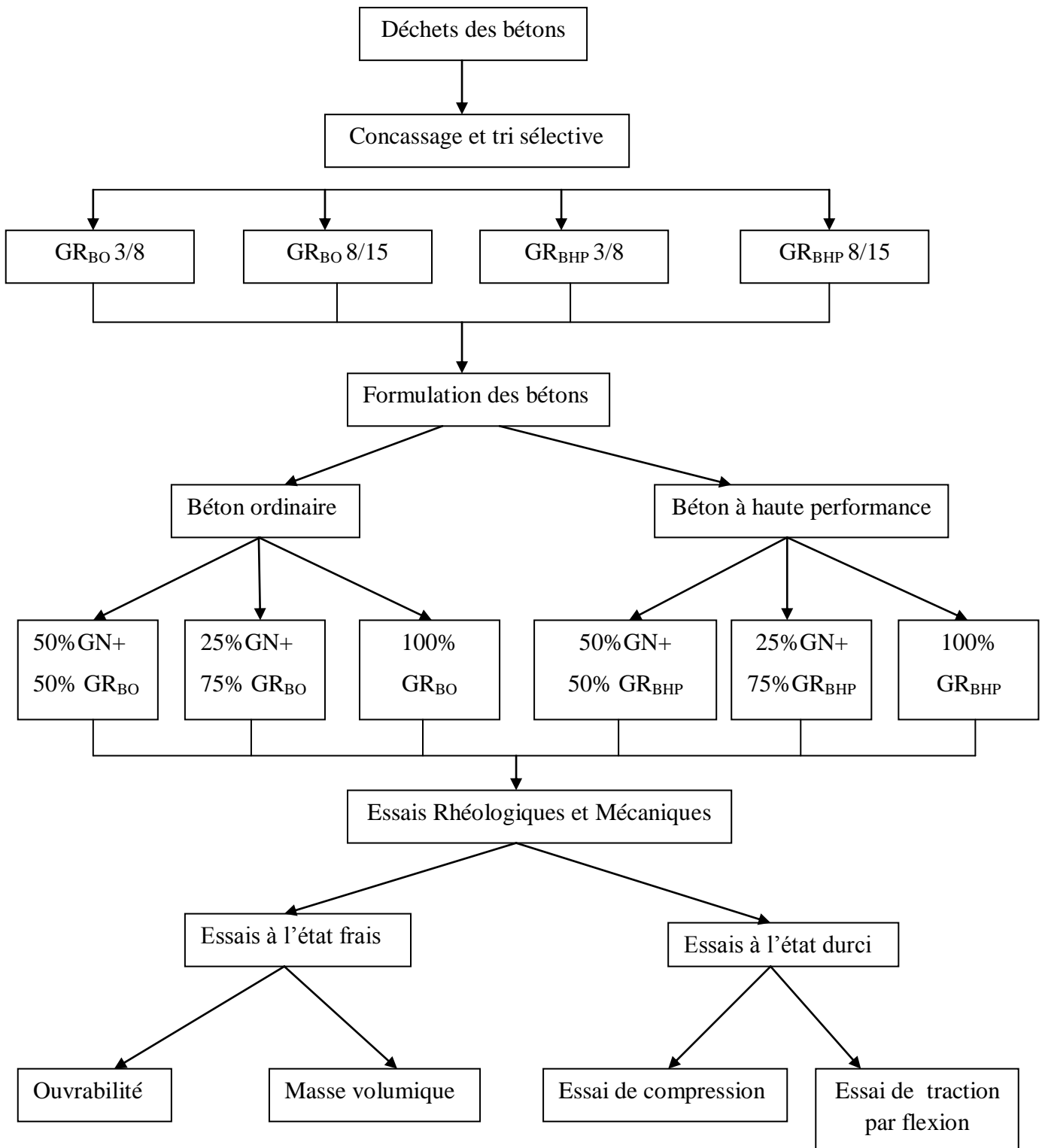


Figure 3.13 : Organigramme des essais réalisés.

Chapitre : 4

Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction

Les méthodes d'analyse et d'essais ont été décrites au chapitre précédent. Les résultats sont présentés, de façon à mettre en évidence les caractéristiques et les comportements spécifiques des granulats et des bétons.

4.2. Granulats

4.2.1. Analyse granulométrique des granulats

Les courbes granulométriques des sables et granulats sont présentées sur les figures 4.1, 4.2 et 4.3.

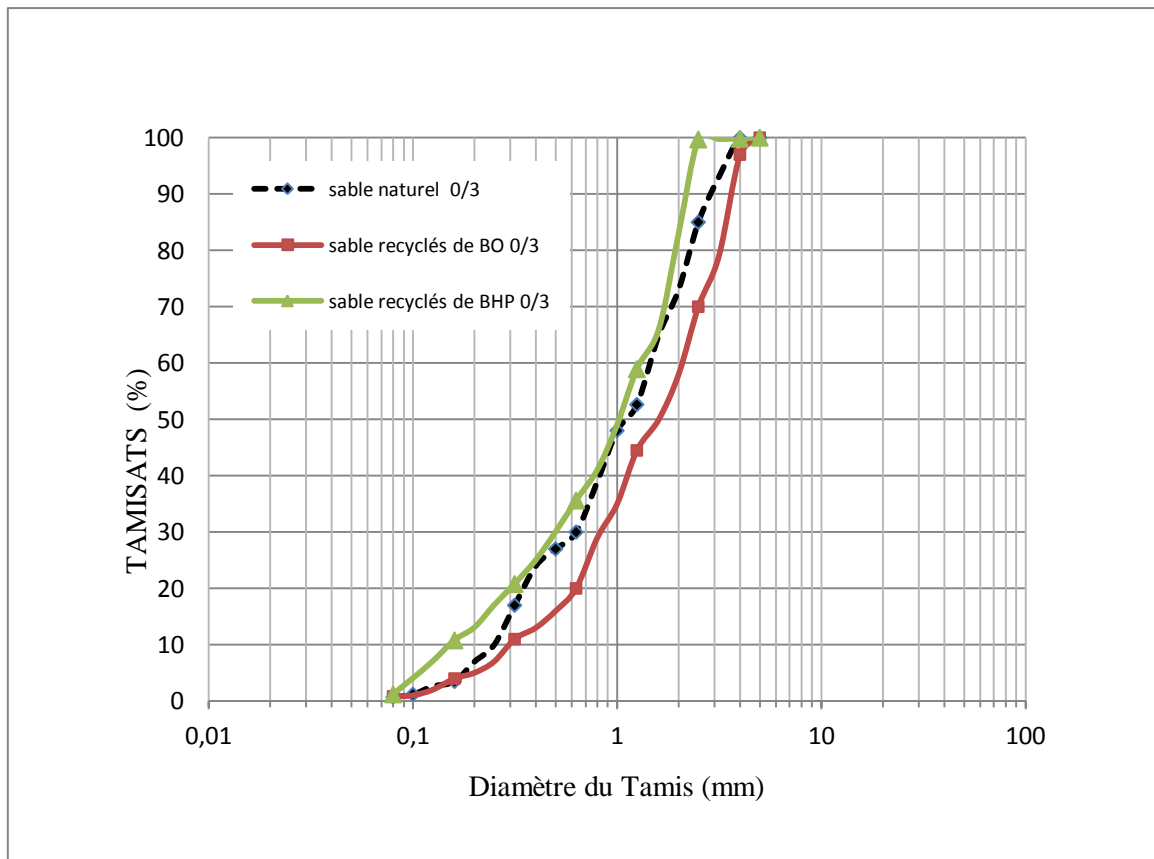


Figure 4.1 : Courbe granulométrique des sables naturels et recyclés.

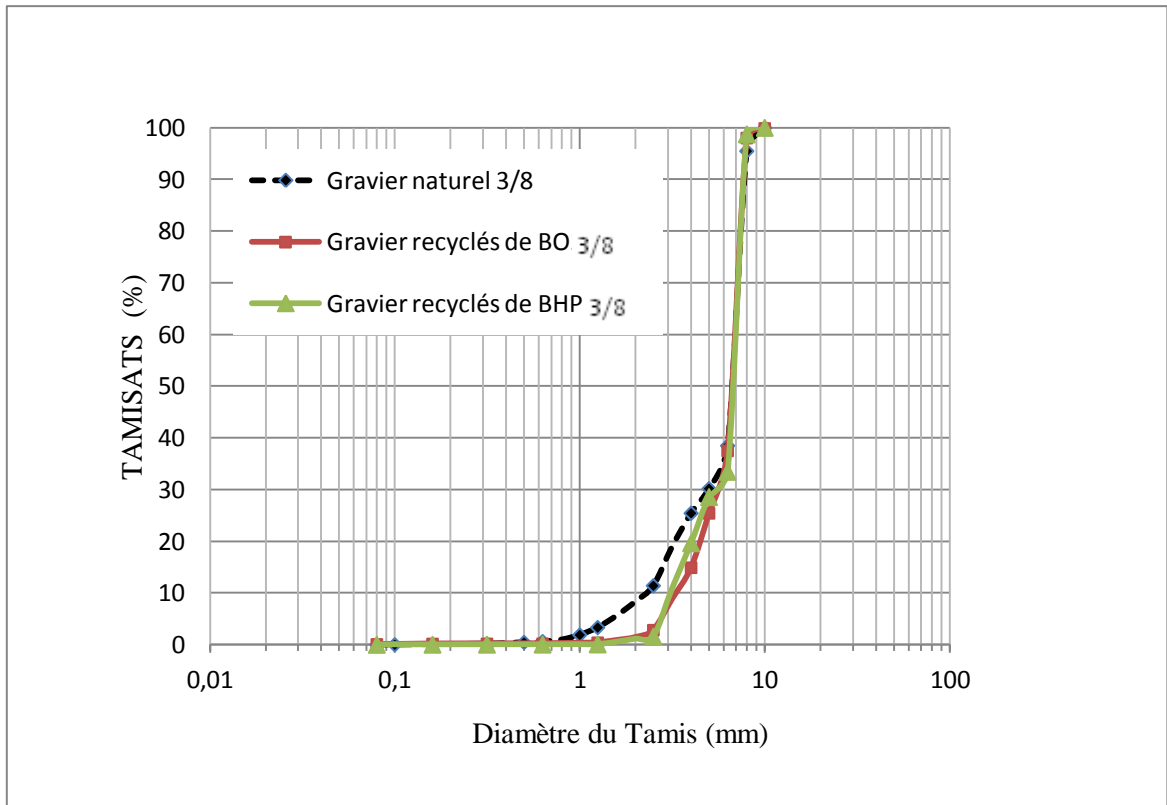


Figure 4.2 : Courbe granulométrique des graviers (3/8) naturels et recyclés.

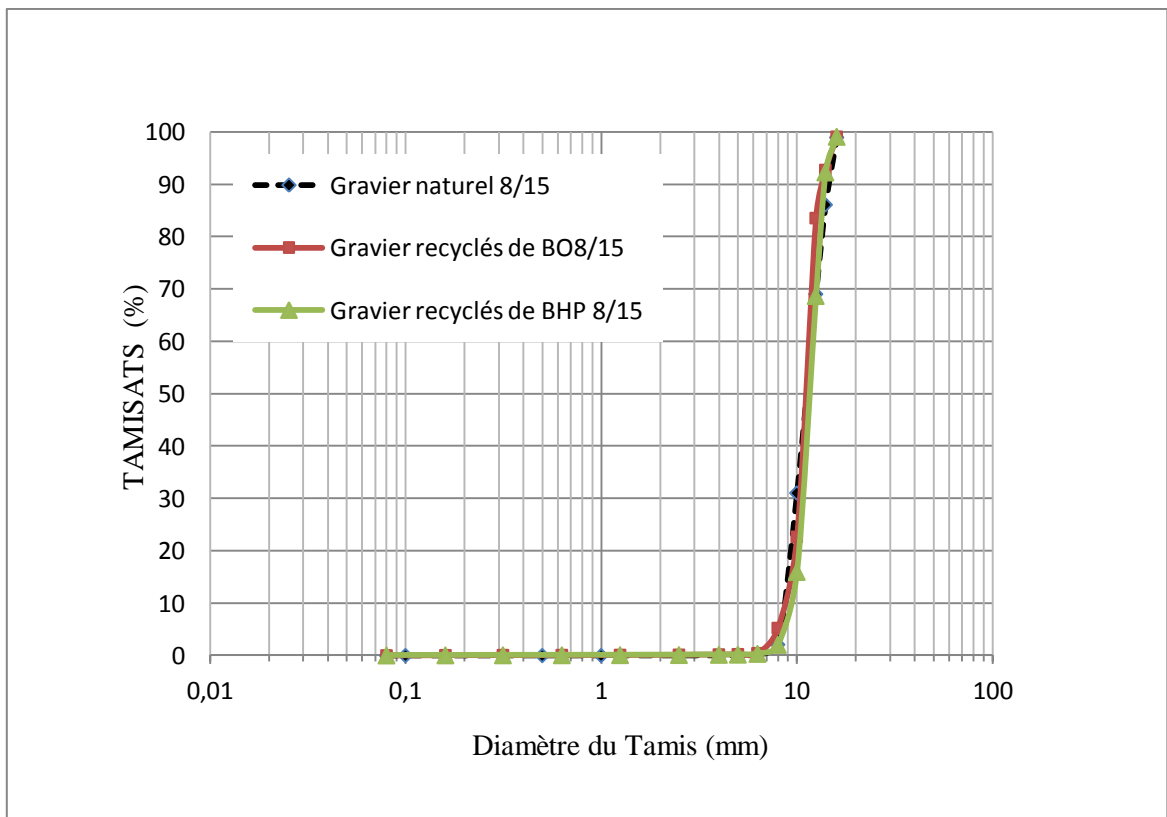


Figure 4.3 : Courbe granulométrique des graviers (8/15) naturels et recyclés.

Le module de finesse du sable recyclé à base de béton ordinaire ($MF=3,1$) est plus élevé que celui du sable naturel ($MF=2,74$) et le sable recyclé à base de béton à hautes performances ($MF=2,73$).

Le sable recyclé à base de béton ordinaire est un peu plus grossier que le sable naturel et le sable à base de béton à hautes performances (Figure 4.1), il est constitué en général de petits gravillons issus de la pâte d'ancien ciment.

Les figures (4.2 et 4.3) montrent une granulométrie identique dans les deux types de graviers utilisés (3/8 et 8/15).

4.2.2. Formes des grains et état de surface

Par analyse visuelle, on constate que la surface des granulats recyclés est rugueuse par contre les granulats naturels caractérisés par une surface lisse. Les gros granulats recyclés ont plusieurs formes :

(1) un grain naturel enrobé par la pâte de ciment, (2) une pâte de ciment seule, (3) un grain de gravier naturel.

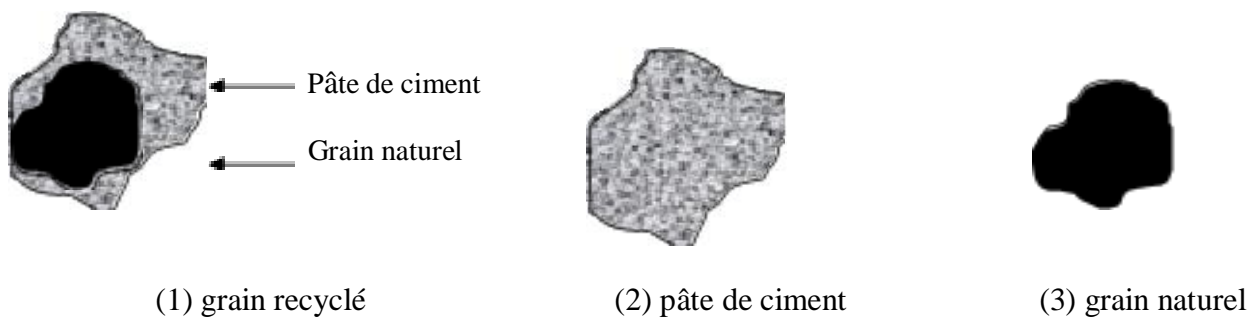


Figure 4.4 forme de granulats recyclés.

L'analyse de forme est effectuée sur trois échantillons de 100 granulats chacun, et la moyenne des résultats est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Forme des granulats utilisés

catégorie	P=e /l	Q=I/L	Plat(%)	Cubique (%)
GN 3/8	0,71	0,77	23	69
GN 8/15	0,72	0,81	26	73
GR_{BO} 3/8	0,60	0,61	53	33
GR_{BO} 8/15	0,63	0,66	61	50
GR_{BHP} 3/8	0,61	0,63	40	45
GR_{BHP} 8/15	0,66	0,79	45	55

On remarque que le coefficient de cubicité des granulats naturels est plus élevé par rapport aux graviers recyclés des deux types de béton. Les granulats recyclés présentent un pourcentage important des particules plates, qui aura un effet néfaste sur le comportement du béton à l'état frais et durci. Des résultats comparables ont été observés par d'autres recherches [88,89].

4.2.3. Masse volumique

Le tableau ci-dessous présente, les masses volumiques de chaque type de granulats utilisés dans nos essais.

Tableau 4.2 : Masse volumique des granulats utilisés

Type de granulats	$\rho_{app} (kg/m^3)^*$	$\rho_{abs}(kg/m^3)^{**}$
SN	1520	2640
GN 3/8	1370	2600
GN8/15	1340	2570
SR_{BO}	1270	2370
GR_{BO} 3/8	1120	2300
GR_{BO} 8/15	1040	2320
SR_{BHP}	1300	2400
GR_{BHP} 3/8	1150	2350
GR_{BHP} 8/15	1080	2370

(*) Masse volumique apparente ,(**) Masse volumique absolue.

D'après les résultats des masses volumiques on constate que ces masses diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire.

On constate aussi que les masses volumiques des granulats recyclés sont plus faible que celle des granulats naturels. Cette diminution est d'environ 10% pour les graviers et 15% pour les sables, des résultats similaires ont été trouvé par Hansen, Debieb, Kenai, Rahal, Poon [50, 62, 52,90, 91], cette chute de masse volumique des granulats recyclés est due à la faible densité d'anciens mortier qui attaché aux granulats naturels.

On observe aussi que les masses volumiques des granulats recyclés à base de BO sont inférieur à celle des granulats recyclés à base de BHP ceci est nettement due à la différence au mortier des deux types de béton, le mortier de BHP contient dans sa composition une quantité de fumé de silice, cette dernière et avec ses particules ultrafine jouent un rôle d'un filler, qui densifie la pâte de ciment.

La masse volumique des granulats recyclés dépend donc de la masse volumique des granulats naturels et la masse volumique d'anciens mortiers liés aux granulats.

Debieb [89], a proposé corrélation suivante :

$$MV_{rcyc} = MV_{nat} \cdot V_1 + MV_{mort} \cdot V$$

Avec : MV_{rcyc} : masse volumique des granulats recyclés

MV_{nat} : masse volumique des granulats naturels

MV_{mort} : masse volumique du mortier ancien attaché aux granulats naturels.

4.2.4. Absorption d'eau

Les résultats des essais de l'absorption sont présentés dans le tableau 4.3 :

Tableau 4.3 : Pourcentage d'absorption d'eau des granulats utilisés

GN	Absorption (%)	B.O	Absorption(%)	BHP	Absorption(%)
GN 15/25	0,42	GR 8/15	4,50	GR 8/15	3,97
GN 8/15	0 ,4	GR 3/8	8,30	GR 3/8	6,70
GN 3/8	1 ,5	SR 0/3	9,80	SR 0/3	7,3
SN 0/5	0 ,35	/	/	/	/

On constate que les granulats recyclés absorbent une quantité importante d'eau par rapport aux granulats naturels. Le pourcentage d'absorption d'eau des granulats recyclés à base de BO est élevé par rapport aux granulats recyclés à base de BHP. Debieb [89], a montré que l'absorption élevée des granulats recyclés doit être limitée et des précautions devraient être prises pour éviter des problèmes de durabilité dans quelques éléments structuraux. Louis et al [92], ont trouvé que l'augmentation d'absorption a eu lieu au delà de 30% de substitutions des granulats fins.

L'augmentation d'absorption des granulats recyclés est justifiée par la présence et l'attachement d'ancien mortier aux granulats naturels. Par conséquent, l'existence de la fumée de silice dans l'ancien mortier de BHP fait la différence d'absorption entre les granulats à base de BO et BHP à cause des particules ultrafine de la fumée de silice qui améliore la résistance et la compacité de la pâte (mortier).

4.2.5. La propreté

Parmi les paramètres physiques mesurés pour les granulats utilisés pour la formulation de béton : la propreté, cette dernière est exprimée en pourcentage d'impureté pour les gros granulats et au équivalent de sable pour les granulats fin (sable).

Le tableau suivant regroupe les pourcentages des impuretés et l'équivalent de sable des différents granulats utilisés :

Tableau 4.4 : Pourcentage des impuretés et équivalent de sable des différents granulats.

Type de sable recyclés	Pourcentage d'impureté	Equivalent de sable	
		ES _v (%)	ES _p (%)
SN	/	84,4	79,1
GN 3/8	0,3	/	/
GN8/15	0,64	/	/
SR _{BO}	/	82,50	83,85
GR _{BO} 3/8	0,34	/	/
GR _{BO} 8/15	0,56	/	/
SR _{BHP}	/	80,47	81,50
GR _{BHP} 3/8	0,27	/	/
GR _{BHP} 8/15	0,54	/	/

Avec :

ES_v : équivalent de sables à vue.

ES_p : équivalent de sable à piston.

On remarque que l'équivalent de sable des granulats naturels et recyclés dépasse 70% donc le sable est considéré comme un sable propre.

4.2. 6. Resistance mécanique (dureté/Los Angeles)

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.5 :

Tableau 4.5 : Dureté des granulats utilisés.

GN	Los-Angeles (%)	B.O	Los-Angeles (%)	BHP	Los-Angeles(%)
GN15/25	20	GR 8/15	37	GR8/15	28
GN 8/15	21	GR3/8	32	GR3/8	26
GN 3/8	25				

La différence de la dureté des trois types de granulats utilisés est due nettement à l'ancienne pâte de ciment qui diminué facilement la résistance mécanique des granulats recyclés. Par conséquent, l'existence de la fumée de silice dans l'ancien mortier de BHP fait la différence de la dureté entre les granulats à base de BO et BHP à cause des particules ultrafines de la fumée de silice qui améliore la résistance et la compacité de la pâte (mortier). Mais ces résultats restent acceptables car ils sont inférieurs à limite exigé par la norme NF P 18-573 [80].

4.3. Béton frais

4.3.1. L'ouvrabilité et masse volumique

L'ouvrabilité des bétons étudiés à été mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams, et les résultats trouvés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.6 : Propriétés des bétons à l'état frais.

Type de béton		E/C	Slump (mm)	Masse volumique (kg/m ³)
BO	BO témoin	0,6	110	2346
	50%N+50%R	0,6	85	2318
	25%N+75%R	0,6	73	2260
	100%R	0,6	60	2226
BHP	BHP témoin	0,35	130	2423
	50%N+50%R	0,35	110	2391
	25%N+75%R	0,35	95	2321
	100%R	0,35	72	2264

La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons est représentée sur la figure 4.5 :

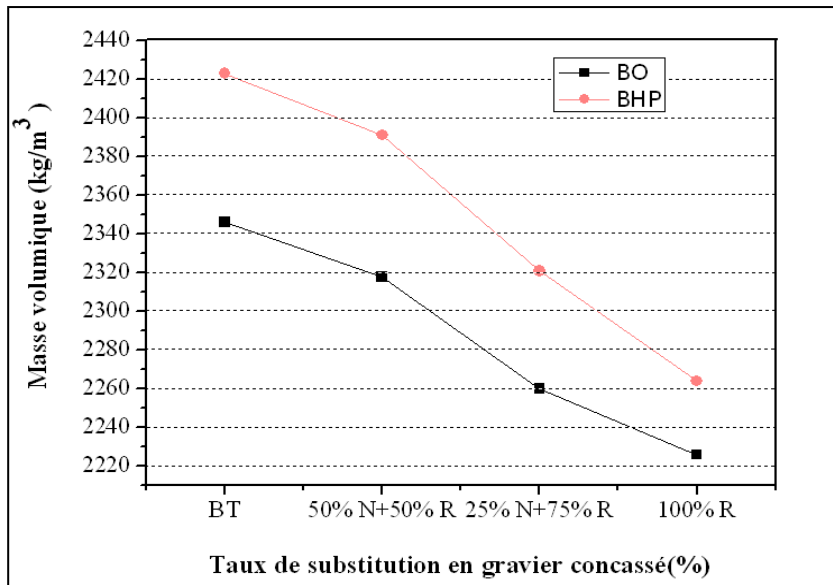


Figure 4.5 : La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons (l'état frais).

On remarque que les masses volumiques des bétons recyclés est moins élevé par rapport au béton témoin, et que l'augmentation de la substitution de gravier diminué la masse volumique, ceci est due à l'accroissement des vides aux niveaux des graviers recyclés.

La variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons est représentée sur la figure 4.6 :

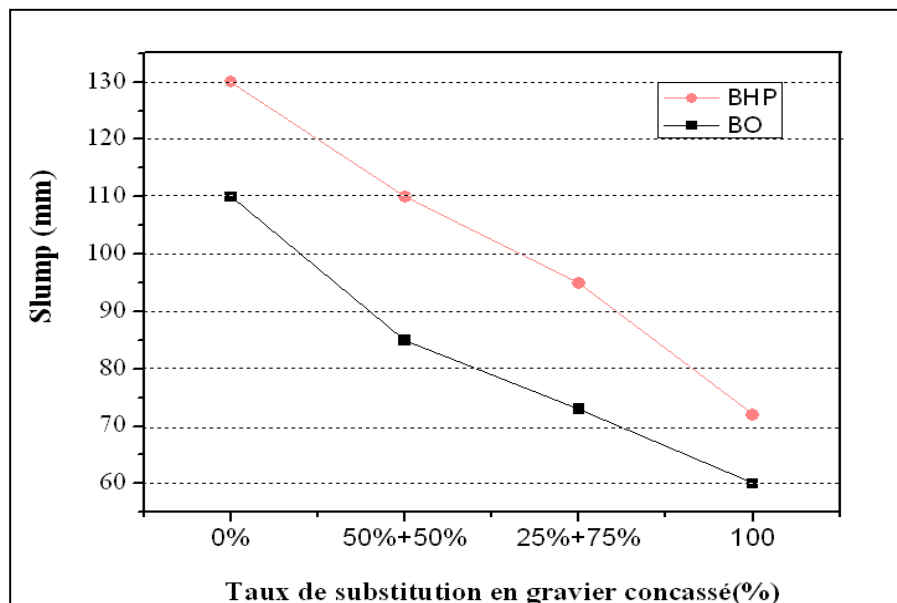


Figure 4.6 : La variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons.

On observe une diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation du taux de substitution de gravier recyclés pour les deux types de bétons, ceci est dû à l'augmentation d'absorption d'eau des granulats recyclés.

4.4. Béton durci

4.4.1. Propriétés physiques et mécaniques du béton durci

4.4.1.1. Masse volumique

Les masses volumiques des différents types des bétons à l'état durci sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.7 : les masses volumiques des bétons à l'état durci

Type de béton		Masse volumique (kg/m ³)
BO	BO témoin	2335
	50%N+50%R	2310
	25%N+75%R	2252
	100%R	2217
BHP	BHP témoin	2402
	50%N+50%R	2385
	25%N+75%R	2310
	100%R	2257

La variation de la densité en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons est représentée sur la figure 4.7 :

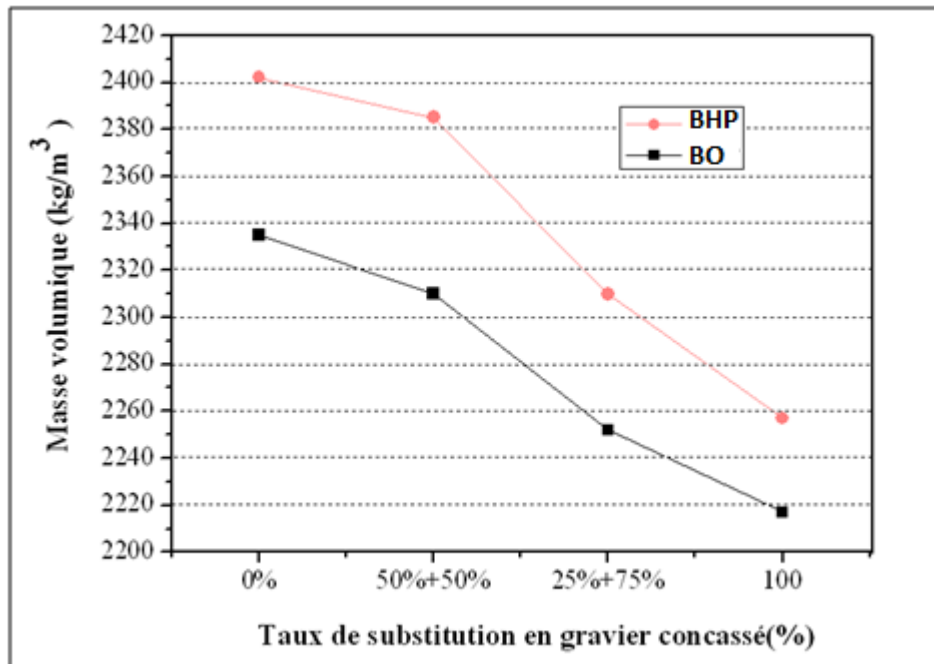


Figure 4.7 : La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de gravier pour les deux types de bétons (l'état durci).

Les masses volumiques des bétons recyclés sont moins élevées que celle des bétons témoin, cette différence est due sans doute à la présence des vides et des pores au niveau d'anciens mortiers attachés aux granulats recyclés.

La chute de la masse volumique est d'environ 7% pour les bétons de 100% de granulats recyclés, Debieb [89] à trouvé une diminution de 6%.

4.4.1.2. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des deux types de béton sont présentés respectivement au tableau 4.8 et tableau 4.9 :

Tableau 4.8 : La résistance à la compression du béton ordinaire.

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)					
	3	7	14	21	28	56
BT	9,2	20,5	25	28	30,8	31,9
50%N+50%R	6,5	16,5	23,1	25	27,3	27,7
25%N+75%R	5,9	16	20	23	26,8	27,2
100%R	5,1	15,4	18,3	21	23,5	24,9

Tableau 4.9 : La résistance à la compression de béton à haute performance.

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)					
	3	7	14	21	28	56
BT	38,5	48	58	68,5	74,3	76,9
50%N+50%R	36,8	44,5	57,5	68,5	74,1	76,2
25%N+75%R	36,2	44,7	57,1	67,3	73,9	75,6
100%R	36	46,5	56,8	67	74	76,8

La variation de la résistance en compression en fonction du taux de substitution de gravier concassé pour les deux types de bétons est représentée sur les figures 4.8 et 4.9 :

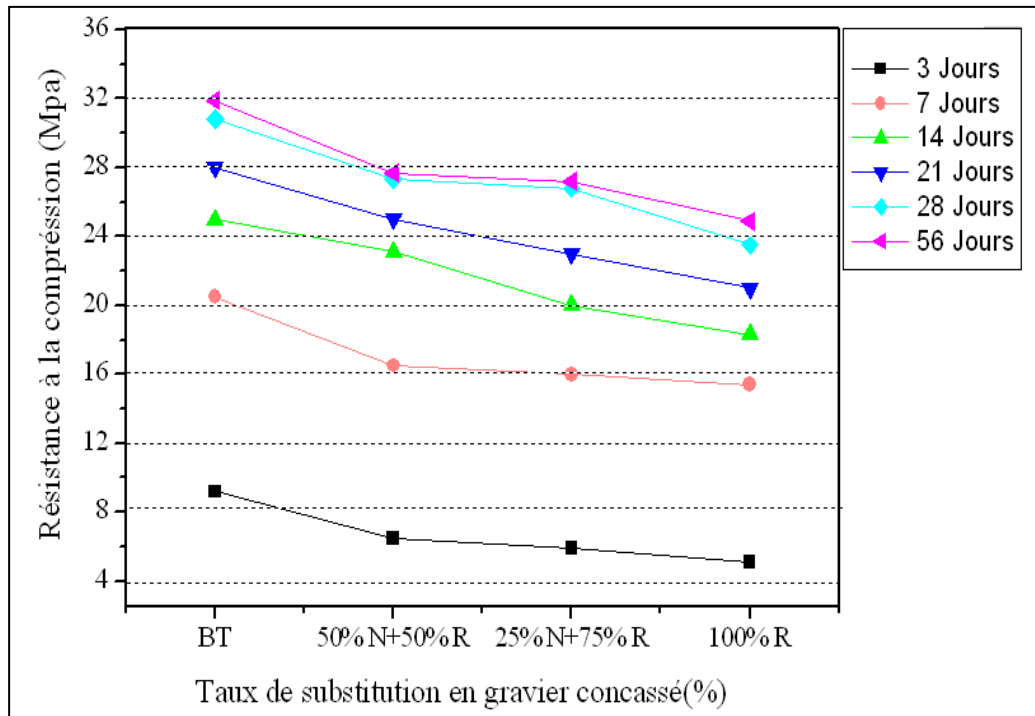


Figure 4.8: Evolution de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction du taux de substitution en gravier concassé.

On remarque une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du taux de substitution de gravier concassé aux différents jours.

La diminution de la résistance à la compression à 28 jours était environ de 20 à 25% quand le taux de substitution de gravier recyclé est de 100%, ces résultats sont rapprochés à des résultats d'autres chercheurs. En effet, une diminution de résistance est de l'ordre 40% remarqué par Debieb et Cabral [89,59] et de 10% par Tori et Ravindraradjah [93 ,72 ,69] et 35% par hansen [50].

Par contre lors du remplacement des gros et fins granulats recyclés, une diminution de résistance de l'ordre 24 à 35% été remarqué par Katz et Zahaviera [64 ,94] et de 40% par Kenai et Debieb [52 ,62].

La chute de la résistance à la compression est due aux modifications de certains paramètres qui influencent négativement de la résistance à la compression, ces paramètres sont :

L'augmentation du rapport E/C des bétons à base des granulats recyclés, l'augmentation de l'absorption d'eau à cause de la porosité élevée des granulats et la faible résistance d'anciens mortiers attachés aux granulats recyclés qui gêne le bon déroulement d'hydratation.

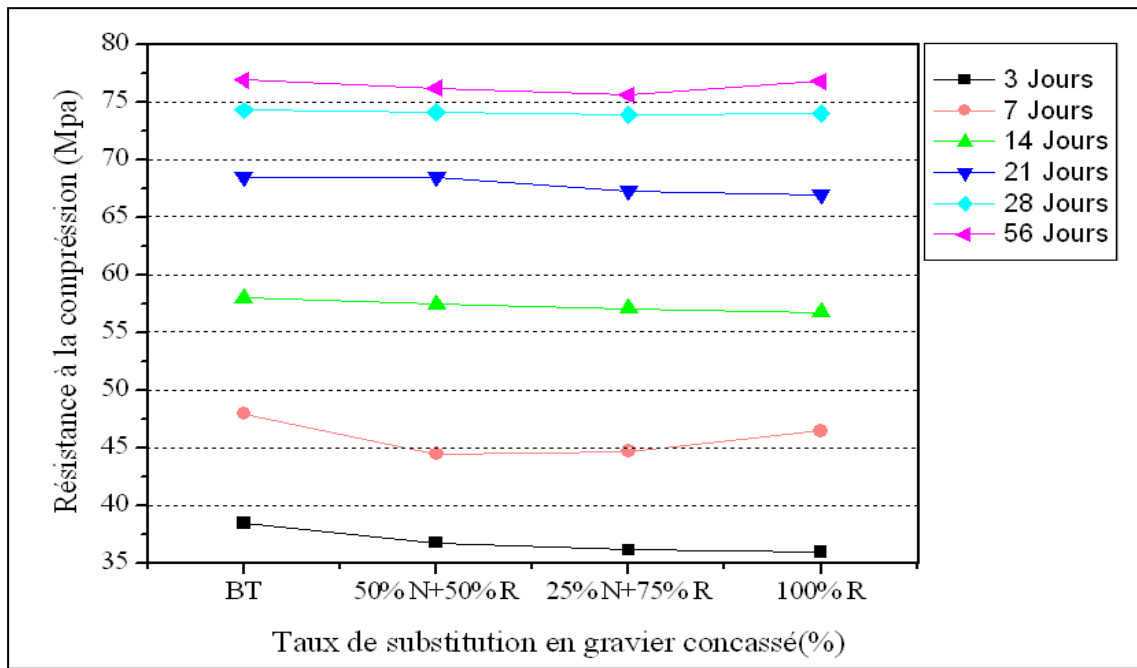


Figure 4.9 : Evolution de la résistance à la compression du béton à hautes performances en fonction du taux de substitution en gravier concassé.

On constate une stabilité de la résistance à la compression avec l'augmentation du taux de substitution de gravier à base de BHP concassé aux différents jours.

La stabilité de la résistance à la compression de BHP malgré l'augmentation de la substitution de graviers concassés est justifiée par l'équivalence des granulats recyclés à base de BHP et les granulats naturels. Néanmoins, les granulats recyclés comportent et attachés d'anciens mortiers, mais ce dernier il est caractérisé par une résistance comparable aux celle des granulats naturels à cause sa composition qui contient une quantité de la fumée de silice cette dernière améliore la résistance de la pâte de ciment.

4.4.1.3. Résistance à la traction :

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des deux types de béton sont présentés respectivement dans les tableaux 4.10 et 4.11 :

Tableau 4.10 : Résistance à la traction de béton ordinaire

Type de béton	Résistance à la traction (MPa)		
	7J	28J	56J
BT	1,80	2,20	2,55
50%N+50%R	1,46	1,95	2,05
25%N+75%R	1,23	1,80	1,98
100%R	1,05	1,68	1,80

Tableau 4.11 : Résistance à la traction de béton à hautes performances

Type de béton	Résistance à la traction (MPa)		
	7J	28J	56J
BT	3,80	5,35	5,75
50%N+50%R	3,77	5,30	5,60
25%N+75%R	3,81	5,32	5,70
100%R	3,80	5,34	5,68

La variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution de gravier concassé pour les deux types de bétons est représentée sur les figures 4.10 et 4.11 :

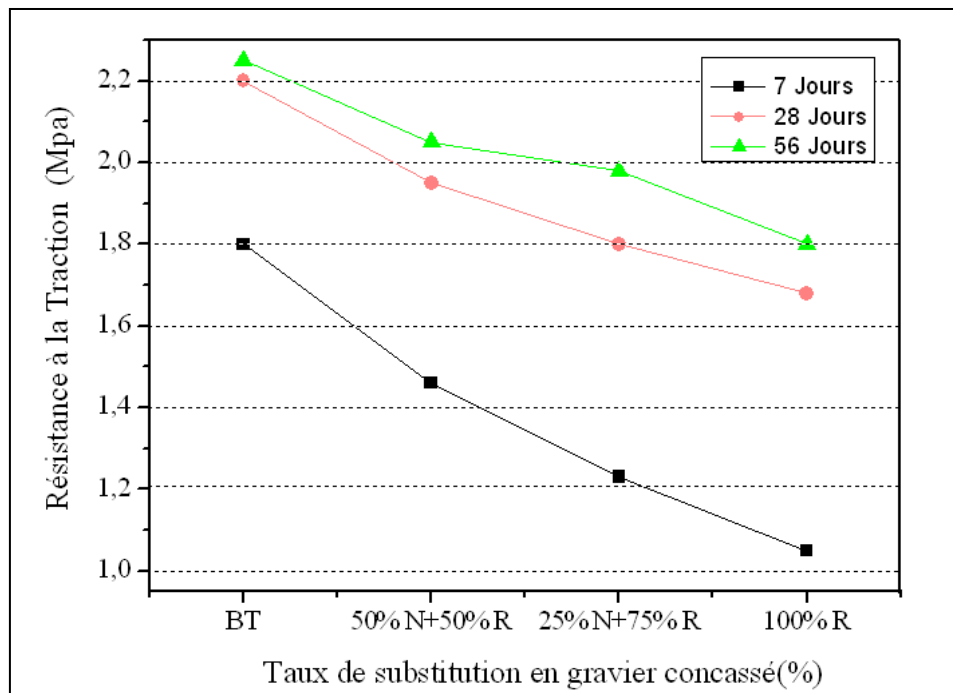


Figure 4.10 : Evolution de la résistance à la traction du béton ordinaire en fonction du taux de substitution en gravier concassé.

Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation du taux de substitution de gravier concassé aux différents jours a été observée.

La chute de la résistance à la traction de béton ordinaire à 28 jours est de 23% pour un taux de substitution de gravier recyclés de à 100%, cette valeur est diminuée jusqu'à 11% quand le taux de substitution de gravier recyclés est de 50%. Ces résultats sont similaires à des résultats de Debieb et al [95], qui ont trouvé une diminution de 19% de résistance lors de remplacement de 100% de gros granulats recyclés.

Pour un béton à base de 100% de gros et fins granulats recyclés, une chute de 11% a été observée par Gómez [96], et une diminution de 16% par Debieb et al [95].

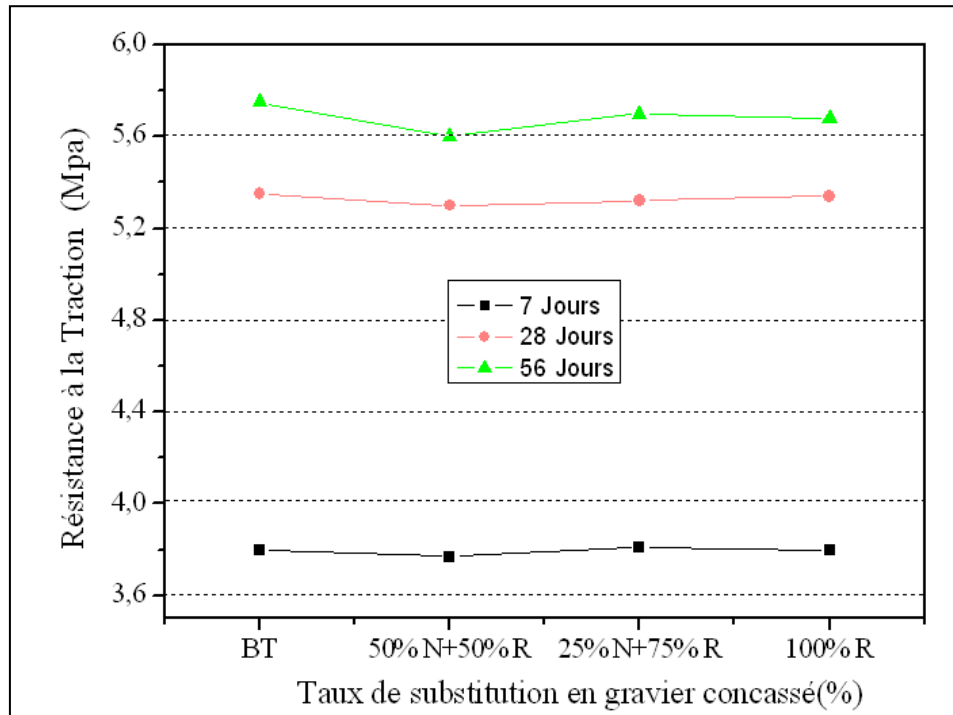


Figure 4.11 : Evolution de la résistance à la traction du béton à hautes performances en fonction du pourcentage de substitution en gravier concassé.

On remarque une stabilité de la résistance à la traction avec l'augmentation du taux de substitution de gravier à base de BHP concassé aux différents jours.

Le maintien de la résistance à la traction en équilibre, est dû à l'équivalence de la résistance des granulats à base de béton à hautes performance et les granulats naturels.

Conclusions et perspectives

Conclusion :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit sur l'étude de valorisation et le recyclage des déchets de construction et de démolition, en étudiant certaines propriétés des granulats recyclés et des bétons de granulats recyclés à l'état frais et durci.

La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La valorisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnement, d'une part elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis, et d'autre part de protéger l'environnement de l'exploitation excessive des réserves de granulats naturels et soulager cet environnement des décharges nuisibles.
- Les granulats recyclés à base de béton ordinaire présentent une faible masse volumique par rapport aux granulats naturels, contrairement aux granulats recyclés à base de béton à hautes performances qui présentent des masses volumiques comparables aux granulats naturels.
- La densité des granulats recyclés sont plus faible que ceux des granulats naturels.
- La dureté des granulats recyclés à base de BO est faible par rapport aux granulats naturels, par contre les granulats recyclés à base de BHP présentent des valeurs intermédiaires entre les granulats naturels et granulats recyclés à base de BO.
- Du point de vue ouvrabilité et rhéologie, l'augmentation du taux de substitution des granulats recyclés diminue l'ouvrabilité et la maniabilité des bétons.
- Un taux d'absorption d'eau élevé des granulats recyclés complique la mise en œuvre d'un tel béton de granulats recyclés.
- Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés à base de BO présentent une absorption d'eau plus élevée et contiennent une quantité importante d'ancien mortier, néanmoins l'absorption d'eau des granulats recyclés à base de BHP reste inférieur à celle des BO.

- La résistance à la compression et à la traction du béton recyclé à base des granulats de béton ordinaire présentent une diminution de 25% et 22% respectivement avec un taux de substitution de gravier recyclés égal à 100% par rapport au béton de 100% de granulats naturels, par contre le béton recyclé à base des granulats de béton à hautes performance reste stable par rapport aux bétons témoin.
- Il est donc essentiel de maîtriser la quantité et la qualité de la pâte de ciment présent sur les granulats d'origine afin de comprendre leur influence sur les propriétés des bétons de granulats recyclés de béton.
- L'application des granulats recyclés nous permis de mettre en évidence qu'ils peuvent fournir un béton de résistance caractéristique à 28 jours bien supérieure à 20 Mpa, valeur admise antérieurement dans la formulation mais avec beaucoup plus de méfiance quant à son comportement.

Cette recherche a ouvert la porte à des recherches nouvelles qui doivent s'intéresser à la valorisation des sous produits dans la confection des bétons hydrauliques.

Ce travail ouvre différentes perspectives :

- La détermination d'autres caractéristiques tels que, le module d'élasticité, le retrait et le fluage.
- Influence des paramètres affectant sur la composition du béton ainsi que les paramètres liés à l'environnement.
- Etude des aspects de durabilité des bétons à base des granulats recyclés.

Références

Bibliographie

- [1] **INRA** Institut National de la Recherche Agronomique, 'Gestion des déchets' guide pour les établissements publique d'enseignement supérieur ou de recherche, France, Novembre 2002.
- [2] Actu-Environnement Dictionnaire Encyclopédique ,23 Octobre 2011.
- [3] Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, texte original dans son état 2009, Les autorités fédérales de la Confédération suisse
- [4] <http://fr.wikipedia.org/w/index.php>,titre: Déchets de constructions et démolition.
- [5] **Saadani S.**, 'Comportement des bétons à base de granulats recyclés' mémoire magister Université Mentouri Constantine, Algérie pp.132
- [6] **Munck-Kampmann B.**, 'European trends in waste generation and waste management', in 'recycling and reuse of waste materials'proceeding of an international symposium, Edited by R. K. Dir, M. D. Newlands and J.E.Halliday,published by T.Thelford .London,sept.2003, pp.1-22
- [7] [http:// www.techno-science.net/illu_ Recyclage.pfp](http://www.techno-science.net/illu_Recyclage.pfp). 'Recyclage et valorisation'.2011.
- [8] **Husson B., Escadeillas G., Carles-Gibergues, A .et Vaquier, A.**, 'Stratégie d'étude des déchets et sous-produit : valorisation ou mise en décharge', Revue française de génie civil, Vol .2 n° 8,1998, pp.985-997
- [9] **Ramachandran V.S.**, 'Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton', CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.
- [10] **Bonnet S., Turatsinze A et Granju J-L.**, 'Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment', Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 2004-N° 6.
- [11] **Quebaud M., Courtial M. et Buyle-Bodin F.**, 'Le recyclage des matériaux de démolition', Matériaux et structure, travaux, n° 721, France, juin 1996
- [12] **Melton J. S.**, 'Guidance for recycled concrète aggregate use in the highway environment, in Recycling Concrète and Other Materials for Sustainable Development', ACI International, Spécial Publication SP-219, Edited by T. C. Liu. And Ch. Meyer, Published by ACI, USA, 2004, pp. 47-60.
- [13] **Rousseau E., Van Dessel J. et Legrand C.**, 'Le recyclage des matériaux de démolition dans l'union Européenne', CSTC, Automne 1995, pp. 13-21

- [14] **Hendricks Ch. F.**, 'European standard for recycled aggregates in construction', Proceedings of the International Recycling World Congress R'99, Vol III, Geneva Switzerland, Feb 2-5 1999, pp 108-113
- [15] **Oikonomou N. D.**, 'Recycled concrete aggregates', Cernent and Concrete Composite, Vol. 27, issue 2, Feb. 2005, pp. 315-318
- [16] **Simons B. et Vyncke J.**, 'Les déchets de construction et de démolitions', CSTC, Printemps 1993, pp. 32-41.
- [17] **Rousseau E., Van Dessel J. and Legrand C.**, 'Le recyclage des matériaux de démolition dans l'union européenne', CSTC, 3eme trimestre 1995, pp. 15-21
- [18] **Quebaud M.**, 'Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats', Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [19] Programme d'Actions Prioritaires Centre d'Activités Régionales Juin 2004
- [20] **Rao A. and Jha K.N. Misra S.**, 'Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete', Resource conservation and Recycling, 2007, pp 71-81.
- [21] **Khalaf F.M. and Devenny A.**, 'Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review'. ASCE J Mater Civil Eng 2004, pp.331-340.
- [22] **De Juan M.S. and Gutiérrez P.A.**, 'Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate', Construction and Building Materials, 23 (2), 2009 pp. 872-877
- [23] **Douara T.H.**, 'Caractérisation physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [24] **Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S.**, 'Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete', Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 829-836, 2009.
- [25] **Etxeberria M., Vazquez A., Mari A. and Barra M.**, 'Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled concrete', Cement and concrete research, 2007.
- [26] **Courard L.**, 'Le cycle de vie des matières : les matériaux de construction et de démolition' Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006 sur l'état de l'environnement wallon, juin 2006.
- [27] Le retraitement en place des chaussées au moyen du ciment, dossier ciment (Ed. J.P. Jacobs, Febelcem), 30, Mars 2003.
- [28] 'Guide information sur le recyclage des matériaux secs' Recyclage - Quebec, 1999.

[29] **Laby F.**, Actu-Environnement.com, 'Le recyclage des déchets de démolition pourrait être amélioré par la déconstruction sélective', mars 2007.

[30] Commissariat Général au Développement Durable, 254 millions de tonnes de déchets produits par l'activité construction en France en 2008, Chiffres et Statistiques n° 164, octobre 2010.

[31] Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – division nuisances, ressources, sécurité, déchets, Déchets du BTP – Plan de Gestion pour Paris et la Petites couronne, Juillet 2004.

[32] DRE Haute Normandie, 'Prendre en compte la gestion des déchets de chantier de démolition ou de réhabilitation lourde dans les marchés publics' – Guide de recommandations à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre, France, 2005.

[33] PDR, US Département of Housing & Urban Development - Office of Policy Development and Research, 'A guide to Deconstruction', February 2000

[34] Bradley Guy & al., Design for Deconstruction, 2004.

[35] **Molin C., Larsson K. and Arvidsson H.**, 'Quality of reused crushed concrete strength, contamination and crushing technique', RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne

[36] **Müller A. and Linsz E.**, 'Processing of concrete with high performance sonic impulses, Actes du colloque Use of Recycled' Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.

[37] **Larbi J.A.**, 'Preliminary laboratory investigation of thermally treated recycle concrete aggregate for general use in concrete', Waste management series, volume1, 2000, pp. 129-139.

[38] **Wan.**, 'Removal of cement mortar remains form recycled aggregate using pre-soaking approaches', Resources Conservation and Recycling, 2007, pp. 82-101.

[39] **Shi-Cong Kou.**, 'Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates', Cement & Concrete Composites, 2010

[40] NF EN 933-11, 'Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 11 : essai de classification des constituants de granulats recyclés' Norme française, 2009.

[41] **IREX**, institut pour la recherche appliqué et l'expérimentation en génie civil 'recyclage complet des bétons, étude de faisabilité', France, Mai 2011.

[42] NF EN 1744-1, 'Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1 : Analyse chimique'. Norme française, 2010.

- [43] EN 1744-5, 'Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 5 : Détermination des sels chlorures solubles dans l'acide' Norme française, 2007.
- [44] NF EN 1744-6, 'Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 6: Détermination de l'influence d'un extrait de granulat recyclé sur le temps de prise initial du ciment'. Norme française, 2007.
- [45] **Schouenborg B.**, 'Test methods adapted to alternative aggregates' -RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.
- [46] NF EN 12620+A1, 'Granulats pour béton'. Norme française, 2008.
- [47] NF EN 13139, 'Granulats pour mortier' Norme française, 2003.
- [48] NF P 18-545, 'Granulats – Eléments de définition, conformité et codification' Norme française, 2004.
- [49] NF P 18-545, 'Granulats – Eléments de définition, conformité et codification. Norme française, 2010.
- [50] **Hansen T.C.**, 'Recycling of demolished concrete and masonry', RILEM report 06, published by E&FN Spon London, 1992.
- [51] **Wang Z. and Huang X.**, 'repeated reuse of demolished concrete wastes as aggregates' Cement and concrete composites, China 2005.
- [52] **Kenai S., Debieb F. and Azzouz L.**, 'Mechanical properties and durability properties of concrete made with coarse and fine recycled aggregates' challenges of concrete construction ,September 2002.
- [53] **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 & Concrete Composites 33, 2011, pp 286–291.
- [54] **Kou S.C. and Poon C.S.**, 'Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates' Cement & Concrete Composites 31, 2009, pp 622–627.
- [55] **Yanabashi K., Yonezawa T., Arakawa K. and Yamada M.**, 'A new concrete recycling technique for coarse aggregate regeneration process' Cement & Concrete Composites 32, 2007, pp 511–522.
- [56] **Evangelista L. and de Birto J.**, 'durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates' Cement & Concrete Composites 32, 2010, pp. 9–14
- [57] **Belen G. F., Fernando M. A., Herrador M. F. and Sindy S. P.**, 'Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate' Construction and Building Materials 28, 2011, pp. 111-116.

- [58] **Fonseca N., de Birto J. and Evangelista L.**, 'The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made recycled waste' *Cement & Concrete Composites* 33, 2011, pp.637–643
- [59] **Cabral A. E. B., Dal M. and Rebeiro D.**, 'Compressive strength and deformation modelling of recycled aggregate concrete' *Cement & Concrete Composites* 31, 2007, pp.545–560
- [60] **Muler E., Blaakmeer J., Nijland T. and Tamboer L.**, 'A closed material cycle for concrete as part of integrated process for the reuse of the total flow c&d waste' *Cement & Concrete Composites* 31, 2005, pp.555–561
- [61] **Debieb F., Courard L., Kenai S. and Degeimbre R.**, 'Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates' *Construction and Building Materials* 23, 2009, 3382–3387
- [62] **Debieb F. and Kenai S.**, 'The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete' *Construction and Building Materials* 22, 2008, pp.886–893
- [63] **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 recyclés' 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [64] **Katz A.**, 'Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete', *Cement and concrete research*, 33 (5), 2003, pp. 703-711
- [65] **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), 2008, pp. 703-714
- [66] **Gómez-Soberón J.M.V.**, 'Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study', *Cement and concrete research*, 32 (8), 2002, pp. 1301-1311
- [67] **Wirquin.**, 'Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés', *Materials and Structures*, 33, 2000, pp. 403-408,
- [68] **Sánchez M. and Gutierrez P. A.**, 'Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate', *RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne
- [69] **Ravindraradjah R., Loo Y.H. and Tam C. T.**, 'Recycled concrete as fine and coarse aggregate in concrete', *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, 1987, pp. 2.4-220.
- [70] **Braymand S.**, 'Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons'. Nantes. 2010.

- [71] **Zaharieva R., Byle-Bodin F. and Wirquin E.**, 'Frost résistance of recycled aggregate concrète', *Cernent and Concrète Research*, 34, 2004, pp. 1927-1932.
- [72] **Ravindrardjah R. S. and Tam C. T.**, 'Properties of concrète made with crushed concrète as coarse aggregates', *Magazine of Concrète Research*, Vol. 37, N° 130, March 1985, pp. 29-38.
- [73] NF P 18-560 '*Granulats* - analyse granulométrique par tamisage', Norme française, 1990
- [74] NF P 18-561 '*Granulats* - mesure du coefficient d'aplatissement' Norme française, 1990
- [75] BS 812-100 'testing aggregates – general requirements for apparatus and calibration' Norme anglaise, 1990.
- [76] NF P 18-554 'Granulats – mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption', Norme française, 1990
- [77] NF P 18-555 'Mesures des masses volumique coefficient d'absorption et teneur en eau des sables', Norme française, 1990
- [78] NF P 18-598 'Granulats - Equivalent de sable', Norme française, 1991.
- [79] NF P 18-591 'Granulats - Détermination de la propreté superficielle', Norme française, 1990.
- [80] NF P 18-573 'Granulats - Essai de Los Angeles', Norme française, 1990
- [81] NF EN 1008 'Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton' (indice de classement : P18-211), Norme française, Juillet 2003.
- [82] **Dreux G. et Festa J.**, 'Nouveau guide de béton et de ses constituants'. Ed. Eyrolles, 1995-1998.
- [83] NF P 18-406, 'Bétons 'essai de compression' Norme française, 1981
- [84] NF P 18-407, 'Bétons - essai de traction' Norme française, 1981
- [85] NF P 18-451, 'Bétons - essais d'affaissement'. Norme française, 1981.
- [86] NF P 18-404, 'Bétons-essais d'étude, de convenance et de contrôle, confection et conservation des éprouvettes'. Norme française, 1981.
- [87] NF P 18-416, 'Bétons - surfaçage ou soufre des éprouvettes cylindrique'. Norme française, 1994.
- [88] **Hadjieva-Zaharieva R.**, 'durabilité des bétons à base des granulats recyclés' thèse de doctorat de l'université d'Artois, France, 1998.

- [89] **Debieb F.**, 'performance et durabilité de béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates' thèse de doctorat, de l'USTHB Alger, pp 168, Algérie ,2007.
- [90] **Rahal K.**, 'Mechanical properties of concrète with recycled coarse aggregate', Building and Environment, 42, 2007, pp. 407-415
- [91] **Poon C. S. and Chan D.**, 'Feasible use of recycled concrète aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base', Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 8, 2006, PP. 569-577.
- [92] **Louis R. and George C.**, 'Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production' Building and Environment, 31, 2008, pp. 307-316
- [93] **Tori L., Kawamura M., Takemoto K. and Hasaba S.**, 'Applicability of recycled concrète aggregate as an aggregate for concrète pavement', Transaction of the Japan concrète institute, Vol. 6, 1984, pp. 133-140
- [94] **Zaharieva R., Byle-Bodin F., Skoczylas F. and Wirquin E.**, 'Assessment of surface permeation properties of recycled aggregate concrète', Cernent and Concrète research, 25, 2003, pp. 223-232.
- [95] **Debieb F et Kenai S** 'Propriétés mécanique et durabilité des bétons à base de gros et fins granulats de béton de démolition' colloque national de génie civil à Mostaganem, Algérie 2000.
- [96] **Gómez soberon .,** 'Shrinkage and creep of recycled concrete interpreted by the porosity of the aggregate' Spain 2003, pp. 565-576.