



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

Présenté par
MAKHLOUFI Kenza

THÈME : Comportement des bétons à base de granulats de déchets de démolition de béton sous différentes conditions de durcissement.

Soutenu le : 21/06/2016

Devant le jury :

DJELLOUL Chafia	Président	MAA	UBBA
BENAICHI El Hadj	Encadreur	MAA	UBBA
MESSAOUDENE Ibrahim	Examineur	MCA	UBBA
ROKBANE Abd el Madjid	Examineur	MAA	UBBA

2016

REMERCIEMENT

Il n'est jamais facile de faire des remerciements, toujours peur d'oublier quelques noms ou des proches alors que nous vous prions de bien vouloir nous excuser si les lignes qui vont suivre vous paraissent incomplètes. Les gens qui nous entourent savent bien à quel point on les remercie.

Tout d'abord, je tiens à remercier "**ALLAH**" le tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que **ma mère** qui m'a toujours encouragé et soutenu durant toute la durée de mon étude.

Je tenais tout d'abord à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur : **Ben aychi El Hadj**, mon encadreur, pour la proposition de ce sujet de recherche, sa grande patience, tous les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer, pour la confiance qu'il m'a accordé. Je le remercie pour l'aide qu'il a su m'apporter.

Je voudrai remercier l'ensemble de **mes jury** de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil : **ZOBIR, FARID** et **FATIHA** qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel administratif du département de Génie civil de BBA ainsi que tous mes collègues Khawla, Hadjer, Salma, Taoues, Siham, Yasmin, Khalida, Fatima, Soumia, Nadjet, Karima, Imen, Ismahen, Chayma et Narimen ; sans oublier Houssam, Bilal, khalil, Ammar, Abd El Rahman, Ibrahim, Hichem, Farid, Abd Allah, Massi, Yamin, Taher, et tout membre du département de génie civil.

Un remerciement spécial à tous **mes enseignants** du département de Génie civil de l'université du BBA et exceptionnellement **Mr Bennia Abd El Razak, Loumachi, Kessal Oussama** et **Maafi Nabil**.

Je tiens enfin à remercier **Omar** et **ma famille** surtout **mes sœurs** pour leur soutien et leur aide.

Et tous qui a m'a aidé à réaliser notre travail.

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et l'unique qui m'a offert le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie.

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père ;

Spécialement à ma chère mère ;

A mes frères Abdou et Saàdane ;

A ma sœur Toufika, son époux Houcine et ses enfants ;

A ma sœur Samia, son époux Aissa et ses enfants ;

A ma sœur Mahira et son époux Dominique ;

A ma sœur Mouna et son époux Djalel ;

A Wahiba, Souad, Siham et Rima ;

A karim et sa famille ;

A tout mes oncles et tantes ;

A tous mes amis ;

*A mes collègues de promo master 2 génie civil A
tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.*

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs années, des recherches sont effectuées dans les universités comme dans le domaine privé afin d'étudier le comportement des matériaux recyclés des débris routiers et des débris de construction provenant de la démolition comme agrégats dans la fabrication du béton, étant donné que la mise en décharge des déchets de ces matériaux présente de nombreux problèmes (la place occupée par les sites de stockage, importance des coûts, impact sur l'environnement). Donc il est nécessaire de trouver un moyen pour la valorisation et la réutilisation de ces déchets et par conséquent trouver une autre source des granulats.

Le but principal de notre étude est de démontrer techniquement la possibilité d'utiliser partiellement ou totalement les granulats (déchets de démolition de béton) comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton hydraulique.

L'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution (0, 30, 50, 70, 100%) pour chaque type de granulat recyclé.

Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible de fabriquer un béton à base d'agrégats de démolition de béton avec des propriétés physiques et mécaniques comparables à celles du béton ordinaire avec un taux de remplacement des agrégats naturels par les agrégats recyclés de 30%, et qu'on peut l'améliorer jusqu'à 50% avec l'incorporation des ajouts minéraux (laitier et pouzzolane).

Les études des effets de la dégradation en milieux chimiquement agressifs sur les bétons à base de 50% de déchet de démolition de béton à moyenne terme montrent qu'on peut utiliser ce béton dans ces milieux.

Mots-clés : Agrégats recyclés, démolition, caractéristiques physico-mécaniques, milieux agressifs.

ABSTRACT

For several years, research is done in universities as in the private sector to study the behavior of recycled materials road debris and construction waste from demolition as aggregates in concrete production, given that the landfill of waste of these materials has many problems (the place of storage sites, high costs and environmental impact).

So it is necessary to find a way for the recovery and reuse of waste and therefore find another source of aggregates.

The main purpose of our study is to technically demonstrate the possibility of partially or fully use aggregates (Concrete demolition waste) as substitution of natural aggregate in the manufacture of hydraulic concrete.

The experimental study involved the substitution rate (0, 30, 50, 70 and 100%) for each type of recycled aggregate.

The results support the conclusion that it is possible to manufacture a concrete base concrete demolition aggregates with physical and mechanical properties comparable to those of plain concrete with a replacement rate of natural aggregates by recycled aggregates 30 %, and can improve up to 50% with the incorporation of mineral additives (slag and pozzolan).

Studies of the effects of the deterioration in chemically aggressive environments on containing 50% medium term concrete demolition waste concrete shows that we can use this concrete in these environments.

Keywords: recycled aggregates, demolition, physico-mechanical properties and aggressive environments.

Table des matières

Chapitre I : Introduction

I.1 Problématique:.....	1
I.2 Objectifs :	1
I.3 Plan de travail :	2

Chapitre II : Revue de documentation

II.1 Introduction :	3
II.2 Définitions :	3
II.3 Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition à l'étranger :	4
II.4 Natures de déchets de bâtiments :	9
II.4.1 Les déchets inertes (DI) :	9
II.4.2 Les déchets de chantier :	9
II.4.3 Les déchets de démolition :	11
II.5 Gestion des déchets de BTP :	11
II.5.1 Principe de gestion :	11
II.5.1.2 La mise en œuvre :	11
II.6 Valorisation des déchets :	12
II.7 Recherches menées sur le recyclage des matériaux de construction :	12
II.8 Destination et traitement des déchets de chantier :	13
II.9 Destination :	14
II.10 Réemploi-Réutilisation :	14
II.11 Mise en décharge :	15
II.12 Stratégies de traitement des déchets :	15
II.12.1- Arrêt de la production du déchet ou du produit générateur de déchets :	16
II.12.2- Optimisation et innovation technologique :	16
II.12.3- Rejet « éco compatible » des déchets :	16
II.12.4- Stockage :	17
II.13 Utilisation des matériaux de bâtiment recyclés :	17
II.14 Processus de fabrication des granulats recyclés :	17
II.15 Procédés de récupération et de recyclage des matériaux secs :	19
II.15.1 Les différents types de concasseurs :	22
II.15.2 Les méthodes de séparation des impuretés :	23

Table des matières

II.16 Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci :	24
II.16.1 Etat frais :	24
II.16.1.1 Masse volumique :	24
II.16.2 Etat durci :	24
II.16.2.1 Absorption :	24
II.16.2.2 Porosité :	25
II.16.2.3 Perméabilité :	25
II.16.2.4 Résistance à la compression :	25
II.16.2.5 Résistance à la traction par flexion et par fendage :	26
II.17 Les principaux ajouts minéraux actifs :	26
II.17.1 Les laitiers de haut fourneau :	26
II.17.1.1 L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons :	26
II.17.2 La pouzzolane :	27
II.17.2.1 L'effet de la pouzzolane sur les caractéristiques des bétons :	28
II.18 Durabilité du béton à base de granulats recyclés :	29
II.18.1 Résistance aux eaux agressives.....	30
II.18.1.1 Définition :	30
II.18.1.2 Eaux contenant des sulfates :	30
II.18.1.3 Eaux contenant des chlorures :	31
II.18.1.4 Eau de mer :	32
II.18.2 Résistance au gel/dégel :	34
II.18.2.1 Le processus gel/dégel :	34
II.18.2.2 Influence des conditions environnementales sur la dégradation au gel/dégel :	36
II.18.2.3 Les cycles de gel/dégel :	37
Chapitre III : Matériaux et expérimentation	
III.1 Introduction :	39
III.2 Matériaux utilisés :	39
III.3 Caractéristiques des matériaux:.....	39
III.3.1 Caractéristiques du gravier :	39
III.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :	39
III.3.1.2 Masse volumique :	41

Table des matières

a. La masse volumique apparente (γ):	41
b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ):	41
III.3.1.3 La compacité :	42
III.3.1.4 La porosité :	42
III.3.2 Caractéristique du sable :	43
III.3.2.1 Analyse granulométrique :	43
III.3.2.2 Modules de finesse:	45
III.3.2.3 Equivalent de sable :	46
III.3.2.4 La masse volumique :	49
a. Masse volumique apparent :	49
b. Masse volumique absolue :	49
III.3.3 Caractéristiques du ciment utilisé :	50
a. Propriétés chimiques et minéralogiques :	50
b. Propriétés physiques :	50
c. Essais mécaniques sur le ciment :	52
III.3.4 L'eau de gâchage :	52
III.3.5 L'eau de mer :	53
III.3.6 L'adjuvant :	53
III.3.6.1 Description :	53
III.3.6.2 Domaines d'application :	53
III.3.6.3 Propriétés :	54
a. Sur béton frais :	54
b. Sur béton durci :	54
III.3.6.4 Caractéristiques :	54
III.3.6.5 Mode d'emploi :	54
III.3.6.6 Dosage :	54
III.3.6.7 Conditionnement et stockage :	55
III.3.6.8 Durée de conservation :	55
III.3.7 Les ajouts minéraux :	55
III.3.7.1 Les caractéristiques chimiques :	55
III.3.7.2 Les caractéristiques physiques :	56
III.4 Etudes des mortiers :	56

Table des matières

III.4.1 Confection des éprouvettes :	56
III.4.2 Programme d'essais :	56
III.4.2.1 Résistance à la traction par flexion :	56
III.4.2.2 Résistance à la compression :	57
III.5 Formulation de béton :	58
III.5.1 Méthode de Calcul de la composition du béton :	58
a. Le rapport (C/E):.....	59
b. La dépense en eau :.....	60
c. La dépense en ciment:.....	60
d. La dépense en gravier :	60
e. La dépense en sable :	60
III.6 Techniques expérimentales :.....	61
III.6.1 Les essais sur le béton à l'état frais :	61
III.6.1.1 Le malaxage :	61
a. Malaxage du béton :	62
b. Malaxage à la main :	62
III.6.1.2 Affaissement au cône d'abrams (slump test):	63
III.6.1.3 Vibration :	63
III.6.2 Les essais sur béton durci :	64
III.6.2.1 Durcissement de béton :	64
III.6.2.2 Mode de conservation de béton	64
III.6.3 Détermination de la résistance par :	65
III.6.3.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement):	65
III.6.3.2 La presse hydraulique :	65
III.6.3.3 Essai d'écrasement :	65
III.6.3.4 La résistance à la traction far fendage :	66
III.6.3.5 Absorption d'eau :	67
III.7 Mode d'action des environnements agressifs :.....	67
III.8 Essai de durabilité aux cycles de gel et de dégel :.....	68
III.9 Conclusion :	69

Table des matières

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction :	70
IV.2 Etude des mortiers :	70
IV.2.1 Comportement du mortier à l'état frais :	70
IV.2.2 Comportement du mortier à l'état durci :	71
IV.2.2.1 Résistance à la compression :	71
IV.2.2.1.1 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression :	73
IV.2.2.2 Résistance à la traction par flexion :	74
IV.2.2.1 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction :	76
IV.3 Etude des bétons :	77
IV.3.1 Comportement du béton à l'état frais :	77
IV.3.1.2 Masse volumique :	79
IV.3.2 Comportement du béton à L'état durci :	82
IV.3.2.1 Masse volumique :	82
IV.3.2.2 La résistance à la compression :	85
IV.3.2.3 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression :	86
IV.3.2.4 Optimisation du dosage entraîneur d'air :	87
IV.3.2.5 Absorption d'eau par immersion :	88
IV.4 Durabilité :	89
IV.4.1 Résistance aux milieux agressifs :	90
IV.4.1.1 La perte de masse :	92
IV.4.2 Résistance au gel/dégel :	94
IV.4.2.1 La perte de masse :	95
IV.5 La résistance à la traction par fendage :	95
IV.6 Conclusion :	96

Chapitre V : Conclusion et recommandations

V.1 Conclusion générale :	97
V.2 Recommandations :	98

Liste des Tableaux

Chapitre II : Revue bibliographique

Tableau II.1 : types de gestion des matériaux secs aux états –unis 1998.	5
Tableau II.2 : destination des déchets de chantier	14
Tableau II.3 : stratégies de recyclage des débris de construction et de démolition	21

Chapitre III : Matériaux et expérimentation

Tableau III.1 : La masse volumique apparente, absolue, compacité et porosité du gravier concassé (8/15), (15/20).....	42
Tableau III.2 : module de finesse du sable	45
Tableau III.3: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SV} et E_{SP}	48
Tableau III.4 : Résultats d'essais d'équivalent de sable des deux sables	48
Tableau III.5 : La masse volumique apparente, absolue, compacité et porosité des sables utilisés.....	49
Tableau III.6 : Analyse chimiques du ciment utilisé.....	50
Tableau III.7 : Composition minéralogique du clinker.....	50
Tableau III.8 : Essais physiques du ciment utilisé.....	52
Tableau III.9: Résistance à la traction et à la compression du ciment.....	52
Tableau III.10: Analyse chimique de l'eau utilisée.....	53
Tableau III.11: Analyse chimique de l'eau de mer utilisée.....	53
Tableau III.12 : L'analyse chimique des ajouts	55
Tableau III.13 : Les caractéristiques physiques des ajouts.....	56
Tableau III.14 : Valeurs des coefficients A et A'.....	59
Tableau III.15 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	60
Tableau III.16: Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment.....	60
Tableau III.17: Formulation des mélanges de béton pour aff=5-6 cm	61

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1 : Quantité d'eau réellement utilisée des mortiers avec des différents taux de substitution.....	69
Tableau IV.2: Résistance à la compression des mortiers :	71
Tableau IV.3: Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers.....	72
Tableau IV.4 : Résistance à la traction par flexion du mortier étudié.....	74

Liste des Tableaux

Tableau IV.5: Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion des mortiers.....	76
Tableau IV.6: Quantités d'eau réellement utilisées pour les différents taux de substitution....	78
Tableau IV.7: Les masses volumiques à l'état frais	79
Tableau IV.8: Les masses volumiques à l'état durci.....	82
Tableau IV.9: La résistance à la compression du béton.....	85
Tableau IV.10: Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression du béton	86
Tableau IV.11 : optimisation du dosage entraîneur d'air	88
Tableau IV.12: Absorption d'eau par immersion.....	89
Tableau IV.13: PH des différents milieux agressifs.....	90
Tableau IV.14: Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression.....	91
Tableau IV.15 : perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs.....	93
Tableau IV.16 : Résistance au gel des bétons.....	94
Tableau IV.17 : perte de masse au gel/dégel des bétons recyclés.....	95
Tableau IV.18 : La résistance à la traction des bétons testés.....	96

Liste des figures

Chapitre II : Revue de documentation

Figure II.1 : composition moyenne des matériaux secs générés au Canada (1993) en pourcentage	4
Figure II.2 : composition des débris de construction et de démolition du Vermont(en poids)..	6
Figure II.3: Les différentes catégories de déchets de chantiers.....	11
Figure II.4 : Trilogie de circulation de la matière.....	16
Figure II.5 : Stratégies de gestion des déchets	19
Figure II.6 : Réception des bétons de démolition.....	19
Figure II.7 : Stock de matériaux démolition destiné au recyclage.....	19
Figure II.8 : Préparation à la cisaille.....	19
Figure II.9 : Déferraillage électromagnétique.....	20
Figure II.10 : Agrégats recyclés.....	22
Figure II.11 : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques	32
Figure II.12 : Schématisation de l'influence combinée du gel et des sels de déverglaçage....	35
Figure II.13 : Description des paramètres d'un cycle de gel-dégel.....	38

Chapitre III : Matériaux et expérimentations

Figure III.1: Courbe granulométrique de graviers concassés (8/15), (15/20).....	40
Figure III.2: Courbe granulométrique du sable naturel.....	44
Figure III. 3: Courbe granulométrique du sable recyclé.....	45
Figure III. 4: Schéma de flexion de trois points.....	57
Figure III.5 : Schéma de l'essai de compression.....	58
Figure III.6: Distribution des contraintes lors de l'essai Brésilien.....	67

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1: Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassée.....	70
Figure IV.2: Variation de la résistance à la compression à 28 jours des différents types des mortiers	71

Liste des figures

Figure IV.3 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la compression du mortier à base de 50% de déchet de béton concassé.....	73
Figure IV.4 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression du mortier à base de 50% de déchet de béton concassé.....	73
Figure IV.5 : Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable de béton concassé.....	75
Figure IV.6 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la traction par flexion à base de 50% de déchet de béton concassé.....	76
Figure IV.7 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la traction par flexion à base de 50% de déchet de béton concassé.....	77
Figure IV.8 : Relation entre le rapport E/C des bétons et le pourcentage de substitution en granulats de béton de démolition.....	78
Figure IV.9 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés à l'état frais.....	80
Figure IV.10 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux à l'état frais.....	80
Figure IV.11 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts d'entraîneur d'air à l'état frais.....	81
Figure IV.12 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés à l'état durci.....	83
Figure IV.13 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux à l'état durci.....	83
Figure IV.14 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts d'entraîneur d'air à l'état durci.....	84
Figure IV.15 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution.....	85

Liste des figures

Figure IV. 16 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la compression de béton à base de 50% de déchet de béton concassé.....	86
Figure IV.17 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression de béton à base de 50% de déchet de béton concassé.....	86
Figure IV.18 : Influence du dosage de MEDA AIR sur la résistance à la compression.....	88
Figure VI.19 : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types des bétons.....	89
Figure IV.20 : Effet des milieux agressifs sur la résistance à la compression des bétons.....	91
Figure IV.21 : variation de perte de masse des bétons conservés dans les milieux agressifs..	93
Figure IV.22 : Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés.....	96

Liste des photos

Chapitre III : Matériaux et expérimentations

Photo III.1 : Tamiseuse.....	39
Photo III.2 : Le sable naturel utilisé.....	43
Photo III.3 : Le sable de démolition de béton utilisé.....	44
Photo III.4 : Essai équivalent de sable.....	47
Photo III.5 : Pouzzolane forme de poudre.....	55
Photo III.6 : Laitier forme de poudre.....	55
Photo III.7 : Les éprouvettes de mortier.....	56
Photo III.8 : Essai de flexion.....	57
Photo III.9 : Essai de compression.....	58
Photo III.10 : malaxeur.....	62
Photo III.11 : Essai au cône d'Abrams.....	63
Photo III.12 : Presse hydraulique.....	65
Photo III.13 : Essai d'écrasement.....	66
Photo III.14 : Essai de fendage.....	67
Photo III.15 : Conservation des bétons dans les milieux agressifs.....	68

Chapitre IV : Résultats et discussions

Photo IV.1 : Mesure de PH.....	90
Photo IV.2 : Essai de compression.....	91
Photo IV.3 : Les éprouvettes après 28 jours d'immersion dans les milieux agressifs.....	93
Photo IV.4 : Essai de fendage.....	95

Liste des abréviations

D&C : déchets de démolition de construction.

BTP : Bâtiment et travaux publics.

CSTC : centre scientifique et technique de la construction.

OCDE : organisation de coopération et de développement économique.

BRH : brise roche hydraulique.

DI : déchets inertes désignés.

RAC : Béton de granulats recyclés.

NF : Norme Française.

NF P : Norme Française applicable au bâtiment et génie civil.

C : ciment.

E : eau.

E/C : rapport eau sur ciment.

T : le temps.

D_{\max} : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

γ : masse volumique absolue.

ρ : masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

e(%) : indice des vides.

A (%) : taux d'absorption.

M_H : La masse du matériau saturé d'eau.

M_S : La masse du matériau sec.

MF : module de finesse du sable.

E_{sv} : équivalent de sable visuel.

E_{sp} : équivalent de sable par piston.

R_{c28} : résistance à la compression à 28 jours.

Rc: activité du ciment.

Rb: classe du béton.

PC : pierres concassées.

G : gravier.

S : sable.

A, A' : coefficients de la qualité des granulats et des liants.

α : coefficient d'écartement.

F : charge de rupture.

SN : sable naturel.

SBD : sable de démolition de béton.

S : section de l'éprouvette.

F : charge de rupture.

Aff : affaissement au cône d'Abrams.

PZ : la pouzzolane.

L : le laitier.

R_f : résistance à la traction par fendage.

R_{rg} : résistance au gel.

R_{sat} : résistance du matériau saturé.

K_{rg} : coefficient de résistance au gel.

AEA : l'adjuvant entraîneur d'air.

PAF : Perte au feu.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CHAPITRE I :
INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

I : INTRODUCTION GENERALE

I.1 Problématique

Dans tous les pays du monde, le tissu urbain ne cesse de consommer des millions de tonnes de matériaux de constructions et de produire en parallèle des millions de tonnes des déchets de démolition. Pour un futur plus sain et rassurant, les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaires la valorisation et le recyclage des déchets. La disposition de décharge facilement accessible autour des grandes villes (France) a diminué, les distances entre les sites de démolition et les surfaces de décharges publiques sont devenues plus grandes et des pénuries critiques de bons agrégats naturels dans plusieurs surfaces urbaines.

D'après de nombreuses recherches européennes, il a été estimé qu'en France le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) a produit 2 650 000 tonnes de déchets en 2007. [1]

En Algérie, suite à des sinistres naturels comme les séismes et les crues et par vieillissement et dégradations des bâtiments publics, des ponts et des installations industrielles sont démolis mais jamais recyclés. L'industrie de construction génère aussi une quantité importante de déchets qui est rarement valorisées. Aussi l'Algérie connaît un déficit important en matériaux de construction et en particulier les agrégats et le ciment. De plus les ressources naturelles dans certaines régions de l'Algérie sont épuisées, le sable de mer est interdit, les agrégats utilisés sont amenés de très loin, et les décharges publiques sont saturées. Les objectifs sont les suivants :

Du fait de la limitation et épuisement, dans certaines régions d'Algérie, des ressources naturelles d'agrégats, l'augmentation des coûts de transport et la pollution de l'environnement par tonnage importants des déchets de démolition, il est indispensable d'étudier la possibilité de valorisation de ces déchets.

I.2 Objectifs

Notre travail a pour objectif premier de caractériser les agrégats recyclés provenant de la démolition. Ces matériaux qui sont récupérés principalement des déchets de béton, concassés sous forme d'agrégat fin recyclés (sable) qui par la suite, peuvent être mélangés partiellement avec les agrégats naturels pour former un autre type de granulats fin recyclés.

INTRODUCTION GENERALE

L'étude consiste aussi à l'évaluation expérimentale de l'influence des agrégats fins recyclés sur les caractéristiques physico –mécaniques, rhéologiques ainsi que la durabilité des bétons et mortiers conçus à base de ces agrégats sous l'effet des différents milieux agressifs.

I.3 Plan de travail

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés précédemment. Nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des parties suivantes :

- Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.
- Une revue de la documentation qui porte sur les travaux antérieurs concernant les agrégats recyclés et leur utilisation à travers quelques pays et évidemment leur influence dans la fabrication de béton.
- Une étude expérimentale a été réalisée afin d'établir en premier lieu les caractéristiques des agrégats recyclés et ensuite étudier l'effet de remplacement des agrégats naturels par les agrégats recyclés sur les propriétés du béton et mortier à l'état frais et durci à travers un programme d'essais qui tient compte des propriétés physiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton, et l'influence des ajouts minéraux actifs (Pouzzoles, laitier) et de MEDA-AIR sur le comportement rhéologique des bétons et mortiers. et l'effet des milieux chimiquement agressifs sur le comportement du béton à bases des agrégats recyclés fin.
- Une analyse et une discussion des résultats obtenus tout en faisant des observations sur le béton témoin composé à 100% des granulats naturels.

Finalement une conclusion générale sur cette étude avec des recommandations qui porte sur les particularités des agrégats recyclés ainsi que les mesures à prendre en compte lors de l'utilisation de ces agrégats dans la fabrication du béton.

CHAPITRE II :

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

II : REVUE DE DOCUMENTATION

II.1 Introduction

Les chantiers de construction et de démolition du BTP génèrent une grande diversité de déchets. Aujourd'hui environ 90 % sont éliminés en décharge. Le recyclage impose des contraintes de tri et de collecte alors que les gisements sont dispersés, et que les procédés de démolition génèrent en général des déchets en mélange. Certains de ces déchets, en particulier les déchets minéraux, peuvent être réutilisés après tri et traitement particulier, dans le domaine de la construction d'infrastructures routières.

Dans ce chapitre, on définira les types de déchets de chantier du bâtiment et leurs caractéristiques, ainsi que le plan de gestion des déchets de bâtiment et leur valorisation. On passera ensuite à la réglementation des déchets inertes en Algérie.

II.2 Définitions

Le déchet [2] peut être définie de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état du déchet.

Parmi les nombreuses définitions existantes, nous pouvons mentionner celles qui nous paraissent les plus intéressantes :

- Le déchet est un résidu abandonné par son propriétaire, car inutilisable, sale ou encombrant.
- Le déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou l'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.
- Les déchets sont des résidus de l'emploi de matières solides qui peuvent être exploitables ou non exploitables.
- Les déchets sont des matières normalement solides ou semi-solides résultant des activités humaines et animales qui sont indésirables ou dangereuses.

La pollution [3] est toutes les causes de dégradation qui menacent la protection de la nature, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques et la conservation des ressources naturelles. Toutes les altérations et contaminations des milieux récepteurs sont considérées comme pollution.

Toute substance de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs, d'une façon générale porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement.

II.3 Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition à l'étranger

L'idée de recyclage des matériaux de démolition était envisagée depuis la seconde guerre mondiale ou les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient réemployés en Grande Bretagne et en Allemagne pour la reconstruction de différents ouvrages, les granulats obtenus par ce recyclage comportaient une forte proportion de brique compte tenu de la nature des constructions à cette époque.

Les travaux de recherche qui ont fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolit et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton, connaissent actuellement une large application sur le terrain dans divers pays du monde. [4]

Au Canada

Il y a dix ans, le Canada générait environ 15 millions de tonnes par année de matériaux secs.

En 1992, cette quantité diminuait à peu plus de 11 millions de tonnes. Ce sont les résidus issus de la construction et de la réparation des routes et des ponts qui arrivent en tête avec de 55 à 63 % de la génération totale des matériaux secs. Dans une moindre proportion, la quantité générée par la construction, la rénovation et la démolition de bâtiments représentent entre 37 et 45 %.

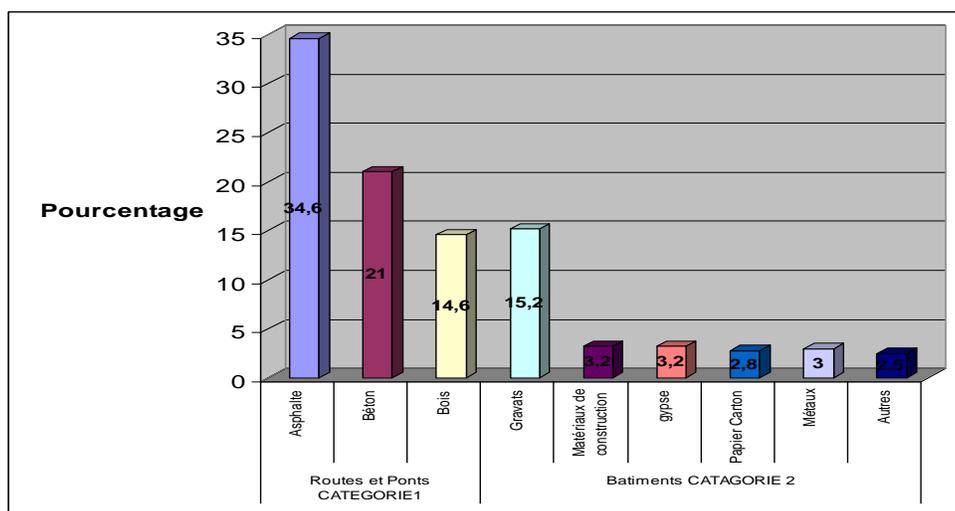


Figure II.1 : Composition moyenne des matériaux secs générés au Canada (1993) en pourcentage [5].

REVUE DE DOCUMENTATION

Les modes de gestion des matériaux secs pratiqués au Canada sont principalement l'enfouissement dans un lieu prévu à cet effet, l'incinération ou le recyclage. Cela dit, certaines régions ont déjà eu recours aux déversements en mer ou dans des lacs (Ontario et Colombie-Britannique). En moyenne, 43 % des résidus de construction et de démolition sont détournés des lieux d'enfouissement. Le secteur des routes et des ponts demeure le plus important générateur de matériaux secs avec 40,3 % des matériaux récupérés (asphalte et béton principalement) [6]

Aux Etats-Unis

Selon un rapport publié en 1986 [7], les résidus de construction et de démolition représenteraient 24 % de tous les résidus solides disposés dans les lieux d'enfouissement, soit 31,5 millions de tonnes par année. Toutefois, lors de la conférence nationale sur les matières résiduelles en 1992, la quantité de résidus avait été évaluée à 110 millions de tonnes, chiffre beaucoup plus plausible car, selon une étude datant de 1998 [8], 136 millions de tonnes de matières résiduelles seraient produites annuellement (voir **tableau II.1**).

Au cours des 25 dernières années, le taux de génération de débris de construction et de démolition a été estimé entre 0,05 kg/habitant et 1,60 kg/habitant par jour. Cet écart rend compte de la variabilité et de l'incertitude des taux générés. Pour disposer de ces résidus,

1 900 lieux d'enfouissement des résidus de construction et de démolition étaient toujours en opération en 1998, en plus des 5 600 lieux d'enfouissement municipaux. Dans l'ensemble, chaque lieu d'enfouissement de matériaux secs reçoit près de 30 000 tonnes de matériaux, tonnage qui, multiplié par le nombre de dépôts de matériaux secs disponibles, nous donne un total de 50 millions de tonnes de matériaux secs enfouis dans des lieux voués à ces matériaux.

C'est donc dire qu'un peu moins de 100 millions de tonnes sont enfouies soit dans des lieux d'enfouissement sanitaire, soit dans des dépôts non autorisés.

Tableau II.1 : Types de gestion des matériaux secs aux états –unis 1998. [8]

Types de gestion	Millions de tonnes/année	Pourcentage total
Recyclé	25-40	20-30
Dépôts de matériaux secs	45-60	35-45
Lieux d'enfouissement sanitaire	40-55	30-40
Total	136	100

REVUE DE DOCUMENTATION

Il est difficile d'établir les quantités réelles de matériaux secs récupérés aux États-Unis. Cependant, une étude sur l'État du Vermont, publiée en 1990 [9], affirme qu'environ 50 % des résidus de construction et de démolition sont récupérés. À Portland, en Oregon, ce taux atteignait 45 % en 1993, à Boston, Massachusetts, près de 60 % en 1997. Selon l'étude vermontoise, les travaux routiers sont responsables d'environ 70 % des quantités de matériaux secs générés, contre 30 % pour tout ce qui touche les bâtiments. Par ordre d'importance, on retrouve de l'asphalte, du bois, du béton, des métaux et des matériaux mélangés (verre, plastique, carton, etc.).

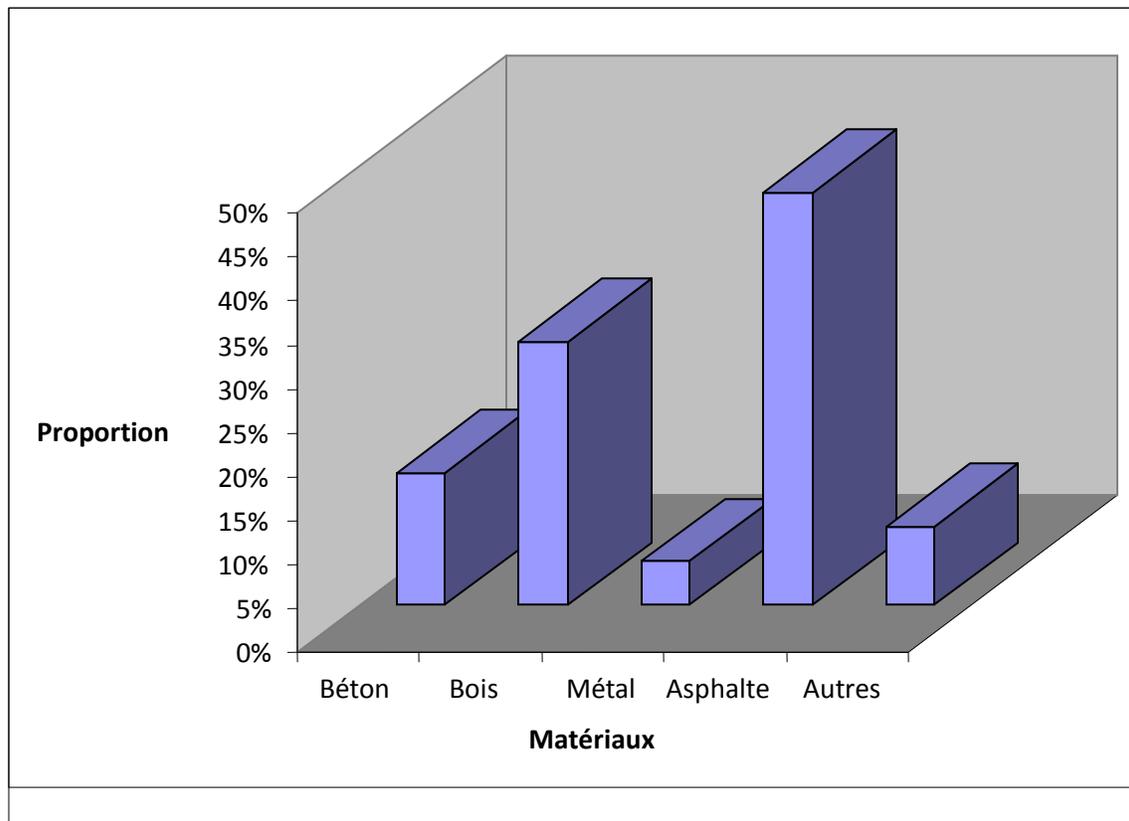


Figure II.2 : *Composition des débris de construction et de démolition du Vermont*

(en poids)[5].

En ce qui a trait aux travaux routiers les États-Unis réutilisent, chaque année près de 50 millions de tonnes d'asphalte dont 20 à 50 % comme béton bitumineux recyclé. Pour l'État de Washington seulement, ce sont des quantités variant entre 650 000 à 1 million de tonnes qui sont réutilisées annuellement, alors qu'en Californie, sur 8,2 millions de tonnes de résidus routiers divers, 57 % sont recyclés.

REVUE DE DOCUMENTATION

En 1990, pour traiter ces matériaux, le territoire américain dénombrait 1 800 unités de recyclage, soit 1 000 unités pour recycler l'asphalte et le béton, 500 unités servant à recycler le bois et 300 autres unités qui servent à traiter les résidus de construction mixtes. En 1997, le chiffre de 1 800 unités de recyclage a fait un bon fulgurant pour atteindre près de 3 500 unités de recyclage.

En France

Plus de 32 millions de tonnes de débris de chantiers de bâtiments et 100 millions de tonnes de débris de travaux publics sont produites chaque année en France [10] (2,06 millions de tonnes de per capita). Ce volume atteindrait 309 millions de tonnes, lorsqu'on y comptabilise la récupération de sols le taux de recyclage des bétons atteindrait 63 % [11].

En Allemagne

En 2003, 222,4 millions de tonnes de débris de C&D ont été générées (2,7 tonnes per capita), comparativement à 240,8 millions de tonnes en 2002. Le volume produit en 2002 se répartit comme suit :

- ❖ 70 % lors de travaux d'excavation;
- ❖ 24 % lors de travaux de démolition de bâtiments ;
- ❖ 8 % lors de la démolition de routes;
- ❖ 2 % sur des sites de construction.

Le pourcentage de récupération, de réutilisation et de recyclage est estimé à 85,6 % en 2002 et 86,2 % en 2003 [12]. Les données sur la proportion des bétons et briques sont imprécises. Comptabilisés dans deux grandes régions, pour les débris provenant de la démolition de bâtiments seulement, ces derniers occupaient 75,7 % dans un cas et 59,1 % dans l'autre, pour une moyenne de 67,4 %.

Au Royaume-Uni

Au total 89,6 millions de tonnes de débris de C&D ont été comptabilisées au Royaume-Uni en 2005 (1,48 tonne per capita). De ce volume, 51% ont été recyclés et 16,7 % ont été utilisées pour la régénération de sites ou pour des projets d'infrastructures. Le 31,3% restant a été enfoui comme déchets [13].

Aux Pays-Bas

Les débris de C&D générés annuellement aux Pays-Bas sont de 25 millions de tonnes (1,5 tonne per capita [13]). Le taux de récupération est le plus élevé de l'Union européenne, atteignant 95 %.

Le recyclage des bétons est présent dans ce pays depuis plusieurs années, favorisé par un manque de disponibilité d'agrégats naturels et d'espace pour les enfouir.

En Australie

Les débris de C&D y représentent 42,5 % de l'ensemble des déchets solides du pays. Ainsi, 13,7 millions de tonnes sont générées (0,64 tonne per capita). De ce volume, 7,8 millions de tonnes sont récupérées, représentant un taux de 57 %. Les bétons occupent 81,8 % du volume de débris de C&D et comptent un taux de récupération de 54 % [13].

Au Japon

Au Japon, 77 millions de tonnes de débris de C&D étaient générées en 2005 (0,6 tonnes per capita). Le taux de récupération était de 80 %. Le béton compte pour 42% de ce volume et l'asphalte %. Le taux de recyclage de ces deux matières est de 98 % [13].

Les chiffres sur les quantités de matières et les taux de récupération sont des indices révélateurs de la volonté des pays à gérer cette matière. On doit toutefois tenir compte, lors de l'analyse des données, des particularités géographiques, des méthodes de construction et des principaux matériaux utilisées [13].

En Algérie

Au cours des 10 dernières années, le taux de génération de débris de construction et de démolition en Algérie a connu une augmentation très remarquable suite aux déchets générés par les entreprises de bâtiments et travaux publics ainsi qu'au vieillissement des constructions et en grande partie au séisme de 2003 qui avait frappé les wilayas d'Alger, Boumerdes, Tizi-Ouzou, Bejaïa, et autres; en produisant des millions de tonnes de matériaux secs (brique et béton en particulier) qui résultent de la démolition des bâtiments et des ouvrages d'art sinistrés. Les quantités restent inconnues.

Les matériaux de démolition sont rarement recyclés en Algérie en matière d'agrégats pour béton de ciment ou béton bitumeux, malgré le déficit entre l'offre et la demande en granulats qui dépassera les 20 % de la production.

II.4 Natures de déchets de bâtiments

Il existe plusieurs types de déchets qui répondent à des définitions très précises :

II.4.1 Les déchets inertes (DI) [14]

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 les débris de :

- Béton
- Briques
- Tuiles
- Céramiques
- Carrelages
- Matériaux à base de gypse.

Pour le secteur des travaux publics, il s'agit principalement de cailloux, de terres et de déblais, ainsi que de déchets minéraux de démolition d'ouvrages d'art et de génie civil.

II.4.2 Les déchets de chantier

Sont considérés comme déchets de chantier tous les déchets de construction ou de démolition :

- Déblais non pollués provenant de travaux d'excavation, de découverte et de percement.
- Gravats, c'est-à-dire déchets de chantier minéraux constitué de pierres et d'autres matières minérales de même nature (briques, béton, tuiles, etc.)
- Déchets de chantier incinérables (bois, carton, plastiques, textiles, etc.)
- Déchets de chantier tout-venant, c'est-à-dire déchets de chantier mélangés contenant diverses matières telles que bois, métal, plastique et éléments minéraux.

REVUE DE DOCUMENTATION

Les gravats regroupent les catégories suivantes :

- Matériaux bitumineux : terme générique désignant aussi bien le produit du fraisage à froid, couche par couche, d'un revêtement bitumineux que les morceaux résultant de la démolition de celui-ci.
- Matériaux non bitumineux de démolition : matériaux provenant de la collecte, du défonçage ou de fraisage de couches de fondation non liées et de couches de support ou de fondation stabilisées aux liants hydrauliques.
- Béton de démolition : matériau obtenu lors de la démolition ou du fraisage d'ouvrages ou de revêtements en béton armé ou non armé.
- Matériaux de démolition non triés : mélange des fractions minérales provenant d'éléments de maçonnerie en béton, en briques de terre cuite, en briques silico-calcaires et en pierre naturelle.

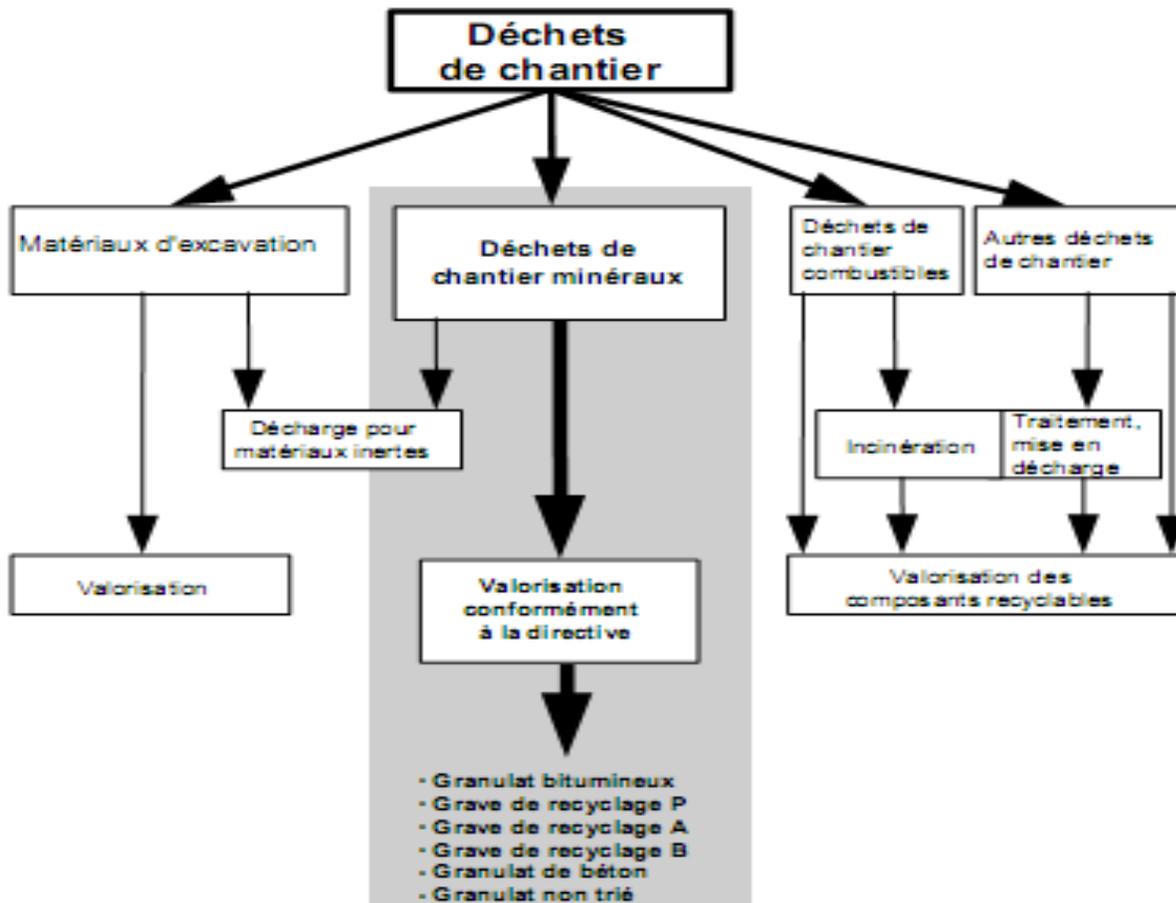


Figure II.3: Les différentes catégories de déchets de chantiers [15].

II.4.3 Les déchets de démolition

Une grande partie des déchets du bâtiment est composée de matériaux provenant de la démolition. La démolition va perturber l'environnement : bruit, poussière, et surtout énormes quantités de matériaux lourds et de grand format, se prêtant mal à la manipulation et qu'il faudra éliminer. Les matériaux d'une démolition conventionnelle sont mélangés et contiennent généralement des substances dont la séparation au niveau de l'installation de recyclage s'avère difficile, limitant de ce fait la qualité et les possibilités d'utilisation des matériaux recyclés.

II.5 Gestion des déchets de BTP [16]

II.5.1 Principe de gestion

Le principe de gestion peut être divisé en trois « tâches ». La première de ces tâches est de minimiser au maximum la production de déchets sur le chantier. En effet, une bonne gestion commence par une prévention. C'est un travail qui doit être effectué en amont par l'entreprise. Ceci consiste à :

- Quantifier les besoins en matériaux (commander le nécessaire et dans la mesure du possible utiliser des éléments préfabriqués ou pré assemblés en usine) ;
- Planifier les approvisionnements en matériaux afin d'éviter le stockage.
- Préparer des aires de stockage propre de chaque type de matériaux, la seconde tâche a pour but de contrôler la production de déchets aux différents postes de travail, c'est un travail de tous les jours qui peut nécessiter l'utilisation d'un ou plusieurs manœuvres à temps plein.

Ceci consiste à :

- Ramasser le plus régulièrement les déchets ;
- Préparer une zone de stockage et de tri ;
- Conditionner les déchets en fonction de leur classe et de leur dangerosité ;
- Planifier et organiser leur évacuation jusqu'au centre de valorisation ou d'élimination.

II.5.2 La mise en œuvre

Enfin il faut évacuer les déchets préalablement stockés et triés sur le chantier. Pour cela il faut :

- Connaître les différents types de déchets ;
- Trier impérativement sur le chantier pour éviter la facturation au coût le plus élevé des différents déchets ;

- Choisir le lieu de tri (au fur et à mesure dans des conteneurs appropriés, sur une aire spécifique sur le chantier, dans un centre de l'entreprise) ;
- Sélectionner les conditionnements pour leur évacuation.

II.6 Valorisation des déchets [17]

Les déchets de chantier sont constitués à 80% environ de composants minéraux, transformables en matériaux recyclés une fois libérés des déchets combustibles (bois, plastiques, etc.), des métaux et éventuellement de constituants nocifs (fines ou composants suspects).

La valorisation des déchets concerne toutes les opérations de recyclage, de compostage, et de régénération des déchets ou toutes les opérations débouchant sur une récupération matière ou de l'énergie.

Généralement, on peut considérer la valorisation selon deux procédés différents :

-Valorisation matérielle

-Valorisation énergétique

- **Valorisation matérielle**

Toute opération ayant pour objet récupération du produit ou de la matière à partir des déchets. Elle nécessite des efforts importants de sélection et de traitement.

- **Valorisation énergétique**

La valorisation énergétique ne signifie pas l'élimination des déchets ultimes par incinération mais la valorisation des différents composants des déchets par l'exploitation de leur potentiel énergétique.

II.7 Recherches menées sur le recyclage des matériaux de construction

En vue de la valorisation des matériaux issus de la démolition des immeubles en les recyclant, plusieurs travaux de recherche ont été élaborés dans ce contexte. En Algérie, et en collaboration avec le ministre de l'enseignement supérieur est de la recherche scientifique, ainsi que quelques organismes nationaux tels que le centre national d'Etudes et de Recherches Intégrées en Bâtiment, et dans le cadre d'un Programme National de Recherche qui porte sur la « Valorisation des déchets de construction » certains chercheurs ont répondu à cette requête :

Parmi ce dernier on peut citer les travaux de Debieb [18] De l'université de Blida a travaillé sur la valorisation des agrégats (gros, et fins) recyclées, les résultats rapportés montrent une chute de résistance pouvant aller jusqu'à 30 % par rapport à un béton ordinaire, en fonction du pourcentage de substitution.

En Belgique le centre scientifique et technique de la construction (CSTC), est l'origine d'un projet exemplaire de la valorisation des déchets en matériaux recyclés pour la construction qui s'intitule Le projet RECYHOUSE. Cette construction exemplaire d'un bâtiment-témoin qui a nécessité cinq années de travail sur le site de la station expérimentale, intègre un peu plus de 150 matériaux venant de toute l'Europe fabriqués de débris de construction et/ou de la valorisation des déchets ou sous-produits issus d'autres secteurs industriels. L'objectif du projet est de démontrer qu'il est possible d'édifier un bâtiment presque uniquement au moyen de matériaux recyclés répondant aux exigences d'une construction moderne, sans nécessairement nuire aux performances finales, ni augmenter le coût de la construction [19].

L'entreprise Raisch products, de San Jose en Californie, a proposé une nouvelle approche du recyclage du recyclage des débris de construction et de démolition avec la mise sur pied d'un parc écologique abritant une diversité de recycleurs de déchets de construction et de démolition servant de poste de transformation et de réutilisation des matériaux de construction qui proviennent des municipalités, comtés et des propriétaires [20].

II.8 Destination et traitement des déchets de chantier [21]

Pour la collecte des déchets de chantier, deux types de solution existent :

- **Les déchèteries publiques** pour la collecte des déchets du bâtiment produits en petite quantité. Cette ouverture ne veut pas dire systématiquement gratuité des services. Elle peut faire l'objet d'une redevance spéciale, en fonction des quantités de la nature des déchets.
- **Les déchèteries professionnelles privées ou plates-formes de regroupement** pour ce genre d'installation se pose très souvent un problème foncier. Pour le résoudre des partenaires entre des structures privées et publiques peuvent être envisagés.

Ces installations « relais » doivent permettre de concentrer des quantités de déchets qui rejoignent ainsi des filières de recyclage.

Pour le traitement et le stockage final spécifiques aux déchets du BTP, deux types d'installation existent :

- Les installations de recyclages de granulats,
- Les installations de stockage pour déchets inertes.

II.9 Destination [22]

Les différentes destinations des déchets de chantier sont représentées dans le **tableau II.2**

Tableau II.2 : Destination des déchets de chantier [18].

Nature du déchet	Destination possible	Remarques
Béton, ciment, parpaing, pierre, marbre, grès, ardoise, céramique, tuile, brique, carrelage	Réemploi, utilisation en remblais, recyclage (fabrication de granulats), stockage en décharge autorisée	Les apports dans les installations ne doivent pas contenir du bois, du plâtre ou polystyrène.
Matériaux d'isolation (laine de verre, laine de roche)	Réutilisation, recyclage, stockage en décharge autorisé	Les matériaux doivent être bien triés
Terre et matériaux de terrassement	Réutilisation sur place en remblais	Les terres ne doivent pas être souillées.

II.10 Réemploi – Réutilisation [23]

- **Réemploi** : nouvel emploi en l'état d'un déchet pour un usage analogue à de la première utilisation.
- **Réutilisation** : utilisation d'un déchet à un usage différent de son premier emploi.

La production de déchets susceptibles d'être réemployés ou réutilisés assurée par les chantiers de démolition et de réhabilitation en phase de dépose et reste globalement faible. Il s'agit principalement d'éléments de charpentes en bois, de portes (métalliques ou bois), d'équipements sanitaires et d'appareils de chauffage démontés de façon spécifique. Dans le cas des chantiers de construction, on peut y ajouter certains éléments de coffrage et une quantité non négligeable de palettes.

❖ Réutilisation sur place

La réutilisation nécessite au préalable de vérifier que les matériaux ne sont pas pollués.

Quelques exemples de réutilisation:

- Édification de buttes avec aménagement paysager s'intégrant dans les sites.

Ces buttes qui modifient l'aspect du site doivent respecter les règles du code de l'Urbanisme (déblais excédentaires de terrassements généreux ou d'ouvertures de tranchées pour réseaux divers) ;

- Traitement des matériaux naturels en place à l'aide de liants (hydrauliques et/ou hydrocarbonés) pour participer à la construction de l'ouvrage. Ce traitement sera réalisé par des matériels mobiles adaptés à chaque technique de traitement;
- Utilisation des matériaux de l'ouvrage à démolir, comme matière première pour le nouvel ouvrage, après traitement dans une installation mobile adaptée ;
- Régénération sur place, à chaud et à froid, de couches de surface et cela pour travaux routiers.

II.11 Mise en décharge [24]

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, et reste la pratique la plus courante dans la plupart des pays. Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets ; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront.

Certains futurologues ont déclaré que les décharges seront « les mines du futur » : comme certaines ressources s'appauvrissent, on pourra justifier qu'il est nécessaire de les extraire des décharges où elles avaient été enfouies considérées alors comme non valorisables. Cet état de fait et la prise en compte croissante des impacts de la consommation excessive des ressources a permis en décharge. Le recyclage des matériaux, leur transformation en énergie, la conception de produits nécessitant moins de ressources, et une législation imposant aux fabricants la prise en charge des coûts d'emballage et de stockage des déchets un sujet connexe est le concept d'écologie industrielle, où les flux de matière entre les industries sont étudiés.

II.12 Stratégies de traitement des déchets [25]

Les Stratégies de traitement des déchets s'appuient sur deux grands principes :

- ❖ Simultanément des notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie. Au plan plus particulier de l'environnement, il y a lieu de bien considérer l'ensemble de l'impact des déchets sur l'environnement et l'impact possible de la mise en œuvre de chaque stratégie.
- ❖ L'inspiration des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu. Ces lois existent à travers les cycles biogéochimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques dans les différents milieux physiques (eau, air, sol) et les espèces vivantes (végétaux et animaux). Au niveau de ces dernières, il faut retenir qu'elles assurent la circulation de la matière à travers la trilogie.

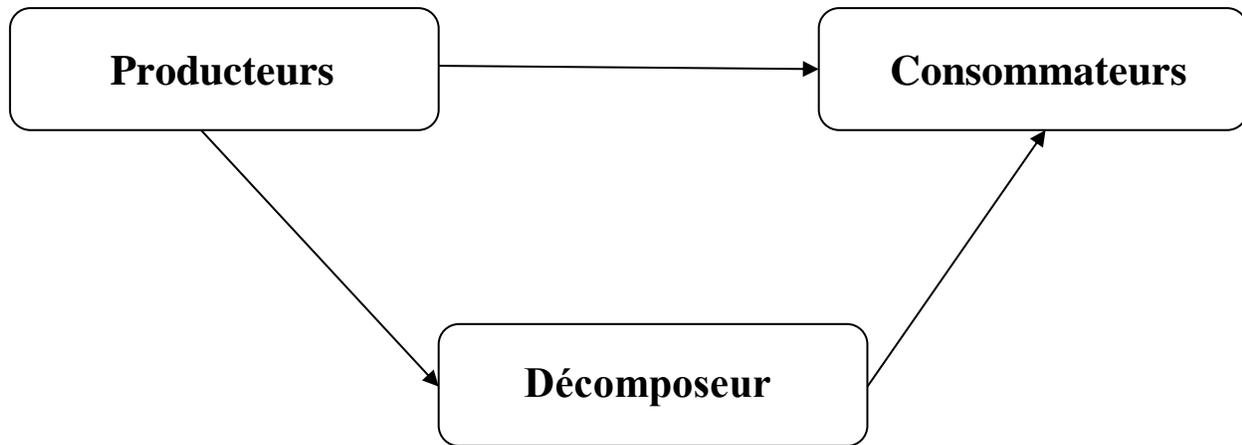


Figure II.4 : Trilogie de circulation de la matière [18].

Sur ces deux principes, la gestion des déchets passe par quatre stratégies possibles :

II.12.1- Arrêt de la production du déchet ou du produit générateur de déchets

Les problèmes, souvent liés à l'impact sur l'environnement ou à la santé humaine, peuvent conduire à la nécessité de cesser l'activité à l'origine de la production de déchets.

II.12.2- Optimisation et innovation technologique

Réduire la quantité de déchets ou en produire de moins polluants relève du domaine des technologies et des produits propre. Cet objectif peut être atteint progressivement au niveau de la minimisation des rejets et de l'optimisation de l'utilisation des matières premières et de l'énergie par le recours à la dépollution dans un premier stade et à la non-pollution dans un second stade.

II.12.3- Rejet « éco compatible » des déchets

Cette notion est fondamentale. Dès lors qu'aucune des trois premières stratégies n'est envisageable, il y a lieu d'assurer un retour « acceptable » des déchets produit dans le milieu naturel. L'acceptabilité, ou éco compatibilité, peut être définie par le fait que des déchets sont intégrés aux cycles biogéochimique sans entraîner de dysfonctionnements prévisibles ou identifiables. Cet objectif peut être atteint soit par des voies de valorisation (réutilisation du déchet comme amendement en agriculture par exemple), soit après transformation chimique ou conditionnement.

II.12.4- Stockage

Il arrive, et c'est le cas des déchets ultimes, que la solution du stockage sûr, dans ou sous le sol demeure le recours inévitable. C'est toute la stratégie de l'enfouissement technique qui constitue, au regard de l'impact sur l'environnement, un secteur clef de la gestion des déchets.

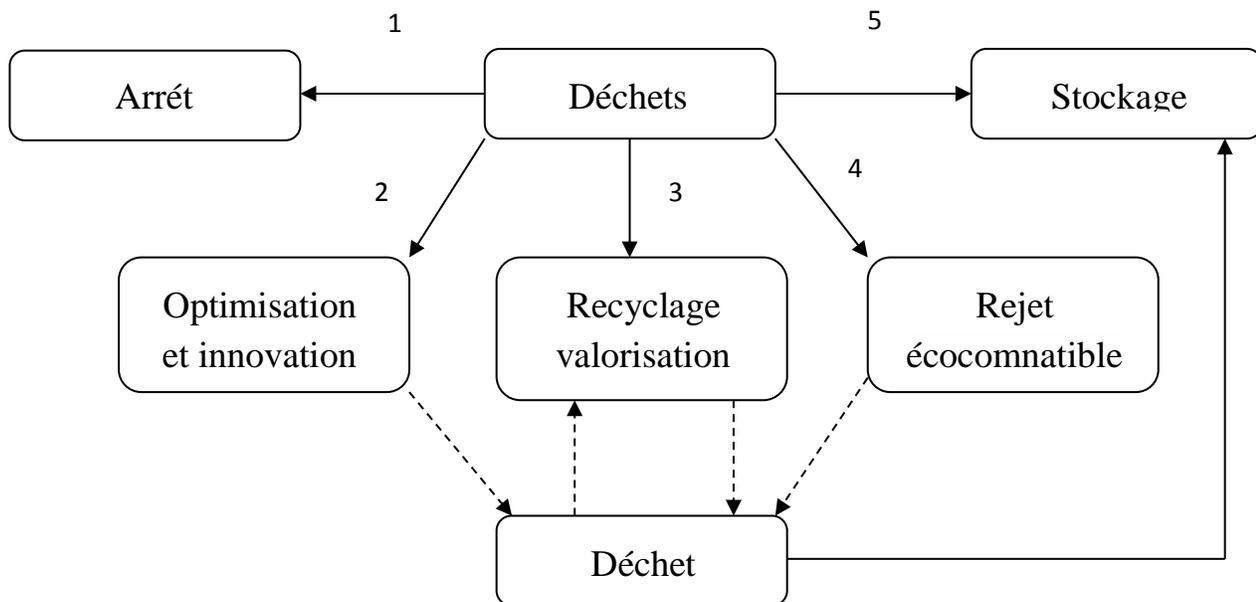


Figure II.5 : Stratégies de gestion des déchets [18].

II.13 Utilisation des matériaux de bâtiment recyclés

Les granulats recyclés sont généralement utilisés comme matériaux de construction. A cet effet, en Europe plusieurs cahiers des charges types ont été modifiés pour accepter ces produits de recyclage. Dans la plupart des cas, les produits de recyclage des déchets de construction et de démolition sont utilisés dans les remblais, sous-fondations, béton maigres et éventuellement pour les concassés de débris de béton et d'enrobés hydrocarbonés en fondation de routes.

II.14 Processus de fabrication des granulats recyclés

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

- **Sélection, stockage et traitement** des produits bruts.
- **Préparation des matériaux avant concassage** : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses.
- **Tri manuel.**
- **Déferrage électromagnétique.**
- **Concassage et criblage** : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques.
- **Concassage secondaire éventuel** de la fraction supérieure issue du concassage primaire.
- **Stockage**
- **Analyses éventuelles avant utilisation.**



Figure III.6 : Réception des bétons de démolition [26]



Figure II.7 : Stock de matériaux démolition destiné au recyclage [26].



Figure II.8 : Préparation à la cisaille [26].



Figure II.9 : Dé ferrailage électromagnétique [26].



Figure II.10 : Agrégats recyclés [26].

II.15 Procédés de récupération et de recyclage des matériaux secs

Il existe essentiellement deux façons de procéder en ce qui a trait à la récupération des matériaux secs. Soit que l'on **procède par séparation à la source**, c'est-à-dire à même le chantier, ou bien on dispose de tous les matériaux secs résiduels dans un ou plusieurs conteneurs qui, une fois remplis, seront récupérés par la

compagnie de location et amenés dans **un centre de tri**. Le tableau ci-dessous présente les avantages et inconvénients de chacune des deux méthodes.

Tableau II.3 : Stratégies de recyclage des débris de construction et de démolition [27].

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Séparation à la Source</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Permet de récupérer le matériel dans sa forme originale, et ainsi de minimiser une possible contamination pouvant mener à une qualité moindre du produit -Offre la possibilité de réutiliser le matériel près du lieu de génération sur un site de construction par exemple. - Permet au promoteur et à l'entrepreneur de réduire leurs coûts lorsque le marché pour les matières existe. Tout en réduisant les coûts d'enfouissement, la compagnie projette une bonne image. -Permet une séparation facile des matériaux alors que lorsqu'ils sont mélangés, cette séparation peut devenir plus ardue (ex. bois traité et bois non traité) 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus d'un conteneur est requis sur le site. Le manque d'espace peut nuire à la séparation adéquate des matériaux. - La participation des ouvriers et des sous-contractants est essentielle pour une séparation adéquate des matériaux. - Les opérations de recyclage doivent demander une certaine coordination afin de bien remplir les conteneurs en fonction de rythme des travaux. -Il peut parfois ne pas y avoir de marché en place pour le recyclage de certaines matières.
<i>Centre de tri de Matériaux pêle-mêle en vrac</i>	<ul style="list-style-type: none"> - un seul conteneur peut être requis lors de la construction. -Aucune coordination des travaux n'est nécessaire .les matériaux mélangés peuvent toujours être expédiés au centre de tri ou ils seront recyclés. -Les grandes quantités des matériaux récupérés permettent le développement de certains marchés qui autrement seraient limités en raison des coûts de transport. - les centres de tri et de recyclage concurrencé avec les coûts d'enfouissement principalement dans les régions ou les frais d'enfouissement sont élevés et les marchés pour les matériaux résiduels sont bien développés 	<ul style="list-style-type: none"> -Les cas de contamination des matériaux sont beaucoup plus nombreux, du fait qu'ils sont en contact avec d'autres matériaux. - L'équipement et la main d'œuvre requis sont beaucoup plus importants. - Certaines exigences sont semblables à celles qui s'appliquent aux lieux d'enfouissement mesure de lixiviation, restriction quant au niveau de poussière. - certains matériaux peuvent être plus difficiles à trier une fois, mélangés avec d'autres.

À l'heure actuelle, la plupart des entrepreneurs, sensibilisés à la récupération et au recyclage des matériaux secs, ont largement recours à un seul conteneur qui, une fois rempli, est récupéré et transféré vers un centre de tri et de conditionnement.

Les éléments de béton et d'enrobé bitumineux arrivent sur le site de concassage par camion. A ce moment, on retrouve du béton de ciment et des enrobés bitumineux, mais aussi une quantité non négligeable d'impuretés (métal, bois, plastique, verre, plâtre, etc.) qui devront être enlevées au cours du procédé de concassage. Il est important d'enlever le plus possible ces impuretés.

Selon **Quebaud (1996) [28]**, voici à quel moment on devrait enlever ces éléments et quels sont les problèmes possibles si la quantité d'impuretés est relativement importante :

Le plâtre: L'élimination des éléments constitués de plâtre est réalisée à l'entrée du site de recyclage et à différents stades de la fabrication. Une certaine quantité de ces matériaux peut toutefois se trouver dans les granulats, surtout sous forme de particules fines (compte tenu de leur caractère relativement friable) ;

Le verre : La présence de verre dans la composition des granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment peut être dangereuse car en milieu humide et en présence de teneurs élevées en alcalins, elle peut induire une réaction **alcali - silice** ;

Les chlorures : Les granulats recyclés peuvent se trouver contaminés par les chlorures car les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton de démolition, comme c'est le cas pour les ouvrages en milieu marin ou les chaussées déverglacées au sel ;

La maçonnerie : Quand ces fragments représentent moins de 5 % de la masse totale des granulats recyclés, les changements des propriétés mécaniques de ces derniers ne sont pas significatifs. Par contre, si le pourcentage est plus important, ces matériaux diminuent la densité des granulats recyclés, réduisent leur résistance au gel et peuvent même poser des problèmes de gonflement s'ils contiennent de la chaux vive (CaO) ou du péri clase (MgO);

Les métaux: Une petite quantité d'armatures ou de fils de fer dans la composition des granulats peut provoquer des dégâts ceci en raison de l'oxydation de ces matériaux

Une fois que l'on connaît la provenance du matériau, on peut le diriger vers les piles de réserves correspondantes. D'après **Cimpelli (1996) [29]**, on distingue habituellement cinq catégories de matériaux :

- Les bétons armés ou non sans enduit ni plâtre ;
- les matériaux composites, mais propres, constitués de graves routières, de pierres, de blocs rocheux, d'enrobés, de bordures, de briques, etc. ;

- les mélanges de matériau avec de faibles teneurs en plâtre, bois, plastique, etc. ;
- les mélanges hétérogènes avec des teneurs en matières indésirables (plâtre, bois, plastique, etc.) supérieures à 10% ;
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

Une fois cette sélection faite et les matériaux séparés selon leur nature, sont dirigés vers les unités de concassage.

II.15.1 Les différents types de concasseurs

Pour la fragmentation des matériaux secs, différents types de concasseurs peuvent être envisagés :

➤ *Concasseurs à mâchoire*

Avec ce type de concasseurs, le matériau est cassé par pression entre les deux machines, l'une fixe et l'autre en mouvement. Ces concasseurs ont tendance à produire des agrégats de forme plate (surtout pour la maçonnerie). Ils sont, de ce fait peu indiqués comme concasseur secondaire par contre c'est ce type de concasseur qui produit le moins de particules fines (de l'ordre de 10 % max).

➤ *Concasseurs à marteaux*

Il réalise la fragmentation des matériaux par percussion sur des matériaux articulés sur un ou deux rotors tournants à grande vitesse. Lorsqu'il est utilisé comme concasseur primaire, la hauteur entre la courroie d'alimentation et l'axe de rotor est réglable. Cela permet, en réglant la vitesse du rotor d'assurer une très importante réduction de la dimension des matériaux concassés. La forme des matériaux a une influence sur la dimension et la forme des granulats obtenus. Le niveau de fragmentation est difficilement maîtrisable, la consommation énergétique de l'équipement est plus élevée en comparaison avec le concasseur à mâchoires. Par contre, la séparation de l'acier du béton est meilleure.

➤ *Concasseurs à percussion*

Un rotor équipé d'un certain nombre de barres d'impact, projette les matériaux à grande vitesse contre les parois de la chambre de broyage garnie latéralement des plaques d'usure et de deux encolures en acier de haute résistance. Les agrégats sont produits par choc et éclatement, ils sont de ce fait très durs et de faible calibre avec une importante quantité de fines (jusqu'au 40% de particules < 6mm).

➤ *Concasseur giratoire*

Le concasseur opère par écrasement du matériau entre un cône giratoire. Le mouvement à l'intérieure de la chambre de broyage est commandé par un arbre excentrique, ce qui rapproche par le dessous de la machine. La dimension maximale du matériau est limitée à 200 mm environ. Sans métal ni

bois, cet équipement peut être utilisé comme concasseur primaire et produit des agrégats de forme cubique et une quantité moyenne de fines (< 20 %).

➤ *Concasseur à cône*

Ce concasseur fonctionne selon le même principe que le concasseur giratoire. Ici un cône tronqué se met autour d'un axe excentrique dans un matériau qui a la forme d'un cône tronqué inversé, de telle sorte que l'espace n'agrandit à nouveau, les petits morceaux tombent par la fente. Ici également, le matériau à concasser doit être exempt d'acier.

II.15.2 Les méthodes de séparation des impuretés

➤ **Séparation manuelle**

Elle a l'avantage majeur de pouvoir éliminer les éléments indésirables qui ne sont pas facilement séparable par d'autres moyens, il s'agit notamment du verre, des morceaux d'isolants plats, les fils électriques gainés, etc. Par contre elle nécessite du personnel en permanence et le rythme de production doit être adapté à leur vitesse de travail (Par exemple, arrêt momentané de la bande transporteuse si trop d'éléments indésirables passent en même temps).

➤ **Séparateur magnétique**

Un très puissant aimant permanent enjambe la courroie transporteuse. Il est équipé d'une courroie à lattes contre lesquelles se plaquent les métaux ferreux qui sont ainsi écartés de la voie du concasseur pour tomber à côté de l'installation lorsqu'ils quittent le champ magnétique de l'aimant. Ce système ne fonctionne que pour les métaux ferreux.

➤ **Séparation par aspiration**

Tous les matériaux légers (tels que bois, textile, plastique de faible densité etc....) sont aspirés dans un système placé à l'extrémité du premier crible, tandis que les matériaux pierreux plus lourds, passent en travers. Son efficacité est notamment améliorée lorsqu'on peut l'utiliser que pour une fraction granulométrique bien définie. Dans ce cas, il permet jusqu'à 95% des éléments indispensables.

➤ **Séparation par gravité**

La méthode est basée sur la différence de masse volumique des différents composants. Pour pouvoir exploiter la différence de masse volumique, il faut s'intéresser à des volumes comparables et donc de sélectionner une granulométrie limitée. En général, la séparation s'opère en deux niveaux : un étage supérieur pour la fraction 50-150 mm et un étage inférieur pour 20-50 mm.

➤ Séparation par décantation

Les granulats traversent une distance avec renfile d'eau. Les matériaux légers flottent tandis que les matériaux pierreux plus tard, tombent au fond. Les éléments indésirables flottant sont raclés en surface tandis que les agrégats propres continuent le circuit. Ce procédé a l'avantage d'éliminer la grande majorité des éléments indésirables ou de fournir un granulat très propre. Par contre il produit une grande quantité de boue qui doit être traité.

II.16 Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci

La thématique des bétons de granulats recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie bibliographique ne présente que les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie du béton de granulats recyclés de béton à l'état frais et à l'état durci.

II.16.1 Etat frais

II.16.1.1 Masse volumique

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de 2400 kg/m³, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, 2150 kg/m³, quel que soit le type de ciment [30,31].

La densité plus faible est le résultat de la masse volumique des granulats, qui est liée à la nature du béton utilisé pour la production de l'agrégat. En outre, l'augmentation de la teneur en air dans le béton recyclé, conduit à une réduction supplémentaire de la masse volumique du béton frais.

II.16.2 Etat durci

II.16.2.1 Absorption

L'absorption d'eau est importante pour les bétons de granulat recyclé. En effet, l'ensemble des études montre que les bétons de granulat recyclé sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau. De plus, il semble que la partie plus fine des granulats recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions du béton 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. En effet, les bétons de granulats recyclés requièrent approximativement 15% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique [32].

II.16.2.2 Porosité

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons de granulats recyclés.

La porosité des bétons de granulats recyclés est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des bétons de 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 bétons de granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [31].

II.16.2.3 Perméabilité

Selon [33], lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

II.16.2.4 Résistance à la compression

des études antérieures ont montré que lors du remplacement des agrégats naturels par des granulats recyclés, les caractéristiques et propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclés changent. Il provoque une réduction sur ces propriétés mécaniques.

[34].

Bien que les chercheurs ont signalé une réduction de la résistance du béton à base de granulats recyclés, il convient de noter que l'ampleur de la réduction est liée à des paramètres tels que le type de béton utilisé pour la fabrication des agrégats recyclés (élevé, moyen ou faible résistance), le ratio de remplacement, de l'eau / ciment et l'état d'humidité des granulats recyclés [35]. Par exemple, **Katz** a constaté que dans un rapport de haute E / C (entre 0,6 et 0,75), la résistance du béton à base de granulats recyclés est comparable à celui du béton de référence, même à un niveau de remplacement de 75% [31]. Rao a trouvé la résistance du béton à base de granulats recyclés et le béton de référence à comparable avec un remplacement à 100%, à condition que le rapport eau-ciment est supérieur à 0,55 [36].

Selon **Quebaud [28]** la comparaison des performances du béton à base de granulat recyclé par rapport à un béton de même composition formulé avec des granulats naturels donne les indications suivantes résistances à la compression inférieures d'environ **10 à 30 %**.

II.16.2.5 Résistance à la traction par flexion et par fendage

Une étude menée par Rao, montre une diminution de la résistance à la flexion et à la traction de **15-20%** par rapport à béton référence à 100% de remplacement **[36]**. Dans une autre étude, où on a déterminé la résistance à la traction directe du béton, il a été constaté que cette différence est inférieure à **10%** pour la résistance à la traction du béton à base de granulat recyclé et du béton de référence à 28 jours **[37]**. Des études ont également montré que l'utilisation de mélanges cimentaires supplémentaires, telles que la fumée de silice, ... etc. contribue à améliorer les propriétés du béton à base de granulat recyclé **[37]**.

II.17 Les principaux ajouts minéraux actifs

La pouzzolane et le laitier sont des matériaux à grande surface spécifique qui présentent des structures amorphes ; avec la chaux et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique.

II.17.1 Les laitiers de haut fourneau

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air ; ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.

II.17.1.1 L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons

- **A l'état frais**

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [38] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Venuat [39] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Des recherches sur le sujet trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type du laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton [38].

➤ A l'état durci

Selon Venuat [39], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Les particules de laitier <10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45 µm ont de la difficulté à s'hydrater.

Venuat rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète.

Les mortiers aux laitiers sont de 10 à 100 fois moins perméable à l'eau que les mortiers de ciment portland. Un remplacement de 10% du ciment par le laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition. Les chercheurs montrent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminates.

II.17.2 La pouzzolane

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [40].

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noir, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux (CaO) sont en général plus vitreuses. La différence SiO₂-CaO doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable [41,42]. Les pouzzolanes sont définis comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui

en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes [43].



Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalin agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.

II.17.2.1 L'effet de la pouzzolane sur les caractéristiques des bétons

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

➤ A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [43].

➤ A l'état durci

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.

- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre.

Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

II.18 Durabilité du béton à base du granulats recyclés

Les études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités des agrégats recyclés sur les propriétés du béton à base de granulats recyclés. Cependant, certaines études ont montré que le béton à base de granulats recyclés est beaucoup plus perméable que le béton à base de granulats naturels, donc est un béton moins résistant à un degré satisfait aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration.

Il a noté que les propriétés de durabilité peuvent être améliorées par l'utilisation des cendres volantes, fumée de silice condensée, etc.

Chaque agent agressif dans l'environnement entourant une structure en béton peut s'infiltrer, diffuser et pénétrer à travers les pores contenus dans le béton selon des lois et mécanismes de transport. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes aux bétons. L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation et l'absorption d'eau est la tare essentielle qui compromet la durabilité.

L'absorption d'eau par immersion et le volume total des pores sont considérés comme les meilleurs indicateurs de la longévité potentielle du béton que l'absorption par capillarité qui donne une indication macroscopique du réseau poreux puisque le béton n'est pas totalement en état de saturation d'eau. **WIRQUIN & ALL [44]** ont rapporté dans une étude, que le processus d'absorption d'eau d'un béton recyclé est similaire à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Toutefois, les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau. Cela est dû à la taille plus grande des gros capillaires et à la proportion en volume plus importante des petits capillaires, ce qui les rend a priori plus vulnérables à la pénétration des agents agressifs. Ceux-ci sont sous forme d'eau, d'ions ou de gaz qui pénètrent dans le béton et peuvent changer la cinétique de dégradation du béton pendant la durée de vie de l'ouvrage. Les pathologies les plus abordées par la littérature pour le cas du RAC sont ; la carbonatation ; l'alcali-réaction et le gel-dégel. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulats naturels, affecte davantage cette dureté, donc sa qualification [45].

II.18.1 Résistance aux eaux agressives

II.18.1.1 Définition

Les altérations du béton observées en présence d'agents agressifs, sont d'ordre chimique ou physique. Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, bases et à solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en associations avec cette dissolution la formation des composés nouveaux.

Les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives aux frottements, aux chocs thermiques et aux gonflements ou aux retraites, entraînant l'érosion et la fissuration du béton. L'enquête OCDE (organisation de coopération et de développement économique), indique que les plus importantes causes de dégradation relevées sur 800000 ponts de par le monde, sont : contaminations par les chlorures et attaque par les sulfates.

L'utilisation de ciments contenant des additions semble être aujourd'hui une approche prometteuse. L'incorporation de ces additions nous permet d'augmenter la capacité des bétons à résister à l'attaque chimique de son environnement agressif, comme il a été mis en évidence par plusieurs chercheurs [46].

II.18.1.2 Eaux contenant des sulfates

Lorsque le béton est attaqué par l'eau sulfatée, il se gonfle et se fissure. Les sulfates les plus agressifs, par ordre, sont les sulfates d'ammonium, magnésium et calcium. Le sulfate de calcium est le plus répandu, il n'est pas considéré comme un sulfate agressif. L'eau contenant de CaSO_4 attaque le béton à cause de la réaction entre CaSO_4 et l'aluminate de calcium hydraté du ciment durci avec la formation d'ettringite expansive. Ce sel est stable dans les solutions qui sont comparativement riches en CaSO_4 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$, comme le cas des pâtes du ciment portland [47].

Le sulfate de magnésium n'est pas heureusement répandu dans les eaux naturelles, son action est plus nocive que CaSO_4 puisqu'il réagit non seulement avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ce dernier réagit avec l'aluminate hydraté et engendre l'ettringite expansive.

L'importance de la détérioration due à l'eau sulfatique dépend de la perméabilité du béton et de la concentration des ions agressifs, aussi bien que sur la composition chimique du ciment [48].

Les additions des pouzzolanes naturelles et des fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact [48].

II.18.1.3 Eaux contenant des chlorures

A l'exception de l'eau de mer ou l'eau se trouvant à proximité de la mer, la teneur de l'eau en chlorure est généralement très faible et par conséquent non nocive. L'action des agents de dégivrage à base de chlore est révélée par gonflement, fissuration et désagrégation du béton [48].

Les chlorures, qui peuvent arriver en contact avec le béton, le plus souvent sont les chlorures de sodium et calcium, qui sont largement utilisés comme des sels de dégivrage, le chlorure de calcium est considéré comme le plus agressif [48].

Les mécanismes qui conduisent à la détérioration sont différents, et peuvent affecter le béton directement et indirectement. Pour ce qui est de l'attaque directe, on peut dire que quand le béton arrive en contact avec les solutions de chlorure, il se gonfle et perd sa résistance même si les solutions ne sont pas très concentrées. D'ailleurs les chlorures contribuent au lessivage de la chaux à travers un mécanisme qui n'est pas encore complètement expliqué, et lequel dépend de nombreux facteurs d'environnement (pluie, température,...) mais aussi sur le type de ciment [47].

Le lessivage de chaux CH est plus faible dans les ciments pouzzolaniques, ou les ciments contenant de la fumée de silice, que dans les ciments portland. Dans ces derniers le CH qui peut seulement être lessivé est celui qui n'a pas été déjà combiné comme C-S-H avant l'exposition aux sels, comme conséquence, la porosité des mortiers exposés à l'action des sels augmente dans les ciments portland et diminue dans ceux qui contiennent de la fumée de silice ou de la pouzzolane.

Une solution concentrée de 30% CaCl_2 endommage les pâtes et les mortiers de ciment portland, avec ramollissement de la surface, fissuration, non seulement après plusieurs cycles de séchage et mouillage, mais aussi, après une simple submersion. Les pâtes de ciment pouzzolanique montrent une meilleure résistance aux solutions concentrées de chlorure que celle obtenue par le ciment portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés [48].

Les chlorures pénètrent au sein du béton à travers des microfissures et par diffusion dans l'eau contenue dans la pâte de ciment et dans les pores d'agrégat. Supposant que le béton ne possède pas de microfissures, la pénétration se produit par diffusion. Les bétons à base des ciments pouzzolaniques s'opposent généralement à la

REVUE DE DOCUMENTATION

pénétration d'ions de chlorure, contrairement au ciment portland. Ceci s'explique par le fait que les ciments contenant des matériaux pouzzolaniques sont capables d'immobiliser (dans les aluminates et les silicates) une quantité de Cl^- plus grande que celle dans le ciment portland, ainsi que la diffusion de Cl^- dans les ciments pouzzolaniques est ralentie [49].

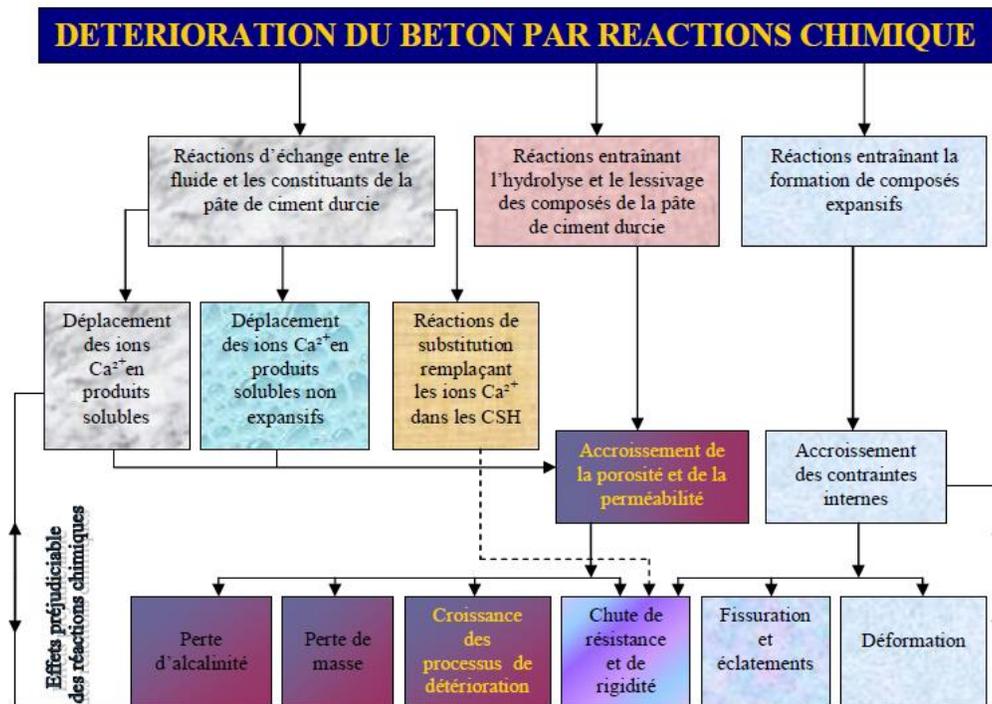


Figure II.11: Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [50]

II.18.1.4 Eau de mer

L'eau de mer a une forte teneur en sel (3.5% environ) avec une prédominance de chlorure et de sulfate. Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes : dissolution, lixiviation, réaction d'échange de base, précipitation des composés insolubles, cristallisation des sels expansifs [51].

Les principales réactions mises en jeu peuvent se décomposer de la manière suivante :

➤ Action des chlorures

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers des bétons armés, les chlorures peuvent être à l'origine d'altération du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydraté, une autre partie se combine au C_3S sous forme de monochloroaluminate de calcium $C_3A.CaCl_2.10H_2O$.

Le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite suivant la réaction d'échange :



La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le $CaCl_2$ réagit avec les aluminates pour former de monochloroaluminate.

➤ Action des sulfates de magnésium

Cette réaction conduit à la formation d'ettringite expansive et à la substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} , soit dans les C-S-H, soit dans la portlandite (formation de brucite).

➤ Action du dioxyde de carbone

Il réagit sur la portlandite selon la réaction :



Le carbone de calcium se précipite à la surface du béton sous forme d'aragonite et de calcite qui colmatent les pores. Les actions de chacun des ions ne sont pas cumulatives. Le monochloroaluminate de calcium devient instable en présence de sulfates et se décompose pour former de l'ettringite. Elle-même, en présence de silice dissoute et de carbone, il se transforme partiellement en thaumasite ($Ca.SiO_3.CaSO_4.CaCO_3.15H_2O$). C'est l'interférence des différents ions qui explique l'agressivité de l'eau de mer sera bien plus faible que celle des eaux sulfatées [52]. La thaumasite n'est détectée qu'en solution solide avec l'ettringite. Sa formation cause une dégradation du béton qui se manifeste par une expansion et une fissuration, dans un premier temps, et par une destruction des C-S-H par la suite. La formation de la thaumasite est encore plus destructive que celle de l'ettringite, car d'abord la quantité de thaumasite qui peut se former est beaucoup plus grande que celle de l'ettringite à cause des constituants qui rentrent dans sa composition (silicates, carbonates, sulfates, chaux et eau) et ensuite, la formation de la thaumasite peut causer la consommation des silicates et du calcium des C-S-H [53].

Selon Mehta [49], le remplacement des ions OH^- par des ions Cl^- réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive .

Par ailleurs, de fait de leur coefficient de diffusion relativement élevé, les chlorures pénétrant rapidement dans le béton et consomment une partie des aluminates en formant du monochloaluminat non expansif. Toutefois, les chloroaluminates instable en présence de sulfate, tendent à se transformer en ettringite expansive plus ou moins lessivée par l'eau de mer.

Locher [54], attribue l'agressivité relativement faible de l'eau de mer à l'action du dioxyde de carbone qui induit la formation d'une couche protectrice dense de carbonate de calcium à la surface du béton. Cependant la pénétration d'ions de chlorure est beaucoup plus faible quand les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers utilisés à la place du CPA.

Les ciments aux pouzzolanes et aux laitiers, grâce à leur pâte plus compacte et à cause de leur faible teneur en aluminates de calcium hydratés et de CH, empêchent la pénétration d'ions de sulfate et résistent intrinsèquement mieux que les ciments Portland à l'attaque des sulfates [55].

II.18.2 Résistance au gel dégel

II.18.2.1 Le processus gel/dégel

Il faut distinguer deux types de dégâts liés au gel : le processus gel/dégel intervenant au cours du vieillissement de la structure et le gel du béton au moment du coulage bar faible température [57].

L'effet d'éclatement provoqué par l'eau de geler est la cause principale des dégâts du béton dus au gel quand le degré de saturation dépasse 90%. Ce phénomène se produit lorsque le béton en surface, se gorge d'eau et gèle de façon répétée.

Les pores capillaires absorbent l'eau de la surface du béton. Si l'eau gèle, l'accroissement de volume vaut 9% du volume d'eau. Dans le cas d'une formation de glace dans un pore complètement rempli, l'accroissement de volume va générer une pression hydraulique qui va créer un éclatement du béton en surface.

Influence combinée du gel est des sels de déverglaçage (ouvrages concernés : plies de ponts, talus)

- La réaction du sel avec la glace est une réaction endothermique et créé un refroidissement plus rapide de la structure.
- Les sels de déverglaçage provoquent une absorption plus rapide de l'eau.
- Le point de congélation de l'eau dépend directement de la teneur en sel le schéma illustre le phénomène découlant de ces 3 caractéristiques selon la figure **II.12** :

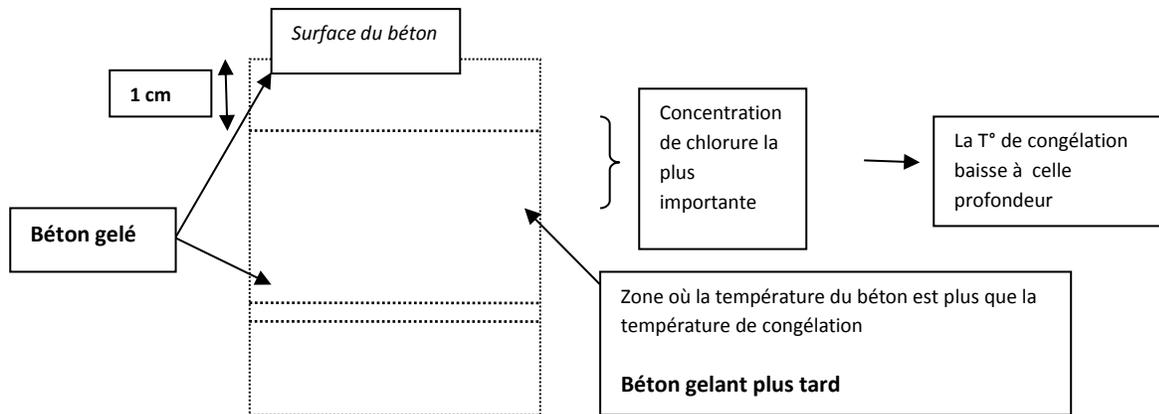


Figure II.12 : Schématisation de l'influence combinée du gel et des sels de déverglaçage [57].

Si le refroidissement se poursuit, la couche intermédiaire va également gelé mais la pression de congélation qui en résulte ne pourra pas s'affaiblir dans les couches voisines déjà gelées et cela peut conduire à l'éclatement de la couche superficielle.

- Les dégâts visibles dus au gel :

Un faïençage superficiel.

- Moyens d'auscultation pour déterminer si le béton est gelé :

Seule une analyse visuelle peut permettre de déterminer si un béton a été gelé. La matrice du béton est plus claire et on observe également une mauvaise interface granulats/matrice au MEB et le béton est assez poreux.

On peut en revanche déterminer la profondeur de béton gelé en effectuant un carottage ou si l'on ne souhaite pas effectuer de sondage destructif ou les limiter, déterminer la profondeur et la surface s'étend le béton gelé par l'auscultation ultrasonique. On conclue généralement à l'attaque du gel par l'auscultation ultrasonique. On conclue généralement à l'attaque du gel par réduction lorsque les autres causes de dégradations ont été éliminées.

Pour protéger le béton contre le gel, on doit prendre en considération la teneur en air et le facteur d'espacement, car il est possible de produire un béton avec une teneur en air respectant les spécifications, mais dont le facteur d'espacement ne serait pas suffisant pour assurer la protection du béton contre le gel [58].

La détérioration n'apparaîtrait pas dans le béton après une seule période de gel, mais elle serait le résultat d'un endommagement progressif dû à la succession d'un nombre plus ou moins grand de cycles de gel-dégel [59].

L'utilisation des adjuvants entraîneurs d'air facilitent la mise en place des bétons et les protègent du gel [60]. Mais cette utilisation est efficace dans la mesure où les bulles qui sont ajoutées améliorent le réseau de bulles d'air. Ceci ne semble possible que si la dose d'AEA ajoutée est assez importante [61], si non on risque de n'entraîner que 1% à 2% d'air, ce qui n'est pas assez bien pour garantir une amélioration du réseau. Cette augmentation pourrait tout aussi bien provenir de la fluidification du mélange par l'ajout d'eau avec l'AEA. Généralement cette fluidification entraîne surtout des grosses bulles qui sont susceptibles d'être perdues par la suite [62]. De même des études récentes dans le domaine comme celle de [Nicola Pitrov 2003] [63], ont remarqués que l'absence de l'AEA dans le béton exposé é aux effets gels dégels cause une diminution assez remarquable de la résistance à la compression et le module d'élasticité.

Donc notre objectif principal dans cette étude consiste à la formuler une série de dosages en agents entraîneurs d'air incorporés à l'intérieur des mélanges de béton lors du malaxage dans le but de développer une formulation assurant au béton une meilleure durabilité avec le temps et de protéger notamment aux cycles de gels répétés. Ces formulations des bétons consistent à avoir aussi un meilleur comportement rhéologique vis-à-vis de la maniabilité sans avoir une perte de résistance importante qui dépasser les normes.

Depuis sa découverte au début des années 50, l'écaillage des matériaux à matrice cimentaire a été l'enjeu de nombreuses études expérimentales et théoriques. Le but de cet indicateur de durabilité est de présenter succinctement les principaux résultats émergeant de ces effets, nous nous intéresserons aux principales théories d'endommagement par l'action du froid Powers (1949) [64] jusqu'à aujourd'hui. Enfin, nous concluons sur les recommandations en vigueur de nos jours pour la formulation d'un béton résistant à l'action du froid.

II.18.2.2 Influence des conditions environnementales sur la dégradation au gel-dégel

Les dégradations au gel, et plus particulièrement l'écaillage, se produisent majoritairement dans des régions humides (surface du matériau saturée en eau) ou les conditions hivernales sont rigoureuses (gel sévère) et où l'utilisation des sels de deverglaçage est importante (qualifiée de fréquent ou très fréquent) [65].

La norme française XP-P-18-305 définit trois classes de gels :

- Faible : pas plus de deux jours par an avec une température inférieure à -5°C ,
- Sévère : plus de 10 jours par an avec une température inférieure à -10°C ,
- Modéré : entre faible et sévère.

L'importance du salage est définie dans le fascicule 65-A. Le salage est dit fréquent lorsqu'il y a entre 10 et 30 jours de salage par an très fréquent pour plus de 30 jours de salage par an.

Il faut distinguer 2 types de dégâts liés au gel : le processus gel/dégel intervenant au cours du vieillissement de la structure et le gel du béton au moment du coulage par faible température.

Dans la suite de cette partie, les conséquences des conditions hivernales (cycles de gel-dégel), de l'humidité de l'air et des sels de deverglaçage sur l'endommagement au gel sont étudiées séparément.

II.18.2.3 Les cycles de gel-dégel

L'endommagement de surface est augmenté par une température minimale basse (dans la gamme allant de 0°C à -20°C) est une durée de sollicitation longue [66] [67] [68]. Cet effet est plus sensible sur les bétons de résistance intermédiaire (résistance en compression de l'ordre de 50 MPa) que sur les BHP (résistance en compression supérieure à 70MPa) et les bétons ordinaires (résistance en compression de 20 à 40 MPa) [69].

Le taux de descente en température ne semble pas avoir une importance majeure [66]. Cependant une légère augmentation de l'écaillage semble se produire pour de faibles taux de gel [67].

On notera des différences notables sur le nombre et la durée des cycles de gel dégel appliqués : 300 cycles de 4-h pour le gel interne, 56 cycles de 24h pour l'écaillage comme le montre la figure II.13 ci-dessous :

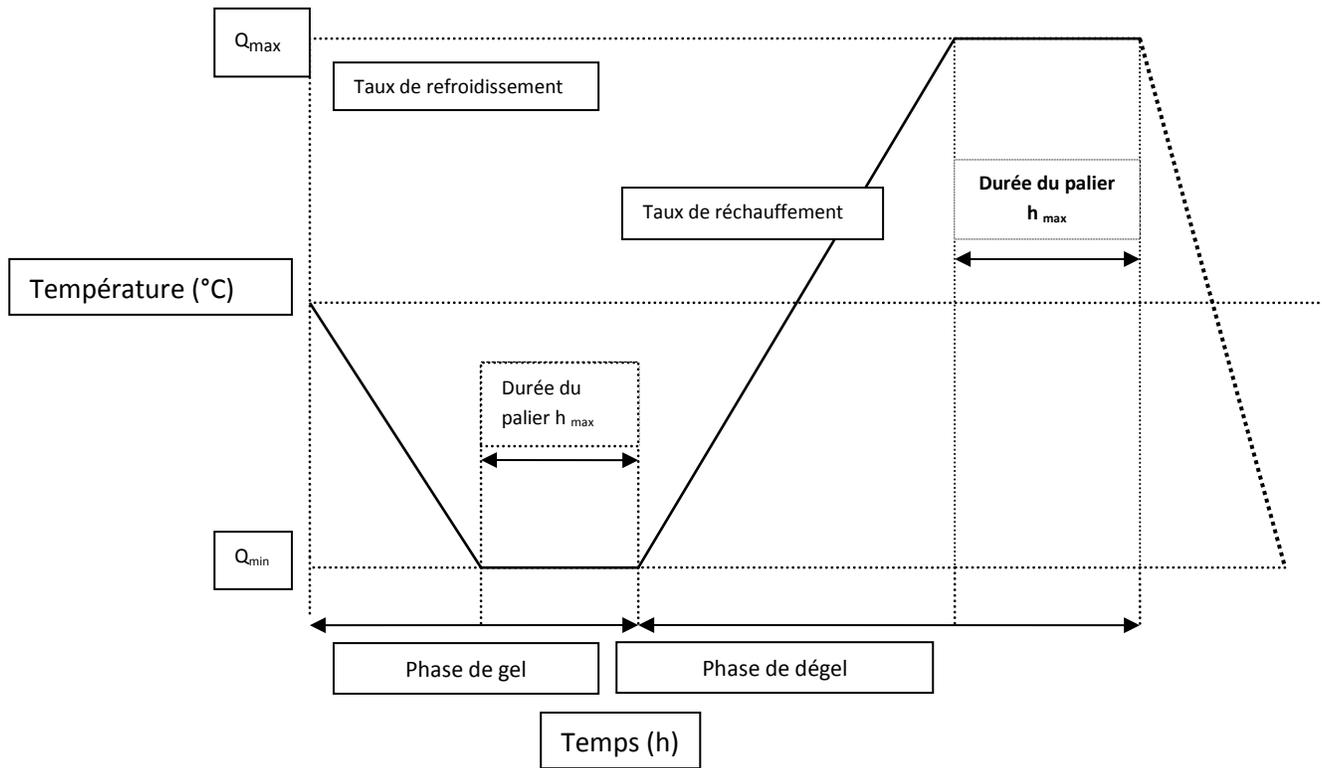


Figure II.13 : Description des paramètres d'un cycle de gel-dégel [67].

CHAPITRE III :
MATERIAUX,
MATERIELS
ET
ESSAIS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques et on présente les calculs de formulation de notre béton et ensuite on d'écrit les différents modes opératoire des essais destructif.

III.2 Matériaux utilisés

Nous avons analysé les caractéristiques des granulats fins recyclés (sable) et des granulats ordinaires entrants dans la composition des bétons. En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la possibilité d'utiliser les déchets de béton (fin) comme granulats dans le béton en substitution d'une fraction volumique du sable, avec des taux de substitution de (0%, 30%, 50%, 70%, 100%) et d'analyser les comportements des bétons obtenus à l'état frais ainsi qu'à l'état durci en les comparant à ceux d'un béton composé de granulats ordinaire (témoin).

III.3 Caractéristiques des matériaux

III.3.1 Caractéristiques du gravier

Le gravier utilisé pour la confection du béton dans notre étude expérimentale provient de la carrière de Sétif obtenue après concassage de la roche. Les fractions utilisées sont : (8/15), (15/20).

III.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5]

✓ But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.



Photo III. 1 : Tamiseuse.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NA EN 933-5). La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.

Les résultats obtenus sont classés dans la courbe suivante :

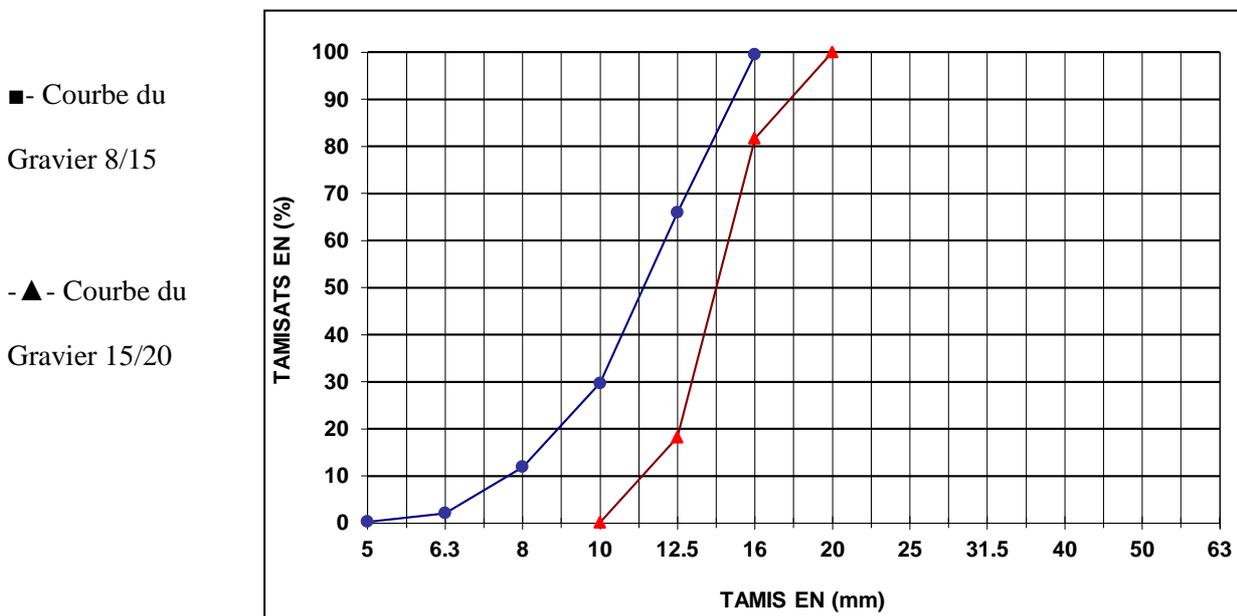


Figure III.1 : Courbe granulométrique de la pierre concassée 8/15 et 15/20.

III.3.1.2 La masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité: Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4°C, c'est-à-dire une grandeur sans unité.

Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ) [NA EN 1097]

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm³; Kg/m³; t/m³).

✓ Principe

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure, a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

✓ Mode opératoire

- Peser le récipient à vide et noter M1,
- Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- Araser à la règle,
- Peser le contenu et noter M2.
- Il résulte que :

$$\gamma = (M2 - M1)/V$$

M1 : masse du récipient vide.

M2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ) [NA EN 1097]

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (t/m³, kg/dm³, g/cm³).

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Principe

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

✓ Mode opératoire

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V1 (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air,
- Lire le nouveau volume V2,
- Le volume absolu ou réel est : $V = V2 - V1$
- La masse volumique réelle est: $\rho = M / (V2 - V1)$

L'opération se fait 03 fois et on prend la moyenne.

III.3.1.3 La compacité

La compacité c'est le rapport de la masse volumique apparente sur la masse volumique absolue.

III.3.1.4 La porosité

La porosité c'est la valeur : (1 - La compacité).

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : La masse volumique apparente (ρ), absolue, Compacité et Porosité du gravier concassé (8/15), (15/20).

Matériaux	$\gamma_{app}(kg/l)$	$\rho_{abs}g/cm^3$	Compacité%	Porosité%
8/15	1.53	2.66	57.52	42.48
15/20	1.43	2.65	53.96	46.04

III.3.2 Caractéristiques du sable

Le sable utilisé dans nos travaux est un sable de dune. Ce sable est prélevé d'Oued Souf d'où les caractéristiques sont citées ci-après :

III.3.2.1 Analyse granulométrique [NA EN 933-1]

a. Sable naturel

Sable naturel (SN) 0/5 provenant de Oued Souf d'où les caractéristiques sont citées ci-après :



Photo III.2 : Le sable naturel utilisé.

✓ But de l'essai

Permettre la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

✓ Principe de l'essai

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

✓ Mode opératoire

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3 minutes dans le cas des sables.

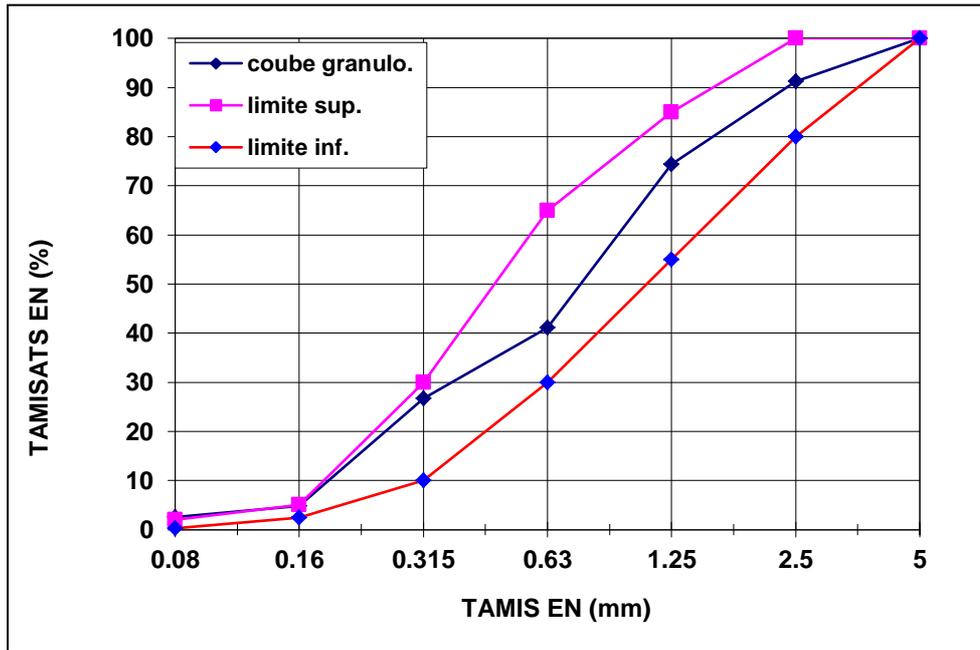


Figure III.2 : Courbe granulométrie du sable naturel.

b. Sable recyclés

Sable recyclé (SDB) 0/5 produit par le concassage de béton de ciment d'un vieil immeuble situé à BB Arreridj.



Photo III.3 : Le sable de démolition de béton utilisé.

Le concassage du sable recyclé était assuré après tirage des impuretés par un marteau.

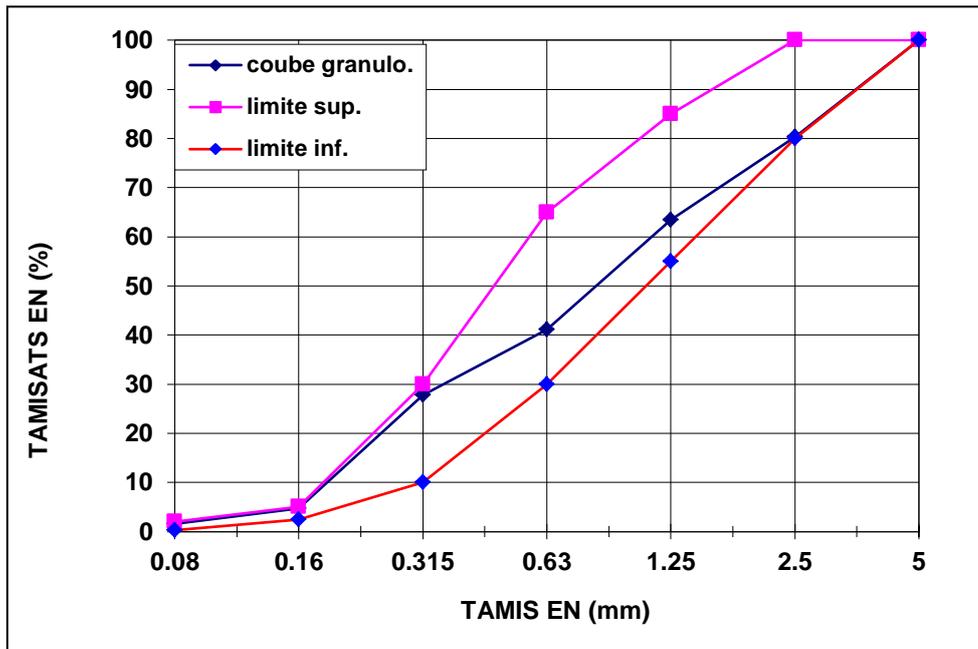


Figure III.3 : Courbe granulométrique du sable recyclé (SDB).

III.3.2.2 Modules de finesse [NA EN 12620]

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis. [69]

Tableau III.2 : Module de finesse du sable [69].

Quantité du Sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

$$MF = \sum Ri/100$$

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

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

a. Sable naturel

Après l'analyse granulométrique on trouve que le module de finesse du sable naturel testé est égal à : $MF = 2.19$ (c'est un sable moyen)

b. Sable recyclé

Après l'analyse granulométrique on trouve que le module de finesse du sable naturel testé est égal à : $MF = 2.41$ (c'est un sable moyen)

III.3.2.3 Equivalent de sable [NA EN 933-8]

✓ But de l'essai

Cet essai consiste à déterminer la quantité d'éléments fins (argile, limons, impuretés) contenus dans le sable par rapport à la quantité d'éléments sableux.

✓ Mode opératoire

- Remplir l'éprouvette d'une solution la veille jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 min.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontales en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec la solution la veille au-dessus de l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de la partie supérieure de la flocculation jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Introduire le piston dans l'éprouvette et le laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$Esp = (h'_2/h_1) 100\%$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.



Photo III.4 : Essai équivalent de sable.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Tableau III.3 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP [69].

Esv	Esp	Nature et qualité de sable
Es <65	Es<60	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<Es<75	65<Es<80	Sable légèrement argileux de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤Es≤85	70≤Es≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
Es ≥85	Es>85	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

On a répété l'essai 03 fois

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : Résultats d'essais d'équivalent de sable des deux sables.

Hauteur (cm)	ESV (%)	ESP(%)	Qualité et nature du sable
SN	91.39	85.26	Le sable est considéré très propre
SDB	93.44	88.52	Le sable est considéré très propre

III.3.2.4 La masse volumique

a. La masse volumique apparente [NA EN 1097-6]

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1L.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M2-M1)/Vr$$

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient plus le sable.

Vr : Volume du récipient (Vr = 1L).

b. La masse volumique absolue [NA EN1097-6]

Le mode opératoire et le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment. La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule:

$$\rho_{abs} = M / (V2-V1)$$

Avec: M=300g

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : La masse volumique apparente (ρ), absolue, Compacité et Porosité des sables utilisés.

Matériaux	γ_{app} (kg/l)	ρ_{abs} g/cm ³	Compacité%	Porosité%
SN	1.65	2.59	63.71	36.29
SDB	1.43	2.45	58.37	41.63

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.3.3 Caractéristiques du ciment utilisé

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment le CRS-CEM I 42,5 (GIKA) provenant de la cimenterie d'AIN EL KBIRA. Les propriétés physico-chimiques ont été étudiées conformément la norme algérienne (NA 443) et européenne (NE CE 197-1).

Propriétés chimiques et minéralogiques

Tableau III.6 : Analyse chimique du ciment utilisé.

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	P à F
Valeur %	20.77	4.41	5.19	64.81	1.97	0.293	1.27	1.29

Tableau III.7 : Composition minéralogique du clinker.

Composants	Valeur %
Silicates tricalciques C3S	63.33
Silicates bicalciques C2S	11.80
Aluminates tricalciques C3A	2.91
Aluminoferrites tetracalciques C4AF	15.79

b. Propriétés physiques

➤ La finesse

L'étude de la finesse de mouture, pour les liants est indispensable puisqu'il influe considérablement sur la résistance mécanique, la maniabilité...etc. la finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en (m^2 /kg) de poudre ou (cm^2/g).

Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil appelé «perméabilimètre de Blaine» (NA231).

La surface massique est donnée par la relation :

$$SSB = \frac{K\sqrt{e}\sqrt{3}\sqrt{t}}{\gamma(1-e)\sqrt{0.1\eta}}$$

Avec :

K: constante de l'appareil.

γ : Masse volumique en g/cm³.

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : Temps de passage de l'air dans la couche de poudre en seconde.

e : porosité de l'ajout dans la cellule.

➤ La consistance normale [NFP 15-402]

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance évaluée de cette manière sera appelée «consistance Vicat ».

➤ Le temps de prise [NFP 15-413]

Le début ou la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou moins grande rapidité de prise.

L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit signification de cette rapidité de prise. (NA230).

Tableau III.8 : Essais physiques sur le ciment utilisé.

Finesse Cm^2 /g	Consistance normal (%)	Début de prise (heure : min)	Fin de prise (heure : min)
3760	23.50	2 :40	3 :45

C) Essai mécaniques sur le ciment

- Mesure des résistances à la compression

Les ciments sont classés d'après leur résistance mécanique minimale, à la rupture par compression à 7 et 28 jours d'âge, mesurée sur des éprouvettes (4x4x16) cm³ en mortier normal.

Le mortier normal se compose en masse d'une partie du liant à essayer, de trois parties en sable normal (sable normalisé). Selon la norme NFP 15-403 et une demi-partie d'eau (E/C=5).

Les résultats des essais de résistance figurent dans le tableau III.9.

Tableau III.9 : Résistance à la compression du ciment.

Jours	Résistance à la compression Rc en Mpa
7	36.21
28	51.12

En ce qui nous concerne donc, l'activité du ciment CRS 42,5 est vérifiée.

III.3.4 L'eau de gâchage [NA EN 1008]

Parmi les constituants du béton, on a l'eau de gâchage qui est nécessaire à l'hydratation du ciment et qui facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton et notre mortier l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau III.10 : Analyse physico-chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité
Ph	7.5
Conductivité	750 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Taux de (Cl-)	72 mg/l
Taux de (NO ₂ -)	<0.01 mg/l
Taux de (NO ₃ -)	17 mg/l
Turbidité	1,44 NTU
Dureté total	50 °F
Densité	1.01 g/cm ³
Résidu sec	480 mg/l

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

III.3.5 L'eau de mer

Nous avons utilisés l'eau de mer de la région de Bejaïa.

Tableau III.11 : Analyse physico-chimique de l'eau de mer utilisée.

Paramètre	Quantité
pH	8.2
Conductivité	5500 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Taux de (Cl-)	700 mg/l
Taux de (NO ₂ -)	68.42 mg/l
Taux de (NO ₃ -)	13 mg/l
Turbidité	45 NTU
Dureté total	56.16 °F
Densité	1.3 g/cm ³

III.3.6 L'adjuvant

On a utilisé dans notre projet de recherche pour cette étude un adjuvant MEDA-AIR

III.3.6.1 Description

Le MEDA-AIR, est un entraîneur d'air sous forme liquide à diluer dans l'eau.

Le MEDA-AIR, permet d'augmenter la quantité d'air occlus dans le béton en y formant des micros bulle d'air uniformément réparties qui protègent le béton contre le cycle gel/dégel.

III.3.6.2 Domaines d'application

- Béton soumis aux cycles de gel dégel
- Bétonnage par temps froid
- Ouvrages exigeant de hautes résistances à la compression tels que les ouvrages d'art, barrages, digues.....

- Béton extrudés
- Utilisé pour les bétons en milieu agressifs.

III.3.6.3 Propriétés

- a. Sur béton frais
 - Augmentation de la cohésion.
 - Diminution de la ségrégation.
 - Amélioration de la maniabilité.
- b. Sur béton durci
 - Amélioration des résistances aux cycles gel dégel.
 - Amélioration de l'aspect au démoulage.

III.3.6.4 Caractéristiques

- Forme..... liquide
- Densité.....1,00(±0,01)
- PH.....7-8
- Ions chlore.....< 1%

III.3.6.5 Mode d'emploi

Mélanger le MEDA-AIR avant son utilisation afin de l'homogénéiser.

MEDA-AIR est introduit dans le malaxeur mélangé à l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant au béton après que 50 à 70 % de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Ne pas introduire le MEDA-AIR sur les composants secs du béton.

Le MEDA-AIR peut être utilisé en association avec les plastifiants super plastifiants : MEDAPLAST SP, MEDAFLUID SF, MEDAPLAST SP 40 et MEDAFLOW30.

III.3.6.6 Dosage

Plage de dosage recommandée : 0.01% à 0.1% du poids de ciment

Soit 0,01 litre à 0.1 litre par 100 kg de ciment.

Le dosage dépend de la quantité d'air occlus désirée mais aussi de la composition du béton et de ses caractéristiques.

Il est recommandé de procéder à des essais préalables afin de déterminer le dosage optimal.

Tout surdosage entraînera des pertes de résistance.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.3.6.7 Conditionnement et stockage

En bidon de 10 kg en fût de 225 kg.

Stocker à l'abri du soleil à une température comprise entre 5°C et 35 °C.

III.3.6.8 Durée de conservation

Une année dans son emballage d'origine et à l'abri du gel. [70].

III.3.7 Les ajouts minéraux

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont les suivants :

- La pouzzolane
- Le laitier



Photo III.5: Pouzzolane forme de poudre



Photo III.6 : Laitier forme de poudre

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.3.7.1 Les caractéristiques chimiques

La composition chimique des ajouts a été déterminée dans le laboratoire de la cimenterie d'AIN ELKBIRA.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.12 : Analyse chimique des ajouts.

Les ajouts	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P à F
Pouzzolane(%)	38.57	16.77	11.77	15.39	3.09	0.34	1.638	12.419
Laitier(%)	35.52	8.88	2.92	26.11	2.58	1.50	1.268	21.205

III.3.7.2 Les caractéristiques physiques

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.13 : Les caractéristiques physiques des ajouts.

Les ajouts	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
Pouzzolane	0.84	2.52	3560
Laitier	0.94	2.91	3520

III.4 Etudes des mortiers

III.4.1 Confection des éprouvettes

Des moules prismatiques (4x4x16) cm³ ont été réalisés pour les essais de compression et flexion. La confection des éprouvettes est faite conformément aux normes EN 196-1. La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique a été à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage elles sont conservées dans l'eau à 20 °C.



Photo II.7 : Les éprouvettes de mortier (4x4x16) cm³

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.4.2 Programme d'essais

III.4.2.1 Résistance à la traction par flexion

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$, jusqu'à rupture.

Conserver les demi-prismes jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion R_f (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule suivante :

$$R_f = (1.5 PL) / b^3$$

R_f : est la résistance en flexion, en Newtons par millimètre carré ou MPa.

b : est la côté de la section carrée du prisme, en millimètre.

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

L : est la distance entre les appuis, en millimètre.

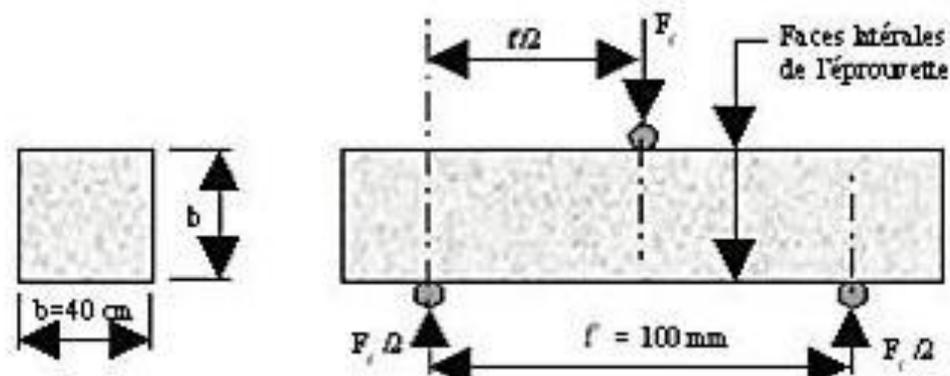


Figure III.4 : Schéma de flexion de trois points [26].



Photo III.8 : Essai de flexion.

III.4.2.2 Résistance à la compression

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

La résistance en compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = F_c / b^2$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

F_c : charge de rupture en (N).

b^2 : cote de l'éprouvette est égale à 40mm.

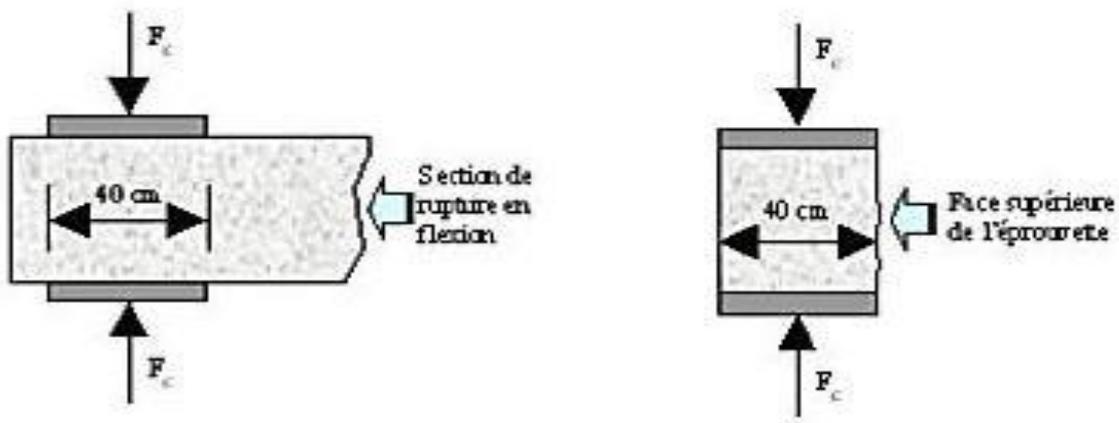


Figure III.5 : Schéma de l'essai de compression [26].



Photo III.9 : Essai de compression.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.5 Formulation de béton

III.5.1 Méthode de calcul de la composition du béton

La formulation du béton pour un dosage de ciment de 350 Kg/m^3 et pour un affaissement au cône proche de 5 à 6 cm.

Le calcul de la composition du béton a été fait par la méthode des «volumes absolus» élaborée par le professeur B .SCRAMTAÏV.

Le principe de cette méthode est le suivant : la somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m^3 de béton frais est égale à 1000 litres. C'est une méthode de calcul purement expérimentale.

Pour confectionner un béton, il faut connaître les méthodes de calculs en vigueur (calcul des dépenses en matières premières) et leur mise en œuvre.

On choisit alors les composants du béton d'une façon convenable dans des proportions bien définies.

Les données de base servant pour le calcul de la composition du béton sont :

- ❖ la classe de résistance requise du béton (R_b).
- ❖ Le degré de fluidité ou de consistance du béton.
- ❖ Les caractéristiques des matériaux d'origine :

⇒ Activité du ciment (R_c).

⇒ Masse spécifique (absolue) du ciment.

⇒ Masses spécifiques (absolues) et masses volumiques (apparentes) du sable et gravier.

⇒ La porosité des pierres concassées ou du gravier.

Les principes étapes de calcul de la composition du béton sont :

a) Le rapport C/E

Si $C/E \leq 2,5$ béton plastique : $R_b = A \cdot R_c ((C/E) - 0,5) \Rightarrow C/E = (R_b / (A \cdot R_c)) + 0,5$.

Si $C/E > 2,5$ béton ferme : $R_b = A' \cdot R_c ((C/E) + 0,5) \Rightarrow C/E = (R_b / (A' \cdot R_c)) - 0,5$.

Tableau III.14 : Les valeurs des coefficients A et A' [26].

Les valeurs des coef A et A' en fonction du liant et agrégat	A	A'
Moyen	0,60	0,40
Mauve	0,55	0,37
Bon	0,65	0,43

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

b) La dépense en eau

Tableau III.15 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.

La quantité d'eau (l/m^3) en fonction du D max du gravier (mm)				Caractérisation du béton
70	40	20	10	affaissement au cône (cm)
145	155	170	185	1-2
160	165	180	195	3-4
165	170	185	200	5-6
170	175	190	205	7-8
175	185	200	215	9-10

c) La dépense en ciment

$$C=(C/E).E \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

d) La dépense en gravier

$$G=1000/ [Pg (\alpha /\gamma g) + (1/\square g)] \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Tableau III.16 : Les valeurs de α en fonction de (E/C) La dépense en ciment.

Les valeurs de α en fonction de (E/C)						La dépense en ciment
0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	(Kg/m ³)
1,38	1,32	1,26	-	-	-	250
-	1,42	1,38	1,30	-	-	300
-	-	1,44	1,38	1,32	-	350
-	-	-	1,46	1,40	1,31	400
-	-	-	1,56	1,52	1,44	500
-	-	-	-	1,56	1,52	600

e) La dépense en sable

$$S= [1000- ((C/\square c) + (E/\square e) + (G/\square g))] . \square s \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

La formulation complet des mélanges du 1 m^3 du béton pour un dosage de ciment respectif de 350 (Kg/m³) dans le tableau suivant :

Tableau III.17 : Formulation des mélanges de béton pour Aff=5-6 cm avec un dosage de ciment (350 Kg/m³).

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Proportion SN/ SDB	Les quantités des matériaux utilisées pour 1 m3 de béton			
	Ciment kg/m3	Eau l/m3	Pierres concassés kg/m3	Sable kg/m3 SN/SDB
100/0	350	210	1295	478/00
70/30		220.5		334.6/143.4
50/50		236.25		239/239
30/70		246.75		143.4/334.6
0/100		260		00/478

III.6 Techniques expérimentales

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes en vigueur.

III.6.1 Les essais sur le béton à l'état frais

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidification par un liant de ciment, un squelette granulaire composé d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs graviers.

III.6.1.1 Le malaxage [NA EN 12390-2]

L'objectif du malaxage est de répartir dans l'espace de façon homogène, par l'action des outils des brassages, les éléments des constituants mis en présence dans le malaxeur.

La maîtrise de dosage des différents constituants est nécessaire pour maintenir la constance et l'homogénéité du béton fabriqué.

La préparation de béton est faite par l'appareil dit le malaxeur, les étapes de préparation de béton sont :

On verse la quantité de gravier, et en suit par la quantité de sable, on allume le malaxeur pour le malaxage granulaire et on verse en suit par la quantité de ciment, et finalement la quantité de l'eau, on prend 35 s pour le malaxage, après cette durée, on arrête le malaxage et on réalise l'essai au cône d'Abrams pour déterminer l'affaissement des bétons préparés.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

III.6.1.1.1 Malaxage du béton

Il est essentiel que les constituants de base (C;S;G et E) soient mélangés correctement afin de produire un béton frais dont la surface de tous les granulats sera enrobée de pâte de ciment et qui sera alors homogène à grande échelle et possédera par conséquent des propriétés uniformes.

Le malaxage est effectué dans des malaxeurs ou à la main. Dans notre cas on a utilisée deux types de malaxage :

a. Malaxage à la main

Une surface dure, propre et non absorbante. Le ciment est ensuite déposé sur les granulats et les matériaux secs sont mélangés en les retournant d'un bout à l'autre de la surface et en les recoupant avec la pelle jusqu'à ce que le mélange semble uniforme. Il faut retourner le mélange au moins trois fois. L'eau est ensuite ajoutée progressivement afin qu'elle ne s'écoule pas vers l'extérieur en entraînant le ciment hors de l'air de gâchage. Le mélange est retourné au moins trois fois jusqu'à ce qu'il ait une consistance et une couleur uniformes. Durant le malaxage à la main, il est impératif qu'aucune impureté provenant du sol ou de tout autre matériau ne soit mélangé au béton.

b. Malaxeurs à béton

Les malaxeurs à béton doivent, non seulement assurer un malaxage uniforme des constituants du béton, mais ils doivent également décharger le béton sans modifier cette homogénéité.



Photo III.10 : Malaxeur.

III.6.1.2 L'affaissement au cône d'Abrams (slump test) [NA EN 12350-2]

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (NA EN 12350-2). 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 30cm de hauteur. 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 1,6 cm 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 [71].

Dans notre étude on a fixé l'affaissement à : Aff. entre 5 et 6cm.



Photo III.11 : Essai au cône d'abrams.

III.6.1.3 Vibration [NA EN 12390-2]

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- On commence par piqué de vibration qui utilise pour vibrer le béton dans l'éprouvette dans 3 étapes et 3 couches à chaque fois en frappe 25 frappes avec le même rythme à fin d'homogénéiser la forme de l'échantillon.
- On fait la vibration sur la table vibrante pendant 20s.
- Peser 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquer par peinture et conserver dans l'eau.

III.6.2 Les essais sur béton durci

Les essais sur béton durci faire pour détermination des performances mécaniques du béton de manière destructive et non-destructive au moyen des essais les plus courants :

III.6.2.1 Durcissement de béton

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progression du ciment.

Il bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le passe ceci peut expliquer par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décrois elle-même avec le temps.

III.6.2.2 Mode de conservation de béton [NA EN 12390-2]

Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton [51].

Notre béton est conservé dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

❖ La masse volumique apparente

On mesure systématiquement la masse volumique apparente de toute éprouvette soumise à un essai. En effet, lorsqu'une éprouvette a été mal compactée ou si la granulométrie est mauvaise, cela se remarque sur la masse volumique apparente.

Le principe de l'essai est simple, concerné sur la mesure de la masse d'une éprouvette sous forme cylindrique, prismatique, cubique ...etc. En béton à l'état frais et durci, la masse volumique apparente est calculée par la formule simple est :

$$\rho = m/v \quad \text{exprimé en Kg/m}^3$$

Tel que :

- ρ : la masse volumique apparente de matériau.
- m : la masse de matériau.
- V : le volume occupé par matériau

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

A afin de coffrage des éprouvettes , On poser les éprouvettes au durcissement, après durée de 24 heures, on fait le décoffrage des éprouvettes ,et on introduire dans un réservoir contient d'eau pour le durcissement de durée de 28 jours, après 28 jours , on prendre les éprouvettes pour faire les mesures de la résistance de béton à la compressions par les méthodes destructifs (essai l'écrasement).

III.6.3 Détermination de la résistance

III.6.3.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement) [NA EN 12390-3]

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

III.6.3.2 La presse hydraulique

La presse utilisée répond aux normes NA EN 12390-3, elle comporte deux parties :

Unité de commande constituée de :

- Un cadran pour valeur maximal de charge ;
- Interrupteur principal ;
- Commande de réglage de la vitesse ;
- Clapet de charge-décharge.

Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Photo III.12 : Presse hydraulique.

III.6.3.3 Essai d'écrasement [NA EN 12390-3]

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubiques normalisée (10x10x10) cm³.

On calcule la résistance à la compression par la relation

$$R_c = F/S$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²).



Photo III.13 : Essai d'écrasement.

III.6.3.4 La résistance à la traction par fendage des bétons [NF EN 12390-6]

L'essai de fendage est exécuté selon la *Norme NF EN 12390-6*. L'éprouvette cylindrique est comprimée le long de deux génératrices diamétralement opposées comme la Figure III.6 pour éviter une rupture locale en compression au niveau des génératrices de chargement et répartir la charge appliquée, deux bandes minces en contreplaqué neuf d'une largeur de 10 mm, d'une épaisseur de 4 mm et d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette, sont placées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette. Un des avantages de l'essai de fendage est que le même type d'éprouvette est utilisé à la fois pour des essais de compression et de traction.

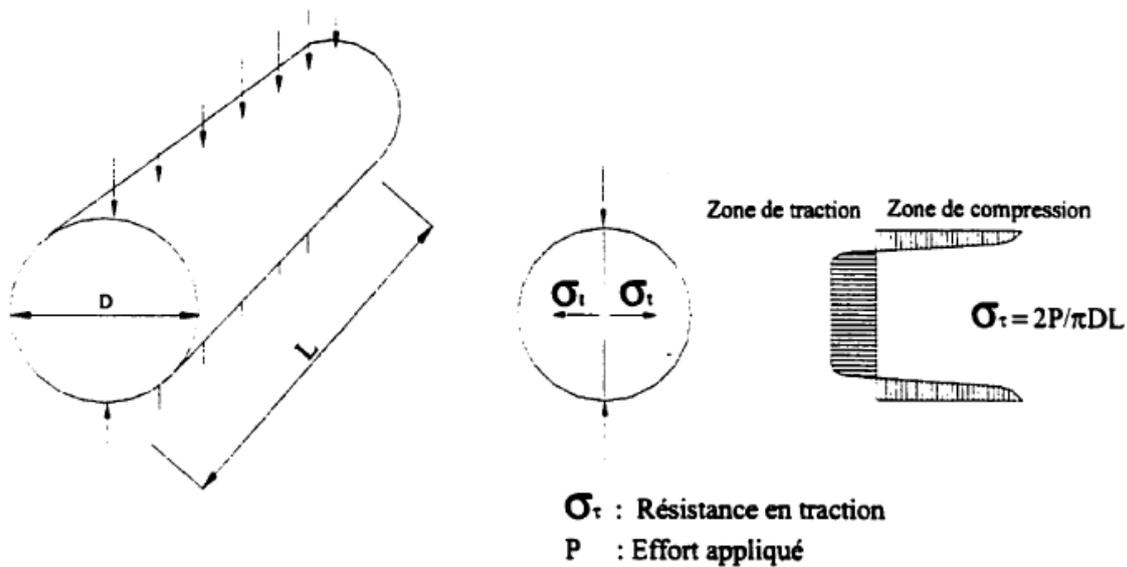


Figure III.6: Distribution des contraintes lors de l'essai Brésilien [26].



Photo III.14 : Essai de fendage.

III.6.3.5 Absorption d'eau [NA EN1097]

Cette norme a pour objet d'exposer la technique pour mesurer le coefficient d'absorption d'eau par le béton.

III.7 Mode d'action des environnements agressifs

Action des eaux agressives

Le comportement du mortier ou du béton, placé dans un environnement chimiquement agressif, dépend de facteurs complexes et multiples liés, d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des éléments agressifs), d'autre part, au béton lui même (nature et dosage des constructions, condition de fabrication). Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en

MATERIAUX ET EXPERIMENTATION

béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification dessiccation) ou mécaniques.

La résistance aux eaux agressives est déterminée à partir des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³, le durcissement des éprouvettes était en condition naturelles pendant 28 jours, puis elles sont immergées séparément pendant 28 jours et 60 jours dans les solutions suivantes :

- 2.5 % d'acide chlorhydrique (HCL)
- 5% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
- 5% d'hydroxyde de sodium (NaOH).
- 5% de sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄).
- 5% de sulfate de sodium (Na₂SO₄).
- Et l'eau de mer.



Photo III.15 : Conservation des bétons dans les milieux agressifs.

III.8 Essai de durabilité aux cycles de gel et de dégel

A Bordj Bou Arréridj, le climat est un des facteurs qui prône le plus dans la détérioration des structures, telles les fondations de maison, les bordures des routes et les routes elles mêmes. C'est pourquoi une telle étude se doit de comporter un essai de durabilité aux cycles de gel et de dégel.

L'essai consiste à geler et dégeler les échantillons de béton pour en évaluer leur durabilité sur le terrain. Pour les bétons ordinaires et recyclés, les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai étaient (10x10x10) cm³, l'essai effectuée près de 4 cycles par jour, soit une durée d'environ 17 jours.

Le gel doit se faire à -10 jusqu'à -15°C et le dégel à +20°C.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. La méthode de formulation a été développée et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental étant fait, ainsi, les essais sur mortier et béton frais et durci que ce soit le milieu de conservation.

CHAPITRE IV :
RESULTATS
ET
ANALYSES

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers et les bétons confectionnés selon les différentes combinaisons de taux de substitutions.

IV.2 Etude des mortiers

IV.2.1 Comportement du mortier à l'état frais

La quantité d'eau de gâchage conditionne en grande partie, l'ouvrabilité d'un mortier s'il existait toutefois un moyen de la spécifier et de la mesurer ce serait en fonction de la maniabilité. Pour les différents sables, des quantités d'eau successives seront ajoutées aux mélanges jusqu'à obtention d'une maniabilité constante.

Tableau IV.1 : Quantité d'eau réellement utilisée des mortiers avec des différents taux de substitution.

Mortier avec C=500g et S=1500g		
Type de mortier (SN/SDB)	E/C	Quantité d'eau réellement utilisé (l/m ³)
100/0	0.5	250
70/30	0.6	300
50/50	0.62	310
30/70	0.65	325
0/100	0.68	340

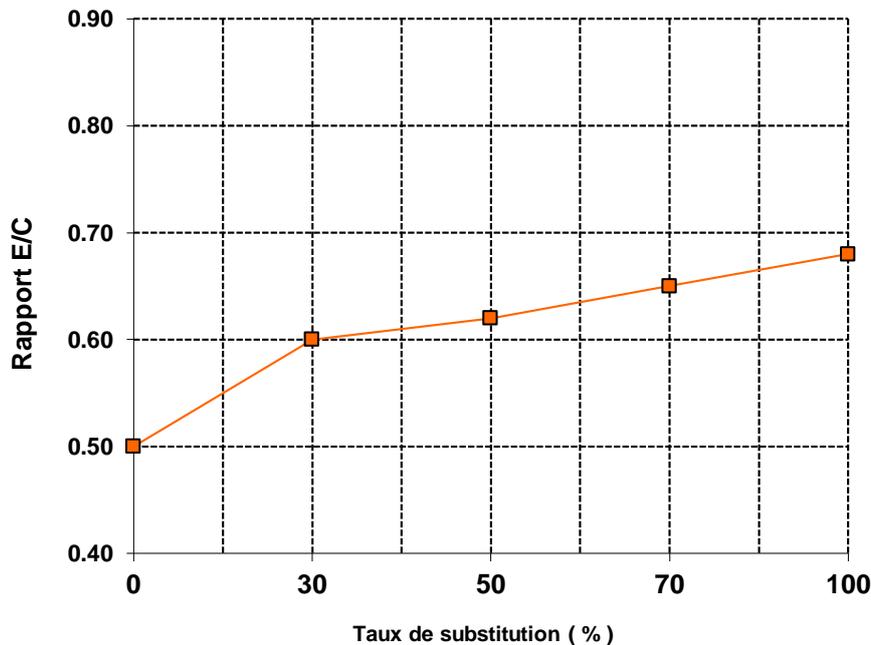


Figure IV.1 : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton concassé.

D'après le **tableau IV.1** et la **figure IV.1**, on remarque que les mortiers à base de sable recyclé absorbe beaucoup d'eau.

Le rapport E/C augmente avec taux de substitution des sables recyclés. Cela se traduit par la présence de fines en grande quantité dans la sable de démolition de béton concasse.

IV.2.2 Comportement des mortiers à l'état durci

L'évolution du comportement mécanique est suivie en fonction des différents taux de substitution pour les différents milieux de conservation.

IV.2.2.1 Résistance à la compression

La résistance mécanique du mortier après durcissement dépend du rapport E/C, de la qualité et la nature de sable, du mode de conservation du mortier et de l'échéance de l'essai. Cette résistance mécanique est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression et flexion.

Nous présentons les résultats des essais de la résistance à la compression et à la rupture par compression et flexion effectués sur les éprouvettes de dimensions (4x4x16) cm³.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau IV.2 : Résistance à la compression des mortiers.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)			
	C= 500g ; S= 1500g			
	à l'air libre		dans l'eau	
	Rc (MPa)	%	Rc (MPa)	%
100/0	12.50	100	32.40	100
70/30	11.65	93.2	30.90	95.37
50/50	10.10	80.8	28.76	88.77
30/70	8.11	64.88	24.45	75.47
0/100	6	48	21.02	64.88

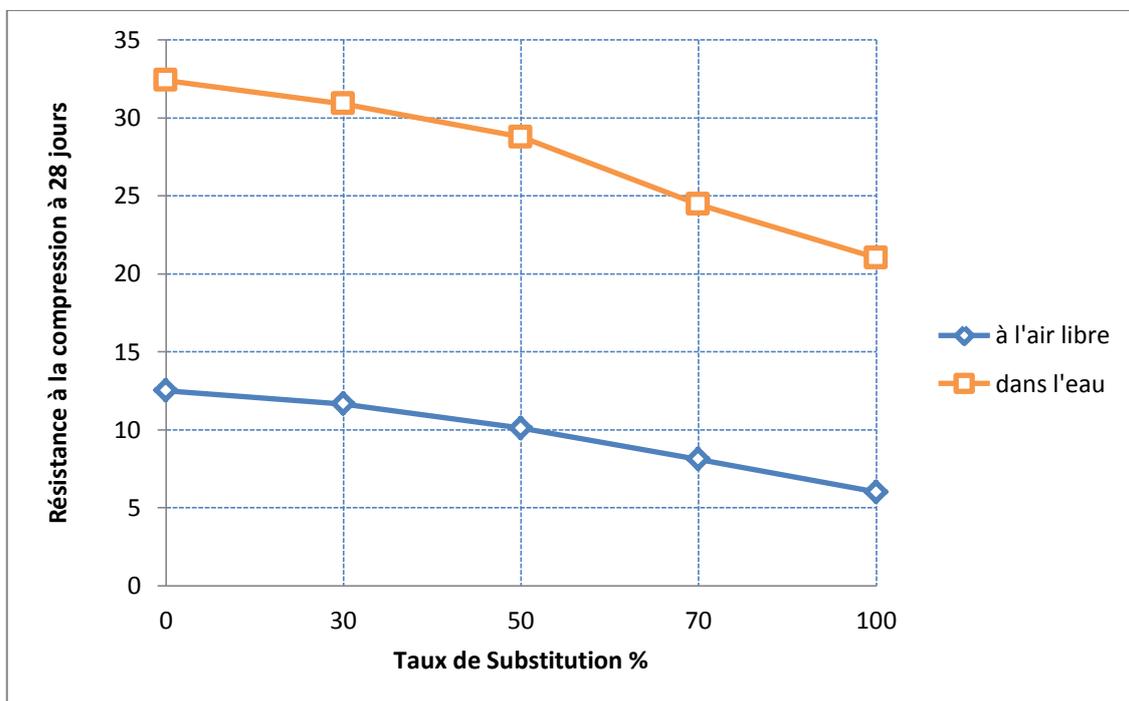


Figure IV.2 : Variation de la résistance à la compression à 28 jours des différents types des mortiers.

D'après le tableau IV.2 et la figure IV.2 On observe que les mortiers à base des sables recyclés présentent des résistances à la compression plus faible par rapport aux mortiers naturels qui nécessitent une augmentation du dosage et présentent un inconvénient du point de vue économique. On constate que les résistances à la compression des mortiers conservés à l'air libre sont inférieures celles des mortiers conservés dans l'eau. Cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau suite à son évaporation à l'air libre, entraînant un abaissement de la cinétique d'hydratation du ciment qui provoque une diminution de la résistance.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.2.2.1.1 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers

Afin d'améliorer le comportement du mortier frais et durci à base de sable recyclés, des ajouts minéraux actifs (laitier et pouzzolane) ont été incorporé dans la meilleure composition soit 50/50.

Les résultats obtenus sont résumés dans le **tableau IV.3** :

Tableau IV.3 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers.

Type de mortier (SN/SDB)	à l'air libre		dans l'eau	
	R _c (MPa)	R _c /R _t	R _c (Mpa)	R _c /R _t
100/0	12.5	100	32.40	100
50/50	10.10	100	28.76	100
50/50 + 10% S	13.93	111.44	32.46	100.18
50/50 + 10 % Z	14.1	112.8	33.50	103.93

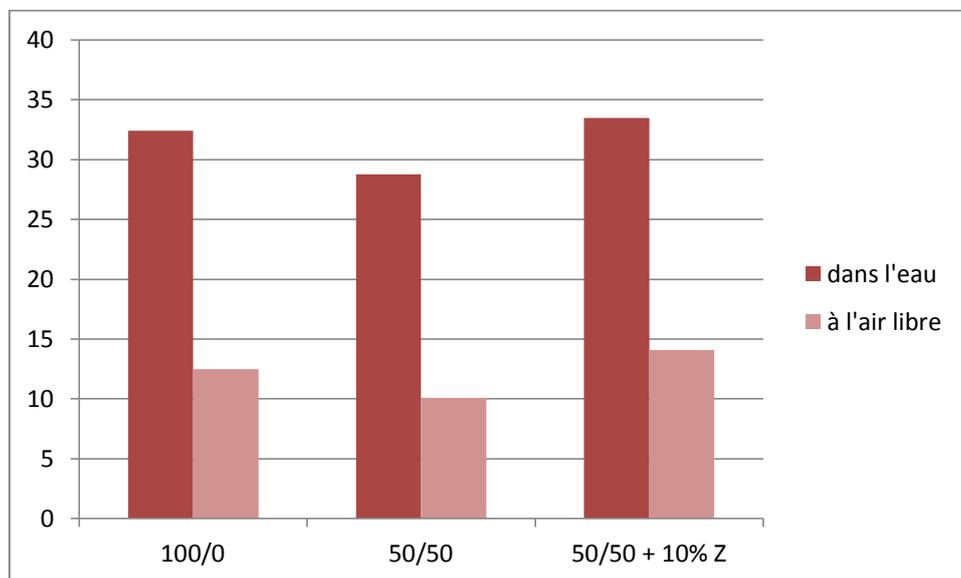


Figure IV.3 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la compression du mortier à base de 50% de déchet de béton concassé.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

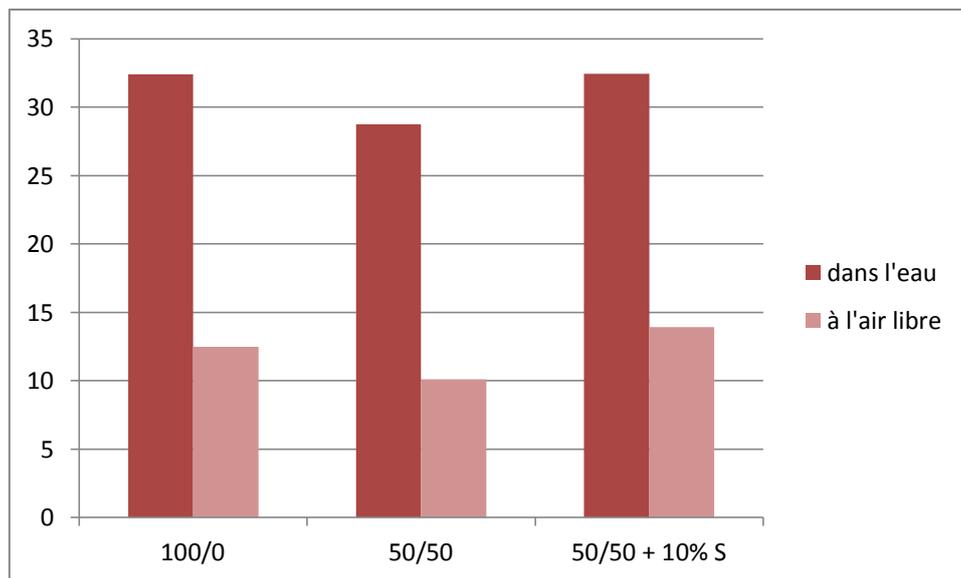


Figure IV.4 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression du mortier à base de 50% de déchet de béton concassé.

D'après le **tableau IV.3** et les **figures IV.3, IV.4** on voit que la résistance mécanique à la compression à 28 jours avec 10% de laitier et 10% de pouzzolane est supérieure à celle du mortier témoin quel que soit le milieu de conservation, cela explique l'influence des ajouts minéraux dans l'amélioration de la résistance à la flexion et la réduction de la porosité du mortier.

IV.2.2.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Résistance à la traction par flexion du mortier étudié.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa) C= 500g ; S= 1500g			
	à l'air libre		dans l'eau	
	R _f (MPa)	%	R _f (MPa)	%
100/0	3.20	100	5.70	100
70/30	2.80	87.5	4.80	84.21
50/50	1.92	60	3.75	65.79
30/70	0.90	28.13	3.20	56.14
0/100	0.75	23.44	2.3	40.35

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

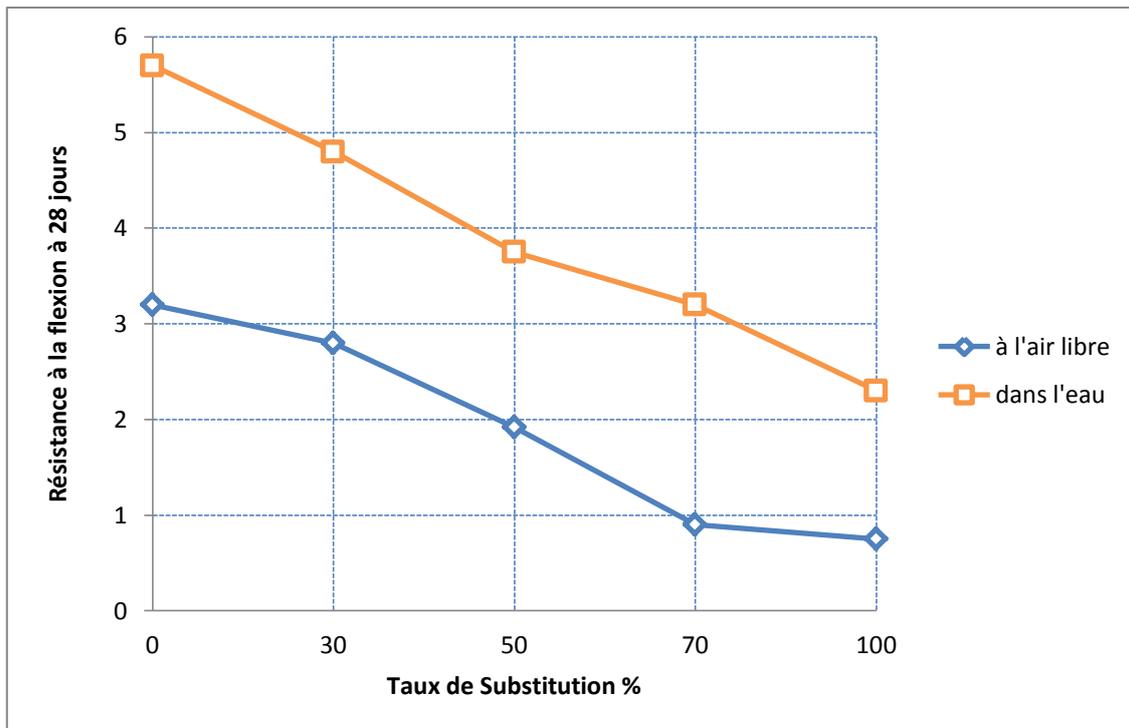


Figure IV.5 : Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable de béton concassé.

D'après le **tableau IV.4** et la **figure IV.5**, la résistance à la traction par flexion est inversement proportionnelle au taux de substitution en sable à base de béton concassé quel que soit le milieu de conservation.

La meilleure résistance observée correspond au mortier à base de 100% sable naturel.

La plus faible valeur de la résistance est remarquée pour le mortier à base de 100% sable de démolition du béton.

On constate que les résistances à la flexion des mortiers conservés à l'air libre sont inférieures à celles des mortiers conservés dans l'eau.

Cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau suite à son évaporation à l'air libre, entraînant un abaissement de la cinétique d'hydratation du ciment qui provoque une diminution de la résistance.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.2.2.2.1 Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion

Tableau IV.5 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion des mortiers.

Type de mortier (SN/SDB)	à l'air libre		dans l'eau	
	R_f (MPa)	R_f/R_t	R_f (MPa)	R_f/R_t
100/0	3.20	100	5.70	100
50/50	1.92	60	4.80	84.21
50/50 + 10% S	2.77	86.56	4.66	81.75
50/50 + 10 % Z	2.81	87.82	4.90	85.96

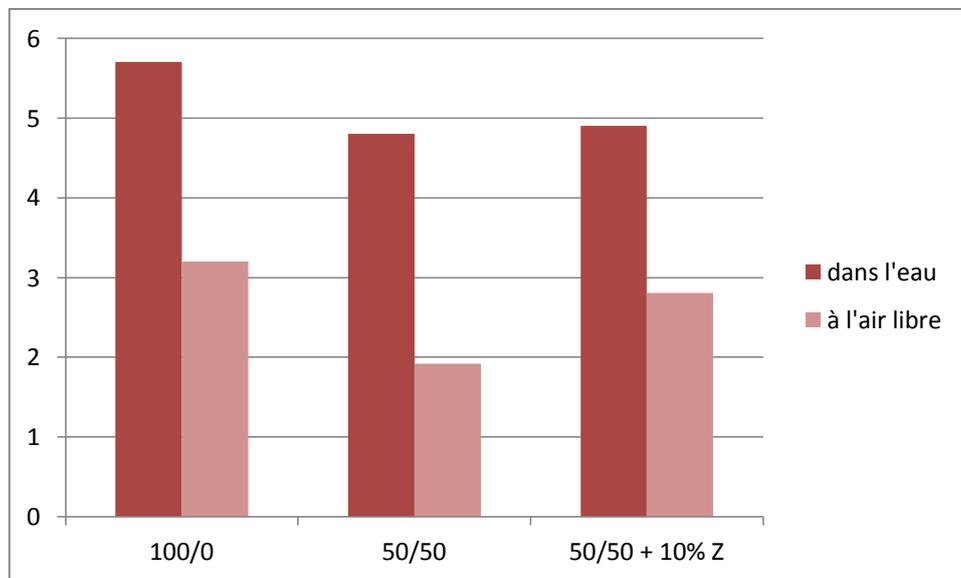


Figure IV.6 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la traction par flexion à base de 50% de déchet de béton concassé.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

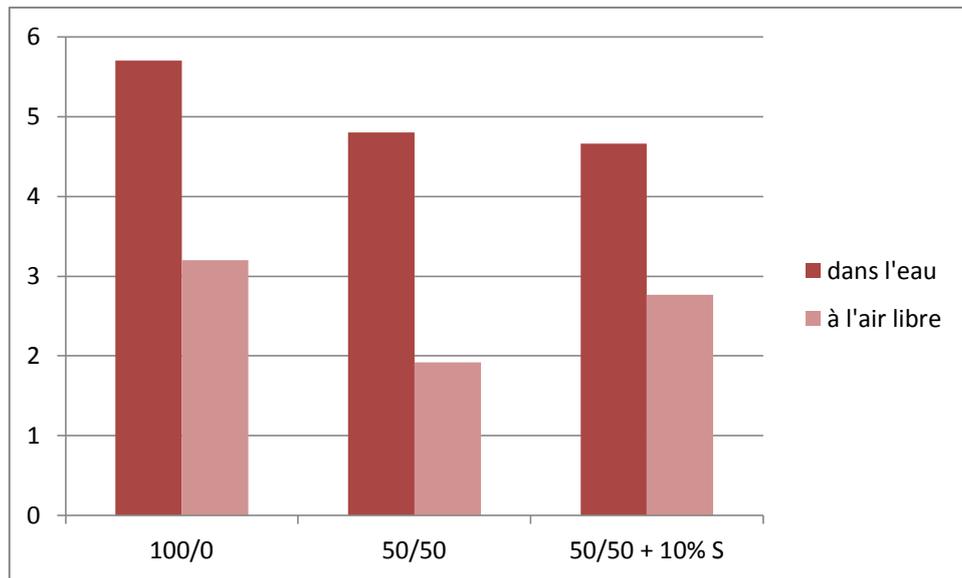


Figure IV.7 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la traction par flexion à base de 50% de déchet de béton concassé.

D'après le **tableau IV.5** et les **figures IV.6** et **IV.7**, on remarque que l'ajout de 10 % de laitier et pouzzolane améliore la résistance à la flexion des mortiers de l'ordre de 18 % et 14%.

IV.3 Etude des bétons

IV.3.1 Comportement du béton à l'état frais

Comme tous les mélanges de béton sont préparés avec un affaissement imposé (entre 5 et 9cm) fourchette des bétons plastiques ce qui est plus répandu dans les chantiers de coulage de béton, on remarque que la quantité d'eau réellement utilisée (eau de gâchage) pour assurer cet affaissement s'accroît suivant le taux de substitution en granulats recyclés d'une part et le type de granulat d'autre part. Voir le **tableau IV.6** :

Tableau IV.6 : Quantités d'eau réellement utilisées pour les différents taux de substitution.

Type de béton SN/SDB	E/C	Quantité d'eau réellement utilisée (l/m ³)	L'affaissement mesuré (cm)
100/0	0,60	210	5,5
70/30	0,63	220.5	5,8
50/50	0,67	236.25	5,5
30/70	0,70	246.75	6
0/100	0,74	260	6

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

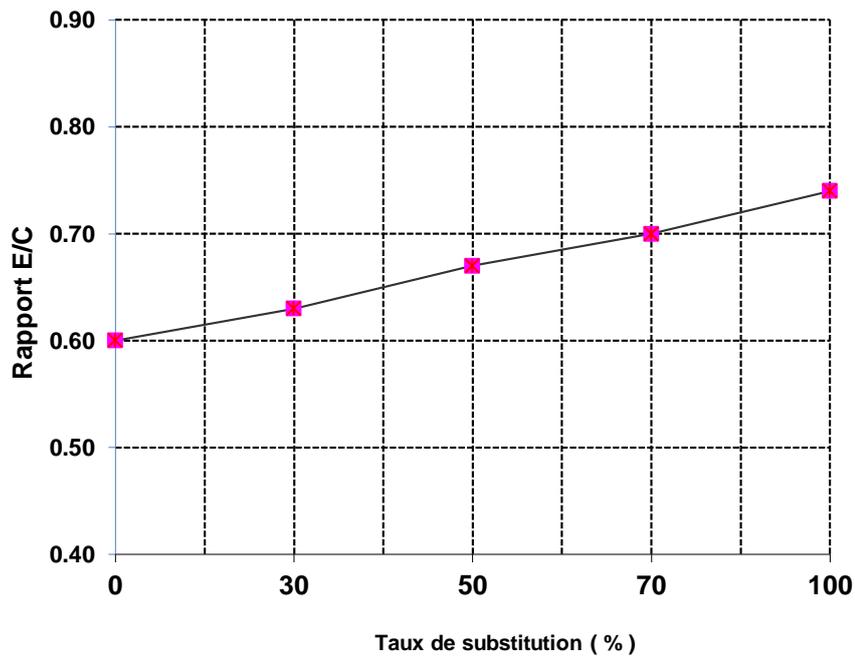


Figure IV.8 : Relation entre le rapport E/C des bétons et le pourcentage de substitution en granulats de béton de démolition.

Lors de la confection des bétons recyclés, on constate que ces bétons nécessitent une quantité d'eau de gâchage supplémentaire afin de garder une maniabilité similaire à celle du béton témoin, par conséquent, l'augmentation du rapport **E/C**, comme le montrent le **tableau IV.6** et la **figure IV.8**

Cette demande en eau supplémentaire est liée en premier lieu à la forte absorption d'eau de sable recyclé, à cause de sa porosité élevée.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.3.1.2 La masse volumique

Tableau IV.7 : Les masses volumiques à l'état frais.

Bétons (SN/ SDB) (%)	La masse volumique à l'état frais Kg/m ³
Pour dosage de ciment 350 Kg/m³	
100/0	2468.48
70/30	2417.82
50/50	2395.53
30/70	2291.22
0/100	2226.19
Pour dosage de ciment 350 Kg/m³ avec les ajouts (pouzzolane (10%), laitier 10%), et l'adjuvant entraîneur d'air (0.01; 0.05 ; 0.1%)	
50/50 avec 10% Pouzzolane	2312.06
50/50 avec 10% Laitier	2317.17
50/50 avec 0.01% d'entraîneur d'air	2231.13
50/50 avec 0.05% d'entraîneur d'air	2228.66
50/50 avec 0.1% d'entraîneur d'air	2206.9

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

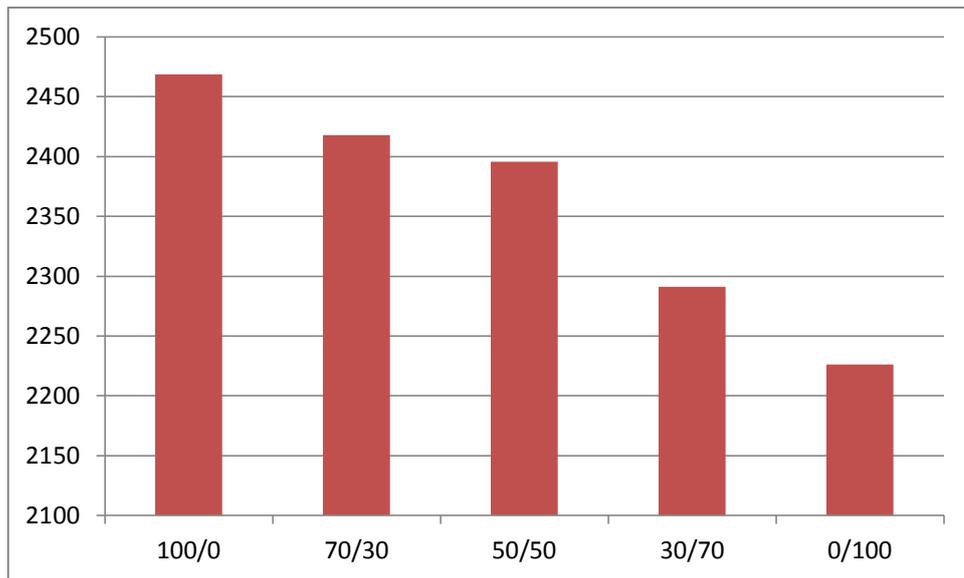


Figure IV.9 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés à l'état frais.

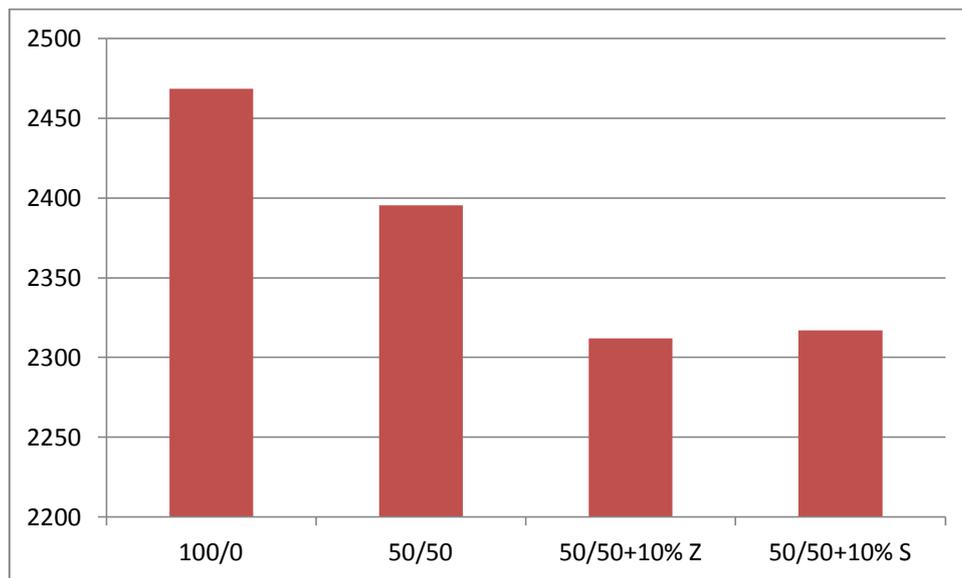


Figure IV.10 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux à l'état frais

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

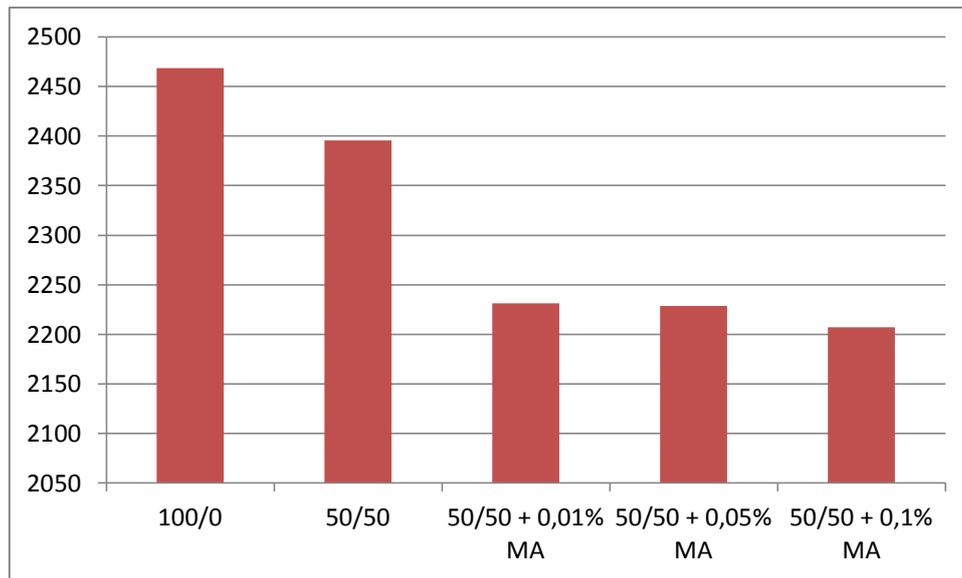


Figure IV.11 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts d'entraîneur d'air à l'état frais.

D'après le **tableau IV.7** et la **figure IV.9**, On remarque que la densité des bétons recyclés à l'état frais est généralement faible en comparaison avec le bétons témoin, on note que : Le béton ordinaire présente une densité égale à (**2468.48 Kg/m³**) par contre le béton recyclé présente une diminution, ceci confirme les résultats trouvé par d'autres chercheurs [30], et indique que le remplacement des agrégats concassés par des agrégats recyclés entraîne une diminution de la densité des bétons à base de ces agrégats recyclés avec une porosité élevée.

D'un autre côté, l'incorporation de 10% de laitier et pouzzolane améliore la masse volumique par rapport au taux de substitution élevé, d'après le **tableau IV.7** et la **figure IV.10**

D'après le **tableau IV.7** et la **figure IV.11**, on remarque une chute de densité par rapport au béton témoin si on utilise l'entraîneur d'air.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.3.2 Comportement du béton à l'état durci

IV.3.2.1 La masse volumique

Tableau IV.8 : Les masses volumiques à l'état durci.

Bétons (SN/ SDB) (%)	La masse volumique à l'état durci Kg/m ³
Pour dosage de ciment 350 Kg/m³	
100/0	2385.01
70/30	2367.50
50/50	2350.98
30/70	2220.36
0/100	2198.41
Pour dosage de ciment 350 Kg/m³ avec les ajouts (pouzzolane (10%), laitier (10%)) et l'adjuvant entraîneur d'air (0.01; 0.05 ; 0.1%)	
50/50 avec 10% Pouzzolane	2267.78
50/50 avec 10% Laitier	2275.46
50/50 avec 0.01% d'entraîneur d'air	2210.6
50/50 avec 0.05% d'entraîneur d'air	2203.98
50/50 avec 0.1% d'entraîneur d'air	2200.75

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

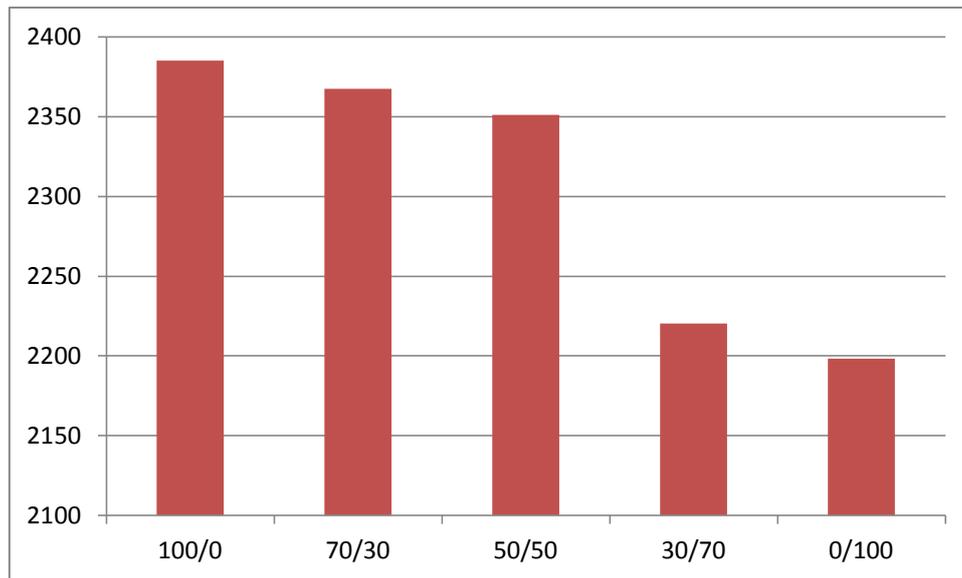


Figure IV.12 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés à l'état durci.

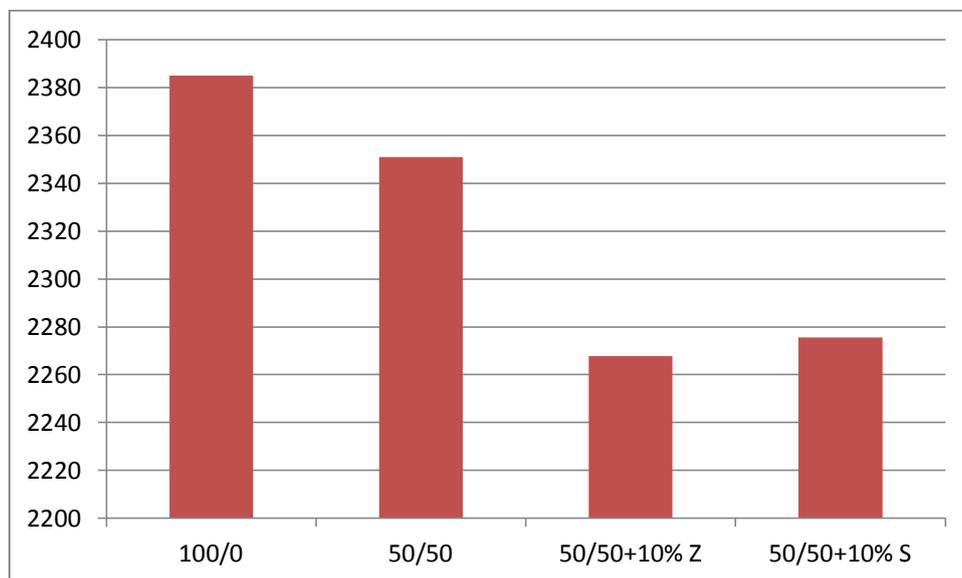


Figure IV.13 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux à l'état durci.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

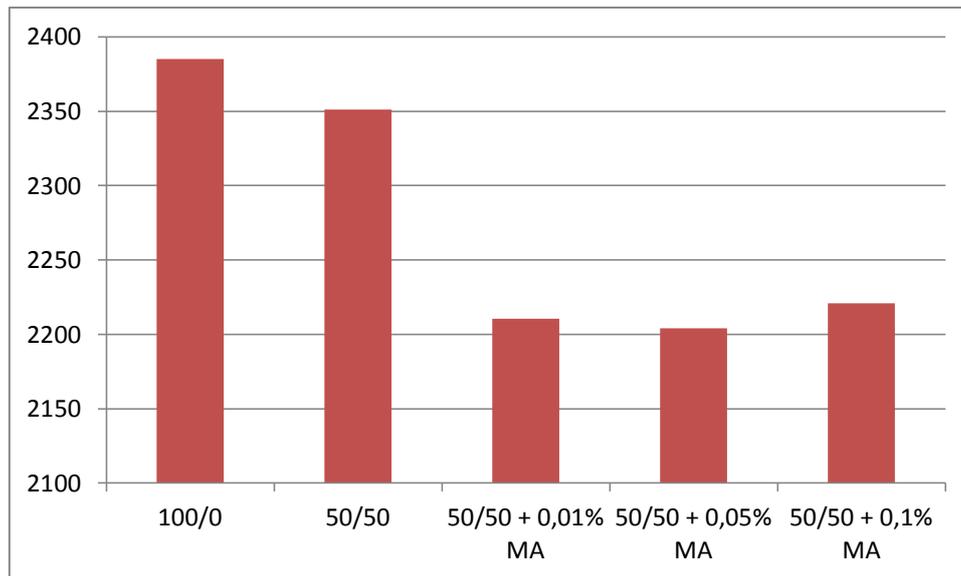


Figure IV.14 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts d'entraîneur d'air à l'état durci.

L'introduction des matériaux recyclés dans la composition de béton entraîne une diminution légère de la densité de béton durci qui varie en fonction du taux de substitution (**tableau IV.8**) et ceci s'explique par l'air occlus autant élevé dans les bétons à base d'agrégats recyclés (granulats poreux). [72, 73,74]

Il est à noter que la densité du béton témoin est de **2385.01 kg/m³** et que la chute de la densité est de l'ordre de 7.8% à l'état durci pour béton (à 100% sable de béton de démolition concassé **2198.4 kg/m³**).

La figure IV.12 présente cette diminution qui est due principalement à la légère densité des agrégats concassés de béton.

D'après **la figure IV.11**, les bétons recyclés confectionnés à base de 50% de sable recyclé avec 10% pouzzolane et 10% laitier présentent des faibles valeurs de la densité qui varie entre (**2267Kg/m³** et **2276 Kg/m³**).

D'après **la figure IV.14**, On remarque que la densité des bétons recyclés adjuvantés est généralement faible en comparaison avec le béton témoin.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.3.2.2 La résistance à la compression des bétons

Tableau IV.9 : La résistance à la compression du béton.

Type de béton (SN/SDB)	à l'air libre		dans l'eau	
	Rc (MPa)	%	Rc (MPa)	%
100/0	24.57	100	41.1	100
70/30	20.98	85.39	33.24	80.88
50/50	19.50	79.37	25.83	62.85
30/70	18.20	74.05	23.38	56.89
0/100	17.02	69.27	22.30	54.26

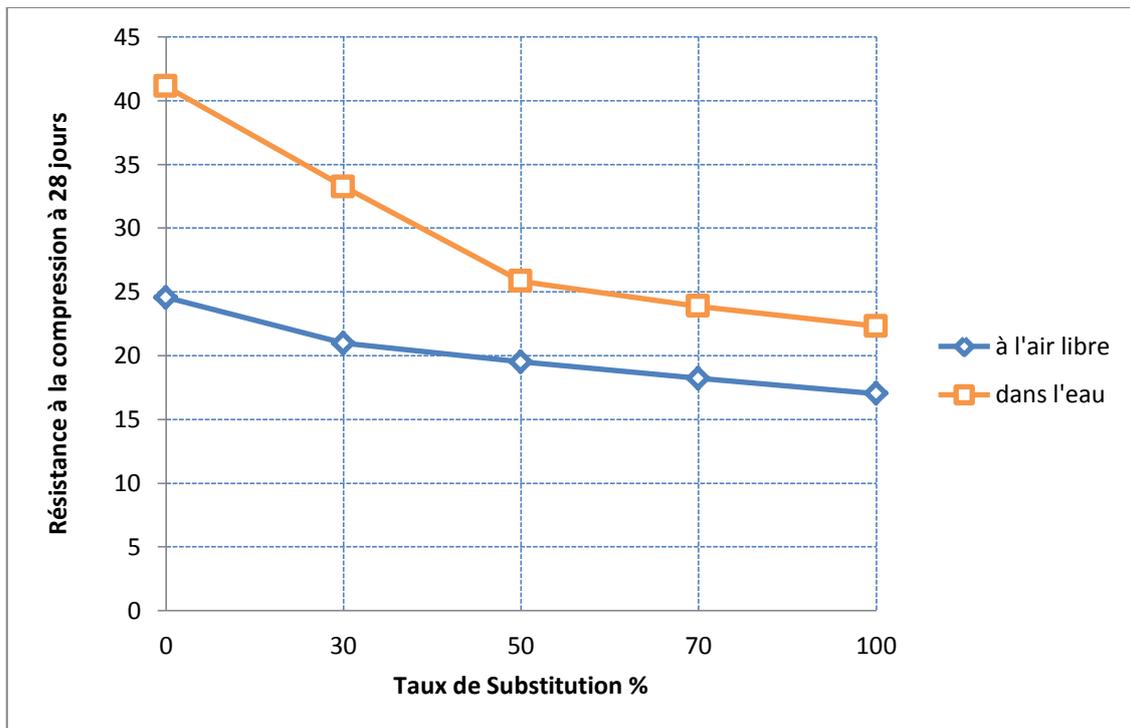


Figure IV.15 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution.

D'après le tableau IV.9 et la figure IV.15 on observe que les bétons à base des sables recyclés présentent des résistances à la compression faibles que les bétons témoins (100% sable naturel) et que la chute de résistance diminue dès qu'en faisant augmenter le taux de substitution de sable quelque soit le milieu de conservation.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.3.2.3 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression

Tableau IV.10 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression du béton.

Type de béton (SN/SDB)	à l'air libre		dans l'eau	
	Rc (MPa)	Rc/Rt	Rc (MPa)	Rc/Rt
100/0	24.57	100	41.1	100
50/50	19.50	79.36	25.83	62.84
50/50 + 10% S	22.43	91.29	37.79	91.95
50/50 + 10 % Z	22.03	89.66	39.50	96.11

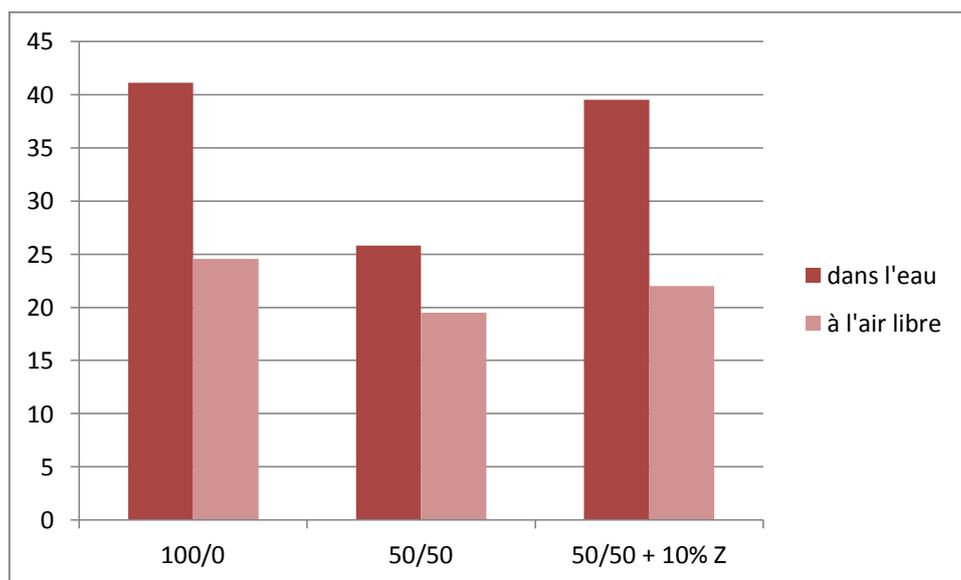


Figure IV. 16 : Effet de l'ajout de pouzzolane sur la résistance à la compression de béton à base de 50% de déchet de béton concassé.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

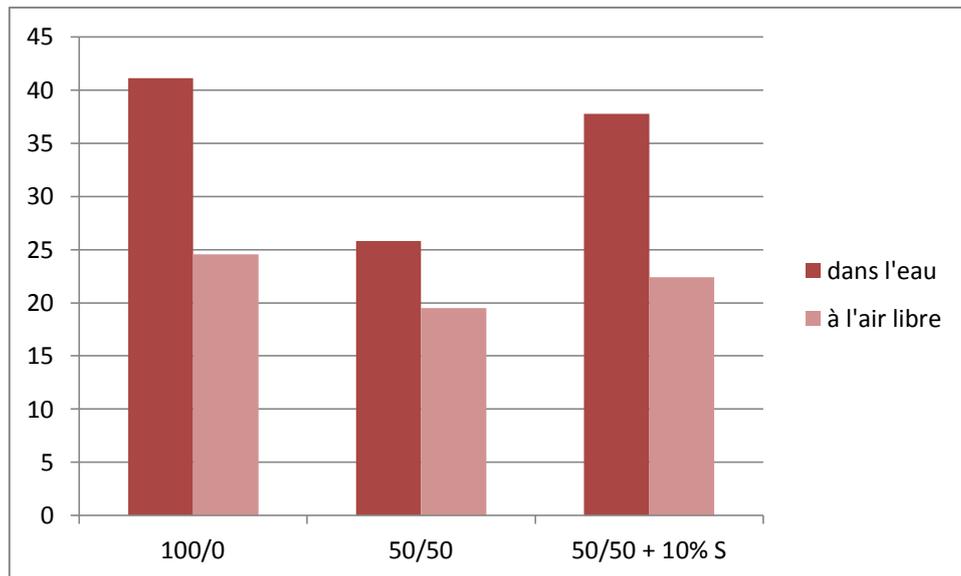


Figure IV.17 : Effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression de béton à base de 50% de déchet de béton concassé

On remarque d'après le **tableau IV.10** et les **figures IV.16** et **IV.17** que l'incorporation de l'ajout de 10% de pouzzolane et de laitier au béton à base de 50% de déchet de démolition du béton concassé provoque une augmentation de la résistance à la compression qui dépasse la résistance à la compression du béton à base de 50% de sable recyclé et plus proche à la résistance de béton ordinaire.

On constate que la présence des ajouts minéraux (pouzzolane et laitier) dans le béton à base de sable de démolition de béton influence de façon significative ce dernier.

IV.3.2.4 Optimisation du dosage entraîneur d'air

Dans le cadre de cette étude et dont le but d'optimiser le dosage d'entraîneur d'air (MEDA-AIR) incorporés dans les mélanges du béton étudié, on a effectué la série des dosages suivantes (0.01% , 0.05% et 0.1%), ces derniers sont évalués en pourcentage de la masse du ciment, pour chaque dosage, trois éprouvettes ont été confectionnées dans les mêmes conditions et sont par la suite soumises à l'essai de compression à l'âge de 28 jours afin d'estimer l'influence de l'agent entraîneur d'air sur la résistance du béton. Les résultats de cet essai sont représentés **le tableau IV.11**

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau IV.11 : Optimisation du dosage en entraîneur d'air.

	Rc à l'air libre (MPa)			Rc dans l'eau (MPa)		
100/0 (Témoin)	41.1			24.57		
50/50 (Témoin)	19.5			25.83		
50/50	0.01%	0.05%	0.1%	0.01%	0.05%	0.1%
Valeurs	23.16	16.08	14.50	29.55	21.89	20.82

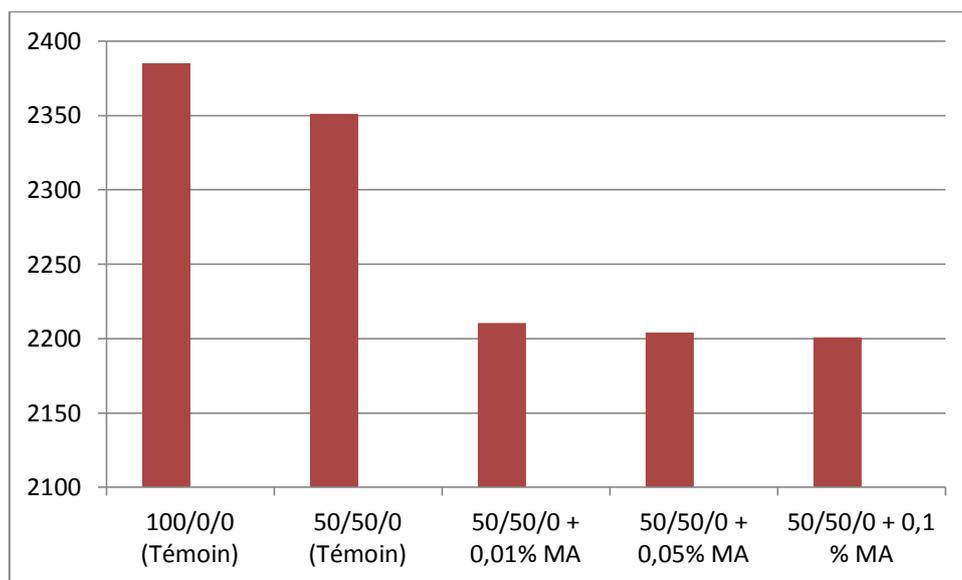


Figure IV.18 : Influence du dosage de MEDA AIR sur la résistance à la compression.

D'après le tableau IV.11 et la figure IV.18, On constate d'une façon générale une chute de résistance à la compression en fonction du dosage de l'entraîneur d'air.

IV.3.2.5 Absorption d'eau par immersion

Le volume poreux du béton peut se mesurer par absorption d'eau, le procédé consiste à sécher une éprouvette de béton à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche. L'absorption d'eau en

masse (%) est :

$$A = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} 100\%$$

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont cubiques de dimensions (10×10×10) cm³ et sont conservées à l'eau (T = 22°C). Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton sont illustrées dans le **tableau IV.12**

Tableau IV.12 : Absorption d'eau par immersion à l'état durci des bétons.

Type de béton SN/SDB	M _{sat} (g)	M _{sec} (g)	Absorption d'eau %
100/0	2437	2303	5.82
50/50	2432	2291	6.15

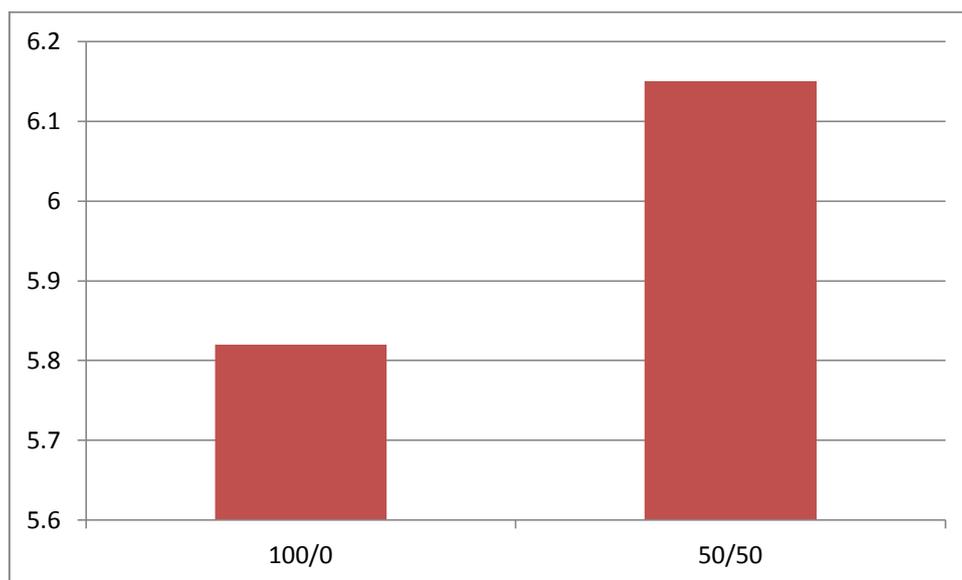


Figure VI.19 : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types des bétons.

L'analyse des résultats d'essai d'absorption d'eau par immersion, mentionnée au **tableau IV.12** et la **figure IV.19** ci-dessus, permet de constater que le taux d'absorption d'eau des bétons à base des sable recyclé est supérieur au taux d'absorption de béton témoin. Il est nettement visible que les bétons à base d'agrégats recyclés sont plus poreux et absorbent plus d'eau.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.4 Durabilité

Les études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités des agrégats recyclés sur les propriétés du béton à base de granulat recyclé.

IV.4.1 Résistance aux milieux agressifs

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrate, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaque d'acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque salin.

La résistance aux milieux agressifs est déterminée à partir des éprouvettes cubique (10×10×10) cm³. Le durcissement étant en conditions naturelles (cure dans l'eau) pendant 28 jours, puis les bétons durcis sont immergées séparément pendant 35 jours dans les solutions suivantes : eau potable , eau de mer , HCl (2.5%), H₂SO₄ (5%), NaOH (5 %), Na₂SO₄(5%) et (5%) de (NH₄)₂SO₄ . Les résultats de mesure de PH sont représentés **le tableau IV.13**

Tableau IV.13 : PH des différents milieux agressifs.

Les milieux agressifs	H ₂ SO ₄	HCl	NaOH	Na ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	Eau de mer
pH	2.28	6.3	13.65	12.88	4.4	12.90



Photo IV.1 : Mesure de pH.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau IV.14 : Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression.

	H₂SO₄ Rc(MPa)	Hcl Rc (MPa)	NaOH Rc (MPa)	Na₂SO₄ Rc(MPa)	(NH₄)₂SO₄ Rc(MPa)	Eau de mer Rc (MPa)
100/0	49.87 MPa					
50/50	40.71 MPa					
100/0	19.40	29.41	37.66	39.61	36.55	40.80
50/50	14.38	25.93	35.25	38.94	35.32	27.05



Photo IV.2: Essai de compression.

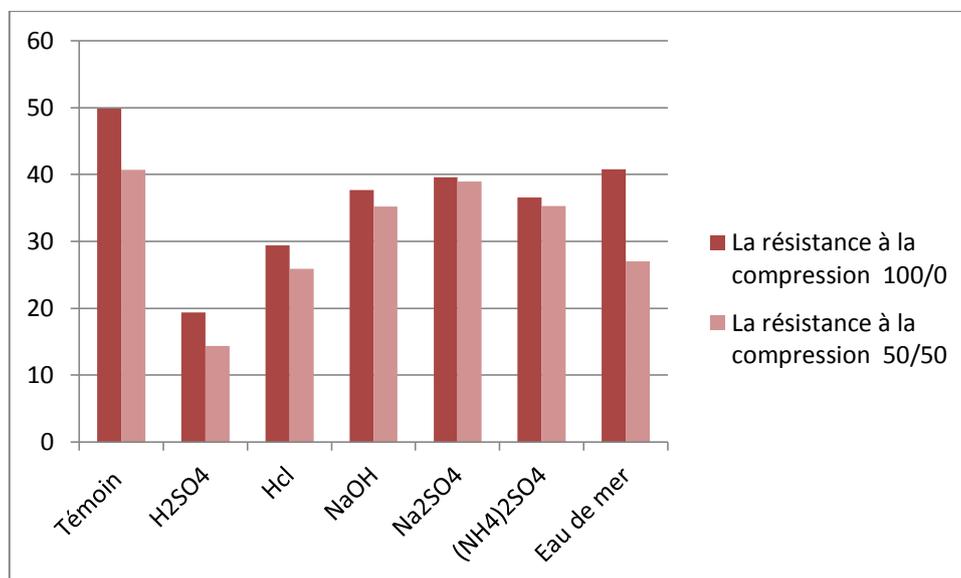


Figure IV.20 : Effet des milieux agressifs sur la résistance à la compression des bétons.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

D'après le **tableau IV.14** et la **figure IV.20** On voit que la résistance des bétons conservés dans les milieux agressifs est inférieure à celle conservés dans l'eau potable.

Le comportement mécanique des bétons dans les milieux agressifs diffère de l'un à l'autre. Cela est dû au mécanisme de dégradation aux attaques sulfatiques, attaques des acides, sulfuriques et chlorures qui sont totalement différents l'une de l'autre.

L'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chlorhydrique (HCL) et sulfate d'ammonium sont classés comme les menaces naturelles les plus agressives. Lorsque un béton est exposé à un environnement contenant ces acides, il subit une dégradation due à des réactions de neutralisations.

IV.4.1.1 La perte de masse

On a réalisé des éprouvettes ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 avec des différents taux de substitutions du sable

(0%, 30%, 50%, 70% et 100 %) ; elles sont immergées pendant 28 jours dans l'eau à une température de $20 +$ ou $- 2$ °C, après la période de cure de 28 jours dans l'eau, les cubes sont pesés pour déterminer M1 puis elles sont immergées dans les différentes solutions :

- 2.5 % d'acide chlorhydrique (HCL)
- 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4).
- 5% d'hydroxyde de sodium (NaOH).
- 5% de sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2SO_4$).
- 5% de sulfate de sodium (Na_2SO_4).
- Et l'eau de mer.

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM 267-96 [75], les éprouvettes sont nettoyées 3 fois à l'eau douce pour éliminer le matériau altéré et puis on les laisse sécher pendant une demi heure ensuite on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M2.

Cette opération est effectuée après 1, 7, 14, 21 et 28 jours après l'immersion concernant l'attaque par les acides. La solution d'attaque est renouvelée à sa totalité chaque 7 jours (selon la valeur du PH).

Enfin, la résistance chimique soit pour l'attaque acide soit pour l'attaque basique est évaluée par la mesure de la perte des masses.

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1-M2)/M1] \times 100 \quad [76]$$

Avec M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau IV.15 : Perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs.

Type de béton SN/SDB	La perte de masse en %					
	H ₂ SO ₄	HCl	NaOH	Na ₂ SO ₄	((NH ₄) ₂ SO ₄)	Eau de mer
100/0	5.43	3.56	0.83	0.79	1.02	0.65
50/50	4.79	2.27	0.51	0.74	0.60	0.46

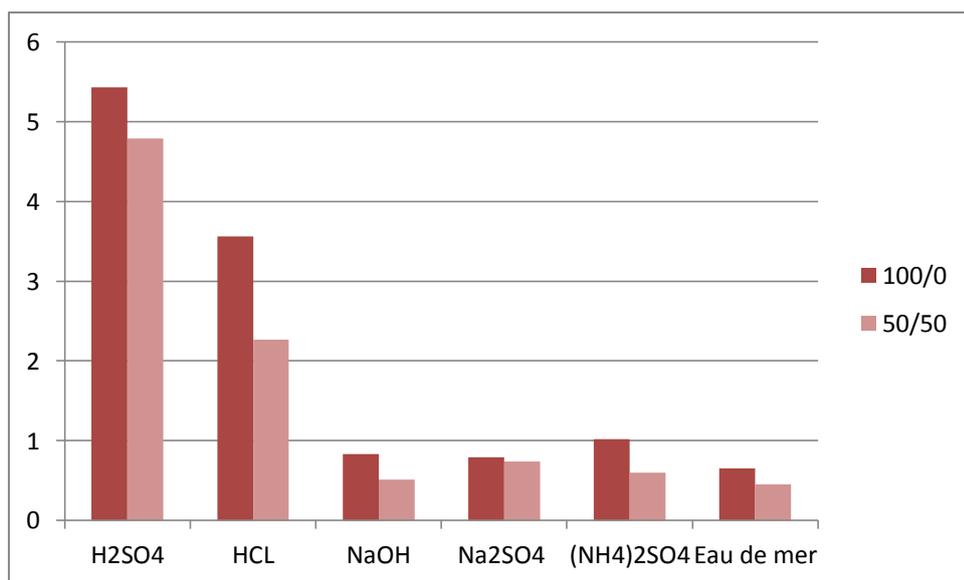


Figure IV.21 : Variation de perte de masse des bétons conservés dans les milieux agressifs.



Photo IV.3 : Les éprouvettes après 28 jours d'immersion dans les milieux agressifs.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Selon le **tableau IV.15** et la **figure IV.21** qui indiquent la perte de masse des différents bétons étudiés on note que : les solutions **H₂SO₄** et **HCL** ont grandement affecté le béton par rapport aux autres solutions **NaOH**, **Na₂SO₄**, **(NH₄)₂SO₄** et l'**eau de mer**.

IV.4.2 Résistance au gel/dégel

La résistance au gel est le pouvoir d'un matériau saturé d'eau de supporter la congélation et le dégel alternatif sans aucun signe de destruction ni perte sensible de résistance mécanique.

Un matériau est considéré résistant au gel si, après un nombre déterminé de cycles de congélation et de dégel en état saturé, sa résistance ne diminue pas au delà de 15-20% et si les pertes en poids, n'ont pas dépassé 5%. Si après la congélation les éprouvettes ne portent pas de traces de destruction, le degré de résistance au gel est établi en déterminant le coefficient de résistance au gel d'après la formule :

$$K_{rg} = R_{rg}/R_{sat} > 0.75$$

Où :

R_{rg} : est la résistance à la compression d'un matériau après l'essai de résistance au gel, en MPa

R_{sat} : la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau, en MPa.

La valeur de K_{rg} des matériaux de construction résistant au gel ne doit pas être inférieure à 0.75

Tableau IV.16 : Résistance au gel des bétons.

Type de béton	Rc des témoins (MPa)	Rc après l'essai de gel/dégel (MPa)	Coefficient de résistance au gel
100/0	49.87	38.20	0.77
50/50	40.49	32.19	0.80

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.4.2.1 La perte de masse

$$\text{Perte de masse} = ((M_1 - M_2) / M_1) \times 100$$

Où :

M_1 = est la masse sèche initiale avant les cycles, en grammes.

M_2 = est la masse sèche après les cycles, en grammes.

Tableau IV.17 : Perte de masse au gel/dégel des bétons recyclés.

	Type de béton	1 jour	7 jours	14 jours	17 jours
Gel	100/0	1.6%	2%	4%	4.2%
	50/50	1.6%	1.9%	3.2%	3.6%
Dégel	100/0	0.8%	0.4%	0.1%	0%
	50/50	0.8%	0.3%	0%	0%

D'après les tableaux IV.16 et IV.17, on remarque que le coefficient de résistance au gel des bétons recyclés est supérieur à 0.75 et la perte des masses est inférieure à 5% est similaire aux bétons ordinaires à base des agrégats naturelles.

IV.5 La résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cette essai est souvent appelé « Essai Brésilien ». Si p est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre 16X32 cm par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{\text{g}} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$



Photo IV.4 : Essai de traction par fendage.

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau IV.18 : La résistance à la traction des bétons testés.

Type de béton	Résistance à la traction (MPa)	%
100/0	2.71	100
50/50	2.07	76.38

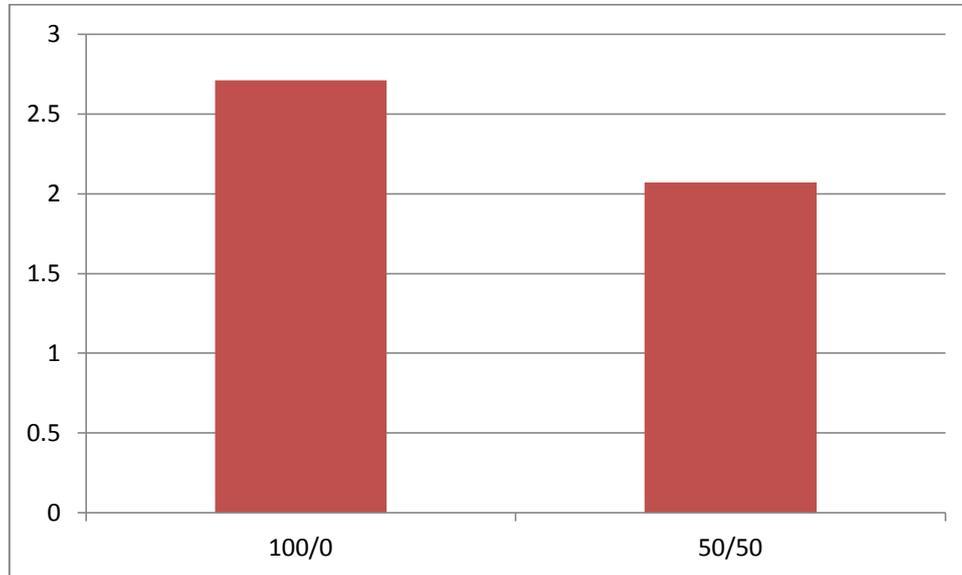


Figure IV.22 : Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés.

D'après le **tableau IV.18** et la **figure IV.22** On remarque que le béton contenant de sable recyclé possède une résistance à la traction comparable au béton témoin, une chute de résistance de 13%.

IV.6 Conclusion

Ce travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des résidus de béton et leur utilisation dans le béton comme agrégats.

L'étude expérimentale sur le comportement physico-mécanique et la durabilité des mortiers et des bétons confectionnées, nous permet d'avancer certaines conclusions :

- Les mortiers et les bétons à base de sable de démolition absorbent beaucoup d'eau par rapport aux mortiers et bétons ordinaires.
- L'influence du taux de substitution des agrégats naturels par les agrégats recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons a été également étudiée en détail.
- Les résistances mécaniques des mortiers et des bétons, que soit en compression ou en flexion diminuent en fonction de taux de substitution du sable recyclés élevé quel que soit le mode de conservation (à l'air, dans l'eau).
- La conservation saturée (dans l'eau) confère aux mortiers et aux bétons les meilleures résistances en compression et en flexion.
- L'ajout de pouzzolane et de laitier en quantité (10%) présente deux avantages essentiels (mortier et béton) : une bonne résistance mécanique et une meilleure économie.
- La perte de masse et les dégradations aux milieux agressifs sont les paramètres retenus dans cette étude.

CHAPITRE V :

CONCLUSION

V : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

V.1 Conclusion générale

Ce mémoire avait pour but d'étudier le comportement des granulats recyclés, issus du concassé de démolition de béton. Les travaux ont donc contribué à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux qu'on peut les résumer dans les points suivants.

- ☞ D'après l'étude bibliographique, les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différentes des installations de concassage des granulats naturels, par contre, on doit porter une attention particulière à la présence d'impuretés dans les matériaux. Pour enlever ces impuretés, on procédera à différents moments au cours du processus de concassage, à des opérations de triage manuel ou mécanique.
- ☞ La quantité d'eau de gâchage utilisée pour assurer des bétons de consistance plastique s'accroît suivant le type et le taux de substitution en granulats recyclés.
- ☞ Le rapport E /C des différents mélanges de bétons est élevé allant de 0.60 à 0.74 et qui varie dans le même sens que le taux de substitution en granulats recyclés.
- ☞ D'après cette analyse, on peut conclure que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dépasse 30% et que cette diminution dépassera 10% de la résistance du béton témoin (100% agrégats naturels).
- ☞ La présence de pouzzolane et laitier dans les bétons à base de 50% de sable de démolition de béton concassé influence de façon significative les propriétés physiques et mécaniques de ces derniers et d'une manière analogue que pour les bétons conventionnels.
- ☞ L'utilisation des granulats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse aux problèmes des déchets de démolition. Le béton recyclé peut être utilisé dans les structures de moindres portances et dans des conditions d'agressivité faible.
- ☞ L'augmentation de taux substitution des agrégats recyclés dans les bétons provoque une diminution considérable de la masse volumique à l'état frais et durci.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

- ☞ On remarque que l'augmentation de pourcentage de l'entraîneur d'air dans le béton provoque une diminution considérable de la résistance.
- ☞ Le taux de substitution des sables recyclés influence négativement sur la résistance à la flexion et à la compression des mortiers et des bétons quel que soit le milieu de conservation (à l'air libre, dans l'eau).
- ☞ La résistance à la flexion par fendage du béton recyclée est comparable au béton témoin.
- ☞ Chute assez faible de la résistance à la compression pour les éprouvettes de béton conservées dans les milieux agressifs.
- ☞ Les bétons recyclés ont une bonne tenue au gel.
- ☞ Des dégradations dans un milieu agressif seront effectivement à redouter pour un béton.
- ☞ La perte en poids des bétons immergés dans les milieux agressifs est légèrement inférieure à celle du béton ordinaire.
- ☞ La perte de masse de l'essai gel/dégel est le paramètre retenu dans cette étude.

V.2 Recommandations

☞ Dans les conditions ordinaires le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton concassé ne doit pas dépasser 30 %, autrement on doit augmenter la teneur en ciment de l'ordre de 15 à 30% selon le cas.

☞ L'incorporation d'un superplastifiant dans les mélanges de béton conçus avec les granulats recyclés est indispensable afin d'assurer une bonne maniabilité ainsi que d'améliorer les propriétés mécaniques.

☞ L'utilisation des ajouts minéraux actifs est vraiment nécessaire et ceci pour réduire la perméabilité et l'absorption d'eau des bétons fabriqués à base des agrégats de démolition.

☞ Analyser le comportement des éléments structuraux fabriqués en béton armé à base des agrégats recyclés sous chargement statique et dynamique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Réactualisation du plan de gestion des déchets du BTP du Var.2007 :

« **Proposition d'une stratégie pour améliorer la gestion des déchets du bâtiment et de travaux public dans le var** ».

[2] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement : « **Glossaire de l'environnement et de développement** » Alger mars 2004.

[3] **KHELOUFI BEN ABDELI** avec la collaboration de **SEIF EL ISLAM BENMANSOUR** : « **Protection de l'environnement** » quelques bases appliquées et réglementaires, présentation d'une expérience réussie. Octobre 1998.

[4] **ROUSSEAU E. (1998)**. Quantité et qualité des matières résiduelles de construction et de démolition en Belgique, Belgique, Centre Scientifique et Technique de la Construction [http : //www.ecomethods.lu/fr/bel/etu_dech.html](http://www.ecomethods.lu/fr/bel/etu_dech.html)

[5] Mémoire de fin d'étude : « **Caractérisation des bétons à base des sables de démolition (recyclés)** ». Année 2011/2012. Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

[6] **SENE CONSULTANTS LIMITED (1993)**. Construction and demolition waste in Canada: Quantification of waste and identification of Opportunities for Diversion from Disposal, Ottawa, Environment Canada, Office of Waste Management and National Resources Canada.

[7] **Characterization of Municipal Solid Waste in the United States, 1960 to 2000**, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by Franklin Associates Ltd., juillet 1986.

[8] **Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States**, prepared for the U.S., Environmental Protection Agency by **Franklin Associates, Ltd.**, June 1998.

[9] **Donovan Associates Inc... Recycling Construction and Demolition Waste in Vermont**: Final Report, Prepared for Vermont Agency of Natural Resources, Department of Environmental Conservation, Solid Waste Management Division, Recycling and Resource Conservation Section, December 1990.

[10] The state of Garbage in America. Biocycle. December 2008.

[11] Gestion des déchets du BTP en Basse-Normandie, 2008.

[12] European Aggregates Association (UEPG) (2007), basé sur des estimations faites par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) et l'Ademe.

[13] **Genest .G, 2010** « recyclage des débris de construction et de démolition (béton, brique et asphalte) » façons de faire à l'extérieur du Québec dossier client no 40916 rapport technique nort-40916.

[14] Arrête préfectorale N° 119/2005 DDE du 2 mai 2005 : « **Plan départemental de gestion des déchets du BTP des Vosges** ».

[15] **H. DJELAL & V. NOUVEL**, « **Gestion des déchets de démolition et environnement** », XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).

[16] **FOURNIER ARNAND**, projet de fin d'étude. « **INSA** » Toulouse. Edition 5, juin 2006.

[17] Mémoire de fin d'étude : « **Influence des déchets de marbre sur mes caractéristiques mécaniques et le retrait des bétons** ». Année 2009/2010. Université de Bejaia.

[18] **Debieb.F** : « **Valorisation de déchet de brique et béton de démolition comme agrégat de béton** ». Thèse de magister université de Blida. Année 1999.

[19] **Pimienta.P, Ruban.M** : « **Recyclage des déchets de démolition à base de plâtre** ». France. Edition 1997.

[20] **F Ridgley. H Riding** « **The construction and demolition wave in California** ». Waste Age 29 (6), juin 1998, PP.108-115.

[21] Société royale belge des ingénieurs et des industriels : « **Valorisation de déchets en matériaux recyclé pour la construction** ». www.srbii.be

[22] **Laetitia, D** : « **Guide des bonnes pratiques sur la gestion des déchets de construction et de démolition** ». 2010

[23] Félix FLORIO, Clotilde TERRIBLE et Valérie VINCENT : « **Bâtiment et des travaux** »

[24] Mlle SAADOUNI Sabrina Mémoire de magister : « **Comportement des bétons à base de granulats recyclés** ».Université MENTOURI, Année 2007

[25] MASSON : « **Valorisation des déchets sous produits industriels** ». Année 1981

[26] Mémoire de fin d'étude : « **L'effet des différents types d'agrégats sur le comportement mécanique d'un béton** » PFE Master 2, 2013, département de génie civil, université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

[27] TOWNSEND, Timothy (1998). What's the right choice for C & D waste, Waste Age, p.91-100.

[28] QUEBAUD, M. (1996) Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat, Département de génie civil, Université d'Artois, Artois, France. 250 p.

[29] CIMPELLI, C. (1996) : Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France : les bétons et produits de démolition recyclés. Décembre 1996, 43 p

[30] Topcu Bekir Ilker, Guncan Fuat Nedim. «Using waste concrete as aggregate». *Cem Concr Res* 1995; 25(7):1385-90. Topcu BI, Sengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem Concr Res* 2004; 34(8): 1307-12.

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

[32] Evangelista L., De Brito J: «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*» 2010, 32, 9-14.

[33] Rasheeduzzafar, Khan A. «Recycled concrete – a source of new aggregate. *Cement, Concrete and Aggregates*» (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.

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

- [35] **Crentsil Sagoe KK, Brown T, Taylor AH «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate». Cem Concr Res 2001; 31:707-12.**
- [36] **Rao A., «Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.**
- [37] **Ajdukiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. Cement Concrete Composites » 2002; 24:269-79.**
- [38] **Manai. K, « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants », Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.**
- [39] **Venuat. M, La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1, « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers », édition 2, Collection Moniteur. – 277p-1989.**
- [40] **Meukam. P, « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.**
- [41] **Meatf, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, « les pouzzolanes et les basaltes », bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69.**
- [42] **Vernet. C, Cadoret. G, (1991), Compte- rendus du Colloque «Voies Nouvelles du Béton», Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours, Cachan, France, pp.p. 17.**
- [43] **Miller. E.W, « Blended cements - Applications and implications », Cément and Concrete Composites, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.**
- [44] **E. WIRQUIN, R. HADJIEVA-ZAHARIEVA & F. BUYLE-BODIN, "Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés", Materials and Structures, 33(6), pp:403-408, (2000).**

- [45] M. S. JUAN & P. A. GUTIÉRREZ, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Construction & Building Materials*, 23(2), 872-877, (2009).
- [46] SAID-MANSOUR M., GHRICI M. et KENAI S., «Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et des bétons». Congrès International réhabilitation des constructions et développement durable, Alger, 2005.
- [47] NEVILLE A.M., «*Propriétés des bétons*». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, 2000. Paris, 806.
- [48] HERMANN K., «Les ajouts: Les fumées de silice», Bruxelles, n°7/Juillet 1995.
- [49] MEHTA P.K., «Sulfate résistance of blended cements». Concrete workshop, Sydney 1988.
- [50] MESSOUDENE.B : Cours « durabilité du béton », 2016 à l'Université El Bachir El Ibrahimi.
- [51] DREUX G. et FESTA J., «Nouveau guide du béton et de ses constituants», 8ème édition, Édition Eyrolles, 1998.
- [52] BARON J. et OLLIVIER J.P., «La durabilité des bétons». Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [53] AREZKI TAGNIT- HAMOU., Cours 2003 (chapitre 7). «*Ajout dans le ciment*». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
- [54] LOCHER F.W., «*Influence of chloride and hydro carbonate on the sulfate attack*», Proc.5th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo. vol. 3, pp. 328-335, 1968.
- [55] COSTA U. and MASSAZA F., «From materials science to construction materials engineering», Proc. 1st Int. Rilem congress, vol. 1 (Versailles, 1987), 159.

[56] **RINCKER. Valentine** « **Diagnostic de structures existantes** » projet de fin d'études, spécialité Génie Civil, Juin 2009

[57] **SAUCIER F.; PIGEON M. et CAMERON G.**; « *Air-void Stability* », Part V, General Analysis and performance Index. ACI Materials Journal, Vol. 88, No.1, pp 25-36 (Jan.-Feb. 1991).

[58] **CARLES-GIBERGUES A. et PIGEON M.**; « **La Durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse** » ; **BRAN J ET OLLIVIER J.P** ; **PARIS** : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp 57-99, (1992).

[59] **J. FORTH EDF France** ; « **Résistance des bétons des barrages au gel dégel** » (2003).

[60] **PIGEON M., SAUCIER F. et PLANTE P.** ; « **Air-void stability** ». Part Iv: Retempering, ACI Materials Journal, pp 252-259, (May/June 1990).

[61] **PIGEON M., SAUCIER F. et PLANTE P.** ; «**Production et stabilité du réseau de bulles d'air entraîné dans le béton**». Rapport soumis au Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie et à la Compagnie **VERREAULT-FRONTENAC**, (Avril 1987).

[62] **PETROV. NIKOLA**; *thèse de doctorat* « **effets combinés de différents facteurs sur L'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite** » Sherbrooke (Québec), pp 55-57, Canada (Avril 2003).

[63] **T.C. Powers**, The air requirement of frost-resistant concrete, Proceedings of the Highway Research Board 29, pp 184-211, 1949.

[64] **LCPC**. Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées", Décembre 2003.

[65] **E.J. Sellevold and T. Farstad**. Frost/salt-testing of concrete: Effect of test parameters and concrete moisture history. Nordic Concrete Research, 10, 1991.

[66] **J. Kaufmann.** Experimental identification of damage mechanisms in cementitious porous materials on phase transition of pore solution under frost deicing salt attack. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ecublens, CH-1015 Lausanne, 1999.

[67] **S. Jacobsen, E. Sellevold, and D.H. Saether.** Frost testing of high strength concrete: frost-salt scaling at different cooling rates. *Materials and structures*, 30:33–42, 1997.

[68] **S. Lindmark.** Mechanisms of salt frost scaling of portland cement-bound materials: studies and hypothesis. PhD thesis, Suede, 1997.

[69] **Alain BRETTE** : fascicule de cours réalisé par pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, 2007. LIEU.

[70] **GRANITEX**, Fiche technique, 2013 Zone industrielle Oued Smar 16270 Alger.

[71] **R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman** « Granulats, sols, ciments et bétons », édition, 2009.

[72] **MARLET.JD ET PIMIENTA.P;** **Mecanical** and physico-chemical properties of concrete aggregates. RILEM, Proceeing 23. Third international RILEM syposium on demolished and reuse of concrete and masonry, Odens, Danemark 24-27 octobre, pp 343-354.

[73] **DE PAUW.C** ; Béton recyclé, CSTC, Revue N° 2, Bruxelles juin 1980 pp 2-15.

[74] **BROOKS. J. & NEVILLE.A;** A compraison of creep, elasticity and strength of intension and compression; magazine of concrete, vol n° 100, 1977, pp. 133-141.

[75] **ASTM C 267-96. 2001** / Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes Oct 10 2001.

[76] **Arliguie G., Hornain H. 2007.** Grandeurs associées à la durabilité des bétons ‘GranDuBé’. Presses de l’école nationale des Ponts et Chaussées.