
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE MOHAMED EL BACHIR EL -IBRAHIMI

BORDJ BOU ARRERIDJ

FACULTE DES SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

THÈME :

**durabilité du béton à base des
déchets de démolition**

Présenté par : ABDELLI Nabila

LAICHAOUI Ouahiba

Soutenu le : 02/07/2018

devant le jury composé de:

BOUGLADA	Mohamed Salah	Président
BENAICHI	El Hadj	Encadreur
NOUI	Ammar	Examineur
MESSAOUDENE	Ibrahim	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements :

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

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.

Nous remercions tous les enseignants du département de Génie civil de BBA.

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

En fin, nous tenons à remercier les membres du jury qui ont consacré un peu de leur temps pour examiner et évaluer notre travail.

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes
études depuis mon enfance

Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes
Etudes

A mes frères et la famille LAICHAOUI

A ma binôme ABDELLI Nabila et sa famille.

Enfin pour Tous les amis qui m'estiment espérant bien que je n'ai
oublier Personne dans cette courte page. Spécialement pour le groupe
CV.

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 béton de démolition) comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton hydraulique.

L'étude consiste à comparer les propriétés sous différentes conditions de durcissement d'un béton de référence, à celles des bétons incorporant des sables de démolition de béton produit par le concassage de béton d'un vieil immeuble en substitution d'une fraction volumique du sable, et les deux ensemble avec des taux de substitution de (30%, 50%, 70%, 100%) mélangé avec un ciment CRS.

Cet effet, nous avons étudié l'effet des milieux agressifs sur les résistances mécaniques et les performances des bétons confectionnés ainsi que l'effet des ajouts minéraux actifs sur le comportement des bétons.

Mots-clés : Agrégats recyclés, démolition, agrégats naturels, caractéristiques physico-mécaniques, durabilité.

ملخص

لعدة سنوات ، أجريت أبحاث في كل من الجامعات والقطاع الخاص لدراسة سلوك المواد المعاد تدويرها من حطام الطرق وحطام التضييق من الهدم كمجاميع في صناعة الخرسانة ، يعرض التلخص من النفايات من هذه المواد العديد من المشاكل (المكان الذي تشغله مواقع التخزين ، وأهمية التكاليف ، والتأثير على البيئة) ، لذلك من الضروري إيجاد طريقة لاستعادة وإعادة استخدام هذه النفايات. لذلك تجد مصدرا آخر للركام .

الغرض الرئيسي من دراستنا هو إثبات من الناحية التقنية لإمكانية استخدام الركام بشكل جزئي أو كلي (نفايات خرسانة الهدم) كبديل عن الركام الطبيعي في تصنيع الخرسانة الهيدروليكية .

وتتكون الدراسة من مقارنة الخصائص في ظل ظروف التصلب المختلفة للخرسانة المرجعية ، إلى خواص الخرسانة المحتوية على رمال هدم الخرسانة التي ينتجها التكسير الخرساني للمباني القديمة وذلك باستبدال جزء رمال هذه الخرسانة. جنبا إلى

جنب مع معدلات الاستبدال (30 % ، 50 % ، 70 % ، 100 %) والتي يتم خلطها مع الاسمنت CRS

قمنا بدراسة تأثير الوسط العدوانى على القوة الميكانيكية وأداء الخرسانة وتأثير الإضافات المعدنية النشطة على سلوكها .

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره ، الهدم ، المجاميع الطبيعية ،الخصائص الفيزيائية الميكانيكية ، المتانة ،

BSTRACT

For several years, research has been conducted in both universities and the private sector to study the behavior of recycled materials from road debris and debris of construction from demolition as aggregates in the manufacture of concrete, given that waste disposal of these materials presents numerous problems (the place occupied by the storage sites, the importance of the costs, the impact on the environment). Therefore, it is necessary to find a way for the recovery and reuse of this waste. therefore find another source of aggregates .

The main purpose of our study is to demonstrate technically the possibility of partially or totally using aggregates (demolition concrete waste) as a substitute for natural aggregates in the manufacture of hydraulic concrete.

The study consists in comparing the properties under different hardening conditions of a reference concrete, to those of concretes incorporating concrete demolition sands produced by the concrete crushing of an old building in substitution of a volume fraction of the concrete. sand, and both together with substitution rates of (30%, 50%, 70%, 100%) mixed with a CRS cement.

This effect, we studied the effect of aggressive media on the mechanical strengths and performance of concretes made and the effect of active mineral additions on the behavior of concrete.

Keywords: Recycled aggregates, demolition, natural aggregates, physico-mechanical characteristics, durability,

Table des matières

Résumé

Abstract

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

1. Problématique.....	2
2. Objectifs	3
3. Plan de travail	4

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	6
I.2 Définitions	6
I.3 Constitution chimique du déchet	6
I-4. Classifications des déchets	7
I.4.1 Selon leur nature	7
I.4.2 Selon le mode de traitement et d'élimination	7
I.4.2.1 Les déchets inertes.....	7
I.4.2.2 Les déchets banals	7
I.4.2.3 Les déchets spéciaux	7
I.4.2.4 Les déchets dangereux	7
I.4.3 Selon l'origine	8
I.4.3.1 Les déchets industriels	8
I.4.3.2 Les déchets urbains	8
I.4.3.3 : Les déchets ultimes	8
I.4.3.3.1 : Nature et prévenance des déchets ultimes	9
I.5 Les impacts des déchets sur l'environnement	9
I.5.2 L'impact sur la pollution du sol	9
I.5.1 L'impact sur la pollution de l'air	9
I.5.3 L'impact sur la pollution de l'eau	10
I.6 . Aperçu sur le recyclage des matériaux de démolition à l'étranger	10
I.6.1. Canada	10

I.6.2 . Aux Etats-Unis	11
I.6.3. En France	12
I.6.4 . Au Royaume-Uni	13
I.6.6 . En Australie	13
I.6.5 . Aux Pays-Bas.	13
I.6.7 . Au Japon	14
I.6.8 .En Algérie	14
I.7 . Natures de déchets de bâtiments	14
I.7.1 . Les déchets inertes	15
I.7.1.1 Béton	16
I.7.1.2 brique	16
I.7.1.3 . tuiles et céramiques	16
I.7.1.4 . le verre	17
I.7.1.5 . enrobé	17
I.7.1.6 . terres et cailloux	18
I.7.1.7 Ballast de voie	18
I.7.1.8 : résumé, les granulats	19
I.7.2. Les déchets de chantier	20
I.7.3 Les déchets de démolition	21
I.8 . GESTION DES DECHETS	21
I.9 La chaîne du recyclage	23
I.10 Description du granulat recyclé	23
I.11 . Chiffres et Historique	24
I.12. Processus de fabrication des granulats recyclés	24
I.13. Caractéristiques des granulats recyclés	25
I.13.1 Distribution granulométrique	25
I.13.2 .Densité / Masse volumique	26
I.13.3 Absorption :.....	26
I.13.4. Résistance à l'abrasion.....	27
I.13.5. Teneur en mortier résiduel et méthodes d'évaluation :.....	27
I.14. Propriétés du béton recyclé à l'état frais	28
I.14.1. Ouvrabilité et Densité à l'état frais	28
I.15. Propriétés à l'état durcie	29
I.15.1 Zone inter faciale de transition	29

I.15.2. Perméabilité / porosité	30
I.16 . Propriétés mécaniques	32
I.16.1 . Résistance à la compression	32
I.16.2. Résistance à la traction et à la flexion et fendage	34
I.16.3 . Module d'élasticité	35
I -18 Définition composition de béton	36
I.18.1. Rôle des différents éléments constituant le béton	36
I.19 . le ciment	36
I.19.1. Les propriétés de ciment	37
I.19.2. Ciment résiste aux sulfates « CRS »	37
I.19.2.1 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES	37
I.20 Les principaux ajouts minéraux actifs	37
I.20.1 Les pouzzolanes naturelles (z)	38
I.20.2 Le laitier de haut fourneau(S).....	39
I.20.3 La fumée de silice(D).	42
I.21. L'eau de gâchage	43
I.22. LES DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULATS	43
I.23. Durabilité du béton à base de granulats recyclés	44
I.24 Résistance aux eaux agressives	45
I.24.1 Définition	45
I.24.2 Eaux contenant des sulfates (xso^{2-}_4)	45
I.24.3 Eaux contenant des chlorures(HCL) :.....	46
I.24.4. Eaux contenant d'hydroxyde de sodium NAOH :.....	47
I.25 Action des chlorures :.....	48
I.26. Action des sulfates de magnésium :.....	48
I.27 Action du dioxyde de carbone :.....	48

CHAPITRE II : METHODE ET MATERIAUX UTILISES

II.1. Introduction	50
II.2 Matériaux utilisés	50
II.3.1. Caractéristiques du gravier	50
II.3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5]	50
II.3.1.2. La masse volumique	53
II.3.1.3. La porosité	53

II.3.1.4. La compacité	56
II.3.1.5 .L'indice des vides	56
II.2.1.6. Degré d'absorption d'eau [NA EN 1097-6]	57
II.3.1.1.7. La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : EN 1097- 2	
II.3.2. Caractéristique du sable	59
II.3.2.1 .Analyse granulométrique [NA EN 933-1].....	60
II.3.2.2. Modules de finesse [NA EN 12620]	63
II.3.2.3 .Equivalent de sable : [NA EN 933-8]	63
II.3.2.4.Masse volumique : [NF P18-555]	66
II.3.2.5. Caractéristiques de ciment	67
II.3.4. Les ajouts minéraux	72
II.3.7.1. Les caractéristiques chimiques.....	72
II.3.7.2 .Les caractéristiques physiques	72
II.4 .Etudes des mortiers	72
II.4.1 .Confection des éprouvettes	72
II.4.2 .Programme d'essais	73
II.4.2.1. Résistance à la traction par flexion	73
II.4.2.2 .Résistance à la compression	74
II.4 .Formulations des bétons étudiés	75
II.4.1. Méthode de SCRAMTAIEV	75
II.4.2 .Présentation de la méthode SCRAMTAIEV	76
II.4.3 .Calculs les composants	79
II.5 .Matériels et essais	81
II.5.1 .Les essais sur le béton à l'état frais	81
II.5.1.1. Le malaxage : [NA EN 12390-2]	81
II.5.1.2 .Affaissement au cône d'abrams (slump test) : [NA EN 12350-2].....	82
II.5.1.3 .Vibration : [NA EN 12390-2]	83
II.5.2. Les essais sur béton durci	83
II.5.2.1.Durcissement de béton	83
II.5.2.2.Mode de conservation de béton : [NA EN 12390-2].....	84
II.5.3.1. Détermination de la résistance par les essais non destructifs	84
II.5.3.5. Ultrason	84
II.4.3.6 .Essai de dureté par rebondissement (scléromètre) : [NA EN 12504-2]	86
II.5.4.3.1.1. La résistance à la compression (essai d'écrasement) [NA EN 12390 3].	88

II.4.3.1.2. La presse hydraulique : [NA EN 12390-3]	88
II.5.3.3. Essai d'écrasement [NA EN 12390-3]	89
II.5.3.4 .Essais De Traction Par Flexion : [EN 12390-5]	89
II.5.3.4. Essais de traction par fendage : [NA EN 12390-6]	90
II.5.3.4 .Essai d'absorption d'eau par immersion	91
III.6 .Mode d'action des environnements agressifs	91
II.6 .Conclusion	93

CHAPITRE III :ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. Introduction	95
III.2 .Etude des mortiers	95
III.2.1. Comportement du mortier à l'état frais	95
III.2.2. Comportement des mortiers à l'état durci	96
III.2.2.1. Résistance à la compression	96
III.2.2.1.1. Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des mortiers.....	99
III.2.2.2 .Résistance à la traction par flexion des mortiers	100
III.2.2.2.1. Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion	102
III.3. Etude des bétons	103
III.3.1. Comportement du béton à l'état frais	103
III.3.1.2. La masse volumique	105
III.3.2.2 .La résistance à la compression des bétons	107
III.3.2.2.1 .Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la compression	109
III.3.2.2. Résistance à la flexion des bétons	110
III.3. 1 .Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la flexion.....	112
III.3.2.2 La résistance a la traction par fendage	113
III.3.2.5. Absorption d'eau par immersion	115
III. 3.2.7. Perte de masse	117
III.16 .2.2. Contrôle non destructif (scléromètre, auscultation dynamique)	118
III.4. Durabilité	119
III.4.1.1. La perte de masse	119
III.4.1. Résistance aux milieux agressifs	120
III.6. Conclusion	126

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale.

Recommandations.

LISTE DES SYMBOLES

AL₂O₃ : l'alumine

BBTM : bétons bitumineux très mince.

BBDr : bétons bitumineux drainants.

BBSG : bétons bitumineux semi grenus

BHP : Béton à hautes performances.

BTP : bâtiment et travaux publique.

CRS- CEM I/A 42.5N : ciment résistant aux sulfates.

C3S : Silicate tricalcique (Aalite).

C3A : Aluminate tricalcique (célite).

C4AF : Alumino-ferrite tétracalcique.

CaO : Oxyde de calcium.

CaCO₃ : carbonate de calcium.

CaCL₂ : Chlorure de calcium.

CL : le clore.

Ca(OH) 2 : Chaux.

CSH : Silicates de calcium hydratés.

CaSO₄ : sulfate de chaux

D&C : déchets de démolition

D : La fumée de silice.

E/C : rapport eau sur ciment.

Fe₂O₃ : Oxyde de fer.

GBR : Granulat de béton recyclé.

H₂O : l'eau.

HCL : acide chlorhydrique

H₂SO₄ : acide sulfurique

K₂O : l'oxyde de potassium.

MgO : Oxyde magnésium.

NF : Norme Française.

NaOH : hydroxide de sodium

Na⁺ : le sodium.

OH⁻ : l'hydroxide.

PVB : polyvinyle de butyral.

RAC : Béton de granulats recyclés

Rt : résistance à la traction par flexion (MPa)

Rc : résistance à la compression (MPa)

s/s : solidifié/stabiliser.

SO₃ : Trioxide de soufre.

SiO₂ : Silice.

SN : sable naturel.

S : Le laitier de haut fourneau.

SD : sable démolition.

Z : pouzzolane

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I-1 : Schéma de la production des déchets ultimes. [6]	9
Figure I-2 : Composition moyenne des matériaux secs générés au Canada (1993) en pourcentage [10].....	10
Figure I-3 : Composition des débris de construction et de démolition du Vermont (En poids)[10].....	12
Figure I-4 : coupe-type d'une structure routière [20].....	18
Figure I-5 : Les différentes catégories de déchets de chantiers [21]	21
Figure I-6 : Stratégies de gestion des déchets. [24].....	23
Figure I-7 : Schématisation d'un granulats recyclés [27].....	24
Figure I-8 : Absorption d'un granulats recyclés en fonction du temps [33].....	27
Figure I-9 : Pouzzolane naturelle granulée.....	38
Figure I-10 : Laitier cristallisé [49].....	40
Figure I-11 : Laitier cristallisé [49].....	41
Figure I-12 :Fumée de silice sous forme de poudre	41

CHAPITRE II : METHODE ET MATERIAUX UTILISES

Figure II.1 : Courbe granulométrique des graviers concassés (15/20).....	53
Figure II.1 : Courbe granulométrique des graviers concassés (8/15).....	53
Photo II.3 : Le sable Naturelle.....	60
Photo II.4 : Le sable de démolition de béton utilisé.....	60
Figure II.5 : Courbe granulométrique de Sable naturel.....	62
Figure II.6 : Courbe granulométrique de Sable démolition	63
Figure II.7 : Essai d'équivalent de sable.....	65
Figure. II.8 : Essai de flexion.....	73
Figure II.9 : Essai de compression.	74
Figure II.10 :Le malaxage de béton	81
Figure II.11 : Affaissement au cône d'abrams	82
Figure II.12 : La Vibration	83
Figure II.13 : Essai l'ultrason [24].....	86

Figure II.14: Relation approximative entre la vitesse ultrason(en m/s) et la résistance en compression R_c (en MPa) [24].....	86
Figure II.15 : Mesurer la dureté superficielle du béton	87
Figure II.16: Etalonnage contrôle du fonctionnement de l'appareil sur les éprouvettes.....	88
Figure II.17: Presse hydraulique capacité 3000 K.....	89
Figure II.18: Essais de traction par flexion.....	90
Figure II .19 Essai de traction par fendage.....	91

CHAPITRE III :ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Figure III.1 : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton de démolition.....	96
Figure III.2 : Variation de la résistance à la compression en fonction de milieu de conservation pour différents types des mortiers.....	97
Figure III.3 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers	98
Figure III.4 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un mortier à base de 50% de déchet démolition en fonction de l'âge des mortier.....	99
Figure III.5 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de milieu de conservation pour différents types des mortiers.....	101
Figure III.6 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour différents types des mortiers.....	101
Figure III.7 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion d'un mortier à base de 50% de déchet démolition en fonction de l'âge des mortiers.....	103
Figure III.8 : Relation entre le rapport E/C des bétons et le pourcentage de substitution en granulats de béton de démolition.....	104
Figure III.9 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés	105
Figure III.10 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux	106
Figure III.11 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution et milieu de conservation.....	108
Figure III.12 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un béton à base de 50% de sable démolition en fonction de l'âge des bétons.....	109
Figure III.13: rupture des éprouvettes « essais de flexion ».....	111

Figure III.14 : La variation de la résistance a la flexion en fonction de l'âge pour différents types des bétons.....	111
Figure III.15 : Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la flexion d'un béton à base de 50% de sable démolition en fonction de l'âge des bétons.....	112
Figure III.16 : Dispositif de chargement pour l'essai de flexion.....	113
Figure III.17 : rupture des éprouvettes « l'essai brésilien ».....	113
Figure III.18 : Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés.....	114
Figure III.19 : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types des bétons.....	115
la figure . III.20 : Perte de masse des bétons.....	116
Figure III.21 : Variation de PH en fonction de temps	119
Figure IV.22 : Les éprouvettes après 60 jours d'immersion dans les milieux agressifs	120
Figure III.23 : Petre de masse en fonction de milieu de conservation pour différents types des bétons	121
Figure. III.24 : Essai de compression	122
Figure III.25 : Effet des milieux agressifs sur la résistance à la compression des bétons.....	123
Figure III.26 : Petre de masse en fonction de milieu de conservation pour différents types des bétons	124

LES TABLEAUX

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I-1 : Types de gestion des matériaux secs. [12].....	11
Tableau I-2: technologies utilisées au japon pour traiter les bétons recyclés [18]	14
Tableau I-3: Classification des déchets inertes issus du BTP [20].....	15
Tableau I-4: gisement des déchets inertes et destination connue [20].....	20
Tableau I-5 : Densité des granulats naturels et recyclés.[37].....	29
Tableau I-6 : quelques applications courantes [42].....	36
Tableau I-7 : le tableau de synthèse ci-après présente les différentes sources de granulats Leur utilisation sur le marché suivant leur typologie. [55].....	43

CHAPITRE II : METHODE ET MATERIAUX UTILISES

Tableau II.1 : Analyse granulométrique du gravier concassé (8/15) et (15/20).....	52
Tableau II.2 : Masse volumique apparente du gravier concassé (8/15) et (15/20).....	55
Tableau III.3 : Masse volumique absolue du gravier concassé (8/15) et (15/20).....	56
Tableau II.4 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....	57
Tableau II.5 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (8/15) et (15/20).....	57
Tableau II.6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie [42].....	58
Tableau II.7 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A	59
Tableau II.8 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (8/15), (15/20).....	59
Tableau. II.9. Analyse granulométrique de sable naturel.....	61
Tableau. II.10. Analyse granulométrique de démolition	62
Tableau II.11 : Module de finesse du sable.....	63
Tableau II.12 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP .	65
Tableau II.13 : Les résultats de l'équivalent de sable	66
Tableau II.14:Les résultats de la masse volumique absolu du sable démolition	66
Tableau II.15:Les résultats de la masse volumique absolu du sable naturel	67
Tableau II.16 : Masse volumique apparente du sable naturel.....	67
Tableau II.17 : Masse volumique apparente du sable démolition	67
Tableau II.18 : Porosité, compacité et indice des vides du Sable	67
Tableau II.19 : Analyse chimique du ciment utilisé.....	68
Tableau II .20. Caractéristiques Physiques du Ciment CRS-CEM I 42,5.....	68

Tableau II.21 Caractéristiques Mécaniques du Ciment CRS-CEM I 42,5.....	69
Tableau II. 22 Compositions potentielles du Clinker.....	69
Tableau II. 23.caractéristique physique du ciment-CRS.....	71
Tableau II.24 : Analyses physico-chimiques de l'eau de gâchage.....	71
Tableau II.25 : Analyse chimique des ajouts.....	72
Tableau II.26 : Les caractéristiques physiques des ajouts.....	72
Tableau II.27 : Les valeurs des coefficients A et A' en fonction du liant et agrégat.....	77
Tableau II.28 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	77
Tableau II.29 : Valeurs du coefficient (α) en fonction du E/C et dosage en ciment.....	78
Tableau II.30: Proportions et composition des mélanges.....	81

CHAPITRE III :ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Tableau III.1 : Quantité d'eau réellement utilisée des mortiers avec des différents taux de substitution.	95
Tableau III.2 : Variation de la résistance à la compression des différents types de des mortiers.....	97
Tableau III.3 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un mortier.....	99
Tableau III.4 : Variation de la résistance à la traction par flexion des différents types des mortiers.....	100
Tableau III.5 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion d'un mortier.....	102
Tableau III.6 : Quantités d'eau réellement utilisées pour les différents taux de Substitution	104
Tableau III.7 : Les masses volumiques à l'état frais est l'état durci.....	105
Tableau IV.8 : Variation de la résistance à la compression des différents types de des béton.....	107
Tableau III.9 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un béton. à base de 50% de sable démolition en fonction de l'âge de béton	109
Tableau III.10: La résistance à la flexion des bétons testés.....	111
Tableau III.11 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la flexion d'un béton.....	112
Tableau III.12 : La résistance à la traction des bétons testés.....	114
Tableau III.13 : Absorption d'eau par immersion à l'état durci des bétons	115
Tableau III.14: Perte de masse des bétons	116

Tableau III.15: Résistance à la compression par essais indirects (Scléromètre et Auscultation sonique).	117
Tableau III.16 : PH des différents milieux agressifs.....	119
Tableau III.17: Perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs.....	121
Tableau III.18 : Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression.....	122
Tableau III.19: Perte de résistance des bétons conservée dans les milieux agressifs.	124



INTRODUCTION

GENERALE

1.1 Problématique

La croissance de la population mondiale, l'urbanisation généralisée et la situation économique des pays en développement a remarquablement augmenté le rythme de développement de l'industrie de la construction. Le béton est, juste après l'eau, le matériau le plus consommé au monde. Chaque habitant de la planète en consomme en moyenne un mètre cube par an. Environ 25 milliards de tonnes de béton sont fabriquées chaque année selon le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable . Lors de la démolition des vieux bâtis ou en cas de catastrophes naturelles, les décharges de ce matériau causent un problème environnemental crucial à cause de sa durabilité et de l'absence de sa dégradation. Le recyclage de ce matériau permettrait à la fois de supprimer ces décharges et récupérer des matériaux utiles. Maintenant, en utilisant les déchets de démolition comme une source de granulats pour fabriquer un nouveau béton devient très intéressant pour l'industrie de la construction. Les principales raisons de cet intérêt croissant sont liées à la protection de l'environnement, la préservation des ressources en agrégats naturels, l'élimination des décharges publiques et la diminution du coût de traitement des déchets, sans oublier l'empreinte carbone surtout si le béton recyclé est utilisé sur place. Au niveau mondial, le recyclage est désormais en marche, réunissant de nombreux scientifiques et industriels du secteur de la construction pour décider des cadres d'utilisation de ce nouveau matériau.

Certains pays recyclent presque tout leur béton, comme la Suisse. En Europe, le taux de recyclage varie du minimum (comme au Portugal) jusqu'à 95% en Suisse, l'application des granulats recyclés dans la production du béton n'a pas encore franchi le seuil des laboratoires et les déchets de construction et de démolition sont importants et rarement valorisés, une seule tentative de valorisation dans ce domaine a été entreprise à El-ASNAM (CHLEF actuellement) suite au tremblement de terre de 1980 en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de Construction (C.S.T.C) Belge. Les experts estiment qu'environ 20% du béton utilisé actuellement pourrait techniquement être remplacé par du béton recyclé.

Les propriétés du béton recyclé ont déjà été étudiées par de nombreux scientifiques à travers le monde, mais très peu d'auteurs se sont intéressés à la problématique de la rhéologie de ce matériau. De par t leur composition, les granulats recyclés présentent des caractéristiques différentes des granulats naturels. En effet, les granulats recyclés sont plus poreux, avec un coefficient d'absorption d'eau plus important, contiennent des

INTRODUCTION GENERALE

hydrates, et présentent des zones de transition inter faciale connues pour être la zone de faiblesse mécanique du béton. De ceci, il est primordial d'être en mesure d'anticiper le comportement mécanique et rhéologique du béton recyclé afin de permettre son utilisation dans le bâtiment.

I -2 Objectifs

Notre mémoire a pour objectif premier de caractériser les agrégats recyclés disponibles provenant de la démolition. Ces matériaux qui sont récupérés sont principalement des blocs de bétons de ciment récupérés, concassés sous forme d'agrégats qui par la suite, peuvent être mélangés partiellement avec les agrégats naturels pour former un autre type de granulats recyclés.

L'étude consiste aussi à l'évaluation expérimentale de l'influence des agrégats recyclés sur les caractéristiques physico - mécaniques, rhéologique, sur la durabilité des bétons à base des agrégats de la démolition dans les milieux chimiquement agressifs.

Cette caractérisation permettra de contribuer à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physico - mécaniques de ces matériaux en plus d'aider à l'interprétation des résultats d'autres projets déjà terminés ou en cours.

Par la suite, on tentera d'évaluer la possibilité d'utilisation des matériaux recyclés afin de fabriquer des bétons de ciment de résistance et de durabilité acceptables. Finalement, toutes ces données permettront de faire des recommandations sur la fabrication de bétons de ciment à partir de matériaux recyclés.

.

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 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 (laitier ; pouzzolane et fumée de silice) sur le comportement rhéologique de béton.
- Effet des conservations des bétons recyclés dans différentes milieux agressifs
- Une analyse et une discussion des résultats obtenus tout en faisant des observations sur le béton témoin composé à 100% des granulats naturels.

Enfin, 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 I:
REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde, après l'eau. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre, afin d'adopter des méthodes s'inscrivant dans un contexte de développement durable.

Avent de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité.

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.

I.2 Définitions : [1]

Le déchet est défini, d'après la loi algérienne N°01-19 du 12/12/2001, comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » Cependant, la notion de déchet est parfois ambiguë car ce qui est considéré comme déchet pour une personne, peut être considéré comme matière première pour une autre.

I.3 Constitution chimique du déchet :

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux. [2]

I-4 CLASSIFICATION DES DECHETS : [3]

I.4.1 Selon leur nature :

La classification des déchets d'après leur nature aboutit à trois catégories Essentielles : Déchets selon son état physique.

I.4.2 Selon le mode de traitement et d'élimination :

Les déchets solides sont regroupés en quatre grandes familles :

I.4.2.1 Les déchets inertes:

Généralement constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur incompatibilité avec l'environnement et qui proviennent de certaines activités d'extraction minières ou de déblais de démolition (terre, gravats, sables, stériles, ...etc.).

I.4.2.2 Les déchets banals :

Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastique, cartons, bois produit par des activités industrielles ou commerciales et déchets ménagers.

I.4.2.3 Les déchets spéciaux :

Ils peuvent contenir des éléments polluants et sont spécifiquement issus de l'activité industrielle (boues de peintures ou d'hydroxyde métallique, cendres d'incinération...etc.). Certains déchets sont aussi dits spéciaux lorsque leur production importante sur un même site entraîne des effets préjudiciables pour le milieu naturel (déchets des centrales thermiques, phosphogypse, ainsi que certains déchets provenant des laboratoires universitaires et hospitaliers...etc.).

I.4.2.4 Les déchets dangereux :

Issus de la famille des déchets spéciaux, ils contiennent des quantités de substances toxiques potentiellement plus importantes et présentent de ce fait beaucoup plus de risques pour le milieu naturel (poussières d'aciéries, rejets organiques complexes, bains de traitement de surface contenant soit du chrome, cyanure ou une forte acidité, les déchets de C.F.C. et mercuriels).

I.4.3 .Selon l'origine :

Principalement cette classification comprend de grandes classes de déchets solides basée sur la source de déchets : Déchets industriels et Déchets urbains.

I.4.3.1 Les déchets industriels :

Hormis les résidus assimilables aux ordures ménagères, tant par leur nature que par leur volume modeste, on distingue dans cette classe :

- 1) Les déchets inertes : Provenant de chantiers de construction, transformation des combustibles et de l'énergie (gravats, cendre, ...etc.), métallurgie (scorie, laitiers, mâchefers, ...etc.).
- 2) Les déchets des industries agricoles et alimentaires.
- 3) Les déchets pouvant contenir des substances toxiques par des industries variables (ex : ateliers artisanaux, galvanoplastie, chromage, miroiterie,...etc.). [4]
- 4) Les déchets radioactifs.

I.4.3.2 Les déchets urbains : [3]

A partir de la notion « d'ordure ménagère », vocable par lequel on a long temps désigné les résidus des ménages correspondant, de par leur origine et leur nature, à une certaine limitation en quantité et en dimensions, on a été conduit du fait de l'évolution du niveau de vie répercuté par les caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets, à passer à la notion plus générale de résidus ou déchets urbains.

I-4-3-3 : Les déchets ultimes :

La notion de déchet ultime s'applique à un déchet qui, à un moment donné, ne peut plus être valorisé de façon rentable ni sur le plan matériel, ni sur le plan énergétique par quiconque produit.

Le déchet doit donc être stocké de manière définitive ou/et au moins jusqu'à ce que l'on découvre des moyens de le valoriser à nouveau dans le futur. [5]

I.4.3.3.1 : Nature et prévenance des déchets ultimes :

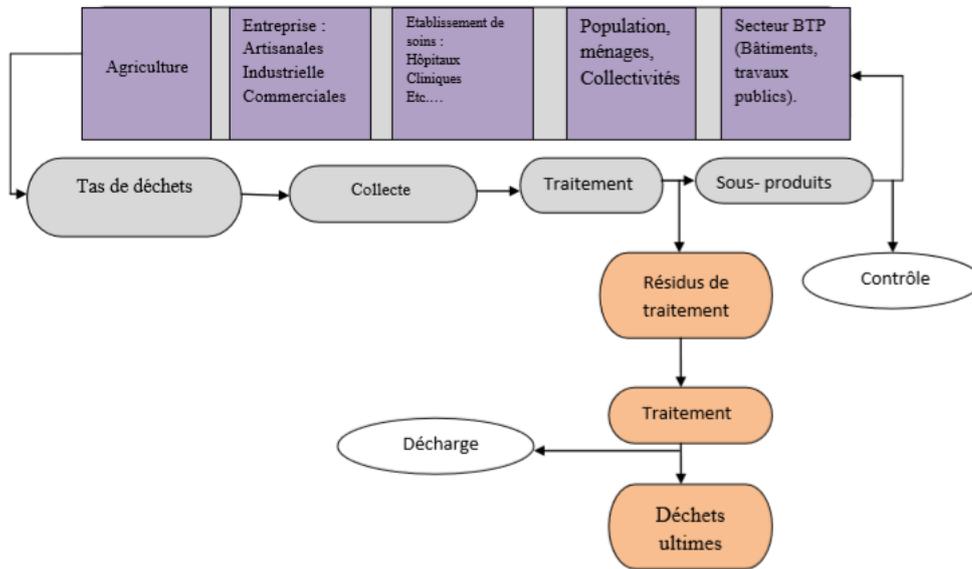


Figure I-1 : Schéma de la production des déchets ultimes. [6]

I-5 Les impacts des déchets sur l'environnement :

Les déchets industriels peuvent avoir des conséquences très néfastes pour l'environnement s'ils sont mal gérés. Leurs impacts sur l'air, l'eau et le sol ne sont pas négligeables.

I.5.1 L'impact sur la pollution de l'air :

(Pollution atmosphérique). Les Décharges contiennent une large variété de déchets leur mélange (surtout entre déchets organiques et de l'eau) provoque l'apparition de méthane, un gaz à effet de serre.

I.5.2 L'impact sur la pollution du sol :

Aujourd'hui on estime que 70% des déchets sont enfouis, notamment les déchets nucléaires. Cela provoque l'érosion et la contamination des sols.

I-5-3 L'impact sur la pollution de l'eau :

Chaque année plus de six millions de tonnes de déchets différents sont rejetés dans les océans. La contamination des espèces aquatiques qui s'ensuit peut devenir dangereuse pour les réseaux trophiques. [7]

I-6 : 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 où 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 démolition et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton, connaissent actuellement une large application sur le terrain dans divers pays du monde. [8]

I-6-1 Canada :

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

En 1992, cette Dans une moindre proportion, la quantité et 45 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. [9]

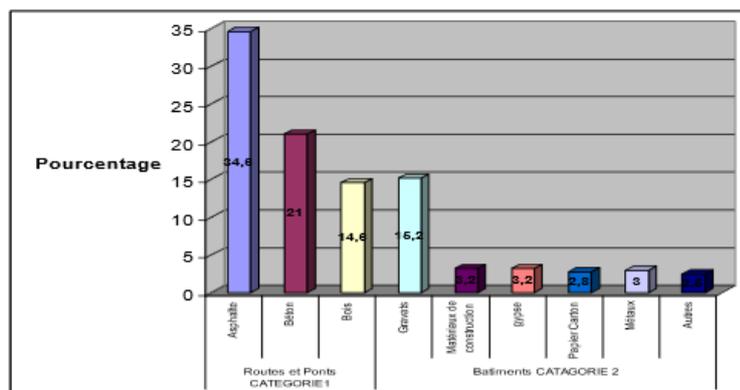


Figure I-2 : Composition moyenne des matériaux secs générés au Canada (1993) en pourcentage [10].

I-6-2 : Aux Etats-Unis :

Selon un rapport publié en 1986 [11], les résidus de construction et de démolition représenteraient 24 % de tous les résidus solides disposées dans les lieux d'enfouissement, soit 31,5 millions de tonnes par année. Toute fois, 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 [12], 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 en fouies soit dans des lieux d'enfouissement sanitaire, soit dans des dépôts non autorisés.

Tableau I-1 : Types de gestion des matériaux secs. [12]

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

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 [13], 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, Massachussets, 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.).

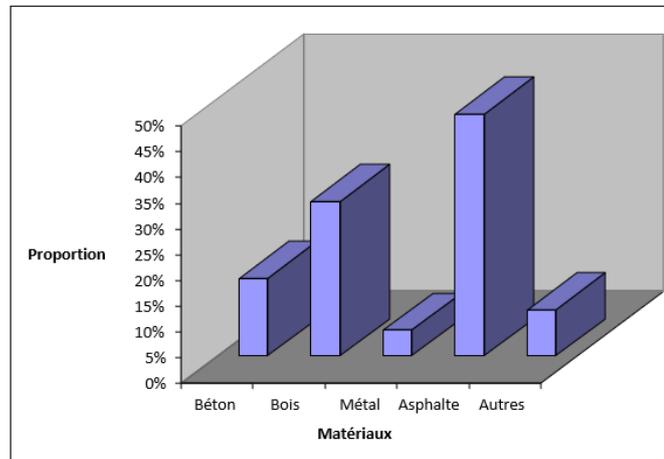


Figure I-3 : Composition des débris de construction et de démolition du Vermont
(En poids)[10]

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.

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.

I-6-3 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 [14] (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 %. [15]

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 :

- 1) 70 % lors de travaux d'excavation;
- 2) 24 % lors de travaux de démolition de bâtiments ;
- 3) 8 % lors de la démolition de routes;
- 4) 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. [16]

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.

I-6-4 : 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. [17]

I-6-5 : Aux Pays-Bas:

Les débris de C&D générés annuellement aux Pays-Bas sont de 25 millions de tonnes (1,5 tonne per capita [17])

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.

I-6-6. 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 %. [17]

I-6-7. 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 % .

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 toute fois tenir compte, lors de l'analyse des données, des particularités géographiques, des méthodes de construction et des principaux matériaux utilisées. [17]

Tableau I-2: technologies utilisées au japon pour traiter les bétons recyclés [18]

Méthode	Détail de la méthode
Méthode par chauffage et broyage	Chauffage des résidus à 300 degrés et broyage.
Méthode par vis de broyage	Vis de broyage comportant une partie intermédiaire et une partie d'échappement couplée à un cône tambour.
Méthode par broyage mécanique	Broyage mécanique par tambour perforé et billes d'acier.
Méthode de concentration par gravité	Traitement par concasseur à mâchoires, broyeur à percussion et laminoir. Utilisation d'un équipement de concentration par gravité humide.

I-6-8 En Algérie :

Au cours des 10 derniers 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, Bejaia, 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.

I.7. Natures de déchets de bâtiments :

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

I-7-1 : Les déchets inertes : [19]

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 :

Tableau I-3: Classification des déchets inertes issus du BTP [20]

TYPE DE DÉCHETS	DESCRIPTION	NUMÉRO DE RUBRIQUE
Béton, briques, tuiles, céramiques, ardoises	Béton	17.01.01
	Brique	17.01.02
	Tuiles et céramiques	17.01.03
	Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques ne contenant pas de substance dangereuse	17.01.07
Verre	Vitre (hors menuiserie)	17.02.02
Enrobés	Mélange bitumineux ne contenant pas de goudron	17.03.02
Terres et cailloux	Pierres et terres de déblais ne contenant pas de substance dangereuse	17.05.04
Ballast de voie	Ballast ne contenant pas de substance dangereuse	17.05.08

Les compositions ainsi que l'utilisation (avant le statut de déchet) de chacun de ces matériaux sont différentes, c'est pourquoi il est primordial de les connaître pour mieux appréhender la suite de l'étude.

I.7.1.1 Béton:[20]

Est un matériau composite, c'est-à-dire qu'il est multi-matériaux. En effet, il est formé par un mélange d'eau, de granulats (sable et gravillons), de ciment (mélange en poudre de chaux et de calcaire argileux) et éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Le choix du ciment, de la forme des granulats, d'utilisation d'adjuvant permet d'obtenir des caractéristiques très diverses.

Utilisation :

Il existe plusieurs types de bétons dans le secteur du BTP, le béton armé, le béton fibré, et le préfabriqué, associé et armature métallique pour obtenir une meilleure résistance à la traction et la compression.

Le béton fibré est un béton auquel ont été incorporées des fibres de diverses natures (polypropylène, métallique, verre filé, carbone, etc..) afin d'améliorer la résistance à la fissuration et la cohésion. En fin le béton préfabriqué consiste à mouler et préparer les pièces de béton en atelier.

I.7.1.2 brique:[20]

La brique est un matériau fait d'argile ou d'autres matières argileuses, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique.

Utilisation :

La brique est à la fois une isolation, un régulateur thermique et un matériau résistant. Les différents types de brique que utilisés dans le bâtiment sont les suivants : Briques alvéolaires et murs, briques creuses et cloisons, brique de parement. Les briques alvéolaires servent à la construction de mur porteur intérieur à un bâtiment.

I.7.1.3 : tuiles et céramiques : [20]

Les tuiles et céramiques (cuites) utilisées dans le BTP sont elles aussi constituées principalement de matières argileuses. Leur procédé de fabrication consiste à solidifier à haute température une pâte humide plastique ou alors une poudre préalablement comprimée.

Utilisation :

Les céramiques présentes dans le BTP sont les terres cuites utilisées afin d'obtenir des briques, des tuiles de toiture, des conduits de fumée, des tuyaux de drainage de des revêtements de sol et mur. L'autre type de céramique présent est le gré avec les casseaux de sols, les tuyaux et les équipements sanitaires.

I.7.1.4 : le verre : [20]

Est une substance solide, transparente et cassante, obtenue par la fusion d'un sable siliceux avec du carbonate de sodium ou de potassium.

Utilisation :

Le verre est majoritairement présent sous forme de vitre dans le secteur du bâtiment. De type silicosodocalcique, différentes configurations lui sont conférées le verre monolithique, le vitrage isolant, le verre teinté, le verre réfléchissant comportant du métal ou des oxydes de métal dans sa masse ou sur sa surface demande une main d'œuvre spécifique.

I.7.1.5 : enrobé : [20]

Aussi appelé asphalte, est un matériau composite. Il est composite de graviers de diamètre supérieur à 63 micromètre de fillers (sable et poussière de section inférieure à 63 micromètres) et d'un liant hydrocarburé (composé essentiellement de bitume) qui assure le lien entre les granulats. Il faut bien distinguer les enrobés à base de liant bitumineux (issus du pétrole) des enrobés à base de liant de goudron (issue de la houille), car ceux à base de goudron n'entrent pas dans la catégorie des déchets inertes.

Utilisation :

Utilisé pour la construction et l'entretien des infrastructures routières, plus précisément pour le revêtement autoroutier, routier, de voirie urbaine, portuaire, aéroportuaire, ... etc. Il existe plusieurs types d'enrobés : les bétons bitumineux (BBSG, BBTM), les bétons bitumineux minces continus à grenailleur, les bétons bitumineux drainants (BBdr), les enduits superficiels d'usure et les enrobés à liant végétal.

I.7.1.6 : terres et cailloux : [20]

Considérés correspondent aux pierres et terres de déblais ne contenant pas de substance dangereuse. La classe des différents types de matériaux selon leurs caractéristiques géotechniques.

Ainsi, se distinguent les classes de A (sols fins), B (sols sableux et graveleux avec fines), c (sols comportant des fines et des gros éléments) et D (sols sensibles à l'eau) correspondant aux différents types de sols, la classe F (sol organiques, sous-produits industriels) correspondant aux sols contaminées par au moins 3% de matière organique, enfin la classe R représentant les matériaux rocheux.

Utilisation :

Utilisés comme remblais soit pour construction de nouvelles infrastructures soit dans sites carriers.

Concernant les nouvelles infrastructures, il s'agit essentiellement de construction de remblais et de couches de forme.

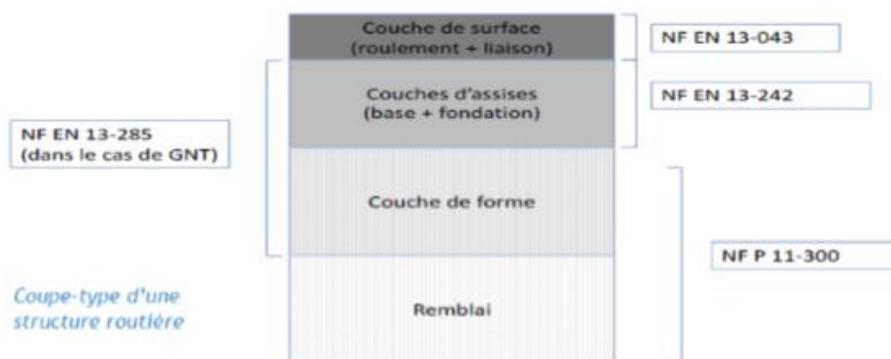


Figure I-4: coupe-type d'une structure routière [20]

I-7-1-7 Ballast de voie : [20]

Est une pierre concassée, de granulométrie variant entre 31.5mm et 50mm le type de roches utilisées varie suivant les régions et les pays en fonction du cliat. Ainsi le granite, la diorite, le calcaire ou encore le calcaire siliceux fins (10mm à 35mm) sont employés.

Utilisation :

Le ballast de voie correspond au lit de pierre ou de cailloux sur les quels usuellement reposent les lignes de chemin de fer.

Il permet à la fois d'émécher la végétation de pousser.

Sous les voies, d'effectuer un drainage efficace lors des intempéries, de limiter les vibrations.

Déformations longitudinales des voies ferrées. Afin d'avoir un ordre de grandeur sur la quantité de ballast requise, l'UNPG affirme que pour un kilomètre de voie ferrée, 10 000 tonnes de granulats sont nécessaires.

I.7.1.8 : résumé, les granulats : [20]

Le béton et l'enrobé sont des matériaux composites composés des matériaux minéraux (gravier, gravillon, sable, ciment bitume). La brique, la tuile et la céramique, le verre et le ballast de voie sont eux aussi des déchets composée de matériaux minéraux avec l'argile les gravillons et la pierre.

Tous ces déchets se retrouvent sous forme de gravats lors de construction ou démolition des chantiers de BTP.

En fin, les matériaux recyclés regroupent tous les granulats élaborés par recyclage.

Tableau I-4: gisement des déchets inertes et destination connue [20].

BTP	Part dans le gisement total d'inertes (%)	Répartition des quantités de déchets inertes en fonction de la dernière destination connue (en %)						
		Déchèterie, plateforme et/ou centre de regroupement et/ou centre de tri	Valorisation matière		ISDI		Autres	Total
			Réutilisation, recyclage sur un site, y compris par un autre établissement	Comblement de carrières	Classe 3 (déchets inertes)	Classe 2 (déchets non dangereux)		
Terres et cailloux non pollués	73,31	32,9	24,0	20,9	18,1	0,2	3,8	100,0
Béton	7,45	15,0	78,1	2,3	4,9	0,0	0,4	100,0
Mélanges de déchets inertes	7,12	56,1	12,3	9,7	10,5	0,3	11,8	100,0
Autres matériaux de démolition de chaussées	4,98	7,5	74,6	11,5	6,2	0,1	0,9	100,0
Enrobés et produits à base de bitume ne contenant pas de goudron	3,89	16,4	77,7	1,0	4,0	0,0	0,9	100,0
Briques, tuiles, céramiques, ardoises	1,21	35,9	24,9	34,8	3,2	0,0	2,0	100,0
Boues de dragage et de curage non polluées	1,09	1,2	34,0	16,0	23,9	4,0	21,9	100,0
Autres types de déchets inertes	0,50	37,0	53,0	4,0	5,5	0,5	0,0	100,0
Ballast de voie non pollué	0,39	0,0	61,2	1,0	0,1	0,0	37,7	100,0
Verre	0,04	78,0	12,4	7,7	1,9	0,0	0,0	100,0
Total	100,0	30,9	32,2	17,0	14,7	0,1	4,6	100,0

I.7.2. Les déchets de chantier :

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

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

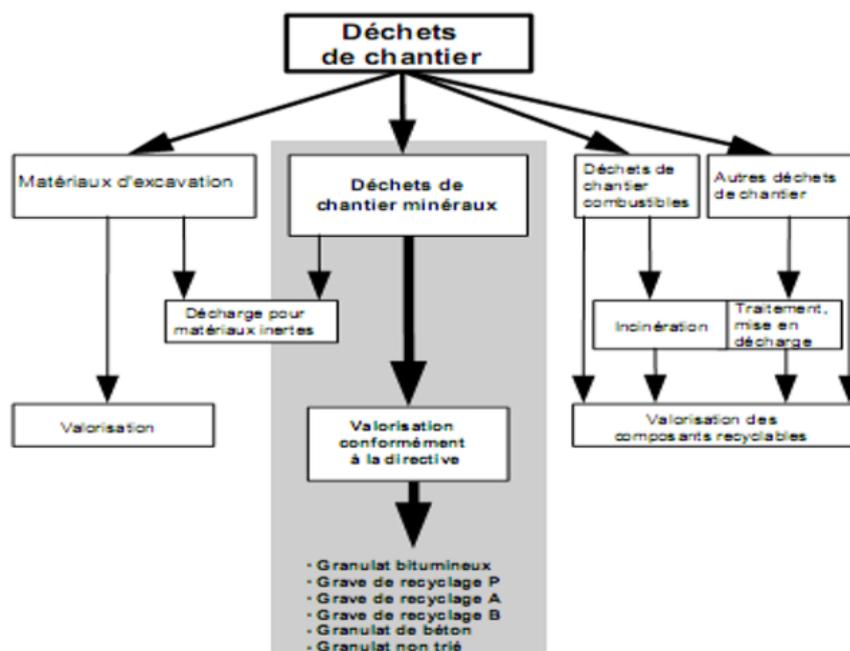


Figure I-5: Les différentes catégories de déchets de chantiers [21]

I.7.3 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.

I.8. GESTION DES DECHETS :

La gestion des déchets est toute opération de pré collecte, de collecte, de stockage, de tri, de transport, de mise en décharge, de traitement, de valorisation, de recyclage et d'élimination des déchets compris le contrôle de ces opérations ainsi que la surveillance des sites de décharges pendant la période de leur exploitation ou après leur fermeture [4].

Les déchets peuvent être toxiques soit directement, soit à la suite d'une réaction physicochimique à un moment de leur élimination d'un traitement ou de leur stockage. Cette gestion est définie par cinq objectifs principaux :

a)-Prévention : [22]

Elle concerne :

- la réduction de la production de déchet.
- la limitation de leur nocivité.
- l'organisation du transport.

b)-Traitement :

Toute opération physique, thermique, chimique ou biologique conduisant à un changement dans la nature ou la composition des déchets en vue de réduire dans des conditions contrôlées, le potentiel polluant ou le volume et la quantité des déchets, ou d'en extraire la partie recyclable.

c)-Élimination :

Toute opération d'incinération, de traitement, de mise en décharge contrôlée ou tout procédé similaire permettant de stocker ou de se débarrasser des déchets conformément aux conditions assurant la prévention des risques pour la santé de l'homme et de l'environnement.

d)-Valorisation :

toute opération de recyclage, de réemploi, de récupération, d'utilisation des déchets comme source d'énergie toute autre action visant à obtenir des matières premières ou des produits réutilisables provenant de la récupération des déchets, et ce, afin de réduire ou d'éliminer l'impact négatif de ces déchets sur l'environnement. [4]

c)-Stockage :

C'est la destination finale des déchets qui ne sont plus susceptibles d'être valorisés dans des conditions techniques ou économiques du moment, il s'intègre dans la filière de gestion globale des déchets, il intervient en aval des opérations de tri et de recyclage et éventuellement de valorisation énergétique. Les installations de stockages modernes, loin des décharges du passé garantissent une protection efficace de l'environnement. [23]

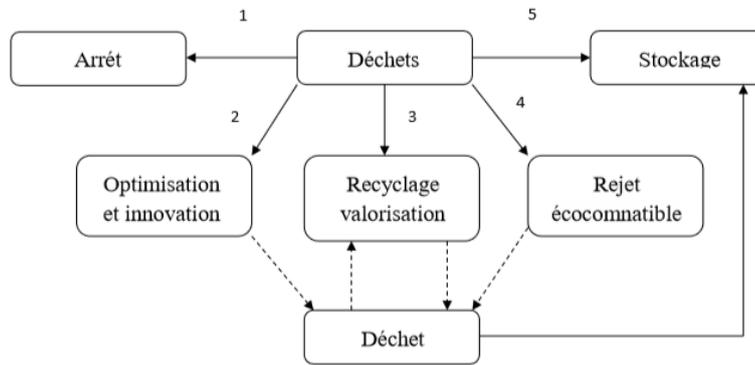


Figure I-6 : Stratégies de gestion des déchets. [24]

I-9 La chaîne du recyclage :

a) Collecte de déchets : Les opérations de recyclage des déchets commencent par la Collecte des déchets. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler.

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

c) Commercialisation et consommation : Une fois transformés, les produits finis issues Du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.[25]

I-10 Description du granulat recyclé : [26]

On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat

recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La schématisation du granulat recyclé est illustrée sur la **figure II-7**.

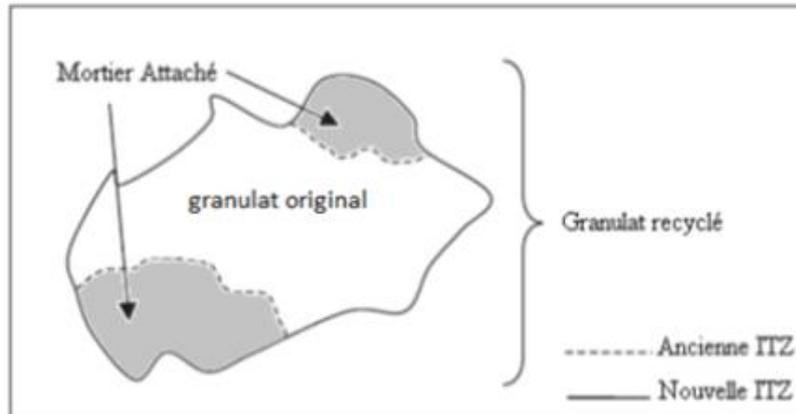


Figure II-7: Schématisation d'un granulat recyclé [27]

I.11 Chiffres et Historique : [28]

Les premiers essais sur le recyclage des bétons ont débuté aux États-Unis et au Japon à la fin des années 1970. L'idée, de transformer les blocs de béton en matériaux valorisables dans les travaux publics, consiste à broyer le béton, comme on le fait avec une roche afin d'en extraire un grave (mélange de sables et de gravillons). Le matériau ressemble à celui utilisé dans une carrière de roche massive classique.

I.12 Processus de fabrication des granulats recyclés : [29]

Différentes étapes visent à obtenir un produit de recyclage répondant aux caractéristiques souhaitées. Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont les suivantes :

- 1) Sélection et stockage des produits bruts.
- 2) Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (B.R.H.), à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille et à retirer les impuretés les plus grosses.
- 3) Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un déferrailage électromagnétique.

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

5) Concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire. L'installation secondaire peut aussi être équipée d'un séparateur magnétique, d'un dispositif d'épuration (lavage, tables densimétriques, ...). On voit donc que les centres de recyclage peuvent offrir une technicité très variée allant du simple concasseur à mâchoire sans criblage ni épuration jusqu'à l'installation industrielle sophistiquée disposant de deux, voire trois niveaux de concassage, de criblage et d'épuration.

6) Stockage.

7) Analyses éventuelles avant utilisation.

Les installations de recyclages peuvent être fixes ou mobiles, et dites «primaires» ou «secondaires» selon qu'elles proposent un ou plusieurs niveaux de concassage. Les produits résultant de ces installations sont de natures variées, allant du matériau de précriblage, aux graves non calibrées, graves 0/D, sables et gravillons. Ils sont aujourd'hui généralement utilisés pour réaliser des terrassements (remblayages divers, couches de forme...) et des chaussées (assises).

Les granulats de béton recyclés peuvent être relativement propres, mais dans un autre cas ils peuvent être contaminés par de la brique, du sable, de la poussière, du verre, du plastique, etc.

Il a été prouvé que ces granulats recyclés, même légèrement contaminés, pouvaient être utilisés dans la formulation des bétons à la place de granulats naturels.

I.13 Caractéristiques des granulats recyclés :

La présence du mortier résiduel attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat. Les propriétés détaillées dans cette section sont la distribution granulométrique, la masse volumique, l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion.

I.13.1 Distribution granulométrique : [30]

La distribution granulométrique des GBR est généralement différente par rapport à celle des granulats ordinaires. Cependant, dans les usines et également dans plusieurs travaux de recherches, les GBR sont produits en adoptant les procédés de broyage et de criblage et, par conséquent, la taille des GBR se situent généralement dans les limites maximales de la

gradation du broyeur. L'utilisation de la technique de broyage similaire avec la même taille maximale (ou si le broyeur est réglé sur une ouverture spécifique) génère des GBR avec des distributions granulométriques similaires

La plupart des chercheurs ont trouvé que les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats ordinaires. Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat ordinaire auquel on le compare. L'analyse de ces résultats montre que les granulats recyclés de tailles maximales de 20 mm contiennent 2,3% de particules plus fines que 4,75 mm.

I.13.2 Densité / Masse volumique : [31]

La densité est l'un des paramètres fondamentaux des granulats. Elle est aussi importante pour la composition des mélanges de béton et influe sur plusieurs propriétés du béton résultant. La densité des bétons de GBR est inférieure à celle des bétons avec des granulats naturels. Cela est dû à l'existence de la pâte de ciment poreuse et moins dense dans les granulats recyclés. En raison de leur origine et de leur taille, les GBR peuvent avoir des densités différentes en fonction de la quantité de la pâte du mortier attaché. La densité est plus élevée pour les GBR qui ont moins de mortier attaché, la densité relative des granulats recyclés est moins grande que celle des granulats naturels. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75. La masse volumique plus faible des granulats recyclés est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle des granulats ordinaires ce qui fait diminuer par conséquent la masse volumique totale des granulats recyclés. Cette réduction en densité est fonction de la teneur en mortier résiduel.

I.13.3 Absorption : [32]

Les études réalisées sur les granulats recyclés ont révélé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels, Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre les granulats recyclés et les granulats naturels. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour des granulats naturels sont souvent en dessous de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5%.

Une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier attaché [27] et par le fait même, ces granulats ont un impact important sur les propriétés du béton. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption des granulats recyclés est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels, la quantité d'eau contenue à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

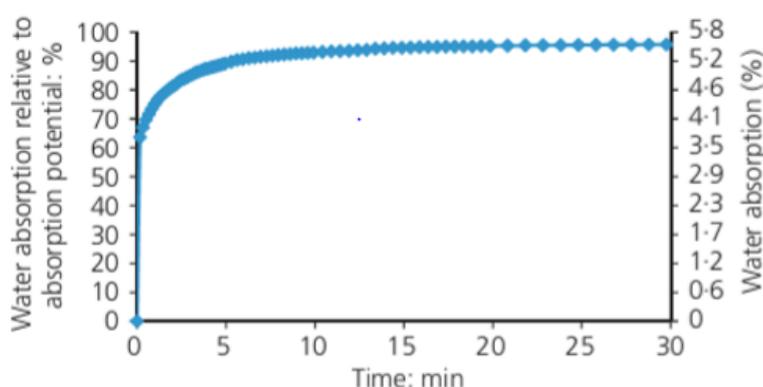


Figure I-8 : Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [33]

I.13.4 Résistance à l'abrasion [34]

La valeur d'abrasion des granulats est définie comme le pourcentage de perte en poids par abrasion, de sorte qu'une valeur élevée indique une faible résistance à l'abrasion. Plusieurs tests sont effectués pour évaluer la valeur d'abrasion des granulats. Parmi ceux-ci, le test d'abrasion Los Angeles qui est le plus couramment utilisé partout dans le monde et donc les valeurs d'abrasion obtenus à partir de ce test sont signalés dans plusieurs travaux de recherche. Selon la norme ASTM C-33, " la spécification standard pour les granulats du béton, " la valeur d'abrasion Los Angeles devrait être inférieure à 50% pour les granulats utilisés pour la confection du béton, et devrait être inférieure à 40% pour les granulats utilisés dans le domaine routier.

I.13.5 Teneur en mortier résiduel et méthodes d'évaluation [35]

La teneur en mortier résiduel est le facteur le plus important pour déterminer la qualité d'un granulat recyclé puisque ses autres propriétés sont liées étroitement à celle-ci. La quantité du mortier résiduel dépend du nombre de processus de broyage dans les usines de

production. La teneur en mortier attaché aux granulats peut être réduite en augmentant le nombre de processus de broyage. Cependant, l'augmentation du nombre de processus de broyage augmente les coûts de production des granulats recyclés et donc une optimisation est nécessaire pour obtenir des GBR de haute qualité avec des coûts de production minimaux.

I.14. Propriétés du béton recyclé à l'état frais :

I.14.1 Ouvrabilité et Densité à l'état frais : [36]

Il apparaît généralement que l'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton contenant un granulats naturel pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, selon Butler on observe une augmentation de 3,1 à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton.

La grande absorption des granulats recyclés peut affecter l'ouvrabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons incorporant ceux-ci puisque les granulats non saturés (secs) peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage.

Il reste donc moins d'eau libre pouvant servir à lubrifier les composantes du béton, diminuant par le fait même son affaissement.

Il est, cependant, possible d'atteindre le même affaissement après un certain temps si l'on ajoute l'eau nécessaire à remplir la porosité du granulats recyclé selon Malesev. Cet auteur rapporte que, pour un béton de rapport E/C de 0,5, l'affaissement reste sensiblement le même si les granulats sont à l'état saturé et avec une surface sèche (SSS), peu importe le type de granulats. Il est aussi possible d'obtenir le même affaissement en faisant varier le rapport E/C du béton. Dans le cas de rapport E/C élevé égal à 0,7, on observe le même affaissement pour le béton témoin et le béton contenant les granulats recyclés.

La masse volumique à l'état frais est plus faible pour les bétons fabriqués avec des granulats recyclés par rapport aux bétons fabriqués avec des granulats ordinaires. Cela serait dû à la grande proportion de mortier total dans le béton fabriqué avec des granulats recyclés. De plus, il a été observé que la teneur en air entraînée ne semble pas être affectée par l'utilisation d'un granulats recyclé.

En raison de la faible densité du vieux mortier de ciment qui reste collé à l'ensemble, les bétons de granulats recyclés ont généralement une densité légèrement inférieure à celle du béton ordinaire, tel que présenté dans le **tableau II-5** :

Tableau II-5 : Densité des granulats naturels et recyclés.[37]

Type de granulats	Dimension (mm)	Densité
Gravier naturel	4-8	2.50
	8-18	2.62
	16-32	2.61
Agréats recyclé (à partir d'un béton de haute résistance)	4-8	2.34
	8-18	2.45
	16-32	2.49
Agréats recyclé (à partir d'un béton de faible résistance)	4-8	2.34
	8-18	2.42
	16-32	2.49

Mathias et al. ont noté que la forte capacité d'absorption d'eau des GBR a une grande influence sur l'eau de gâchage qui peut affecter l'ouvrabilité du béton. Ainsi, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau de gâchage qui est absorbée par les GBR pour déterminer et préciser le temps de malaxage ce qui peut affecter l'ouvrabilité et la résistance du béton. ont également signalé que 10 minutes d'immersion des GBR dans l'eau satisfait d'atteindre l'ouvrabilité désirée du béton.

La pré-saturation des GBR avant la préparation du béton peut empêcher l'absorption de l'eau de gâchage. Cependant, la saturation complète des GBR peut améliorer la maniabilité pendant la préparation du mélange de béton et affecte les performances mécaniques du béton, du fait de la formation d'une faible zone de transition interfaciale entre les GBR et la nouvelle pâte de ciment.

I.15 Propriétés à l'état durcie :

I.15.1 Zone interfaciale de transition : [27]

Il n'est pas tout à fait exact de considérer le matériau béton comme étant un composite à deux phases ; granulats et matrice cimentaire. En réalité, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité des granulats. Cette zone est généralement appelée « zone de transition interfaciale » ou ITZ (Interfacial Transition Zone). Bien que la zone de transition à l'interface granulats-pâte soit relativement étroite, elle occupe une proportion relativement grande du volume de la pâte de ciment. Pour une zone de transition de 40 µm d'épaisseur, ce volume se situe entre 20 % et 40 % du

volume de la matrice cimentaire. Cette zone de transition a beaucoup d'influence sur les propriétés du béton et représente le maillon faible et la source de faiblesse pour le béton . Pour cette raison, la zone de transition est généralement la cause de rupture du béton à des contraintes inférieures à la résistance individuelle de ses deux composantes (matrice de mortier et granulat grossier).

La zone de transition à l'interface granulat-pâte sert de lien entre la matrice de mortier et le gros granulat. Ce lien entre les deux composantes majeures a un impact critique sur les propriétés mécaniques du béton. Même lorsque la résistance de ces deux composantes est élevée, la résistance du béton peut être basse à cause de défauts dans le lien entre les granulats et la pâte, tels que les vides et les microfissures dans cette zone de transition), qui ne permettent pas de transférer les efforts. Il est donc pertinent de considérer l'interface granulat-pâte lorsqu'on évalue la résistance mécanique et la durabilité du béton.

En comparaison avec des granulats ordinaires, les granulats recyclés sont plus poreuses et habituellement partiellement carbonatés en raison de l'adhérence des anciennes pâtes de ciment sur la surface des granulats. La microstructure ITZ du béton de granulats recyclés sera différente de celle du béton de granulats ordinaires. La particularité des bétons recyclés est que ceux-ci ont deux zones de transition distinctes, contrairement aux bétons conventionnels qui n'ont qu'une zone de transition. La première zone de transition est à l'interface granulat d'origine-mortier résiduel et le second est à l'interface mortier résiduel-nouveau mortier.

I.15.2 Perméabilité / porosité :[38]

La perméabilité du béton se définit comme la capacité d'un fluide à passer à travers un solide poreux tel que le béton. Comme la perméabilité du béton détermine la facilité avec laquelle le béton peut devenir saturé avec de l'eau, elle a un impact important sur plusieurs propriétés liées à la durabilité du béton, telles que la résistance au gel/dégel et la résistance à la pénétration des ions de chlorures.

La perméabilité à l'eau du béton augmente avec le taux de remplacement du granulat naturel. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés qui est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels. Cette augmentation ne cependant pas été observée pour un taux de remplacement de 20% selon certains travaux.

Une légère diminution de la perméabilité a été observée dans le cas de l'étude de Levy et Helene et Tam, celle-ci est attribuée au changement de la granulométrie causée par l'ajout de 20% de granulats recyclés. Selon ces auteurs, le mélange de granulat dans le béton à 20% de remplacement aurait un meilleur facteur de compaction. Le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ne semble pas avoir d'impact significatif pour un béton à un rapport E/C élevé de 0,7. Il a été largement prouvé que les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés sont nettement plus perméables que les bétons classiques, cela dit, il faut tout de même noter que cette perméabilité peut facilement être réduite en utilisant des fines (cendres volantes, fillers, fumée de silice... etc.).

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Ceci a un impact important sur la durabilité du béton, notamment sur sa résistance au gel/dégel. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire, et cela est d'autant plus significative quand le taux de remplacement est important. Cela est suivi par une diminution de la densité totale du matériau de l'ordre de 5 à 10% pour une substitution de 100% des gravillons naturels par des granulats recyclés. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%. Cependant il a été observé une diminution de porosité significative une fois que le béton a mûri quelques temps. En effet, Gomez-Soberon a montré que le taux de remplacement des granulats est directement corrélé au volume total des pores et à leurs tailles, mais que si cette influence est tout à fait vérifiée au jeune âge du béton, elle s'atténue à mesure que le béton vieillit.

Ceci semble dû à la cristallisation de nouveaux produits qui réduisent à la fois le nombre et la taille des pores.

Selon certains auteurs, le volume de pore augmente en fonction du taux de remplacement. La porosité totale et le volume moyen des pores augmentent avec le taux de remplacement. Cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement de 20% selon certains résultats. La légère diminution observée dans ce cas peut être due au changement de la granulométrie par rapport au béton témoin. Le béton à 20% de taux de remplacement aurait un meilleur facteur de compaction. Des résultats divergents sont, par contre, observés dans l'étude récente. Où les bétons à granulats recyclés et naturels ont une porosité similaire à 28 jours. La porosité du béton à granulat recyclé diminue, par contre, davantage entre 28 jours et 5 ans que celle du béton à base de granulat naturel.

I.16 Propriétés mécaniques :

I.16.1 Résistance à la compression :[39]

La résistance à la compression d'un béton est un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. En général, la majorité des chercheurs ont observés entre 5% à 30% de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange. En 1977, Buck [28] réalise l'une des premières enquêtes sur les propriétés du BGR. Il a utilisé le béton à partir de différentes sources d'agrégats dans le nouveau béton. Il a gardé le rapport eau/ciment constant, il a observé une diminution moyenne de résistance de 20% dans le BGR. Güneyisi et al. Confirment que la réduction de la résistance à la compression est due à l'augmentation de la teneur en granulats recyclés.

Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à 28 jours du béton. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats d'Ettxeberria et al, la résistance à 28 jours serait de 20 à 25% plus faible de 33% et 23% selon Topcu, de 22% selon Kou, de 20 à 30% selon Martinez-Lage alors que selon Sagoe-Crentsil et al, la résistance à 28 jours serait la même que pour le béton témoin. Il est à noter que dans le cas cette étude, un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons.

Hansen et Narud font différentes qualités du BGR avec des bétons à haute résistance ($E/C = 0,40$), moyen-résistance ($E/C = 0,70$) et à faible résistance ($E/C = 1,20$) comme agrégat. Les trois BGR ont été préparés avec les mêmes proportions du mélange que les trois bétons d'origine. Tous les types ont été ensuite durcis dans les mêmes conditions que les bétons d'origine c'est à dire dans l'eau à 40 degrés Celsius et des essais de résistance à la compression à 28 jours. Il a été montré que les trois types BGR gagnent à peu près la même résistance que les bétons d'origine. Ils ont donc conclu que la résistance à la compression du béton recyclé dépend de la résistance du béton d'origine, et qu'il est largement influencé par une combinaison du rapport E/C du béton d'origine et celle du GBR.

Poon et al. Ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et une plus grande résistance du BGR. Ils ont affirmé que pour augmenter la résistance à la compression, les agrégats recyclés devraient être séchés au four pour créer la liaison interfaciale entre la pâte de ciment et les granulats.

Corinaldesi et Moriconi ont étudié l'effet des cendres volantes et des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du BGR. Ils ont observé que la force peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des cendres volantes ou la fumée de silice dans le mélange.

Braymand et al. Ont fait une étude pour identifier les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés. Il a été montré qu'il est possible d'obtenir des bétons de granulats recyclés pour lesquels les résistances mécaniques sont comparables à celles de bétons classiques, sous réserve que la mise en œuvre soit facilitée par l'ajout d'adjuvants. Les meilleures résistances mécaniques obtenues sont attribuées d'une part à une bonne liaison pâte-granat recyclé et d'autre part à l'origine des granulats et leur degré de contamination par d'autres matériaux de démolition.

Kenai et Debbie ont étudié la résistance à la compression des granulats de béton et de briques concassées, ils ont constaté qu'une chute est survenue en fonction de l'augmentation du pourcentage de substitution en granulats recyclés (gros et fins). Cette chute est due principalement à l'effet du mortier provenant de l'ancien béton qui reste attaché aux granulats recyclés et qui gêne le bon déroulement de l'hydratation du ciment. Elle est due aussi à l'augmentation du rapport E/C et à la présence de poussière de concassage qui augmente la quantité d'eau efficace pour maintenir la consistance et par la suite diminue la résistance. Par contre, pour le béton à base de granulats de briques concassées, cette chute de résistance est due principalement à la valeur élevée de l'absorption d'eau de ces granulats fins recyclés.

Katz et Rao et al. Ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0.55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'à un rapport E/C élevé, la résistance à la compression est liée à la qualité de La pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0.4, la valeur de la résistance chute de 25%. Le peu d'études réalisées jusqu'à présent cherchant à relier la résistance à la compression aux conditions de préparation des granulats (séchés en

étuve, séchés à l'air, imbibés surface sèche...) n'ont pas donné de résultats très concluants. De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises.

I.16.2 Résistance à la traction et à la flexion et fendage : [40]

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer leurs qualités. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction directe, la traction par flexion ou par la traction par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe.

Les études réalisées concernant la résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours. De même, il a été constaté que l'utilisation de divers additions, telles que la fumée de silice, permet d'améliorer les performances du béton recyclé. De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel.

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés augmente. Yang et al. A aussi trouvé qu'en variant le taux de remplacement du granulats naturels, la résistance à la traction diminue et la porosité augmente. Dans cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un granulats recyclés très poreux que pour un granulats recyclés peu poreux. Le remplacement d'un granulats naturels par un granulats recyclés aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction que sur la résistance à la compression.

Etcheberria et al. Ont trouvé que la résistance à la traction du béton de granulats recyclés peut être plus élevée que celle du béton ordinaire pour des taux de remplacement qui ne

dépasse pas les 25%. Berredjem et Arabi ont trouvé que l'écart de résistance en traction entre les différents bétons est assez faible. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important sur la résistance à la traction et que la rugosité des granulats recyclés est très importante ce qui a amélioré l'adhérence pâte granulat.

Butler et al. ont trouvé une forte relation entre la valeur de concassage des granulats et la résistance à la traction. Quand cette valeur augmente, la résistance à la traction du béton diminue. La résistance à la traction devient plus sensible à la résistance des gros granulats ou à la valeur de concassage des granulats dans les grandes résistances à la compression du béton.

I.16.3 : Module d'élasticité [41]

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte-déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée.

Différents auteurs se sont intéressés à la question du module d'élasticité. Habituellement, le module d'élasticité d'un BGR fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ 25% à 40% de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ 10% à 33% de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais il a été montré que cette porosité diminue avec le temps et donc que la différence de module d'élasticité s'affaiblit.

L'impact d'un bas taux de remplacement sur le module d'élasticité n'est pas le même pour toutes les études sur le sujet. Selon Lopez-Gayarre, il n'y a pas d'impact sur le module d'élasticité pour un taux de remplacement inférieur à 50% alors que selon Corinaldesi, la différence avec le béton témoin est de 15%.

Le module d'élasticité des bétons de granulats recyclés est réduit lorsque le pourcentage d'agrégats recyclé augmente. Cette situation a été prévue, par ce que les granulats recyclés sont plus déformable que les agrégats bruts. Etxeberria et al. (2007) ont trouvé que le module d'élasticité des bétons de granulats recyclés diminue lorsque le pourcentage d'agrégats recyclés augmente. Cette situation a été prévue, par ce que les granulats recyclés sont plus

déformables que les agrégats naturels. Ce résultat est attendu car les granulats de béton recyclé ont un module plus faible que les granulats naturels et, en plus, il est bien connu que le module d'élasticité du béton dépend en grande partie du module des agrégats. Les effets de trois différentes conditions d'humidité sur les bétons d'agrégats recyclé sont comparées (sèche, saturée et semi saturés). Le module d'élasticité des bétons d'agrégats recyclés est toujours inférieur à celui des bétons ordinaires.

Tableau I-6 quelques applications courantes : [42]

Granulat recyclés (mm)	Utilisation
0/4	- Mortier - Enduits
0/12 à 0/32	- Assise en chaussée - Couche de roulement dans la composition des enrobés bitumineux
0/32 à 0/80	- Remblais
6/14	- Béton hydraulique (parpaings, canalisation) - Béton prêt à l'emploi
40/70 à 60/120	- Ballast de voie
0/125	- Aménagements décoratifs

I-17 Définition de béton et leur composants :

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier.

I-18 Rôle des différents éléments constituant le béton :

- **Ciment:** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats:** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.

- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

I.19 le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau.

I.19.1 Les propriétés de ciment :

- **Les propriétés hydrauliques :** ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau.

-**les propriétés physiques :** améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité.

-**les propriétés pouzzolaniques :** ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux des composés hydratés stables.

I.19.2 Ciment résiste aux sulfate « CRS » : (ciment résistant aux sulfates) est constitué de :

- 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment ;

- Du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

I-19-2-1 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES :

- La proportion de la magnésie (MgO) dans le ciment est inférieure ou égale à 5 %.

- La teneur en sulfates (SO₃) est inférieure ou égale à 3,5 %.

- La perte au feu est inférieure ou égale à 4%

- Le résidu insoluble est inférieur ou égal à 3%

- La teneur en C3S est inférieure ou égale à 50%

- La teneur en C3A est inférieure ou égale à 5%

-La somme de (C4AF+2C3A) est inférieure ou égale à 22%

I.20 Les principaux ajouts minéraux actifs :

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et l'autre agent agressif. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux. [43]

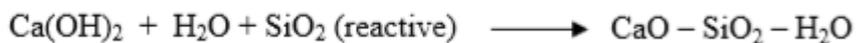
I.20.1 Les pouzzolanes naturelles (z) :

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identiques à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches Sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cour de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolanique. [44]

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer. [45].

Il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition, sur tout, Feldspathique (donc siliceuse) à structure alvéolaire et trachytique résultant de l'accumulation des cendres volcaniques .

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau). [48]



Figure I-9 : Pouzzolane naturelle granulée

L'effet de la pouzzolane sur les caractéristiques des bétons :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

1) 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 .[46]

2) 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. comprendre l'effet de l'utilisation.

I-20-2 Le laitier de haut fourneau(S):

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm . La composition chimique de

laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. [47]

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques [48].

Les laitiers de haut fourneau trouvent leur utilisation surtout dans les ciments et pour les travaux routiers. Il existe d'autres laitiers métallurgiques provenant de métaux non ferreux et qui pourraient être utilisés. [49]

Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke que l'on utilise pour réduire l'oxyde de fer se retrouvent dans le laitier de haut fourneau, comme ces impuretés pourraient avoir un point de fusion très élevé si l'on n'ajustait pas leur composition chimique, on ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme .

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ (réactive) $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

Zone où la température de fusion de ces trois oxydes est parmi la plus basse. Ainsi du point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier fondu a une densité plus faible (de l'ordre de 2,8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7) de telle sorte que le laitier fondu flotte au dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément. [50]

La quantité de laitier recueillie par tonne de fonte varie suivant les minerais utilisés et les régions de production.[49]

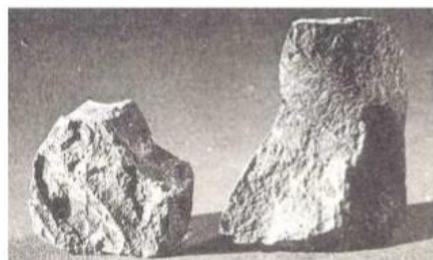


Figure II-10: Laitier cristallisé [49]

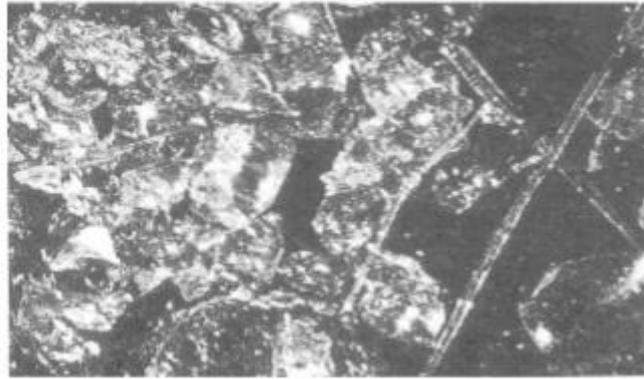


Figure I-11: Laitier cristallisé [49]

La composition chimique des laitiers de haut fourneau est déterminée à partir:

- du Combustible utilisé.
- du métal à obtenir.
- des conditions de refroidissement. [51]

L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons :

1) A l'état frais :

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Mania [52] 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 [53] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, sur tout 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 [52].

2) A l'état durci :

Selon Venuat [53], 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 $> 45 \mu\text{m}$ 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 aluminat.

I.20.3 La fumée de silice(D):

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie des alliages de silicium et notamment ferrosilicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1 μm (100 fois plus Petits que ceux du ciment). [45]

Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 . La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.



Figure I-12:Fumée de silice sous forme de poudre.

L'effet filler est aussi responsable de l'augmentation de la fluidité des bétons qui contiennent de la fumée de silice et qui ont de très faibles rapports eau/ciment. Par conséquent, à cause de leurs caractéristiques physiques uniques, la pâte de ciment durci qui contient du fumé de silice est dense a cause de leur grande finesse, les particules de fumée de silice peuvent remplir les rides qui se trouvent entre les plus grosses particules de ciment.

• Pâte de ciment dense et dure: $\downarrow \downarrow \downarrow$ porosité $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \uparrow \uparrow \uparrow R^\circ\text{C}$

• Pas de zone de transition entre granulat et pâte de ciment $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow R^{\circ}C$.

• $\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$ fluidité du béton $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow E/L$

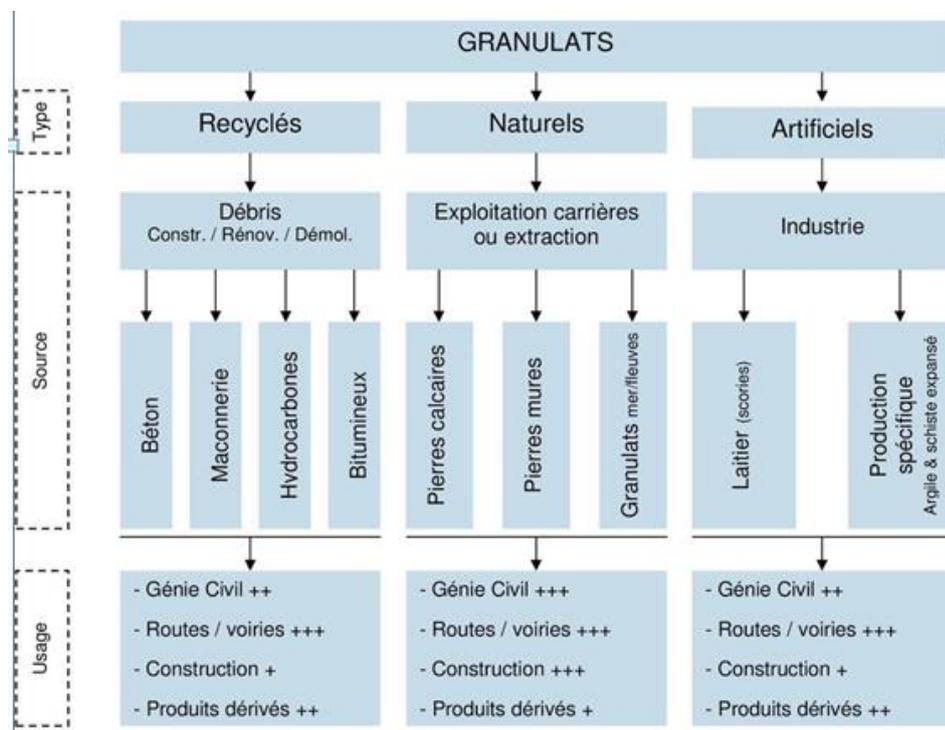
I-21 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton ou mortier il joue deux fonction principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologique) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement.

En sachant le rôle de l'eau dans le béton on peut dire que toutes les eaux ne peuvent être utilisé pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés physiques et mécaniques (prise et consistance), les propriétés esthétiques (tache, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton. [54]

I-22 LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS :

Tableau I-8 : le tableau de synthèse ci-après présente les différentes sources de granulats Leur utilisation sur le marché suivant leur typologie. [55]



I.23. 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 satisfaisant 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 [56] 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. [57]

I.24 Résistance aux eaux agressives :

I.24.1 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 retraitant, 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. [58]

I.24.2 Eaux contenant des sulfates (xso^2_4) :

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 $Ca(OH)_2$, comme le cas des pâtes du ciment portland. [59]

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 $Ca(OH)_2$, mais aussi, il décompose les aluminates et les silicates hydratés en formant $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. 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 [60].

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. [60]

I.24.3 Eaux contenant des chlorures(HCL) :

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 [60].

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.[60]

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. [59]

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 obtenu par le ciment portland. Ce comportement est attribué à la faible quantité ou à l'absence de CH dans les ciments pouzzolaniques hydratés. [60]

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 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. [61]

I.24.4 Eaux contenant d'hydroxyde de sodium NaOH : [62]

L'hydroxyde de sodium est une base forte qui est très soluble dans l'eau. C'est une substance cristalline, dotée d'une structure filamenteuse et d'une densité environ deux fois supérieure à l'eau. Sa couleur est blanc mat, partiellement translucide.

La lessive de soude est la solution aqueuse claire, incolore et visqueuse de l'hydroxyde de sodium. Elle n'est pas volatile et ininflammable. Elle est relativement peu coûteuse. Il s'agit d'une base forte et corrosive qui réagit violemment au contact des acides et produit une quantité importante de chaleur en se dissolvant. La lessive de soude est un produit stable qui n'est endommagé ni par la lumière ni par la chaleur ; suivant le domaine d'application, on utilise une solution à 33 ou 50 %. La lessive de soude est utilisée comme matière première dans la production de soude caustique sous forme de paillettes et de perles. Ceci se fait par évaporation et donne une concentration finale de près de 100 %. Comment se protéger des accidents?

- Tant la lessive de soude que la soude caustique sont des substances très corrosives ;
- il faut éviter le contact physique au moyen de vêtements adaptés ;

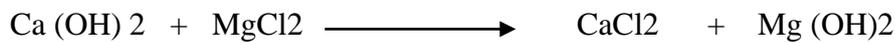
Le produit se présente sous trois formes distinctes :

- L'hydroxyde de sodium
- La lessive de soude
- La soude caustique

I.25 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 C3S sous forme de monocoloré aluminat de calcium C3A. $\text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

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



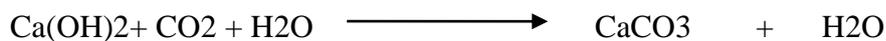
La brucite est insoluble et se dépose à la surface du béton, tandis que le CaCl_2 réagit avec les aluminates pour former de monocoloré aluminat.

I.26. 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).

I.27 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 monocoloré aluminat 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 ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). 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 [63], 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. [64]

Selon Mehta [61], le remplacement des ions OH^- par des ions Cl^- réduit l'alcalinité de la solution interstitielle nécessaire pour former de l'ettringite expansive.

CHAPITRE II:
MATERIAUX
MATERIELS ET
ESSAIS

II.1 Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes et les modes opératoires en vigueur.

II.2 Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed EL Bachir el Ibrahimy de Bordj Bou Arreridj, et le laboratoire de la cimenterie d'AIN KEBIRA pour les ajouts minéraux actifs (pouzzolane, laitier, fume de silice).

Effet des ajouts minéraux actifs sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons à base du sable de démolition.

Qu'il soit le béton frais ou durci nous avons choisi d'utiliser trois types des ajouts et deux types de sable ,naturel et démolition.

II. 3.1 Caractéristiques du gravier :

Le gravier utilisé dans notre étude expérimental pour la confection des différents types de bétons provient de la carrière de Sétif, obtenu après Concassage de roches naturelles .Les fractions utilisées dans notre étude sont : (8/15) et (15/20).

II.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.

- 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 tableaux et sous forme 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 [18].

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse où on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré 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 les tableaux suivants :

Tableau II.1 : Analyse granulométrique du gravier concassé (8/15) et (15/20)

Type de granulats	Maille de tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule		Tamisât(%)
			(g)	(%)	
8/15	16	26.35	26.35	1.01	98.99
	12,5	445.67	472.02	19.69	80.31
	10	898.99	1371.01	54.26	45.74
	8	507.06	1878.07	73.77	26.23
	6,3	620.86	2498.93	97.65	2.35
	5	51.99	2550.92	99.65	0.35
	Fond	7.92	2558.84	99.84	0.16
15/20	20	91.5	91.5	1.83	98.17
	16	2890.5	2982	59.64	40.36
	12,5	318.5	4838	96.76	3.24
	10	132	4970	99.4	0.6
	8	25.5	4995.5	99.91	0.09
	Fond	3	4998.5	99.97	0.03

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisés sont tracés ci-dessous.

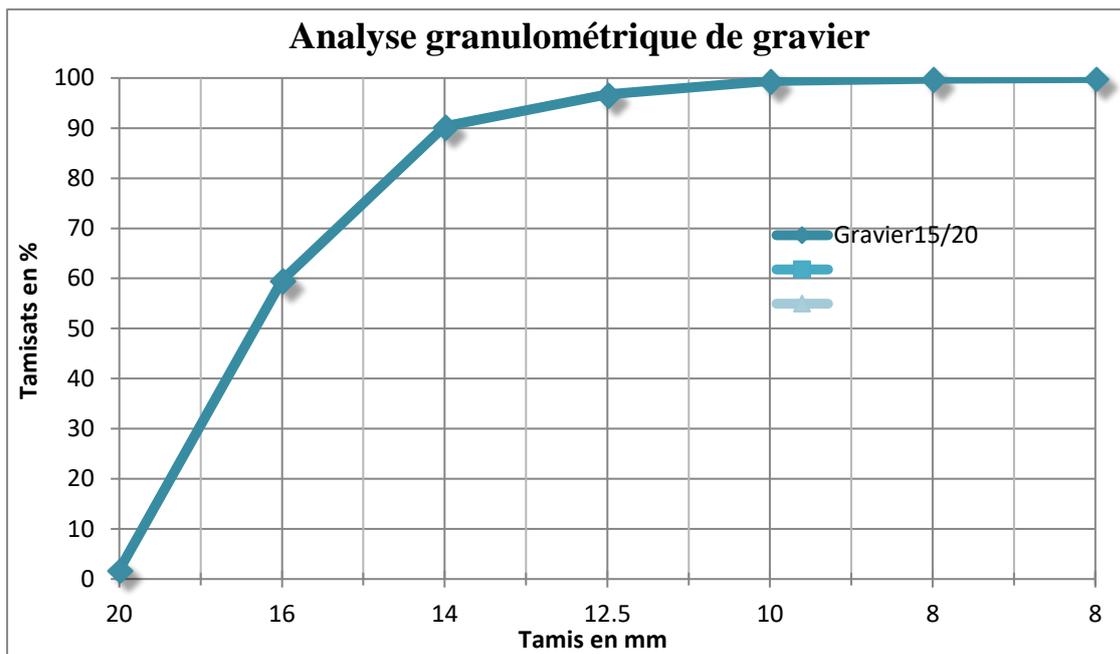


Figure II.1 : Courbe granulométrique des graviers concassés (15/20)

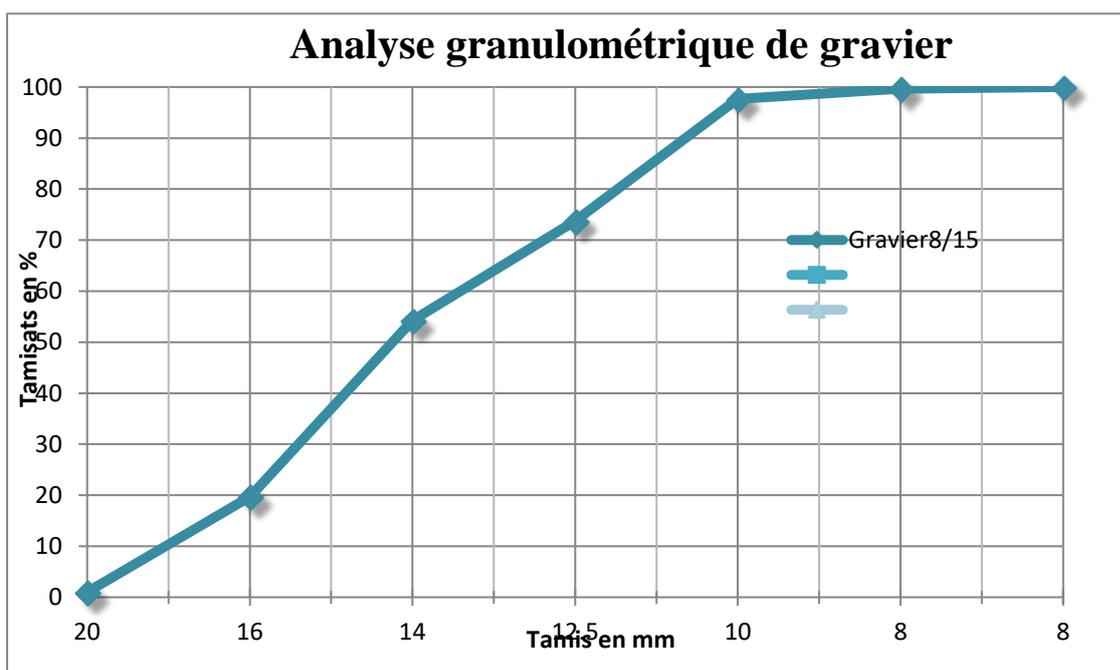


Figure II. -2 : Courbe granulométrique des graviers concassés (8/15)

II.3.1.2 La masse volumique :

C'est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, on distinguera :

a) La masse volumique apparente (γ) :

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/cm^3 ; Kg/m^3 ; t/m^3).

- **Principe :**

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

- **Mode opératoire :**

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1
- ✓ 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, et Peser le contenu et noter M_2 .

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V$$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Masse volumique apparente du gravier concassé (8/15) et (15/20)

Fraction	V _r (cm ³)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₂ moy	γ _{app} (g/cm ³)
8/15	5	836,5	7780	8616.5	1,56
			7780		
			7800		
15/20	5	836,5	14140	15009.83	1,417
			14180		
			14200		

b) La masse volumique absolue (ρ) :

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

➤ **Principe :**

Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

➤ **Mode opératoire :**

- ✓ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V₁.
- ✓ 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 : $V = V_2 - V_1$
- ✓ La masse volumique réelle est : $\rho = M / (V_2 - V_1)$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne [20].

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau II.3 : Masse volumique absolue du gravier (8/15) et (15/20)

Fraction	M (g)	V (cm ³)	V _t (cm ³)	V _{moy} (cm ³)	γ _{abs} (g/cm ³)
8/15	300	400	510	913.33	2,07
			515		
			515		
15/20	300	400	510	913.33	2,05
			515		
			515		

II.3.1.3 La porosité :

C'est le rapport entre le volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = V_v / V_t \times 100$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P (\%) = (1 - \gamma/\rho) \times 100$$

II.3.1.4 La compacité :

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle est exprimée en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = (V_s / V_t) \times 100$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P$$

II.3.1.5 L'indice des vides :

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = V_v / V_s$$

Aussi :

$$e(\%) = (1 - c) / c$$

Tableau II.4 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice de vide e(%)
8/15	32 ,69	31,69	0,96
15/20	44 ,67	43,67	0,97

II.2.1.6 Degré d'absorption d'eau [NA EN 1097-6] :

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(MH - MS)/MS].100$$

MH : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

MS : La masse du matériau sec en (g). [20]

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.5 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (8/15) et (15/20)

Fraction	MH (g)	MS (g)	A (%)
8/15	1016.50	1000	1.65
15/20	1011.50	1000	1.15

II.3.1.1.7. La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : EN 1097- 2

But de l'essai :

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats .

❖ **Principe de l'essai :**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, en évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm.

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50).

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

Tableau II.6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 – 10	9	3960	à
10 – 14	11	4840	-150
10 – 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à
25 – 50	12	5280	-150

❖ **Mode opératoire :**

- Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr /min à 33 tr/min.
- Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

- **P = 5000 – refus**
- Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :
 - $L_A = 100 (P/5000)$
- **P** : est le passant à 1.6mm.
- Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :
- - **Tableau II.7** : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A [93].

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.8 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (8/15), (15/20).

Gravier	LA (%)
8/15	24.3
15/20	21.22

II.3.2 Caractéristique du sable :

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale:

a- un sable naturel: ce sable a été prélevé de la région de OUED SOUF, il est apprécié pour ses bonnes caractéristiques .



Figure II.3 : Le sable Naturelle

b- Sable démolition (recyclés):

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

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



Figure II.4 : Le sable de démolition de béton utilisé.

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

➤ **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 :**

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ **Mode opératoire :**

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

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable d'Oued souf sont représentés dans le tableau ci-dessous .

Matériels utilisés :

- ✓ Une série de tamis normalisés (0.08 – 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5) mm avec couvercle et fond pesés préalablement.
- ✓ Une balance, un tamiseur mécanique .

Tableau. II.9. Analyse granulométrique de sable naturel .

Type de Sable	Tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
			(g)	(%)	
0/5	5	0	0	0	100
	2,5	151	151	15.10	84.90
	1,25	328	479	47.90	52.10
	0,63	180	659	65.90	34,10
	0,315	110	769	76.90	23,10
	0,16	130	899	89.90	10,10
	0,08	75	974	97.40	2,60
	Fond	23	997	99.70	0,30

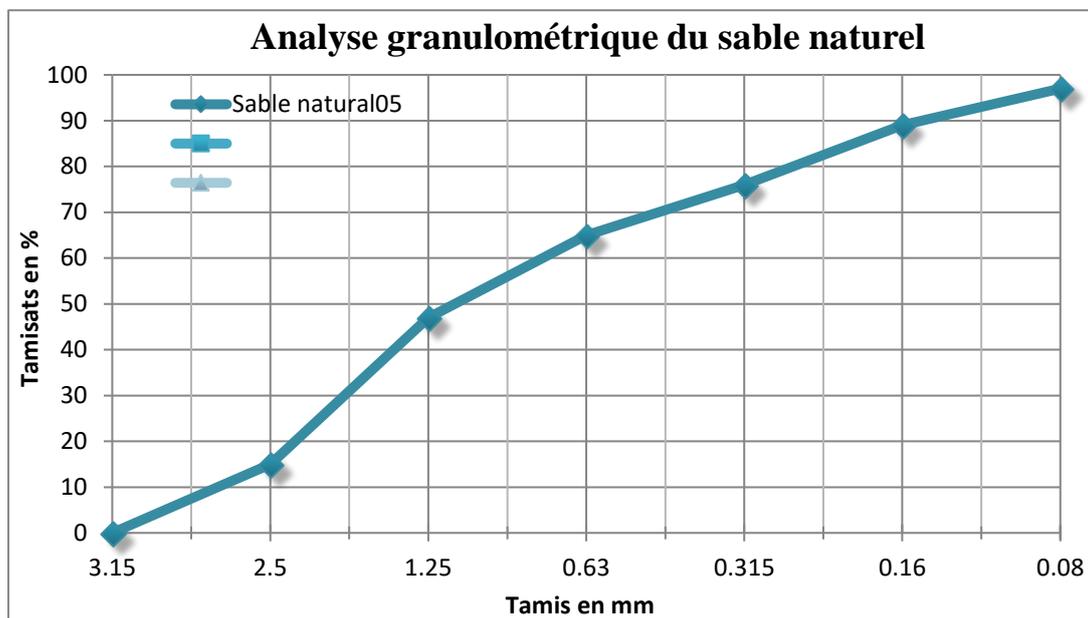


Figure II.5 : Courbe granulométrique de Sable naturel.

Tableau II.10: Analyse granulométrique du sable de démolition

Type de Sable	Tamis (mm)	Refus partiel(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
			(g)	(%)	
0/5	5	0	0	0	100
	2,5	120	120	12.00	82
	1,25	187	307	30.70	69.3
	0,63	170	477	47.70	52.30
	0,315	225	702	70.02	29,98
	0,16	180	882	88.20	11.60
	0,08	97	979	97.90	2.10
	Fond	18	997	99.70	0.30

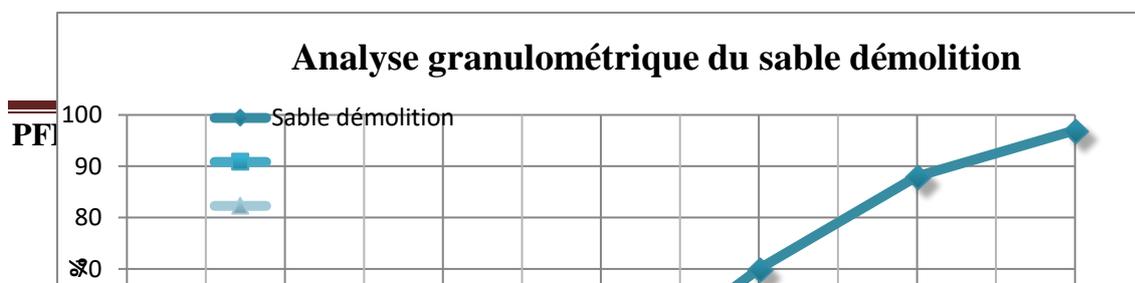


Figure III.3 : Courbe granulométrique de *Sable concassé(1)*.**Figure II.6** : Courbe granulométrique de *Sable démolition* .**II.3.2.2 Modules de finesse [NA EN 12620] :**

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

Tableau II.11 : Module de finesse du sable.

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

$$MF = \sum Ri/100$$

$$MF = (1/100)\sum (\text{refus cumulés en \%des tamis } \{0.08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-3.15 \})$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est Égal à :

$$MF = 2.03 \quad 2 < MF > 2.5 \text{ (C'est un sable moyen).}$$

$MF = 2.47$ $2 < MF < 2.5$ (C'est un sable moyen).

II.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 ± 1 g dans l'éprouvette 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 l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec 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 niveau supérieure de flocculat 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 du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \cdot 100\%$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

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

$$\text{Esp} = \left(\frac{h'2}{h1}\right) \times 100\%$$

Avec :

h₁ : hauteur du sable plus flocculat.

h'₂ : hauteur du sable.

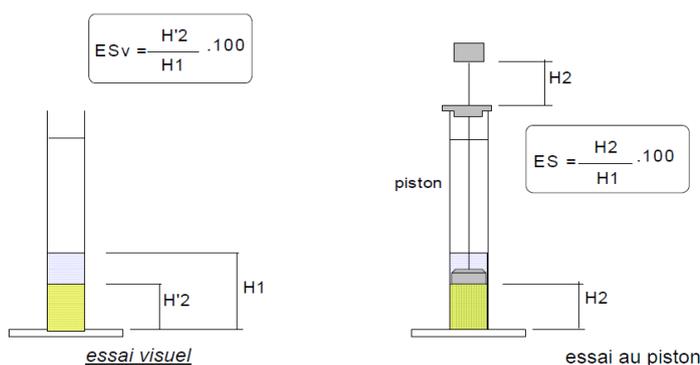


Figure II.7 : Essai d'équivalent de sable. **Tableau II.12** : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP

Tableau II.12 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP

Es _v	Es _p	Nature et qualité de sable
Es < 65	Es < 65	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons 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.

En a répété l'essai 02 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous

Tableau II.13 : Les résultats de l'équivalent de sable

	Sable Natural	Sable démolition
--	---------------	------------------

H1	10.1	8.5
H2	9.7	8.7
Esv	96.03	97.70
ESP	94.04	97.36

Après la comparaison aux résultats proposés par G-DREUX :

. **Donc** : le Sable naturelle et sable démolition sont : sable très propre :

l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.3.2.4 Masse volumique : [NF P18-555]

a) Masse volumique absolue :

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 :

- $\rho_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1)$ avec : $M=300\text{g}$
- Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.14: Les résultats de la masse volumique absolu du sable démolition

Essai	M_s	$V_w(\text{cm}^3)$	$V_t(\text{cm}^3)$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{\text{moy}}(\text{g/cm}^3)$
1	300	400	517	2,54	2.55
2	300	400	518	2.55	
3	300	400	519	2.56	

Tableau II.15: Les résultats de la masse volumique absolu du sable naturel.

b) Masse volumique apparente :

Essai	M _s	V _w (cm ³)	V _t (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ _{moy} (g/cm ³)
1	300	400	512	2.67	2.60
2	300	400	513	2,65	
3	300	400	514	2,50	

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment

.La masse volumique apparente du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{app} = M/V$$

Tableau II.16 : Masse volumique apparente du sable naturel

Essai	γ(g/cm ³)	γ _{moy} (g/cm ³)
1	1.67	1,67
2	1.69	
3	1.65	

Tableau II.17 : Masse volumique apparente du sable démolition

Essai	γ(g/cm ³)	γ _{moy} (g/cm ³)
1	1,40	1,43
2	1,47	
3	1,42	

Tableau II.18 : Porosité, compacité et indice des vides du Sable .

Sable	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice de vide e(%)
SN	32 ,69	31,69	0,96
SD	44 ,67	43,67	0,97

II.3.2.3 Caractéristiques de ciment :

« Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau »

Le ciment employé lors de l'étude est le ciment portland artificielle (CPA-CEM1/42.5): de la cimenterie d'AIN EL KEBIRA (W. Sétif) dont des caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques sont données dans les tableaux suivants.

Tableau II.19 : Analyse chimique du ciment utilisé.

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO	Paf
Valeur%	20.91	3.87	5.42	63.23	2.43	0.50	1.70	0.85

Tableau II .20. Caractéristiques Physiques du Ciment CRS-CEM I 42,5

Essais physiques Norme (EN 196-3et 6)	Unités	Mesure	Garantie
Poids Spécifique	(g/cm ³)	3.16	-
Surface Spécifique Blaine (SSB)	cm ² /g	2943	-
Temps de prise	Début	min	185
	Fin	min	285
Refus %	%	3.4	-
Consistance (normale)	%	0.25	-

Tableau II.21 Caractéristiques Mécaniques du Ciment CRS-CEM I 42,5

Désignation	Age	Mesures	Normes
Résistance à la flexion (MPa)	02 jours	3.8	-
	07 jours	6.5	-
	28 jours	8.4	-
Résistance à la compression (MPa)	02 jours	17.0	Li \geq 10.0
	07 jours	33.8	-
	28 jours	50.8	Li \geq 42.5

Tableau II. 22 Compositions potentielles du Clinker

C3S	%	48.779
C2S	%	25.199
C3A	%	3.279
C4AF	%	15.171

Masse volumique apparent [EN1097-6]**Principe de l'essai :**

Remplir une mesure de volume connu $V=1m^3$ et déterminer la masse du continu.

Matériels utilisée :

Entonnoir porté par un trépied mini d'un passoir et d'un opercule mobile.

Balance de précision.

Une mesure de 1L (1L = 1000 cm³).

Une règle a arasé.

Mode opératoire :

Placer l'entonnoir au-dessus de la mesure de 1 litre

Fermer l'opercule.

Verser environ 200g de liant sur le passoir et le faire descendre dans l'entonnoir à l'aide

de la spatule.

Ouvrir l'opercule, le liant tombe dans la mesure.

Renferme l'opercule.

Recommencer de nouvelles quantités du liant, jusqu'à ce que le bol déborde.

La masse volumique apparente est : $\rho = \frac{M2-M1}{V}$, $V=1$ litre.

M2 : Masse de récipient remplie du liant

M1 : Masse de récipient vide .

Masse volumique absolue : NF EN 196-6

❖ **Objectif de l'essai :**

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue de ciment anhydre qui varient en fonction de la composition du ciment, tout en restant entre 3.0 et 3.2 g/cm³.

❖ **Principe de mesure avec le densitomètre Le Chatelier (Voluménomètre)**

Il consiste de mesurer le déplacement du niveau de liquide lorsqu'on y introduit la poudre dont on recherche la masse volumique absolue.

❖ **Equipement nécessaire :**

- ✓ Densimètre Le Chatelier (Voluménomètre) de 250 cm³ de volume.
- ✓ Un liquide qui ne doit pas être réactifs avec le ciment (toluène).
- ✓ Thermomètre.

❖ **Conduite de l'essai :**

- ✓ Remplir le Voluménomètre jusqu'au niveau zéro
- ✓ Immerger le Voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 °C
- ✓ Peser une masse de 64 g de ciment.
- ✓ Verser le ciment très lentement en ¼ heure.

$N_0 = 0$ cm³.

$N_1 = 20.5$ cm³. $\rho_c = 64 / (N_1 - N_0)$ g/cm³.

$\rho_c = 64 / 20.5 = 3.12$ g/cm³ .

Tableau II. 23.caractéristique physique du ciment-CRS

	Valeurs
Masse volumique apparente	1.055
Masse volumique absolue	3.16

II.3.3 L'eau de gâchage : [NA EN 1008]

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents bétons est une eau potable de robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus concernant les analyses physico-chimiques :

Tableau II.24 : Analyses physico-chimiques de l'eau de gâchage

Paramètre	Quantité	Commentaire
PH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivités	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	
Taux de (Cl^-)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO_2^-)	0,15 mg/l	> à la concentration max(0.1)
Taux de (NO_3^-)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

Les résultats obtenus montrent que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

II.3.4 Les ajouts minéraux

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont les suivants :

- fume de silice
- La pouzzolane
- Le laitier

II.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 II.25 : Analyse chimique des ajouts.

Les ajouts	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	MgO
Fume de silice	88.60	0.964	0	0.995	0.104	1.263	0.398
Pouzzolane (%)	38.57	16.77	11.77	15.39	0.34	1.638	3.09
Laitier (%)	35.52	8.88	2.92	26.11	1.50	1.268	2.58

II.3.7.2 Les caractéristiques physiques :

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.26 : 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

II.4 Etudes des mortiers

II.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.

II.4.2 Programme d'essais

II.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. II.8 : Essai de flexion.

II.4.2.2 Résistance à la compression

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0.5 \text{ mm}$ 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 II.9 : Essai de compression.

II.4 Formulations des bétons étudiés :**Calcul de la composition du béton :****Méthodes de calcul de la composition du béton :**

Le calcul de la composition du béton à pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour un dosage de 1 m³ de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique volume (exigée).

Il existe plusieurs méthodes de détermination la composition du béton proposé et applique dans les différents pays du monde, permis ces méthodes on peut citer :

- Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue).
- Méthode de FAURY.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode de VALETTE.
- Méthode de DREUX GORISSE.
- Méthode des volumes absolus.
- Méthode générale du CES (centre d'essai des structures).

Dans notre projet la méthode des volumes absolus élaborée par le professeur B.G **SCRAMTAIEV**, a été adapté pour formule notre béton.

Cette méthode repose sur le fait qu'un béton lourd dame a l'état frais se rapproche de la compacité absolue, ce qui signifie que la somme du volume absolu des matériaux d'origine dans 1m³ est égale au volume de la composition du béton donnée.

II.4.1 Méthode de SCRAMTAIEV :

La somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m³ de béton frais est à 1000 litres.

Pour confectionner un béton, il faut connaître les méthodes de calcul en vigueur (calcul des dépenses en matières premières) et leur mis 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 : 1. Activité du ciment (R_c).
2. Masse spécifique (absolus) du ciment.
 3. Masse spécifique (absolus) et masses volumique (apparentes) du sable, ou gravier.
 4. La porosité de pierres concassées ou du gravier.

La composition du béton c.-à-d. la dépense (quantité) de ciment, eau, de sable et de pierres concassées ou de gravier est établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélange de béton.

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

1. On définit le rapport (C/E) qui assure l'obtention d'un béton de résistance requise.
2. On détermine la dépense en eau (E).
3. On fait le calcul de la quantité de ciment (C), ensuite des pierres concassées (PC) ou de gravier(G) et de sable(S).

II.4.2 Présentation de la méthode SCRAMTAIEV :

a. Définition du rapport (ciment/eau) :

Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (R_b) en fonction du rapport C/E et des qualités du liant et des granulats.

a) Pour un béton P et TP : $C/E \leq 2.5$ on a : $R_b = A.R_c.[(C/E)-0.5]$

$$\Rightarrow C/E = R_b / (A.R_c) + 0.5$$

b) Pour un béton F et TF : $C/E > 2.5$ on a : $R_b = A'.R_c.[(C/E)+0.5]$

$$\Rightarrow C/E = R_b / (A'.R_c) - 0.5$$

Avec :

R_b : Classe de ciment.

R_c : Activité du ciment.

A, A' : Coefficients admis d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux utilisés.

C/E : Rapport du poids de ciment au poids de l'eau dans l'unité de volume du mélange.

Tableau II.27 : Les valeurs des coefficients A et A' en fonction du liant et agrégat.

Granulats et liants	A	A'
De qualité supérieure	0.65	0.43
De qualité ordinaire	0.60	0.40
De qualité inférieure	0.55	0.37

La formule (a) correspond aux bétons ordinaires plastiques.

La formule (b) correspond aux bétons plutôt secs de haute résistance mécanique.

b. Détermination de la dépense en eau :

Elle est établie approximativement d'après le tableau, qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés :

Tableau II.28 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.

La quantité d'eau l/m ³ en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons frais	
70	40	20	10	Maniabilité (sec)	Affaissement (cm)
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	145	160	80-60	0
130	135	150	165	50-30	0
140	145	160	175	30-15	0
145	155	170	185	-	2-1
160	165	180	195	-	4-3
165	170	185	200	-	6-5
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

c. Détermination de la dépense en ciment :

$$C = [C/E].E$$

d. Détermination de la dépense en gravier :

La détermination du dosage en agrégat doit remplir les deux conditions suivant :

1- La somme des volumes absolue de tous les composants du béton est égale à 1 m³ du mélange de béton damé.

2- La porosité des agrégats doit égale a zéro.

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_e) + (S/\rho_s) + (G/\rho_g) = 1000$$

Ou:

C, E, S et G : dépenses en ciment, eau, sable et pierres concassées (gravier) en (Kg/m³).

ρ_c, ρ_e, ρ_s et ρ_g : masse spécifique ou masses volumique absolue de granulats avec un certain écartement des grains :

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_e) + E = [(Pg \times \alpha \times G/\gamma_g)]$$

Avec :

Pg : porosité des pierres concassées.

γ_g : masse volumique ou masse volumique apparente des pierres concassées en (Kg/l).

α : coefficient d'écartement des grains des pierres concassées, donné par le tableau.

Tableau II.29 : Valeurs du coefficient (α) en fonction du E/C et dosage en ciment.

Dosage en ciment (Kg/m ³)	E/C = 0.40	E/C = 0.50	E/C = 0.60	E/C = 0.70	E/C = 0.80
250	-	-	1.26	1.32	1.38
300	-	1.30	1.36	1.42	-
350	1.32	1.38	1.44	-	-
400	1.40	1.46	-	-	-
500	1.52	1.56	-	-	-
600	1.56	-	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations, on trouve l'expression qui permet de déterminer la qualité nécessaire de pierres concassées :

$$G = 1000 / [V_{pc} * (\alpha/\gamma_{vol.oc}) + (1/\rho_{pc})]$$

Avec :

$$V_{pc} = (1 - (\gamma/\rho))$$

e. détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en pierres concassées, on fait le calcul de la dépense en sable (Kg/m^3).

$$S = [1000 - [(C/\rho_c) + E + (P_c/\rho_{pc})] \cdot \rho_s$$

II.4.3 Calculs les composants :

1) Détermination Du Rapport (E/C) :

Les données :

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0.5) \quad \Leftrightarrow \quad C/E = R_b/A \cdot R_c + 0.5$$

Avec :

$R_b = 350$ bars classe du béton

$R_c = 425$ bars classe du béton

$D_{\max} < 20\text{mm}$

Affaissement $A = 6$ cm

2) Quantité D'eau :

Aff = 6, pierres concassés, $p < 20$

(D'après le tableau) $\Leftrightarrow E = 185$ L

$$E = 185 + 25 = 210 \text{ L} \quad \Leftrightarrow \quad E = 210 \text{ L}$$

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0.5) \quad \Leftrightarrow \quad C/E = R_b/A \cdot R_c + 0.5 \text{ pour } E/C < 2.5$$

$$E/C = 0.6$$

3) Quantité Du Ciment :

$$C = 350 \text{ Kg}/\text{m}^3 \quad (\text{D'après le tableau}) \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = 1.44$$

4) Quantité De Gravier :

$$G = 1000 / [(1 - \rho_{app}/\rho_{abs}) * \alpha / \rho_{app}] * 1 / \rho_{abs}$$

$$G = 1000 / [(1 - 1.44 / 2.67) * 1.44 / 1.44] * 1 / 2.67 = 1251.82 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

$$G= 1206.82\text{Kg/m}^3$$

5) Quantité De Sable :

$$S= [1000-\{C/ \rho_c +E/ \rho_e + G/ \rho_g\}]*\rho_s$$

$$S= [1000-(350 /3,1+210+1206,27 / 2,67)]*2,55=518,06 \text{ Kg/m}^3$$

$$S=605.35 \text{ Kg/m}^3$$

Pour 1 m³ de béton frais :

$$E=210 \text{ L}$$

$$C=350\text{Kg/m}^3$$

$$S=605.35\text{Kg/m}^3$$

$$G=1206,82 \text{ Kg/m}^3$$

➤ Volume de mélange d'essai, on prend 30% de gravier 8/15 et 70% de gravier 15/20 :

$$E=210 \text{ L}$$

$$C=350\text{Kg/m}^3$$

$$S=605.35\text{Kg/m}^3$$

$$G_{8/15}=402.14\text{Kg/m}^3$$

$$G_{15/20}= 804.23\text{Kg/m}^3$$

➤ Densité Théorique De Béton Frais :

$$\text{On a : } \Delta_o = (C+E+S+ G) / 1000 \quad (E \text{ ou } E_c)$$

$$\Delta_o=(350+210+605.35+1206,82) / 1000 = 1.29$$

➤ Volume De Mélange D'essais :

Pour coulage de 6 éprouvettes cubiques:

$$[(0,1 \times 0,1 \times 0,1) \times 6=0.001*0.2=2*10^3$$

Pour 0.0072 m² on prend

➤ Quantité des matériaux :

Tableau II.30: Proportions et composition des mélanges

Gravier (Kg/m ³)		Sable (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Eau (l)
8/15	15/20			
402.14	804.23	605.35	350	210

II.5 Matériels et essais :**II.51 Les essais sur le béton à l'état frais :**

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

II.5.1.1 Le malaxage : [NA EN 12390-2]

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- Introduire gravier 8/15, ciment, sable 0/5 et gravier 15/20.
- Malaxer pendant 1 min et 30 secs
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.
- Mesurer l'affaissement à chaque fois par le cône d'Abrams jusqu'à la valeur désirée visée.



Figure II.10 :Le malaxage de béton**II.5.1.2 Affaissement au cône d'abrams (slump test) : [NA EN 12350-2]**

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 25Coups 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.

Dans notre étude on a fixé l'affaissement à : Aff. Entre6 et 9cm.

**Figure II.11** : Affaissement au cône d'abrams

II.5.1.3 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.
- Pesez 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par peinture et conservées dans l'eau.



Figure II.12 : La Vibration

II.5.2 Les essais sur béton durci :

II.5.2.1 Durcissement de béton :

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

Il est 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.

II.5.2.2 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

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

II.5.3.1 Détermination de la résistance par les essais non destructifs :

Le béton est l'un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction, leur résistance a été considérée comme la qualité essentielle.

Le contrôle de la résistance des bétons est un problème de première importance pour les constructeurs, ils développent des méthodes et des matériels pour s'appuyer uniquement sur les essais non destructifs (ultrason, scléromètre).

Au moyen des essais non destructifs (ultrason, scléromètre), 7j, 14j, 28jours, on évalue l'effet des différents types de sable concassé sur la réponse mécanique d'un béton testé.

II.5.3.5 Ultrason :

L'essai pour but d'apprécier la qualité du béton d'un ouvrage sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage.

➤ Principe D'essai :

Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton, cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton à un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante.

➤ Principe De Fonctionnement :

L'ensemble électrique de l'auscultation permette de mesure le temps de passage des ondes ultrasoniques longitudinales à travers le béton.
L'appareil d'auscultation dynamique se compose de :

- L'instrumentation électrique logée dans un coffret métallique caractérisé par un appareil présentant sur la face (face utile) un affichage digital, ou on peut lire le temps de propagation des ondes mesurés en (μ s).
- Deux ondes : un émetteur ; et l'autre un récepteur de fréquence.
- Deux câbles pour le branchement des sondes.
- Une éprouvette cylindrique pour l'étalonnage.
- Un alimentaire en charge (batterie).

- On branche les deux sondes aux bornes de l'appareil à l'aide de câble.
- On fait l'étalonnage de l'appareil à une valeur de $42,5\mu$ s on enduit les deux faces de l'éprouvette étalon de « vaseline ».
- On frictionne sur ces deux faces les deux sondes pour éliminer les bulles d'air qui se forment entre la sonde et la face d'éprouvette.
- On vérifie que la valeur indiquée sur l'affichage digitale est la même que celle imprimée sur l'éprouvette étalon, connaissant la distance (d) parcourue par les ondes.
- On en déduit la vitesse égale à (d/t) exprimée le plus souvent en (Km/s)

➤ **Type De Mesures :**

Il existe trois types de mesures de la vitesse de propagation du son dans un corps :

- Transmission direct : le capteur est placé face à l'émetteur.
- Transmission semi-direct : Le capteur et l'émetteur sont placés sur deux faces adjacentes.
- Transmission indirect ou de surface : l'émetteur et le récepteur sont placés sur la même face de l'élément.

Après de vérifier le calibrage de l'appareil et de déterminer les points de mesure et par la transmission directe ont appliqué les essais sur chaque éprouvette, en appliquant les deux sondes suivant une configuration longitudinale puis on détermine le temps (t) en (μ s) de passage de l'ultrason dans le béton, ($V = d/t$) avec la formule :

$$R_u = K (\rho/g) v^4$$

R_u : Résistance d'ultrason.

K : constant (coefficient d'étalonnage).

ρ : Masse volumique (Kg/m^3).

g : $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$.

V : la vitesse d'ultrason



Figure II.13 : Essai l'ultrason [24]

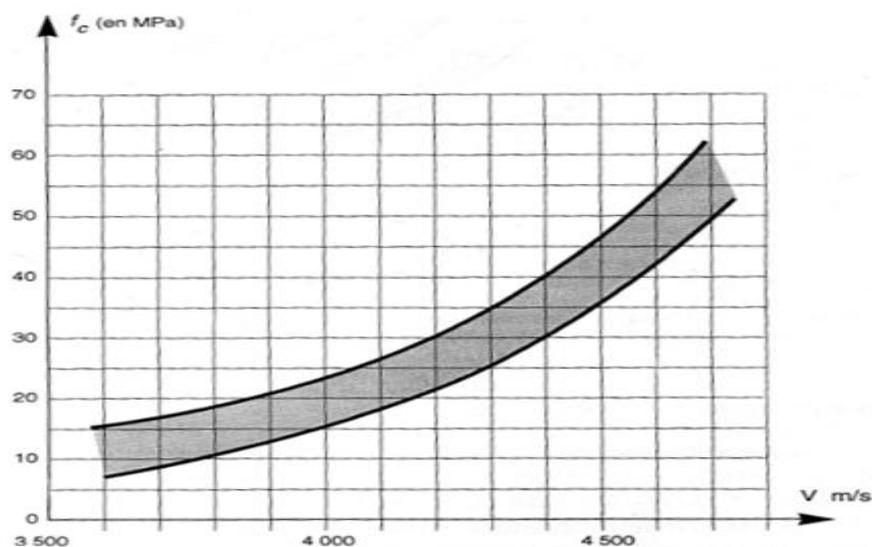


Figure II.14: Relation approximative entre la vitesse ultrason(en m/s) et la résistance en compression R_c (en MPa) [24]

II.4.3.6 Essai de dureté par rebondissement (scléromètre) : [NA EN 12504-2]

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique. Le marteau de Schmidt est le seul instrument connu qui utilise le principe du rebondissement pour les essais sur le béton.

➤ Principe de l'essai :

Une masse commandée par un ressort se déplace sur un plongeur dans un tube de protection. La masse est projetée contre la surface de béton par le ressort, et l'indice sclérométrique est mesuré sur une échelle. La surface sur laquelle l'essai est effectué peut être horizontale, verticale ou à tout autre angle, mais l'appareil doit être étalonné à la position où il sera utilisé.

➤ **Mode opératoire:**

On place l'éprouvette entre les plateaux de la presse et on applique la vitesse constante (0.5 MPa) jusqu'à la charge de 10KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal (10 coups).

La distance entre les points d'essai doit être au moins de (30mm), pour éviter l'influence du compactage superficiel du béton.

Pour chaque zone d'essai, on établit la moyenne des lectures au scléromètre après l'élimination des valeurs très faibles au très élevées.



Figure II.15 : Mesurer la dureté superficielle du béton

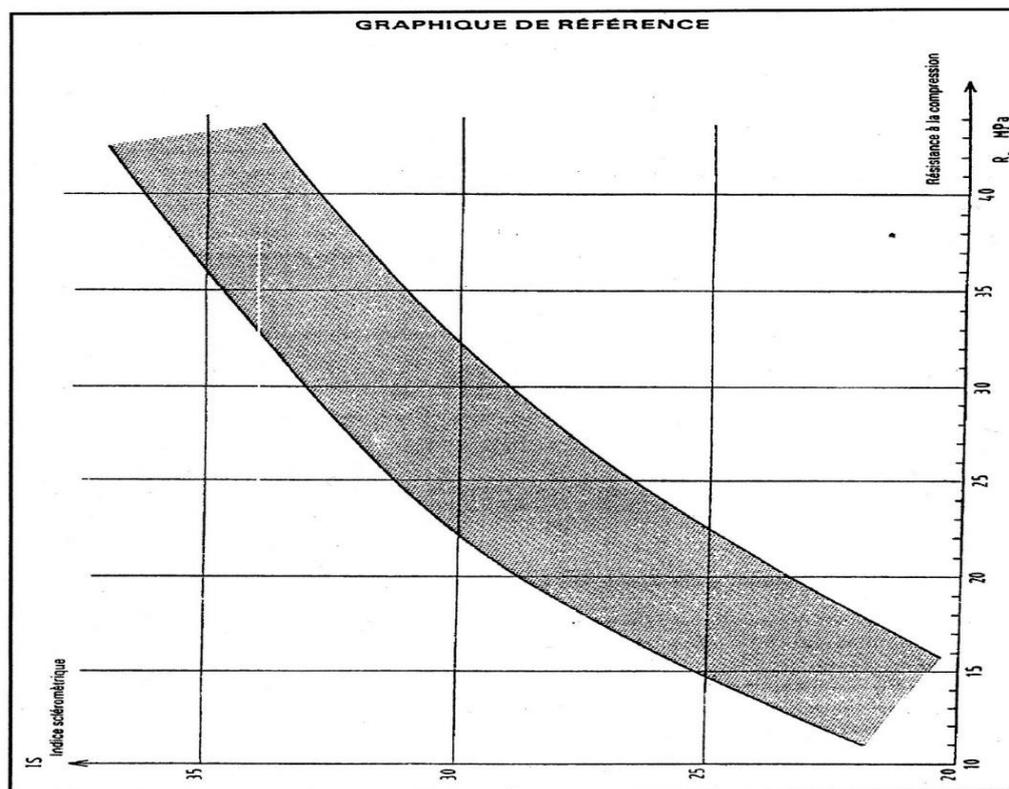


Figure II.16 : Etalonnage contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes

II.5.4.3.1.1 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 béton.

III.4.3.1.2 La presse hydraulique : [NA EN 12390-3]

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.



Figure II.17 : Presse hydraulique capacité 3000 KN

II.5.3.3 Essai d'écrasement [NA EN 12390-3] :

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000KN à une vitesse constante (0.5KN/S) des éprouvettes cubique de dimensions (10x10x10) cm. Celles-ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter

L'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

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 (mm^2).

II.5.3.4 Essais De Traction Par Flexion : [EN 12390-5] [23]

Le plus connus et le plus utilisé des trois essais (traction par fendage, directe par flexion) il permet de réduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent : la flexion. Il est pourtant nécessaire de se contenter d'un essai sur les éprouvettes dont le coté de la section carrée varie (8-10-16et 20) cm.

On place l'éprouvette prismatique [7x7x28]cm, sur les deux appuis, soumise à une charge P appliqué avec une vitesse constante jusqu'à la rupture :

$$R_t = 90 F / 2a^2$$

R_t : résistance à la flexion.

F : la charge de la rupture. La contrainte de Traction donnée par la relation :

$$\sigma_t = 3F / a^2 \text{Mpa}$$

Avec :

σ_t: Contrainte de traction.

F : la charge de rupture.

a : coté de rupture.



Figure II.18: Essais de traction par flexion

II.5.3.4 Essais de traction par fendage : [NA EN 12390-6]

La norme (EN 12390-6) précise en particulier les dispositions de mise en charge.

L'éprouvette est placée horizontalement entre les plateaux de la presse le contact des génératrices supérieure et inférieure avec les plateaux est assuré l'intermédiaire de bandes de mesure en contreplaqué.

La résistance à la traction par fendage est donnée par la formule suivante:

$$R_t = 2 P / \pi D L \quad (\text{en MPa})$$

Avec:

P : charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical en Newton.

D : diamètre de l'éprouvette en mm. L : hauteur de l'éprouvette en mm.

R_t : résistance à la traction en MPa.

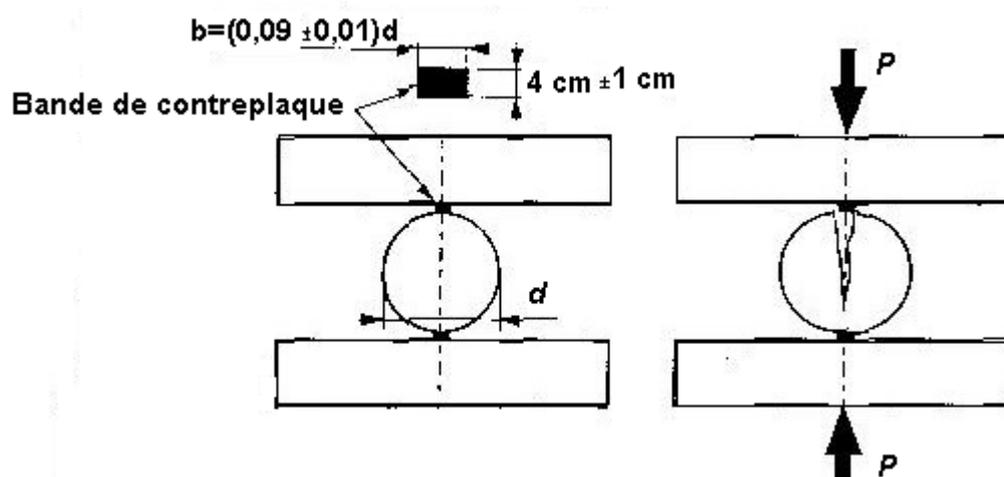


Figure II.19. : Essai de traction par fendage

II.5.3.4 Essai d'absorption d'eau par immersion :

Le principe de cet essai consiste à mettre les éprouvettes prismatiques dans l'étuve et de les peser jusqu'à poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant 24 heures (jusqu'à leur saturation) dans le but de calculer le volume des vides du béton.

II.6 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 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 :

- 5% d'acide chlorhydrique (HCL)
- 2.5% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
- 5% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
- 10% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
- 5% d'hydroxyde de sodium (NaOH).

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques 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 béton frais et durci que ce soit destructifs et d'écrasement ont été effectués.

CHAPITRE III:

ANALYSE ET

DISCUSSION DES

RESULTATS

III.1 Introduction :

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers et bétons confectionnés selon les différentes compositions mentionnées en détail dans le chapitre précédent. Ces résultats concernant en première partie le mortier, et en deuxième partie le béton. La résistance et l'ouvrabilité sont à étudier de pair, car ces deux propriétés sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus, qu'elles varient en sens inverses en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

On s'intéresse aussi, tout au long de ce chapitre à l'effet d'incorporation des ajouts de la Fumée de silice Pouzzolane et laitier sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons à l'état frais et durci à base de sable de démolition .

A l'issu de ces résultats, des discussions et des interprétations seront présentées au fur et à mesure.

III.2 Etude des mortiers :

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

Type de mortier (SN/SDB)	E/C	Quantité d'eau réellement utilisé (l/m ³)
100/0	0.50	250
70/30	0.60	300
50/50	0.62	310
30/70	0.65	325
0/100	0.68	340

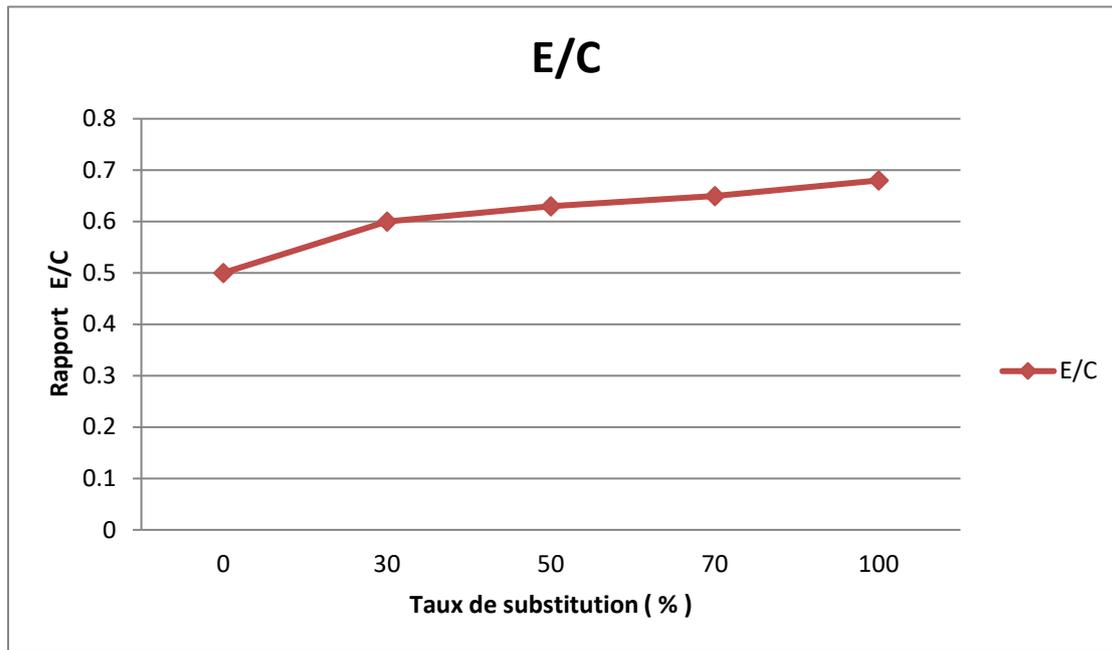


Figure III.1 : Evolution du rapport E/C des mortiers à base de sable de béton de démolition.

D'après le **tableau III.1** et la **figure III.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.

III.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.

III.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.

Tableau III.2 : Variation de la résistance à la compression des différents types de des mortiers.

Type de mortier (SN/SDB)	résistance à la compression					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	10.42	14.75	16.80	34.75	22.40	40.50
70/30	9.15	12.07	14.96	31.00	19.00	38.90
50/50	8.80	11.98	13.70	27.70	18.63	34.25
30/70	6.00	9.00	11.85	25.50	16.50	32.50
0/100	5.50	7.97	10.00	22.57	14.95	27.00

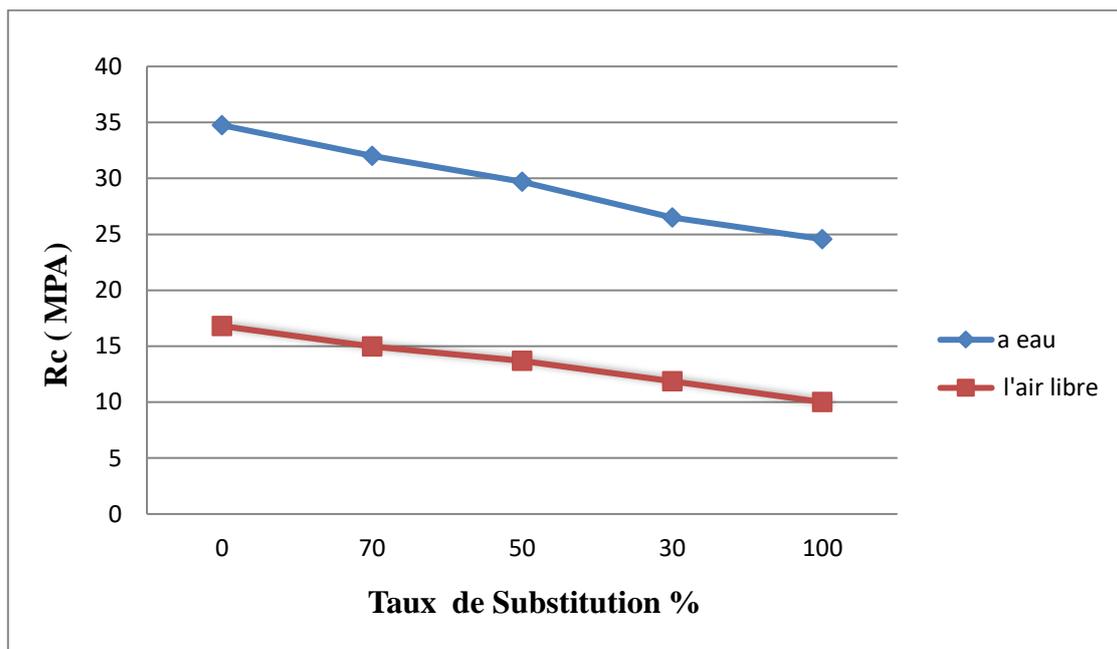


Figure III.2 : Variation de la résistance à la compression en fonction de milieu de conservation pour différents types des mortiers.

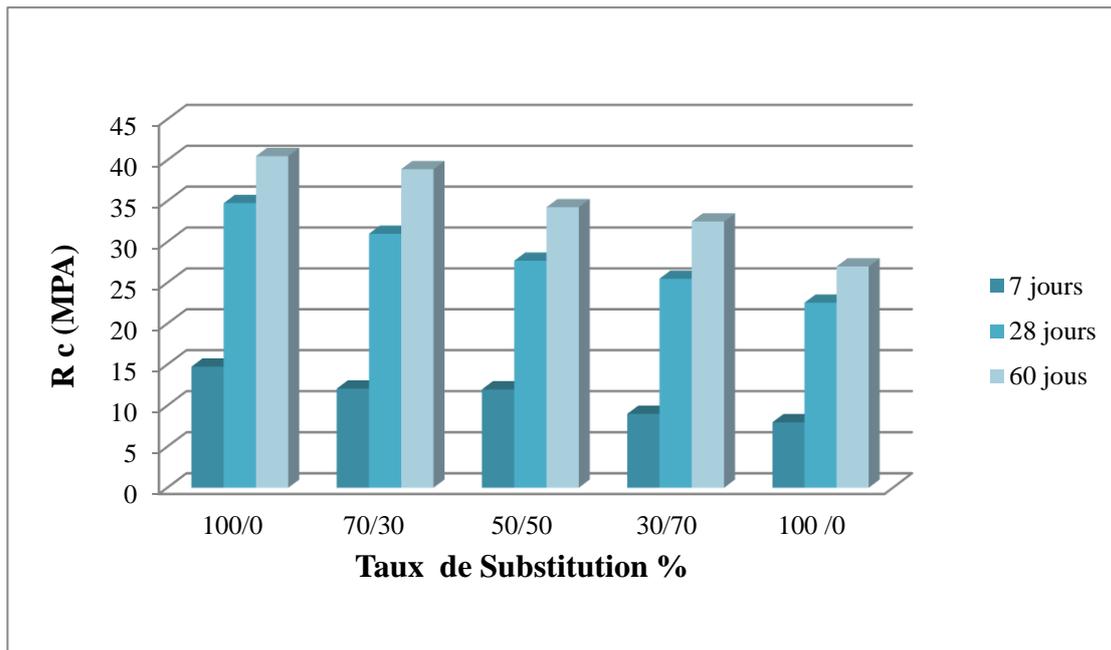


Figure III.3 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers.

D'après le **tableau III.2** et la **figure III.2**, **figure III.3** on remarque que :

1. la résistance à la compression est inversement proportionnelle au taux de substitution en sable à base de béton démolition quel que soit le milieu de conservation.
2. les mortiers à base des sables démolitions présentent des résistances à la compression plus faible par rapport aux mortiers témoin de l'ordre de 10 %.
3. On constate que les résistances à la compression 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.
4. la résistance mécanique à la compression augmente en fonction de l'âge de conservation.

III.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 (fume de silice, laitier et pouzzolane) ont été incorporé dans la meilleure composition soit 50/50.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau:

Tableau III.3 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un mortier.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance a la compression					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	10.42	14.75	16.80	34.75	22.40	40.50
50/50	8.80	11.98	13.70	27.70	18.63	34.25
50/50 + 5% D	8.55	11.05	14.17	30.10	19.10	38.00
50/50 + 8% D	10.00	13.53	16.45	32.65	22.55	41.25
50/50 + 15% Z	7.73	10.40	12.93	26.12	17.67	37.27
50/50 + 15% S	7.15	10.00	12.66	25.80	16.45	36.63

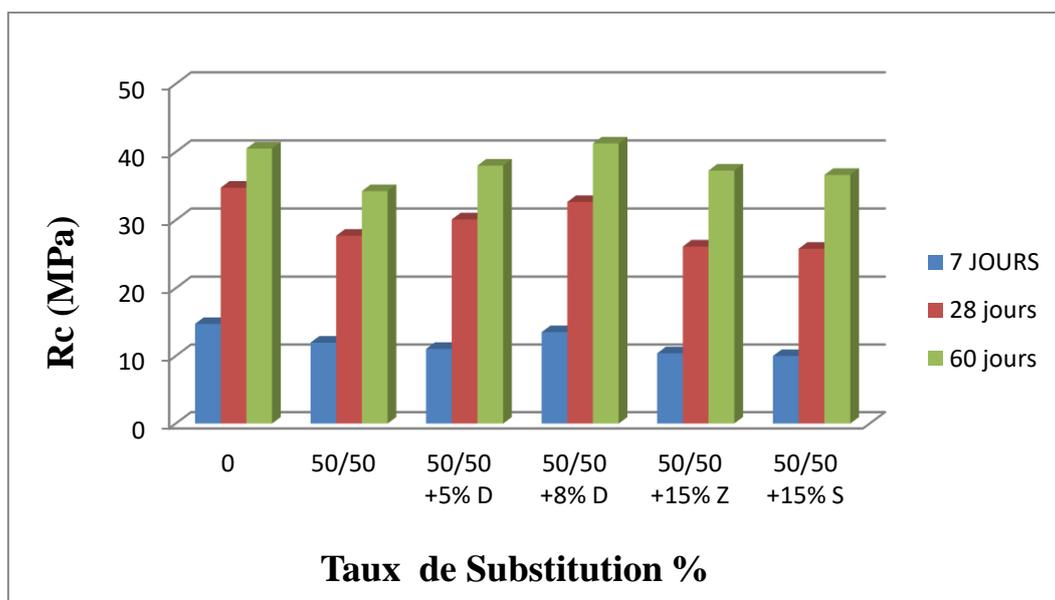


Figure III.4 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un mortier à base de 50% de déchet démolition en fonction de l'âge des mortiers.

D'après le tableau III.3 et les figures III.4. on voit:

- 1- la résistance à la compression est augmente en fonction de l'âge de conservation
- 2- la résistance mécanique à la compression à **60** jours avec **8%** de fume de silice est supérieure à celle du mortier témoin a l'ordre de **10 %** .
- 3- l'incorporation de l'ajout de **5%** de fume de silice et **15%** de pouzzolane et de laitier au béton à base de **50%** de déchet de démolition du béton démolition provoque une augmentation du résistance à la compression qui dépasse la résistance à la compression du béton à base de **50%** de sable démolition et plus proche à la résistance de béton ordinaire.

cela explique l'influence des ajouts minéraux dans l'amélioration de la résistance à la compression .

III.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 les tableaux suivants :

Tableau III.4 : Variation de la résistance à la traction par flexion des différents types des mortiers.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance à la traction par flexion(MPa)					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	3.97	4.50	5.47	7.00	7.95	10.50
70/30	2.86	3.90	4.80	6.80	7.13	9.92
50/50	2.47	3.53	4.26	6.50	6.93	8.63
30/70	1.95	2.85	3.95	5.85	6.70	8.25
0/100	1.40	2.41	3.37	4.30	5.83	7.03

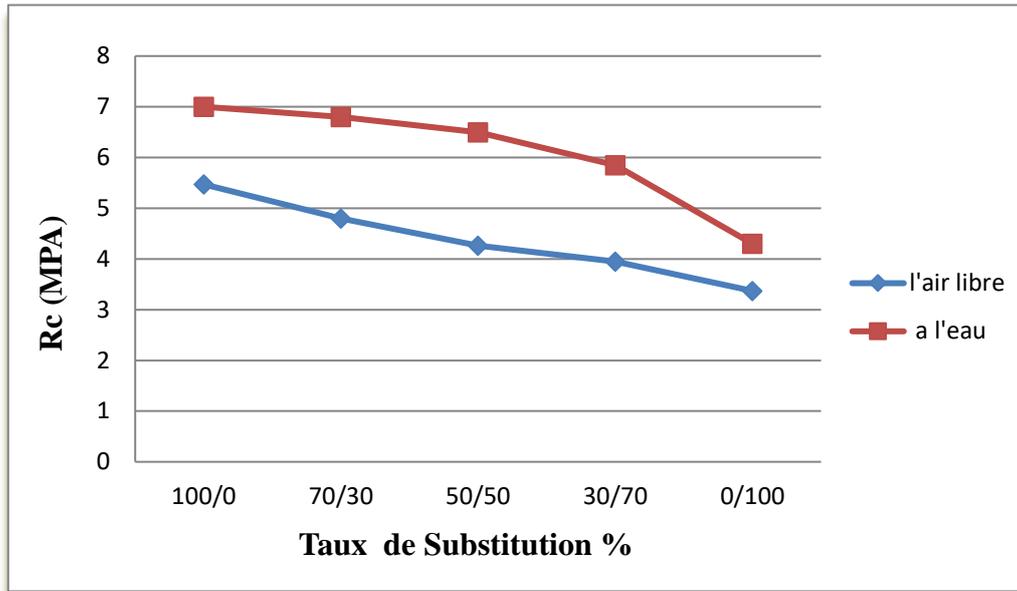


Figure III.5 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de milieu de conservation pour différents types des mortiers.

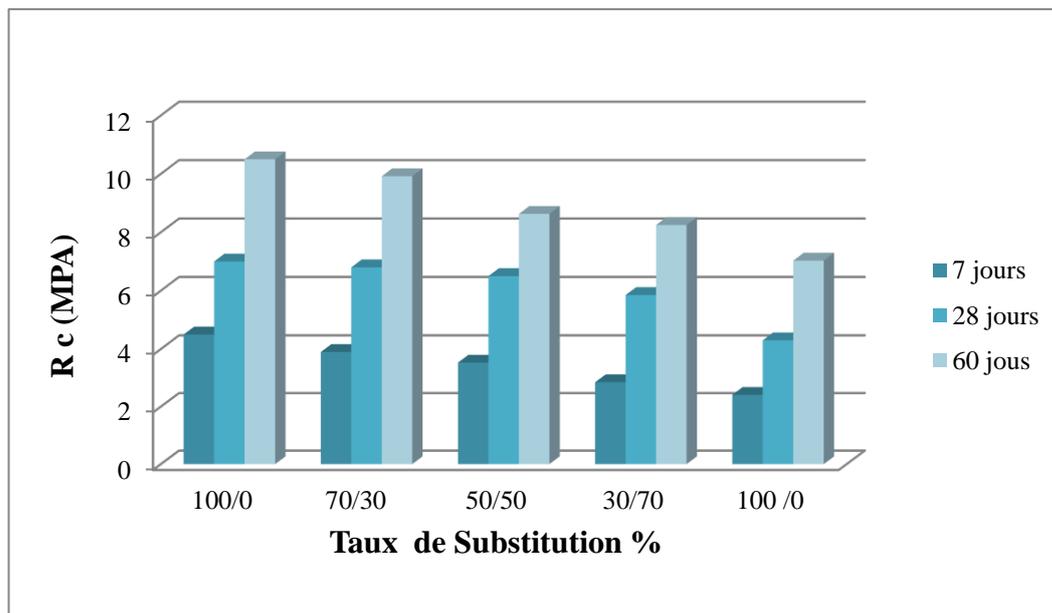


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour différents types des mortiers.

D'après les tableaux III.4 et la figure III.5, et III.6 On observe:

1. On constate que les résistances à la traction par flexion 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.
2. que les mortiers à base des sables démolitions présentent des résistances plus faible à la compression par rapport aux mortiers naturels qui nécessitent une augmentation du dosage et présentent un inconvénient du point de vue économique.

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

Tableau III.5 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion d'un mortier.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance à la traction par flexion(MPa)					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	3.97	4.50	5.47	7.00	7.95	10.50
50/50	2.47	3.53	4.26	6.50	6.93	8.63
50/50 + 5% D	2.35	3.45	4.18	6.66	7.10	9.10
50/50 + 8% D	3.00	4.15	4.87	6.93	7.75	10.52
50/50 + 15% Z	2.15	3.30	3.92	5.98	6.93	9.83
50/50 + 15% S	2.00	2.95	3.75	5.87	6.87	9.47

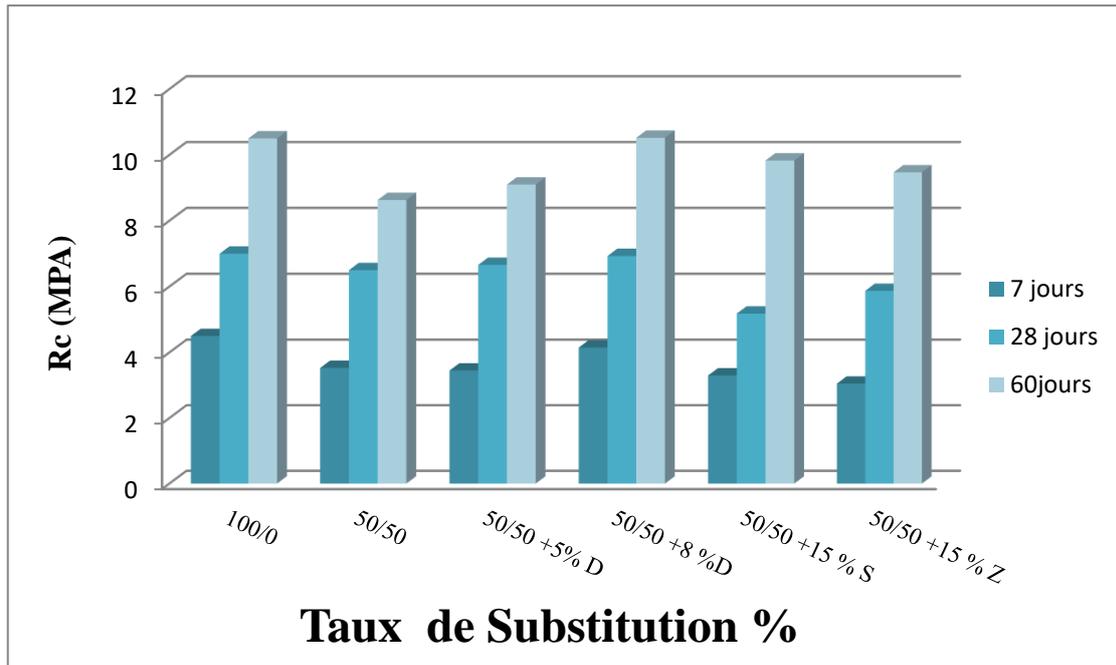


Figure III.7 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la traction par flexion d'un mortier à base de 50% de déchet démolition en fonction de l'âge des mortiers, (28jours) .

D'après le **tableau III.5** et les **figures III.7**, on remarque que:

1. l'ajout de 8% de fumée de silice a présente la meilleure résistance .
2. l'ajout de 15 % de laitier et pouzzolane améliore la résistance à la flexion des mortiers de l'ordre de 11 % et 10% respectivement.

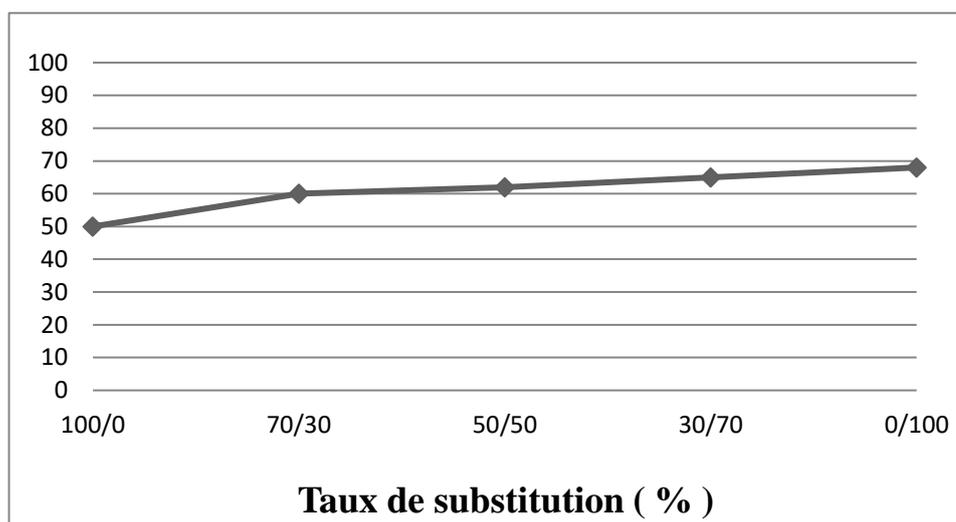
III.3 Etude des bétons :

III.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 III.6** :

Tableau III.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	0.50	210	5.50
70/30	0.60	220.5	5.80
50/50	0.62	236.25	5,5
30/70	0.65	246.75	6.00
0/100	0.68	260	6.00

**Figure III.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 III.6** et la **figure III.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.

III.3.1.2 La masse volumique

Tableau III.7 : Les masses volumiques à l'état frais est l'état durci.

Bétons (SN/ SDB) (%)	La masse volumique à l'état frais Kg/m3	La masse volumique à l'état durci Kg/m3
100/0	2470.55	2390.45
70/30	2420.23	2370.75
50/50	2380.45	2320.48
30/70	2329.61	2231.00
0/100	2313.75	2204.03
avec les ajouts (5%, 8%Fume de silice ,15%pouzzolane ,(15%), laitier)		
50/50 avec 5% Fume de silice	2385.45	2340.00
50/50 avec 8% Fume de silice	2397.00	2350.33
50/50 avec 15% Pouzzolane	2315..65	2275.00
50/50 avec 15% Laitier	2325.50	2290.5

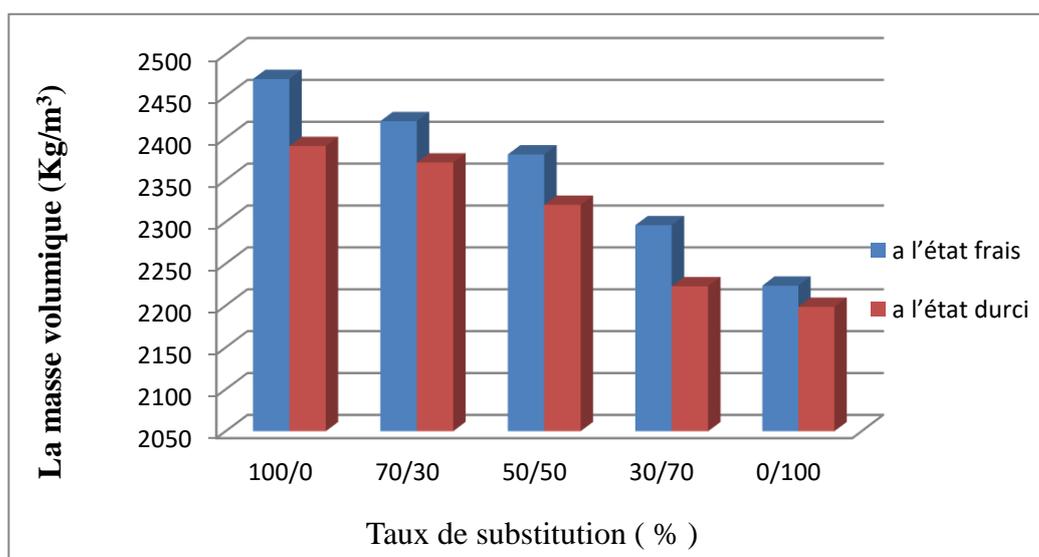


Figure III.9 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés .

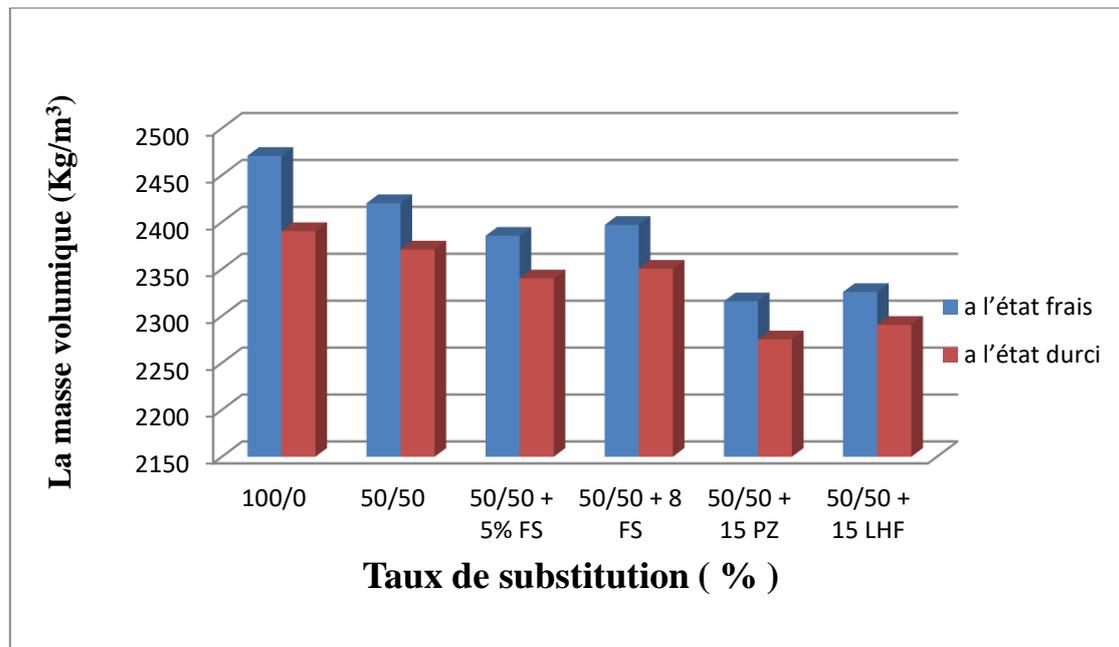


Figure III.10 : Densités des bétons en fonction des taux de substitution en granulats recyclés avec ajouts minéraux .

D'après le **tableau III.7** et la **figure III.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 :

1. Le béton ordinaire présente une densité égale à (2470.55 Kg/m^3), par contre le béton recyclé présente une diminution, ceci confirme les résultats trouvé par d'autres chercheurs ,et indique que le remplacement des agrégats naturels 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'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 III.7**) et ceci s'explique par l'air occlus autant élevé dans les bétons à base d'agrégats recyclés (granulats poreux).

Il est à noter que la densité du béton témoin est de 2390.45 kg/m^3 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 2204.03 kg/m^3).

La figure III.9 présente cette diminution qui est due principalement à la légère densité des agrégats recyclés de béton.

D'après la figure III.10. 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 (2275.00 Kg/m³ et 2290.5 Kg/m³).

III.3.2.2 La résistance à la compression des bétons :

La résistance à la compression a été mesurée à l'âge de 28 jours sur des cubes (10x10x10) cm³ de 100 mm d'arête selon la procédure de la norme NF P 18-406.

Dans le cadre de cette étude nous avons confectionné deux séries de béton, à base de sables de démolition , et un béton témoin.

nous avons varié le taux de substitution des sables naturels par des sables démolition de la manière suivante (0% ,30%, 50%, 70% ,100%) .

Le tableau III.8 regroupe les résultats de la résistance à la compression des différents mélanges.

Tableau III.8 : Variation de la résistance à la compression des différents types de des béton.

Type de mortier (SN/SDB)	Résistance à la compression (MPa)					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	19.47	32.57	35.45	53.50	42.73	66.73
70/30	17.95	30.20	34.55	46.25	40.58	63.25
50/50	16.55	29.15	33.47	44,35	37,30	59,30
30/70	14.20	27.26	32.00	42.65	36.65	47.65
0/100	13.05	23.05	31.95	40.30	33.13	44.27

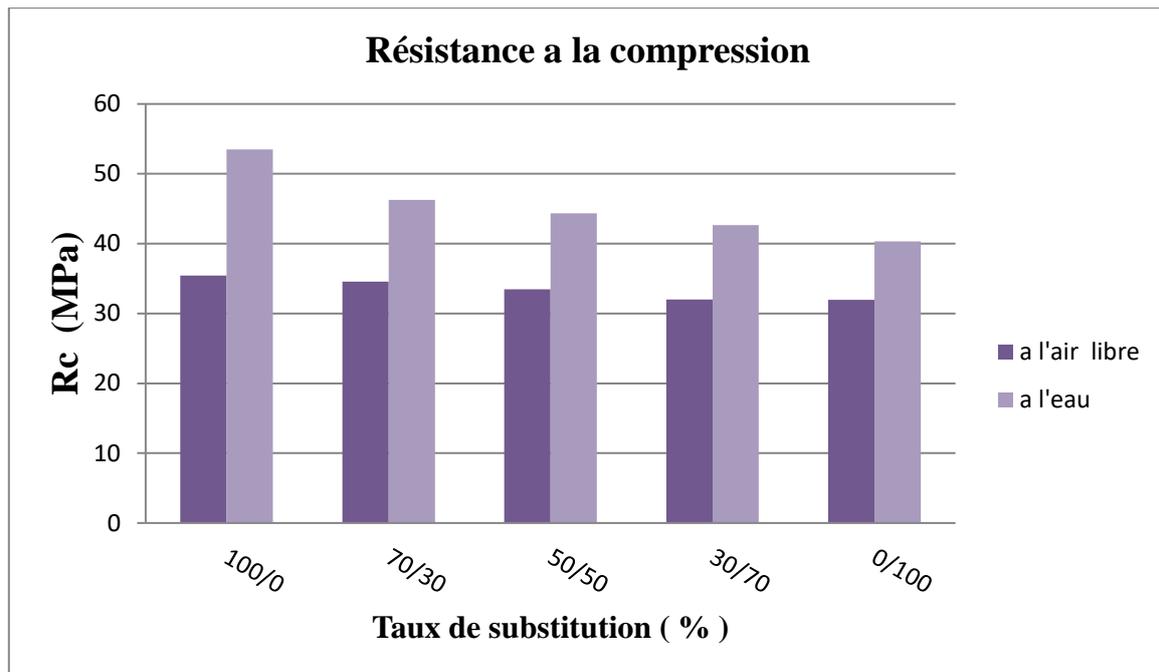


Figure III.11 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de substitution et milieu de conservation.

D'après le **tableau III.8** et la **figure III.11** on observe que:

1. La résistance mécanique augmente dans le milieu humide, du fait que ce dernier empêche l'évaporation de l'eau du béton durant son durcissement, et permet la continuité des réactions d'hydratation et par suite le développement de la résistance mécanique.
2. La résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du béton.
3. les bétons à base des sables recyclés présentent des résistances faibles à la compression que les bétons témoins (100% sable naturel) l'ordre de **4 % et 15 %**.
4. la chute de résistance diminue dès qu'en faisant augmenter le taux de substitution de sable quelque soit le milieu de conservation.

III.3.2.2.1 Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la compression.

Tableau III.9 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression
D'un béton.

Type de mortier (SN/SDB)	résistance à la compression (MPa)					
	7 jours		28 jours		60 jours	
	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau	à l'air libre	à l'eau
100/0	19.47	32.57	35.45	53.50	42.73	66.73
50/50	16.55	29.15	33.47	44,35	37,30	59,30
50/50 + 5% D	16.43	28.90	33.26	45.90	38.15	64.90
50/50 + 8% D	18.75	32.30	37.00	54.30	41.00	67.47
50/50 + 15% Z	14.56	23.03	28.75	45,30	36.56	62.95
50/50 + 15% S	13.20	21.97	26.50	43,67	35.37	61.00

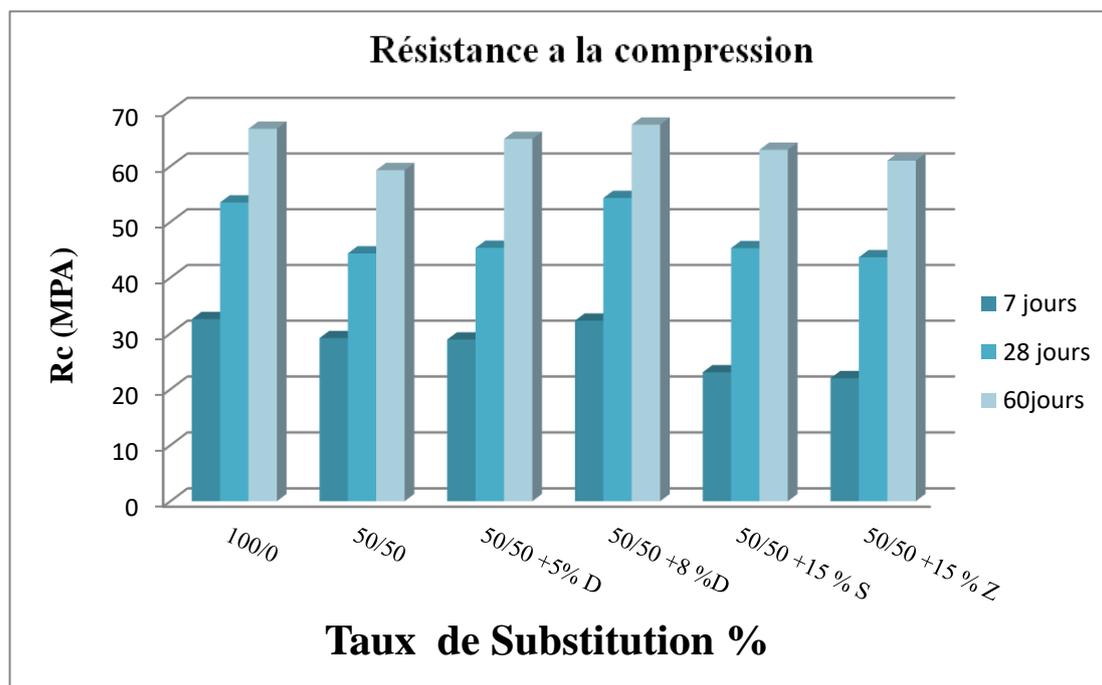


Figure III.12 : Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression d'un béton à base de 50% de sable démolition en fonction de l'âge des bétons.

D'après le **tableau III.9** et les **figures III.12**. On remarque que :

1. l'incorporation de l'ajout de 8% de fume de silice au béton à base de 50% de sable de démolition du béton concassé provoque une augmentation du résistance à la compression qui dépasse la résistance à la compression du béton ordinaire a 60 jours.
2. l'incorporation de l'ajout de 5% de fume de silice et 15% de pouzzolane et de laitier au béton à base de 50% de déchet de démolition du béton concassé provoque une augmentation du résistance à la compression qui dépasse la résistance à la compression du béton à base de 50% de sable de démolition et plus proche à la résistance de béton ordinaire.
3. Le béton à base de **8%** de fumée de silice a développé la meilleure résistance à toutes les échéances testées.

III.3.2.2 Résistance à la flexion des bétons :

Dans cet essai un prisme de béton non armé de (10x10x40) cm³, est soumis à un effort de flexion jusqu'à la rupture d'une charge en deux points symétriques , Les points d'application de la charge étant placés aux tiers de la portée (voir figure **IV.13**).

La contrainte maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspondant à la résistance à la flexion est donnée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{1.8F}{a^2} (MPA)$$

F : la charge de rupture.

a : cote de la section carrée de l'éprouvette.

Dans le cadre de cette étude, cet essai a été effectué sur les meilleures compositions des bétons à base d'agrégats recyclés qui font l'objet de cette étude, après 28 jours de cure dans l'eau à 22°C, les résultats sont portés sur le **tableau III.10**.



Figure III.13: rupture des éprouvettes « essais de flexion »

Tableau III.10: La résistance à la flexion des bétons testés.

Type de béton SN/SDB	Résistance à la flexion (MPa)	%
100/0	3.05	100
70/30	2.87	94.09
50/50	2.73	89.50
30/70	2.45	80.32
0/100	1.97	64.60

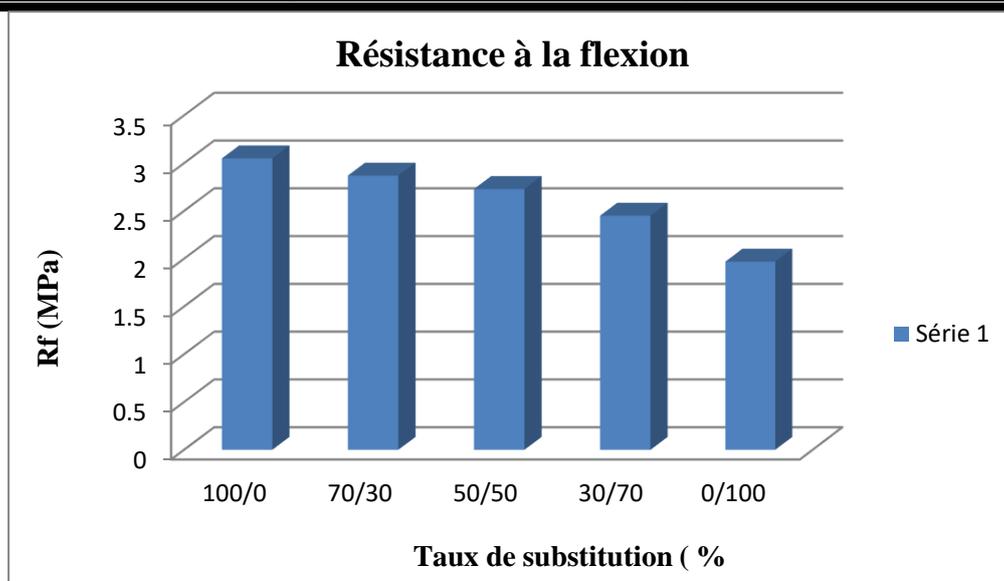


Figure III.14 : La variation de la résistance a la flexion en fonction de l'âge pour différents types des bétons.

D'après le tableau III.10 et la figure III.14 nous remarquons que :

Les résistances à la flexion des bétons de démolitions sont inférieures à celle du béton ordinaire, la chute de résistances est entre :7% et 33%.

Cette réduction de résistance peut se justifier par la présence de l'ancien mortier collé à la surface des granulats issus du concassage du béton de démolition causant une faible adhérence.

III.3. 1 Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la flexion:

Tableau III.11 : L'effet des ajouts minéraux sur la résistance à la flexion
D'un béton.

Type de béton SN/SDB	Résistance à la flexion (MPa)	%
100/0	3.05	100
50/50	2.73	89.50
50/50 +5% D	2.76	90.49
50/50 +8% D	2.85	93.45
50/50 +15% Z	2.41	79.02
50/50 +15% S	2.35	77.05

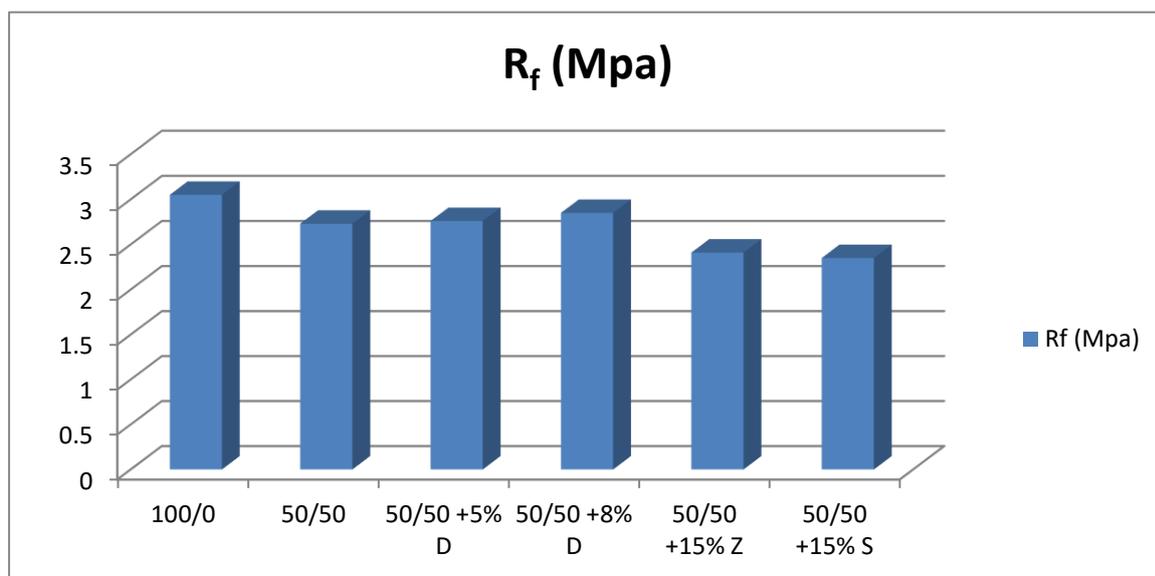


Figure III.15 : Effets d'ajouts minéraux sur la résistance à la flexion d'un béton à base de 50% de sable démolition en fonction de l'âge des bétons.

D'après le **tableau III.11** et les **figures III.15**. On remarque que :

1. Le béton à base de **8%** de fumée de silice a développé la meilleure résistance.

III.3.2.2 La résistance a la traction par fendage :

Afin de déterminer la résistance en traction du matériau, l'essai Brésilien (ASTM C 496) a été utilisé. Il consiste à appliquer une charge sur un cylindre de béton couché de manière à le diviser en deux prismes semi-circulaires (**voir photo III.2**). **La figure III.16** montre la répartition des contraintes dans la section de béton de même que l'équation servant à déterminer la résistance en traction du matériau.

$$f_{ij} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

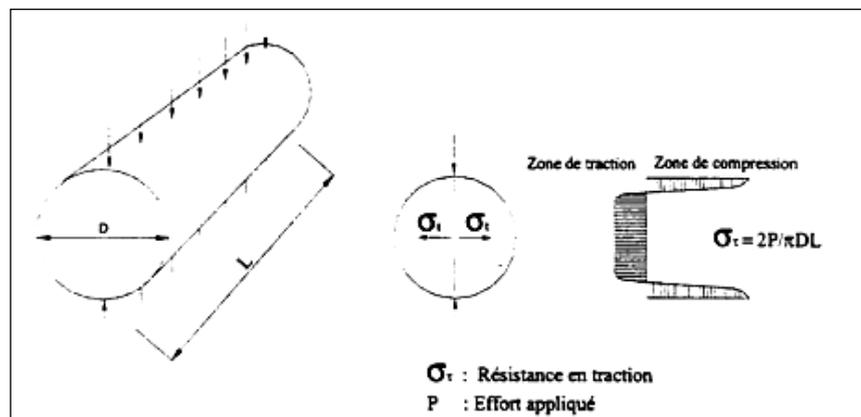


Figure III.16: Distribution des contraintes lors de l'essai Brésilien.



Figure III.17: rupture des éprouvettes « l'essai brésilien »

Tableau III.12 : La résistance à la traction des bétons testés.

Type de béton SN/SDB	Résistance à la traction (MPa)	%
100/0	3.35	100
70/30	3.07	91.64
50/50	2.85	85.07
30/70	2.50	61.19
0/100	1.93	57.62

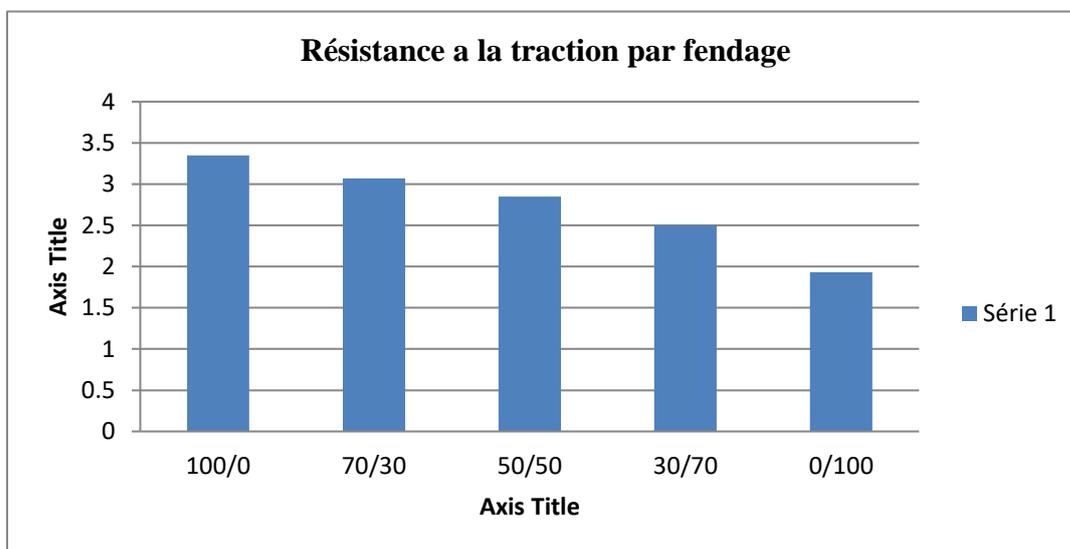


Figure III.18 : Évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons testés.

D'après le tableau III.12 et la figure III.18 On remarque que :

1. La résistance à la traction décroît avec l'augmentation du pourcentage de substitution en sable de démolition d'une manière analogue à celle observée pour la résistance à la compression.
2. La chute de résistance à la traction est de l'ordre de **8 %** pour le béton à base de **30%** sable de démolition et de **42 %** pour le béton à base de **100%** sable de démolition.

III.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

$$\text{masse (\%)} \text{ est : } A = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \times 100$$

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 III.13**

Tableau III.13 : Absorption d'eau par immersion à l'état durci des bétons.

Type de béton SN/SDB	M sat (g)	Msec (g)	Absorption d'eau %
100/0	2441	2370	3.00
70/30	2420	2345	3.20
50/50	2370	2265	4.04
30/70	2329	2231	4.39
0/100	2310	2204	4.80

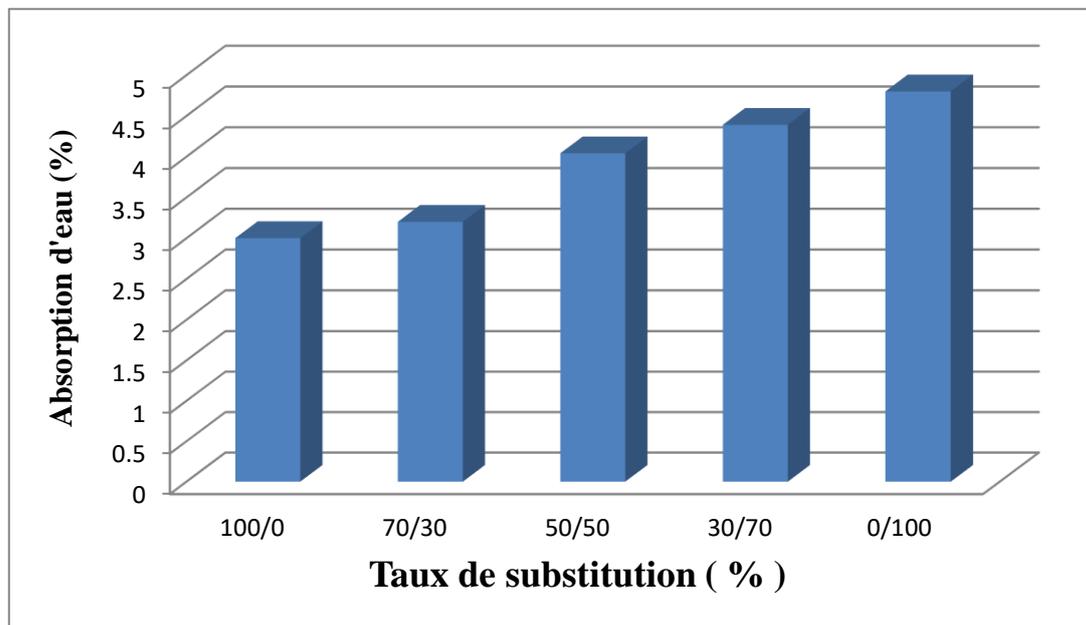


Figure III.19 : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types des bétons.

Le **tableau III.13** et la **figure III.19** ci-dessus, permet de constater que le taux d'absorption d'eau des bétons à base des sables de démolition est supérieur au taux d'absorption de béton témoin. Il est nettement visible que les bétons à base sable de démolition est plus poreux et absorbent plus d'eau.

III. 3.2.7 Perte de masse :

On a réalisé des éprouvettes ((7x7x28) cm³ 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'air, les cube sont pesées pour déterminer M1,M2 .

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

Tableau III.14: Perte de masse des bétons.

Type de béton	Perte de masse (kg /m ³)							
	à l'air libre				dans l'eau			
	7 j	28j	60j	%	7 j	28j	60j	%
100/0	3200	3197	3191	-0.28	3211	3305	3301	0.27
70/30	3187	3179	3176	-0.34	3192	3197	3203	0.34
50/50	3171	3165	3158	-0.40	3182	3191	3196	0.45
30/70	3120	3117	3107	-0.42	3134	3143	3150	0.50
0/100	3000	2996	2987	-0.44	3017	3025	3036	0.62

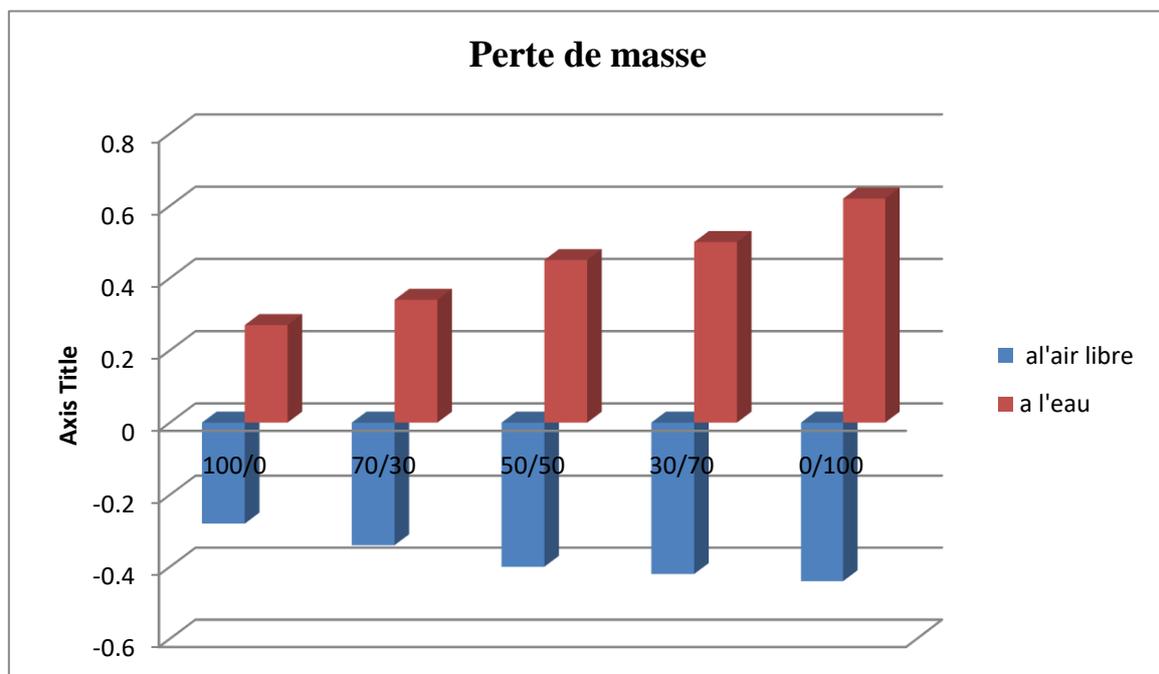


Figure . III.20 : Perte de masse des bétons .

D'après le **tableau III.14** et la **figure III.20**, on remarque que les bétons des sables des démolitions ont des pertes de masses faibles de l'ordre de 0.2 à 0.5 % ce qui permet d'utiliser ces sables de démolition dans le béton hydraulique.

III.16 .2.2. Contrôle non destructif (scléromètre, auscultation dynamique)

Afin de tester les bétons à base de sables recyclés, nous avons mené des essais in situ concernant le contrôle non destructif de la qualité des bétons recyclés en comparant leurs résistances estimées par le scléromètre et l'auscultation sonique à celles déterminées par l'écrasement direct. Les essais ont été effectués sur trois éprouvettes de bétons recyclés à base de 50% de sable de démolition béton concassé et de brique concassée.

Le tableau 4-26 regroupe les résultats des deux essais qui montrent une réduction de la résistance à la compression estimée autant par le scléromètre que par l'auscultation sonique de l'ordre de 6% par rapport aux bétons ordinaires. Nous pouvons conclure, d'un autre côté que la présence des sables recyclés provenant du béton démolé ou des briques concassées comme sable dans le mélange de béton ne fait pas changer le comportement de béton vis-à-vis des ondes soniques.

Tableau III.15: Résistance à la compression par essais indirects (Scléromètre et Auscultation sonique).

Type de béton	Ultrason (L= 200mm)		Scléromètre	
	T (µs)	V (Km/s)	Is	Rs (MPA)
100/0	66.5	4.81	43	66.73
70/30	72.7	4.40	37	63.25
50/50	70.5	4.53	35	59,30
30/70	72.6	4.40	33	47.65
0/100	76.5	4.18	32	44.27

III.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 granulats recyclés.

III.4.1.1 La perte de masse

On a réalisé des éprouvettes (10x10x10) cm³ avec des différents taux de substitutions du sable (0%, 50%, et 100 %) et (50/50+5%D, 8%D, 15%Z, 15%S), 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 :

1. 10 % d'acide sulfurique (H₂SO₄).
2. 5% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
3. 2.5% d'acide sulfurique (H₂SO₄).
4. 5 % d'acide chlorhydrique (HCL)
5. 5% d'hydroxyde de sodium (NaOH).

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.

Perte de masse (%) = [(M1-M2)/M1] x100 [76]

Avec M1, masse de l'éprouvette avant immersion

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

III.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 ($10 \times 10 \times 10$) cm³. Le durcissement étant en conditions naturelles (cure dans l'eau) pendant 28 jours, puis les bétons durcis sont immergées séparément pendant 60 jours dans les solutions suivantes : H₂SO₄ (10 %), H₂SO₄ (5%), H₂SO₄ (2,5%), HCL (5%), NaOH (5 %).

Les résultats de mesure de PH sont représentés le **tableau III.16**

Tableau III.16 : PH des différents milieux agressifs.

Les milieux agressifs	H ₂ SO ₄ (2.5 %)	H ₂ SO ₄ (5 %)	H ₂ SO ₄ (10 %)	HCL (5 %)	NaOH (5 %)
2 jours	1.70	0.95	0.55	3.24	13
7 jours	2.45	1.20	0.62	4.95	13.05
14 jours	3.38	1.95	0.98	5.30	13.20
28 jours	3.40	2.65	1.40	8.68	13.36
60 jours	3.77	3.37	2.02	9.45	13.60

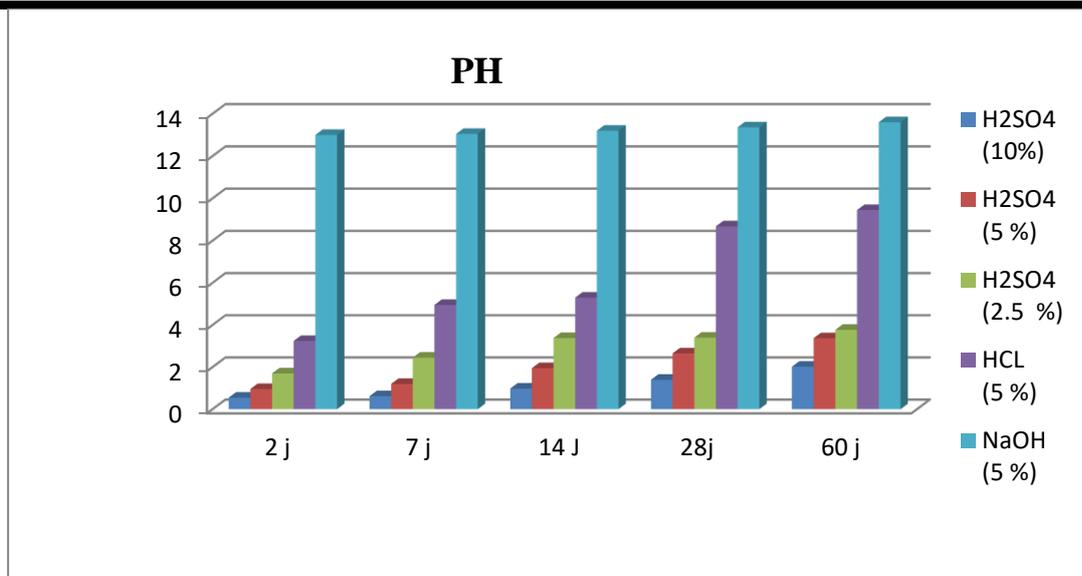


Figure III.21 : Variation de PH en fonction.

Tableau III.17: Perte de masse des bétons conservée dans les milieux agressifs.

Type de béton SN/SDB	H ₂ SO ₄ (10%)	H ₂ SO ₄ (5 %)	H ₂ SO ₄ (2.5 %)	HCL (5 %)	NaOH (5 %)
100/0	8.03	5.39	4.08	2.40	1.68
50/50	9.55	6.07	4.61	3.77	2.53
0/100	11.14	7.83	5.15	4.60	3.18
50/50 + 5% D	9.00	5.74	4.37	3.26	2.13
50/50 + 8% D	8.31	5.55	4.13	2.54	1.76
50/50 + 15% Z	9.13	5.83	4.49	3.55	2.35
50/50 + 15% S	9.22	5.90	4.50	3.67	2.46

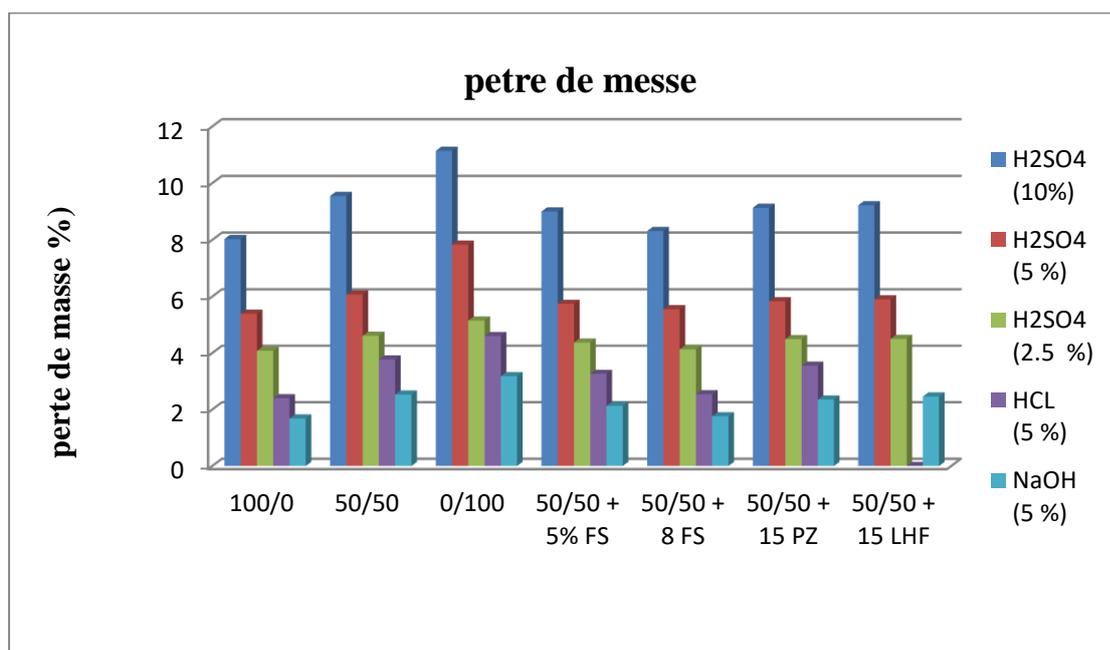


Figure III.23 : Petre de masse en fonction de milieu de conservation pour différents types des bétons

D'après le tableau III.17 et la figure III.23 On voit que:

- qui indiquent la perte de masse des différents bétons étudiés on note que : les solutions H₂SO₄ (10% et 5%) ont grandement affecté le béton par rapport aux autres solutions NaOH, H₂SO₄ (2,5%) et HCL .



Figure. III.24: Essai de compression.

Tableau III.18 : Effets des milieux agressifs sur la résistance à la compression.

Type de béton SN/SDB	Témoin	H ₂ SO ₄ (10%)	H ₂ SO ₄ (5 %)	H ₂ SO ₄ (2.5 %)	HCL (5 %)	NaOH (5 %)
100/0	53.50	23.35	26.50	37.00	35.60	48.60
50/50	44,35	18.75	23.85	33.00	30.50	38.60
0/100	40.30	12.47	19.75	29.15	20.40	33.19
50/50 + 5% D	53.90	23.00	26.85	37.15	35.73	49.50
50/50 + 8% D	54.30	23.18	27.03	37.47	36.00	50.50
50/50 + 15% S	49,75	21.10	25.35	36.00	34.15	42.17
50/50 + 15% Z	48,20	20.9	24.70	35.45	33.07	39.65

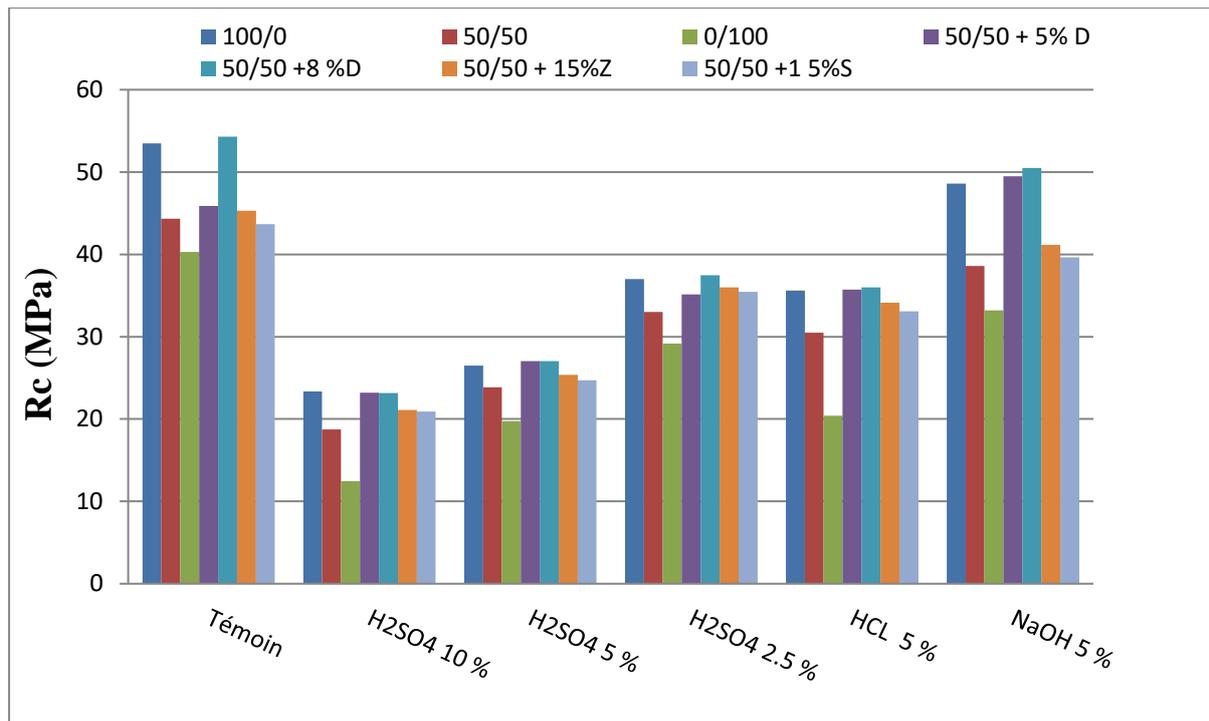


Figure III.25 : Effet des milieux agressifs sur la résistance à la compression des bétons

D'après le **tableau III.18** et la **figure III.25** On voit que:

1. la résistance des bétons conservés dans les milieux agressifs est faibles que les bétons témoins.
2. L'ajout de la fumée de silice au béton augmente sa résistance.
3. Le béton avec fumée de silice résiste mieux aux agressions chimique par rapport au béton sans ajout par ce que la silice amorphe est très réactive et que la petitesse des particules ($15\text{m}^2/\text{g}$) accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment portland en outre, les très petites particules de la fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides.

Tableau III.19: Perte de résistance des bétons conservée dans les milieux agressifs.

Type de béton SN/SDB	Témoin	H ₂ SO ₄ (10%)	H ₂ SO ₄ (5 %)	H ₂ SO ₄ (2.5 %)	HCL (5 %)	NaOH (5 %)
100/0	53.50	56.35	44.46	29.00	40.45	9
50/50	44,35	57.72	46.22	28.59	43.22	12.93
0/100	40.30	69.05	50.99	30.66	49.93	17.64
50/50 + 5% D	53.90	55.32	42.22	26.07	33.71	8
50/50 + 8% D	54.30	52.31	40.22	24.99	30.70	6
50/50 + 5% S	49,75	54.58	45.04	25.63	31.35	15
50/50 + 5% Z	48,20	53.63	45.75	25.45	31.13	17.73

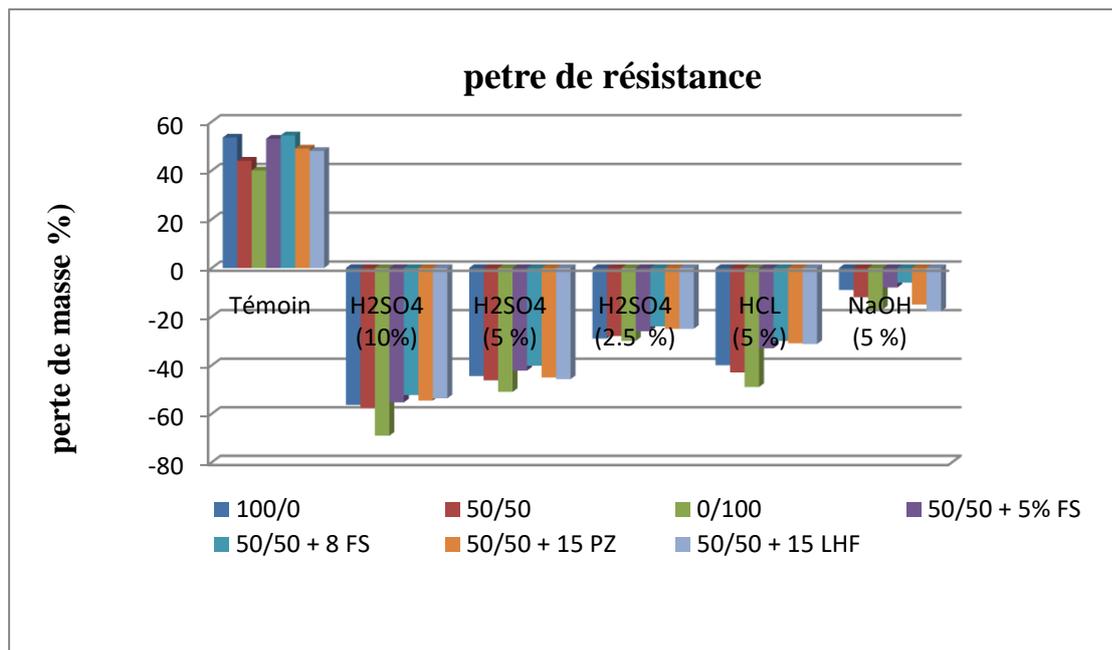


Figure III.26 : Perte de masse en fonction de milieu de conservation pour différents types des bétons

III.6 Conclusion :

Le but de notre travail a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de l'utilisation du sable des démolition comme substitution au sable naturel pour la fabrication du béton ainsi que l'effet des ajouts minéraux (pouzzolane, laitier et fume de silice) sur les propriétés mécaniques et rhéologiques de ce genre du béton. L'étude présente une démarche expérimentale visant à déterminer les performances des types du béton composé à base de différents types du sable de carrières dans le but de tenter de comprendre les influences de substitution du sable naturel par le sable des carrières sur les différentes caractéristiques du béton. Les influences sur l'ouvrabilité, l'absorption, la résistance à la compression et la résistance à la traction sont les paramètres retenus dans cette étude.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1- Conclusion générales

Ce mémoire avait pour but d'étudier le comportement des granulats recyclés, issus du concassé de béton de maçonnerie. 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 et peut atteindre une augmentation de 10 à 20%.
 - ☞ Le rapport E /C des différents mélanges de bétons est élevé allant de **0.50 à 0.68** et qui varie dans le même sens que le taux de substitution en granulats recyclés.
 - La grande faiblesse des bétons conçus avec des granulats recyclés est principalement au niveau de la résistance à la compression, pour des mélanges **100%** sable de démolition ,une chute de résistance a été observée allant de **6 à 22%**, 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 des ajouts minéraux actifs dans les bétons à base de 50% de déchet 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.
-

2- Recommandations

☞ L'utilisation de la fumée de silice 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.

☞ Etudier la microstructure des bétons à base des agrégats recyclés.

REFERENCE BIBLIGRAPHYQUES

- [1] : MEHU, J. ET PERRODIN, Y. Etude comparative et critique des normes et procédures Retenues au plan international pour évaluer le potentiel polluant de déchets solidifiés. 128p, Villeurbanne (Fr) 1991.
- [2] : SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001. LEROY. JB., 1997. Les déchets et leurs traitement : les déchets solides industriels et ménagers. Edition : Presse Universitaires de France, Paris, 3ème édit. 127 p.
- [3] : Journal officiel de la république algérienne n°27 :4 rabie el aoul 1426 13 avril 2005.
- [4] : FNADE : Muriel Morcet (mmocet @ cgea.Fr). Éco- profil du stockage des déchets dangereux en sites collectifs en France.
- [5] : Dahir n ° 1-06-153 du 30 chaoual 1427 portant promu légation de la loi n ° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination. (B.O. n ° 5480 du 7 décembre 2006).
- [6] : Catherine Fantozzi-Merk, Thèse en sciences et Technique du déchet, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003 .
- [7] : Léon crambade (vers une meilleure gestion des déchets industriels commission de développement durable). Année 2012.
- [8] 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)
- [9] SENES 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.
- [10] Mémoire de fin d'étude : « Caractérisation des bétons à base des sables de démolition (recyclés) ». Année 2011/2012. Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [11] 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.
-

REFERENCE BIBLIGRAPHYQUES

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] The state of Garbage in America. Biocycle. December 2008.
- [15] Gestion des déchets du BTP en Basse-Normandie, 2008.
- [16] European Aggregates Association (UEPG) (2007), basé sur des estimations faites par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) et l'Ademe.
- [17] 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.
- [18] Tam V. W.Y. (2009). *Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries*. Journal of Cleaner production, 17(7), p. 688-702
- [19] Arrête préfectorale N° 119/2005 DDE du 2 mai 2005 : « Plan départemental de gestion des déchets du BTP des Vosges ».
- [20] Maël J, « valorisation des déchets inertes du BTP, suivant le principe d'écologie industrielle et territoriale », mémoire master 2, université de Sherbrooke. Janvier 2015.
- [21] H. DJELAL & V. NOUVEL, « Gestion des déchets de démolition et environnement », XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).
- [22] Ahmed ADDOU traitement des déchets valorisation, élimination. Ouvrage édition.
- [23] : ESABILLE MARTIN et LAURENT CHATEAU Stabilisation /Solidification – Stockage de déchet dangereux, décembre 2006.
- [24] Debieb.F : « Valorisation de déchet de brique et béton de démolition comme agrégat de béton ». Thèse de magister université de Blida. Année 1999.
- [25] : SAADANI Sabrina (comportement des bétons à base de granulats recyclés) Université Mentouri Constantine.année 2010.
-

REFERENCE BIBLIGRAPHYQUES

- [26] Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009; 21(10): 601-611.
- [27] Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M., Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement Concrete Research*, 2005;35(6):1195-1203.
- [28] Buck, A. D., Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal*, 1977; 74(5):212-219.
- [29] Rao, A., Jha, K. N. et Misra, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007; 50(1):71-81.
- [30] Chen H-J, Yen T, Chen K-H (2003) Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1):125-132.
- [31] De Juan MS, Gutiérrez PA, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(2):872-877.
- [32] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 2009; 23:829-836.
- [33] Ferreira L, de Brito J, Barra M., Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *magazine of concrete research*, 2012;63(8):617-627.
- [34] ASTM C-33, Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [35] Corinaldesi V, Moriconi G, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(8):2869-2876.
- [36] L. Butler, J.S. West, S.L. Tighe, The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 2011 ;41:1037-1049.
- [37] Hansen, T. C. and Narud, H., Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *concrete international*, 1983; 5(1):79-83.
- [38] Tam, V. W. Y. et Tam, C. M., Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 2007; 42(10): 3592-3602.
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHYQUES

- [39] Liam Butler, Jeffrey S. West, Susan L. Tighe, Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Construction and Building Materials*, 2013; 47 :1292-1301.
- [40] Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(2): 1163-1167.
- [41] Gomez-Soberon JMV, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and Concrete Research*, 2002; 32(8):1301-1311.
- [42] Holcim (2010). *Granulats pour aménagements décoratifs* (Fiche informative).
Holcim granulat, France, 2p.
- [43] A.TAGNIT et P-CNKINAMUBANZIB.les ajouts cimentaires et le développement durable. département de génie civil. Université de Sherbooke
- [44] Dupain .R, R. Lanchon & J.C. Saint –Arroman : «Granulats, sols, ciments et Bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». Edition Casteilla. 1995.
- [45] Dreux .G & J. Festa: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition. Eyrolles. Mai 1998.
- [46] Kobayashi K, Uno Y: “ Influence of alkali carbonation of concrete . 2. Influence of alkali incement onrate of carbona tion of concrete ” *Cernent and Concrete Research.*, 20, 4, PP 619622, 1990.
- [47] Miller. E.W, « Blended cements - Applications and implications », *Cément and Concrete Composites*, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.
- [48] 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.
- [49] Moll H.L, “ Uber die Korroion von stahl béton on, Deutscher ausschuss fur Stahlbeton” ,1964, 169, 23-61.
- [50] Aitcin P.C. 2000, Béton haute performance, Edition Eyrolles, 2000, 800 p.
- [51] Locher, F.W. “ Influence of chloride and hydrocarbonate on the sulfate attack” ,
Proc . 5 th international symposium on the chemistry of cement, Tokyo, Vol, 3, PP. 328-335, 1968.
-

REFERENCE BIBLIOGRAPHYQUES

- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] eau de gâchage et adjuvants .chapitre 3. Disponible sur : <http://ensh.dz/files/Cours/1011/Mat%C3%A9riaux%20de%20construction/Eau%20et%20adjuvants.pdf>
- [55] page 8 sur 24-l'utilisation des granulats issus du recyclage-decembre 2010.
- [56] 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).
- [57] 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).
- [58] 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.
- [59] NEVILLE A.M., «Propriétés des bétons». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, 2000. Paris, 806
- [60] HERMANN K., «Les ajouts: Les fumées de silice», Bruxelles, n°7/Juillet 1995.
- [61] MEHTA P.K., «Sulfate résistance of blended cements». Concrete workshop, Sydney 1988.
- [62] www.pedagogie.ac-nantes.fr/.../hydroxyde_de_sodium_1257372520078.pdf
- [63] BARON J. et OLLIVIER J.P., «La durabilité des bétons». Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [64] AREZKI TAGNIT- HAMOU., Cours 2003 (chapitre 7). «Ajout dans le ciment». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
-

REFERENCE BIBLIGRAPHYQUES

INTRODUCTION GENERALE
