



# Mémoire de fin d'études

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

**Filière : Génie Civil**  
**Option : Matériaux**

**THÈME** : Etude de l'effet des additions minérales sur les propriétés d'un béton recyclé local avec application de la méthode des plans d'expériences « Design-Expert ».

Préparé par : **MECHERI Mohamed Cherif**  
**KHELIF Salah Eddine**

Soutenu le : **23/06/2014**

Devant le jury :

Encadreur : **BELAGRAA. L**

Président : **BOUGUERRA. A**

Examineur: **NOUI. A**

Examineur: **GUELMINE. L**

Examineur: **ACHOUR. Y**

2013/2014

# Remerciement

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

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers DIEU de nous avoir guidé dans la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. Belagraa Larbi, pour le suivi, le soutien, les conseils et les encouragements qu'il nous a attribués.

Nous adressons nos remerciements à tous les enseignants de génie civil qui ont participé dans notre formation.

Nous voudrions remercier l'ensemble de notre jury de thèse, qui a bien voulu examiner ce travail, aussi nous tenons à remercier Mr. Noui Ammar et Mr. Bouglada M<sup>ed</sup> Said pour leurs conseils et soutiens, le responsable du labo Zoubir, ainsi Farid, Fatiha, et Hayat pour leur disponibilité.

Nous adressons nos remerciements à Sami, Brahim, Hichame, Chouaib, Kamel, Ilyes, Nabil, Oussama, Antar, Abd Latif, Yassine, Deboucha, Mustapha.

Aussi, nous adressons nos remerciements à Imène, sara, Hadjer, Messaouda, Samah, Houda...et tous nos collègues.

Et tous qui a nous aidé à réaliser notre travail.

# *Dédicaces*

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

*Je dédie ce travail :*

*A la mémoire de mon grand-père ;*

*A mes parents et spécialement ma chère mère ;*

*A mes frères et ma sœur ;*

*A Salah Eddine, mon cher ami et binôme ;*

*A tous mes amis ;*

*A mes collègues de promo master 2 génie civil*

*A tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*Mohamed Cherif.*

# *Dédicaces*

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

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents ;*

*A mon frère et mes sœurs ;*

*A Mohamed Cherif, mon cher ami et binôme ;*

*A toute ma famille ;*

*A tous mes amis ;*

*A mes collègues de promo master 2 génie civil*

*A tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*Salah Eddine.*

---

## Résumé :

A l'heure actuelle le béton est le matériau de construction par excellence le plus employé dans le domaine de génie civil, cependant l'utilisation intensive de ce matériau implique l'épuisement des ressources d'agrégats aussi que dans un souci de protéger l'environnement la solution reste la valorisation des déchets C&D comme agrégats et la réutilisation des sous-produits de l'industrie comme ajouts de substitution dans le ciment pour formuler des bétons recyclés de qualité.

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier l'effet des additions minérales (fillers de marbre, pouzzolane et laitier) avec des pourcentages allant de 0 à 30% selon différentes combinaisons sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton recyclé local. Dans la deuxième partie, le logiciel « Expert –design » a été exploité comme outil afin d'analyser les formulations optimales dans le cas des ciments quaternaires. La durabilité étant considérée dans cette étude pour le cas des bétons recyclés à base de ces additions.

Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique des ciments binaire, ternaire et quaternaire à des taux élevés de fillers de marbre (15%, 20%, 30%) et laitier (15%, 30%) sur les propriétés physiques des bétons recyclés ; diminution de la teneur en air et l'amélioration de la densité contrairement à ceux à base des substitutions importantes de pouzzolane (15, 20 et 30%) ; ainsi le remplacement du ciment à dosages élevés de laitier (15% et 30%) diminue le besoin en eau des bétons recyclés. Par contre 30% de pouzzolane fait chuter les performances mécaniques d'une manière drastique. En fin, Le remplacement du ciment par la pouzzolane et fillers de marbre (15% et 30%) a un effet positif sur la durabilité des bétons recyclés à base de cette addition vis-à-vis la résistance dans le milieu agressif ( $H_2SO_4$ ).

**Mots clés :** béton recyclé, fillers de marbre, pouzzolane, laitier, teneur en air, résistance mécanique, Design-Expert.

---

---

**Abstract:**

At present, the concrete is the building material of choice used in most fields of civil engineering; however, the intensive use of this material involves the shortage of aggregates a resources. In order to protect the environment it seems that the alternative solution remains the recovery of construction and demolition wastes (C & D) as aggregate and the reuse of by-products of industry as additions substituting a part of ordinary cement. Thus, to formulate a recycled aggregate concrete of quality based on mineral additions .

This experimental work aims to study the effect of mineral additions (marble fillers, pozzolana and slag) with percentages ranging from 0-30% in different combinations. The physico-mechanical properties of a local recycled concrete were investigated. The expert-design program was used as a mean for the analysis for optimal formulations. Further the durability of recycled concrete mixtures was considered in this case of study.

The results obtained showed the beneficial effect of the binary, ternary and quaternary with higher dosages of marble fillers (15%, 20%, 30%) and slag (15%, 30%) on the physical properties of the recycled concrete; reduction of air content and improving the density. At the contrary to those based on high percentages of pozzolana (15, 20 and 30%). The substitution of cement by slag at dosages of 15% and 30% reduces the water demand of recycled concrete mixtures.

The recycled concrete with 30% slag gives a similar mechanical response to that of recycled concrete without mineral additions. Finally, the replacement of cement by 15% pozzolana and 30% marble fillers gives good results and judged to be with positive impact regarding the durability of recycled concrete based on this mineral additions in aggressive an environment ( $H_2SO_4$ ).

**Keywords:** recycled concrete, marble fillers, pozzolana, slag, air content, strength, Design-Expert.

---

---

## Sommaire

---

### Chapitre I : Introduction générale

I.1 Problématique: .....	1
I.2 Objectifs : .....	2
I.3 Structure de mémoire : .....	2

### Chapitre II : Revue bibliographique.

#### **PARTIE A : BETON ET CONSTITUANTS**

II.1 Introduction: .....	4
II.2 Définition d'un béton:.....	4
II.3 Classification des bétons: .....	4
II.3.1 Selon la masse volumique :.....	4
II.3.2 Selon la résistance caractéristique à la compression :.....	5
II.3.3 Selon la classe de consistance :.....	5
II.4 Les constituants du béton :.....	6
II.4.1 Le ciment Portland :.....	6
II.4.1.1 Définition et historique :.....	6
II.4.1.2 Processus de fabrication :.....	6
II.4.1.3 Principaux constituants du ciment :.....	8
II.4.1.4 Composition de ciment :.....	8
II.4.1.5 L'hydratation du ciment et son mécanisme :.....	9
II.4.1.6 Classification des ciments :.....	9
II.4.2 L'eau de gâchage :.....	11
II.4.2.1 Caractéristiques de l'eau de gâchage :.....	12
II.4.3 Les adjuvants :.....	12
II.4.3.1 Classification et utilisation :.....	12
II.4.4 Les granulats :.....	13
II.4.4.1 Les différents types des granulats :.....	14
II.4.4.2 Les gros granulats :.....	15
II.4.4.3 Les granulats fins :.....	15
II.4.4.4 La classification de sable :.....	15
II.5 Les principales propriétés du béton :.....	16
II.5.1 A l'état frais :.....	16
II.5.1.1 L'ouvrabilité du béton frais :.....	16

---

## Sommaire

---

II .5.1.2 La ségrégation :.....	16
II .5.2 A l'état durci :.....	17
II .5.2.1 Résistance à la compression :.....	17
II .5.2.2 Résistance à la traction :.....	18
II .5.2.3 Variations dimensionnelles des bétons :.....	18
II .5.2.4 La porosité :.....	19
II .5.2.5 La durabilité :.....	20
<b>PARTIE B : BETON RECYCLE</b>	
II.6 Introduction :.....	21
II.7 Généralités sur les déchets :.....	21
II.7.1 Définition du mot « déchets » :.....	21
II.7.2 Source des déchets utilisés en génie civil :.....	21
II.7.2.1 Déchets de construction et de démolition :.....	21
II.7.2.2 Les sous-produits de l'industrie :.....	22
II.7.3 Classification des déchets dans le génie civil :.....	22
II.7.3.1 Déchets inertes :.....	22
II.7.3.2 Déchets banals :.....	23
II.7.3.3 Déchets dangereux :.....	23
II.7.4 Le recyclage des déchets :.....	23
II.7.5 Intérêt de recyclage des déchets de chantier :.....	23
II.7.6 Utilisation des déchets en Algérie :.....	24
II.8 Granulats recyclés :.....	24
II.8.1 Elaboration des granulats recyclés :.....	24
II.8.1.1 Concassage, criblage :.....	24
II.8.1.2 Élimination des polluants :.....	24
II.8.2 Composition et propriétés des granulats recyclés de béton :.....	26
II.8.2.1 Composition :.....	26
II.8.2.2 Propriétés des granulats recyclés de béton.....	26
II.9 Propriétés des bétons à base d'agrégats recyclés :.....	28
II.9.1 À l'état frais et durcissant :.....	28
II.9.1.1 Masse volumique à l'état frais :.....	28
II.9.1.2 Teneur en air «naturelle» du béton frais :.....	28
II.9.1.3 Rhéologie du béton à l'état frais :.....	28

---

---

## Sommaire

---

II.9.1.4 Durcissement :.....	28
II.9.2 À l'état durci :.....	28
II.9.2.1 Performances mécaniques :.....	28
II.9.2.2 Module élastique :.....	29
II.9.2.3 Fluage et retrait de séchage :.....	29
II.9.3 Propriétés de durabilité des bétons recyclés :.....	30
II.9.3.1 Absorption d'eau des bétons :.....	30
II.9.3.2 Perméabilité :.....	30
II.9.3.3 Carbonatation :.....	30
<b>Chapitre III : Ajouts minéraux</b>	
III.1 Introduction :.....	31
III.2 Classification des ajouts minéraux :.....	31
III.2.1 Les principaux ajouts minéraux actifs :.....	31
III.2.1.1 Les laitiers de haut fourneau :.....	31
III.2.1.2 L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons :.....	32
III.2.1.3 La pouzzolane :.....	32
III.2.1.4 Types de pouzzolane :.....	33
III.2.1.5 L'effet de La pouzzolane sur les caractéristiques des bétons :.....	34
III.2.2 Principaux ajouts minéraux inertes :.....	34
III.2.2.1 Les fillers de marbre :.....	35
III.2.2.2 L'effet des fillers de marbre sur les propriétés des bétons :.....	36
<b>Chapitre IV : Martiaux, Matériels et Essais</b>	
IV.1 Introduction :.....	39
IV.2 Matériaux utilisés :.....	39
IV.3 Caractéristiques des matériaux :.....	39
IV.3.1 Caractéristiques du gravier :.....	39
IV.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :.....	39
IV.3.1.2 La masse volumique :.....	44
IV.3.1.3 La porosité :.....	47
IV.3.1.4 La compacité :.....	47
IV.3.1.5 L'indice des vides :.....	47
IV.3.1.6 Degré d'absorption d'eau :.....	48
IV.3.1.7 La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles :.....	49

---

---

## Sommaire

---

IV.3.2	Caractéristiques du sable :.....	51
IV.3.2.1	Analyse granulométrique par tamisage :.....	51
IV.3.2.2	Le module de finesse :.....	53
IV.3.2.3	Equivalent de sable :.....	53
IV.3.2.4	La masse volumique :.....	56
IV.3.2.5	La porosité:.....	57
IV.3.2.6	La compacité :.....	58
IV.3.2.7	L'indice des vides :.....	58
IV.3.3	L'eau de gâchage :.....	58
IV.3.4	Caractérisations des ajouts :.....	59
IV.3.4.1	Les caractéristiques chimiques :.....	59
IV.3.4.2	Les caractéristiques physiques :.....	60
IV.3.5	Caractéristiques de ciment :.....	63
IV.3.5.1	Caractéristiques chimiques :.....	63
IV.3.5.2	Caractéristiques physiques :.....	64
IV.3.5.3	Caractéristiques mécaniques :.....	64
IV.4	Formulation de béton :.....	64
IV.4.1	Présentation de la méthode de formulation :.....	65
IV.4.1.1	Définition du rapport (C/E):.....	65
IV.4.1.2	Détermination de la dépense en eau:.....	65
IV.4.1.3	Détermination de la dépense en ciment:.....	66
IV.4.1.4	Détermination de la dépense en gravier :.....	66
IV.4.1.5	Détermination de la dépense en sable :.....	67
IV.4.2	Calculs les composants:.....	67
IV.4.2.1	Béton témoin :.....	67
IV.4.2.2	Mélange d'essais :.....	69
IV.4.2.3	Béton recyclé:.....	69
IV.4.2.4	Mélange d'essais :.....	70
IV.5	Techniques expérimentales :.....	70
IV.5.1	Les essais sur béton frais :.....	70
IV.5.1.1	Le malaxage :.....	70
IV.5.1.2	Affaissement au cône d'Abrams (Slump test):.....	71
IV.5.1.3	Serrage du béton:.....	72
IV.5.1.4	Teneur en air :.....	72

---

---

## Sommaire

---

IV.5.1.5 Densité (état frais) :.....	73
IV.5.1.6 Mode de conservation et durcissement :.....	73
IV.5.2 Les essais non destructifs sur béton durci :.....	74
IV.5.2.1 Essai de dureté par rebondissement (scléromètre) :.....	74
IV.5.2.2 Auscultation dynamique (Ultra son) :.....	75
IV.5.2.3 La méthode combinée :.....	75
IV.5.2.4 Module d'élasticité dynamique : .....	76
IV.5.3 Les essais destructifs sur béton durci .....	76
IV.5.3.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement) :.....	76
IV.5.3.2 Essai de traction par fendage :.....	77
IV.5.4 Absorption d'eau :.....	78
IV.6 Plan d'expérience :.....	79
IV.6.1 Modèle représentative d'un mélange .....	80
IV.6.2 Présentation de logiciel « Design-Expert » :.....	80
IV.7 Conclusion :.....	80

## Chapitre V : Résultats et Analyses

### **PARTIE A : Effet des ajouts fillers de marbre et pouzzolane**

V.1 Introduction :.....	81
V.2 Etat frais :.....	81
V.2.1 La masse volumique :.....	82
V.2.2 La teneur en air :.....	83
V.2.3 Le rapport E/C :.....	84
V.3 Etat durci :.....	85
V.3.1 La masse volumique :.....	87
V.3.2 Résistance à la compression ( $R_C$ ) :.....	89
V.3.3 La résistance à la traction par fendage ( $R_f$ ) :.....	93
V.3.4 La vitesse du son (V) :.....	94
V.3.5 Le module dynamique :.....	96
V.3.6 Résistance au choc (scléromètre, $R_s$ ) :.....	97
V.3.7 Résistance combinée ( $R_{US}$ ) :.....	98
V.3.8 Absorption d'eau par immersion :.....	100

---

---

## Sommaire

---

### **PARTIE B : Effet des ajouts fillers de marbre, pouzzolane, et laitier**

V.4 Introduction :.....	102
V.5 Désignation des bétons :.....	103
V.6 Etat frais :.....	104
V.6.1 La Masse volumique :.....	105
V.6.2 La teneur en air :.....	106
V.6.3 Rapport E/C :.....	107
V.7 Etat durci :.....	109
V.7.1 Masse volumique :.....	111
V.7.2 La résistance à la compression :.....	113
V.7.3 Absorption d'eau :.....	116
V.7.4 Perte de masse :.....	117

### **Chapitre VI : Conclusion générale**

Conclusion générale :.....	119
----------------------------	-----

---

---

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

#### Chapitre II : Revue bibliographique

Tableau II .1: Classes de résistance du béton.....	5
Tableau II .2 : Classes de consistance.....	5
Tableau II.3 : Classification des ciments suivant les résistances à la compression.....	10
Tableau II.4 : Classification des ciments suivant leur composition.....	10
Tableau II.5 : Classification et utilisation des adjuvants selon la norme européenne.....	13
Tableau II.6 : Différents types des granulats issus de la roche massive.....	14

#### Chapitre III : Ajouts minéraux

Tableau III.1 : Critères sur les propriétés physiques.....	35
Tableau III.2 : Critères sur les propriétés chimiques.....	36

#### Chapitre IV :Matériaux, Matériels et Essais

Tableau IV.1 : Tamis utilisés pour le tamisage des graviers.....	40
Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) et (8/16).....	42
Tableau IV.3 : L'analyse granulométrique de gravier recyclé (3/8) et (8/16).....	43
Tableau IV.4 : Masse volumique apparente du gravier concassé.....	45
Tableau IV.5 : Masse volumique apparente du gravier recyclé.....	45
Tableau IV.6 : Masse volumique absolue du gravier concassé.....	46
Tableau IV.7 : Masse volumique absolue du gravier recyclé.....	46
Tableau IV.8 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....	48
Tableau IV.9 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier recyclé.....	48
Tableau IV.10 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16) concassés.....	48
Tableau IV.11 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16) recyclés.....	48

---

## Liste des tableaux

---

Tableau IV.12 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.....	50
Tableau IV.13. Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (3/8), (8/15).....	50
Tableau IV.14 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier recyclé (3/8), (8/16).....	50
Tableau IV.15 : Tamis utilisés pour le tamisage du sable.....	51
Tableau IV.16 : Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.....	52
Tableau IV.17 : Modules de finesse du sable.....	53
Tableau IV.18 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.....	55
Tableau IV.19 : Résultats d'essai d'équivalent de sable d'OUED SOUF testé.....	55
Tableau IV.20 : Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF à l'état lâche.....	56
Tableau IV.21 : Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF à l'état compact.....	57
Tableau IV.22 : Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.....	57
Tableau IV.23 : La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable d'OUED SOUF...	58
Tableau IV.24 : Analyses physico-chimiques de l'eau de gâchage.....	59
Tableau IV.25 : Analyse chimique des ajouts.....	60
Tableau IV.26 : Les caractéristiques physiques des ajouts.....	62
Tableau IV.27 : Analyse chimique du ciment utilisé.....	63
Tableau IV.28 : Composition minéralogique du clinker.....	63
Tableau IV.29 : Propriétés physiques du ciment utilisé.....	64
Tableau IV.30 : Propriétés mécaniques du ciment utilisé.....	64
Tableau IV.31 : Valeurs des coefficients A et A'.....	65
Tableau IV.32 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	66

---

---

## Liste des tableaux

---

Tableau IV.33 : Valeurs du coefficient « $\alpha$ » en fonction du E/C et dosage en ciment .....	66
Tableau IV.34 : Dépense en matériaux pour 1 m <sup>3</sup> .....	68
Tableau IV.35 : Dépense en matériaux pour un mélange.....	69
Tableau IV.36 : Dépense en matériaux pour 1 m <sup>3</sup> .....	70
Tableau IV.37 : Dépense en matériaux pour un mélange.....	70
Tableau IV.38 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	72
Tableau IV.39 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions.....	75

### Chapitre V : Résultats et Analyses

Tableau V.1 : Différents types de bétons étudiés.....	81
Tableau V.2 : Propriétés physiques des différents bétons (témoin et recyclé) à l'état frais.....	82
Tableau V.3 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 7 jours.....	85
Tableau V.4 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 14 jours.....	86
Tableau V.5 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons étudiés à 28 jours...	86
Tableau V.6 : Absorption d'eau par immersion des différents bétons.....	87
Tableau V.7 : Différents types des bétons étudiés.....	103
Tableau V.8 : Propriétés physiques des bétons étudiés (témoin et recyclé) à l'état frais.....	104
Tableau V.9 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 7 jours.....	109
Tableau V.10: Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 14 jours.....	109
Tableau V.11 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons étudiés à 28 jours.....	110

---

## Liste des figures

---

### Liste des figures

#### Chapitre II : Revue bibliographique

Figure II.1 : Elaboration du clinker.....	7
Figure II.2 : Obtention du ciment par broyage du clinker.....	8
Figure II.3 : Micrographie de clinker montrant ses quatre principales phases cristallines.....	9
Figure II.4 : Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.....	19
Figure II.5 : Réception des bétons de démolition.....	25
Figure II.6 : Stock des matériaux de démolition destiné au recyclage.....	25
Figure II.7 : Préparation à la cisaille.....	25
Figure II.8 : Dé ferrailage électromagnétique.....	25
Figure II.9 : Agrégats recyclés.....	25
Figure II.10 : Forme des agrégats recyclés.....	26
Figure II.11 : Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles.....	27
Figure II.12 : Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton.....	27

#### Chapitre III : Ajouts minéraux

Figure III.1 : Illustration de l'effet filler.....	35
Figure III.2 : Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en fillers.....	37

#### Chapitre IV : Matériaux, Matériel et Essais

Figure IV. 1 : La tamiseuse utilisée.....	39
Figure IV.2 : fraction du gravier après tamisât.....	40
Figure IV.3 : Procédure de préparation des granulats recyclés.....	41
Figure IV.4 : Concassage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.....	41
Figure IV.5 : Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/16).....	42
Figure IV.6 : Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/16).....	43
Figure IV.7 : Appareil de Los Angeles.....	49
Figure IV.8 : Tamisage de gravier concassé et recyclé avec un tamis 1.6 mm.....	49
Figure IV.9 : Courbe granulométrique du sable d'OUED SOUF.....	52
Figure IV.10 : Entonnoir utilisé.....	60
Figure IV.11 : Le Densimètre de Le Chatelier.....	61
Figure IV.12 : Appareil de Blaine.....	61

## Liste des figures

---

Figure IV.13 : Ciment utilisé CEMI/42.5.....	63
Figure IV.14 : Malaxeur utilisé.....	70
Figure IV.15 : Etape de mesure l'ouvrabilité du béton.....	71
Figure IV.16 : Mesure de l'affaissement du béton.....	71
Figure IV.17 : Aéromètre.....	72
Figure IV.18 : Mesure de la densité du béton à l'état frais.....	73
Figure IV.19 : Mesure de la dureté superficielle du béton.....	74
Figure IV.20 : Mesure de la vitesse du son.....	75
Figure IV.21 : Presse hydraulique.....	76
Figure IV.22 : Variation des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes.....	77
Figure IV.23 : Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage.....	78
Figure IV.24 : Essai de traction par fendage.....	78

### Chapitre V : Résultats et Analyses

Figure V.1 : variation de la masse volumique en fonction des différents types de bétons.....	82
Figure V.2 : la variation de la teneur en air en fonction des différents types de bétons.....	83
Figure V.3 : Variation du rapport E/C en fonction des différents types de bétons.....	84
Figure V.4 : La variation de la masse volumique des bétons étudiés en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).....	87
Figure V.5 : Développement de la masse volumique de différents types du béton étudié en fonction de l'âge (7, 14, et 28 jours).....	88
Figure V.6 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de différents types du béton à 7 jours.....	89
Figure V.7 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction des différents types du béton à 14 jours.....	89
Figure V.8 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction des différents types du béton à 28 jours.....	90
Figure V.9 : la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) des différents types du béton en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).....	90
Figure V.10 : Développement de la résistance à la compression ( $R_c$ ) de différents types du béton en fonction l'âge (7, 14 et 28 jours).....	91

## Liste des figures

---

Figure V.11 : La variation de la résistance à la traction par fendage ( $R_f$ ) des différents types du béton à 28 jours.....	93
Figure V.12 : La variation de la vitesse du son ( $V$ ) des différents types du béton en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).....	94
Figure V.13 : Le développement de la vitesse du son ( $V$ ) des différents types de bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).....	94
Figure V.14 : La variation du module d'élasticité dynamique des différents types de bétons à 28 jours.....	96
Figure V.15 : La variation de la résistance au choc (scléromètre $R_s$ ) en fonction des différents types de bétons à 28 jours.....	97
Figure V.16 : La variation de la résistance combinée des différents types de bétons à 28 jours.....	98
Figure V.17 : La variation des résistances à l'écrasement( $R_c$ ), scléromètre( $R_s$ ), et combinée ( $R_{us}$ ) en fonction des différents types du béton.....	99
Figure V.18 : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types de bétons.....	100
Figure V.19 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique (frais).....	105
Figure V.20 : Diagramme triangulaire de la variation de la teneur en air.....	106
Figure V.21 : Diagramme triangulaire de la variation du rapport E/C.....	107
Figure V.22 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique à 7 jours.....	111
Figure V.23 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique à 14 jours.....	111
Figure V.24 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique à 28 jours.....	112
Figure V.25 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 7 jours.....	113
Figure V.26 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 14 jours.....	114
Figure V.27 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 28 jours.....	115
Figure V.28 : Diagramme triangulaire de la variation du taux d'absorption d'eau.....	116
Figure V.29 : Diagramme triangulaire de la perte de masse des bétons étudiés.....	117

## Notations :

D&C : déchets de démolition et de construction.

E/C : rapport eau sur ciment.

$\rho$  : masse volumique apparente.

$\gamma$  : masse volumique absolue.

$f_{ckcyl}$  : la résistance caractéristique mesurée sur cylindres.

$f_{ck cube}$  : la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

DIB : déchets industriels banals.

DIS : déchets industriels spéciaux.

V : volume.

P (%) : porosité.

C (%) : compacité.

e (%) : indice des vides.

A (%) : degré d'absorption.

$M_H$  : La masse du matériau saturé d'eau.

$M_S$  : La masse du matériau sec.

$L_A$  : coefficient de Los Angeles.

MF : module de finesse du sable.

$E_{sv}$  : équivalent de sable visuel.

$E_{sp}$  : équivalent de sable par piston.

$\rho_{app}$  : la masse volumique apparente à l'état lâche.

$\rho_{app c}$  : la masse volumique à l'état compacte.

$P_L(\%)$  : porosité à l'état lâche.

$P_c(\%)$  : porosité à l'état compacte.

$C_L(\%)$  : compacité à l'état lâche.

$C_c(\%)$  : compacité à l'état compacte.

$e_L(\%)$  : indice des vides à l'état lâche.

$e_c(\%)$  : indice des vides à l'état compacte.

SSB : Surface Spécifique Blaine.

K : constante de l'appareil.

$\gamma$  : Masse volumique en g/cm<sup>3</sup>.

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

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

e : porosité de l'ajouts dans la cellule.

Rb: classe du béton.

Rc: activité ou classe du ciment.

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

$\alpha$  : coefficient d'écartement.

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

C : ciment.

E : eau.

PC : pierres concassée.

G : gravier.

S : sable.

$R_c$  : la résistance du béton.

I : l'indice scléromètre.

V : la vitesse de propagation du son.

$\nu$  : Coefficient de poisson.

$E_d$ : module d'élasticité dynamique.

F : charge de rupture.

S : section de l'éprouvette.

FM : fillers de marbre.

PZ : la pouzzolane.

S : laitier.

BT : béton témoin.

BR : béton recyclé.

T : le temps.

$R_s$  : Résistance de scléromètre.

$R_{us}$  : Résistance combinée.

$R_f$  : résistance à la traction par fendage.

---

**CHAPITRE I :**  
**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

---

## Introduction générale

### I.1 problématique:

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation dans pratiquement tous les domaines de génie civil. Actuellement, il est sans doute le plus utilisé pour ses avantages économiques et techniques.

Cependant, l'utilisation intensif de ce matériau implique une grande consommation de ses composantes notamment les granulats indispensable pour la fabrication de béton et représente environ 70 % de son volume total. Elles sont produites et utilisées en très grande quantité dans tous les pays du monde, toutefois les ressources naturelles ne sont pas inépuisable, et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des sites de consommation, les granulats sont des matériaux dont le prix d'achat double tous les 50 Km [1].

En parallèle, l'essor rapide du tissu urbain dans les agglomérations a provoqué une augmentation impressionnante des quantités de sous-produits et de déchets, les sous-produits proviennent des industries de fabrication des matériaux de construction, et les déchets (C&D) sont massivement générés suite à des opérations de démolition, et de rénovation.

Les sous-produits et les déchets qui autre fois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique vers la fin du 20<sup>ème</sup> siècle ; les quantités énormes qui sont produites sans cesse immobilisant de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage des déchets et réduisant la disponibilité de terrains, sans compter la pollution avec toutes ces conséquences sur l'environnement.

Pour répondre, d'une part au besoin vital de la construction et d'autre part, au besoin universel de conserver les ressources et protéger l'environnement, Il est devenu primordial de valoriser et recycler les déchets (dites inertes), afin de produire des granulats recyclés comme alternative aux granulats naturels, et la réutilisation des sous-produit de l'industrie comme ajouts de substitution dans le ciment , pour formuler des bétons recyclés présentant des performances (résistance et durabilité) comparables à un béton conventionnel.

Cette étude consiste à mettre en évidence les éventuels effets des ajouts provenant des différents déchets de l'industrie, qui sont incorporés lors de la confection des bétons à des pourcentages allant de 0% jusqu'à 30% ; afin de constater l'influence de cette combinaison (additions minérales et agrégats recyclés) sur les propriétés d'un béton recyclé à base de ces deux produits.

**I.2 objectifs :**

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'effet des additions minérales (fillers de marbre, pouzzolane et laitier), sur les propriétés d'un béton à base d'agrégats recyclés avec un remplacement à 100%.

Le principe consiste à confectionner un béton recyclé à base d'un ciment binaire (un seul ajout), ternaire (deux ajouts), et quaternaire (trois ajouts), le taux de ciment est fixé à 70 %, et le reste (30%) sera substitué par des additions minérales (fillers de marbre, pouzzolane et laitier), selon différentes combinaisons.

Ce travail a pour but de voir :

- l'effet des additions minérales sur les propriétés physiques d'un béton recyclé à l'état frais (la masse volumique, le rapport E/C, la porosité)
- l'effet des additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton recyclé à l'état durci (la masse volumique, l'absorption, la résistance mécanique à la compression et fendage).
- L'effet des additions minérales sur la durabilité d'un béton recyclé (perte de masse et résistance).
- Une comparaison entre les essais non destructifs (scléromètre, ultrason, et méthode combinée), et l'essai destructif (écrasement), dans le cas des bétons recyclés.
- La possibilité de valoriser l'utilisation des déchets pour la formulation de bétons innovants.
- Un apport positif par la substitution d'une quantité de ciment pour préserver l'environnement. Ceci présente une économie du clinker et une limitation des émissions (poussières, CO<sub>2</sub>)

**I.3 structure de mémoire :**

Ce mémoire s'articule sur six chapitres, comme suit :

**Chapitre I : Introduction générale**

- Problématique.
- Objectifs.
- Structure de mémoire.

**Chapitre II : se divise en deux parties ;**

- Partie A : Un aperçu générale sur le béton comme matériau et ses constituants (ciment, agrégats, l'eau de gâchage et adjuvant), ainsi que les caractéristiques physiques, mécaniques et durabilité du béton.
- Partie B : Consacrée aux recherches effectuées sur les différents types de déchets et leur utilisation dans le domaine de génie civil, on y'expose aussi les propriétés des agrégats recyclés, ainsi que les propriétés physiques, mécaniques, et durabilité des bétons recyclés, résultant des travaux antérieurs effectués.

**Chapitre III :** Revue sur les ajouts minéraux concerne, leur classification, l'utilisation, et leurs effets sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

**Chapitre IV :** Matériaux, matériels et essais

- Caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection des bétons (Gravier concassé et recyclé, sable, eau de gâchage, ciment et ajouts).
- Déterminer la formulation des différents types des bétons utilisés dans cette étude.
- Etudier expérimentalement les propriétés des différents bétons confectionnés à l'état frais et durci à travers des essais non destructifs (scléromètre et ultrason), et destructifs (compression et traction par fendage).

**Chapitre V :** Résultats et analyses

**ChapitreVI :** Enfin, une conclusion générale clôture notre travail avec quelques recommandations, suivi de références bibliographiques.

---

**CHAPITRE II :**  
**REVUE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

---

---

---

## **PARTIE A : BETON ET CONSTITUANTS**

### **II .1 Introduction :**

A l'heure actuelle, Le béton est le matériau de construction par excellence. Le plus utilisé dans le secteur de génie civil et travaux publics. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme les bâtiments d'habitation, les ponts, les centrales nucléaires etc...

La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland [2].

### **II .2 Définition d'un béton :**

Le béton est un matériau composite résultant d'un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et le plus souvent, d'adjuvants, qui constituent un ensemble homogène ; après le durcissement il devient un matériau pierreux [2].

### **II .3 Classification des bétons :**

#### **II .3.1 Selon la masse volumique :**

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique [3] :

- Béton très lourd :  $\rho > 2500 \text{ Kg/m}^3$ .
- Béton lourd (béton courant) :  $\rho$  entre : 1800 - 2500  $\text{Kg/m}^3$ .
- Béton léger :  $\rho$  entre : 500 - 1800  $\text{Kg/m}^3$ .
- Béton très léger :  $\rho < 500 \text{ Kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte.

### II .3.2 Selon la résistance caractéristique à la compression :

La norme EN 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau (1), Dans ce tableau  $f_{ck,cyl}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Euro code 2),  $f_{ck,cube}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cubes [4].

**Tableau II .1:** *Classes de résistance du béton [2].*

Classe de la résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindriques	Résistance caractéristique minimale sur cubes
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

### II .3.3 Selon la classe de consistance :

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5). La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test) [2].

**Tableau II .2 :** *Classes de consistance [2].*

Classes de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	> 220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

## II .4 Les constituants du béton :

### II .4.1 Le ciment Portland :

#### II .4.1.1 Définition et historique :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [5].

En 1824, l'écossois Aspidin obtient un brevet d'invention, sur la fabrication d'un liant à partir du mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland [6].

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les liants à base de chaux. L'utilisation de ces ciments artificiels sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produisit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et n'utilisant plus de liants à base de chaux.

#### II .4.1.2 Processus de fabrication :

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Le processus de fabrication du ciment peut se diviser en deux étapes principales. La première concerne la fabrication de la roche artificielle appelée clinker, constituant principal du ciment. La deuxième étape consiste à broyer finement ce clinker avec d'autres constituants minéraux pour obtenir un ciment ayant des propriétés bien déterminées.

#### A. Elaboration du clinker :

La fabrication du clinker est un processus qui se déroule en trois grandes étapes qui sont :

##### A.1 L'extraction et la préparation des matières premières :

Les matières premières qui apportent les oxydes nécessaires pour synthétiser le clinker sont issues de carrières (Figure II.1). Le calcaire est la matière première principale et est introduite à raison de 75 à 80 % dans le mélange cru. Il contient majoritairement de la calcite  $\text{CaCO}_3$ . Les autres oxydes sont en général apportés par l'argile ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), le sable ( $\text{SiO}_2$ ) et le minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Les carrières de calcaire et d'argile (Figure.II.1 : étape 1) sont proches de la cimenterie pour éviter des coûts de transport trop élevés. Les matières premières sont

concassées (Figure II.1 : étape 2) afin de disposer des particules de taille inférieure à 50 mm. Un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argile est réalisé dans un hall de pré homogénéisation. Le pré homogénéisation (Figure II.1 : étape 3) assure la micro homogénéité du mélange cru ainsi que la régularité de sa composition chimique [7].

### A.2 La cuisson :

L'étape de cuisson du cru comporte deux phases : une phase de décarbonatation partielle de la poudre crue dans un pré calcinateur et une étape de cuisson dans un four rotatif. (Figure II.1 : étape 5). Cette étape assure la décarbonatation partielle du cru avant l'entrée dans le four. (Figure II.1 : étape 6). Dès l'entrée dans le four à 1050°C, il se produit des réactions chimiques. La matière achève sa décarbonatation et subit plusieurs réactions à l'état solide jusqu'à 1250°C. Pour la suite un ensemble de réactions solide-liquide constituant la clinkérisation, conduit à la formation des minéraux constitutifs du clinker. La figure II.1 résume le processus de fabrication du clinker [7].

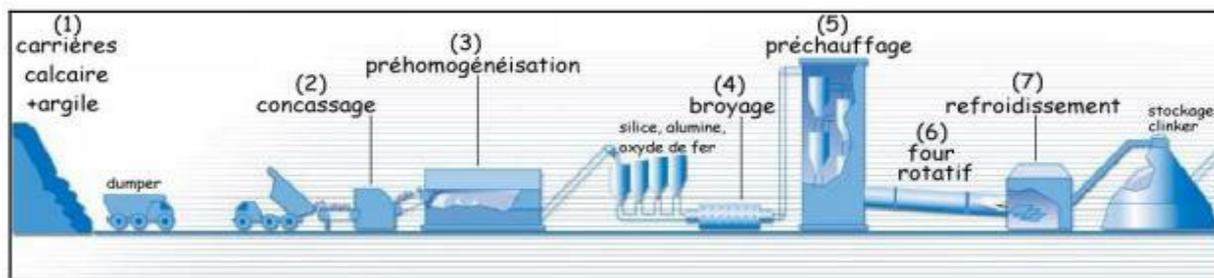


Figure II.1 : *Elaboration du clinker* [8].

Le refroidisseur (Figure II.1 : étape 7) fige par trempe le clinker à l'état où il se trouve aux températures élevées de cuisson. La vitesse de refroidissement, particulièrement aux hautes températures, affecte le mode et la texture de cristallisation des composés du clinker, et par là-même, leur réactivité. Le choc thermique au cours du refroidissement provoque aussi un réseau de microfissures, qui sera utile par la suite, car il favorise le broyage du clinker.

### B. Le broyage du clinker :

A la sortie du four (Figure II.2), la granulométrie du clinker est trop grossière pour que sa réactivité soit suffisante. Le broyage du clinker développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses principales propriétés rhéologiques. A cette étape, différents minéraux naturels ou artificiels sont ajoutés simultanément (Figure II.2 : étape 8) pour ajuster la composition du mélange. Ainsi, 5% de sulfate de calcium sont ajoutés sous forme de gypse

( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou d'hémi hydrate ( $\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) ou d'un mélange des deux. Ce composé sert à réguler la prise du ciment en agissant sur la réaction d'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$  [9], [10].

Le clinker et ses additifs sont réduits finement dans un broyeur à boulets (Figure II.2 : étape 9).

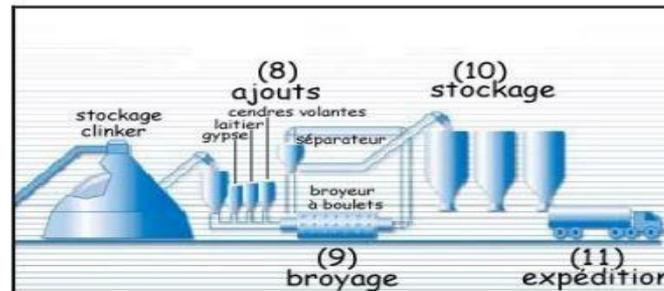


Figure II.2 : Obtention du ciment par broyage du clinker [8].

#### II .4.1.3 Principaux constituants du ciment :

Théoriquement, un ciment portland ne comporte que du clinker et du sulfate de calcium. Cependant en pratique et pour des raisons d'économie et d'énergie, une partie de clinker peut être remplacée par des additions minérales telles que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes et les fillers [11].

➤ **Le Clinker**

➤ **Le Gypse :**

Le gypse doit être ajouté en faible quantité (moins de 5%) aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de réguler la prise [9], [10].

➤ **Les ajouts minéraux :**

D'après leur composition, les ajouts minéraux contiennent principalement de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker.

#### II .4.1.4 Composition du ciment :

Le ciment portland contient quatre constituants principaux :

-le silicate bi-calcique :  $\text{SiO}_2, 2 \text{CaO}$  (ou  $\text{C}_2\text{S}$ ).

-le silicate tricalcique :  $\text{SiO}_2, 3 \text{CaO}$  (ou  $\text{C}_3\text{S}$ ).

- l'aluminate tricalcique :  $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$  (ou  $\text{C}_3\text{A}$ ).

-l'alumino-ferrite tétra-calcique :  $4 \text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$ , (ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ).

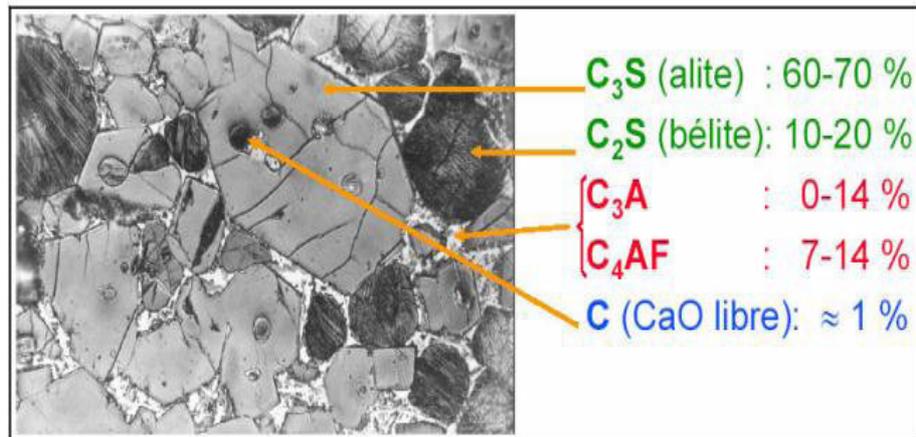


Figure II.3 : Micrographie de clinker montrant ses quatre principales phases cristallines [7].

#### II .4.1.5 L'hydratation du ciment et son mécanisme :

Les principaux hydrates, formés par réaction entre l'eau et les constituants du ciment, sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), l'hydroxyde de calcium (ou portlandite ; CH), l'ettringite ( $C_3A \cdot 3Cs \cdot H_{32}$ ) et le monosulfoaluminate de calcium hydraté ( $C_3A \cdot Cs \cdot H_{12}$ ). Les principales réactions d'hydratation des ciments sont résumées dans la liste suivante [11] :

<u>Phases anhydres</u>		<u>Phases hydratées</u>
$C_3S$	→	$C-S-H + CH$
$C_2S$	→	$C-S-H + CH$
$C_3A$	→	$C_2AH_8 + C_4AH_{13} + C_3AH_6$
$C_3A + \text{gypse}$	→	$C_3A \cdot 3Cs \cdot H_{32} + C_3A \cdot Cs \cdot H_{12} + C_4AH_{13}$
$C_4AF$	→	$C_2(A,F) \cdot H_8 + C_4(A,F)H_{13} + C_3(A,F)H_6$
$C_4AF + \text{gypse}$	→	$C_3(A,F) \cdot 3Cs \cdot H_{32} + C_3(A,F) \cdot Cs \cdot H_{12} + C_4(A,F)H_{13}$

#### II .4.1.6 Classification des ciments :

##### A. suivant les résistances à la compression :

La norme européenne [EN 197-1] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme [EN 196-1], mesurée à 28 jours en six classes de résistance. Et exprimée en  $N/mm^2$  (MPa) [12].

**Tableau II.3 :** Classification des ciments suivant les résistances à la compression [12].

Désignation de la classe de résistance	Résistance de la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32.5 N	-	$\geq 16$	$\geq 32.5$	52.5
32.5 R	$\geq 10$	-		
42.5 N	$\geq 10$	-	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5 R	$\geq 20$	-		
52.5 N	$\geq 20$	-	$\geq 52.5$	-
52.5 R	$\geq 30$	-		

La classe R correspond à une résistance au jeune âge plus élevée que la classe normale correspondante (N).

### B. suivant leur composition :

Le tableau suivant présente la classification des ciments suivant leur composition selon La norme européenne [EN 197-1] :

**Tableau II.4 :** Classification des ciments suivant leur composition [NF EN 197- 1].

Type de ciment	Clinker (K) %	Autres constituants principaux(%)	Constituant secondaire(%)
CEM I Ciment Portland artificiel (CPA)	95 à 100	0	0 à 5
CEM II Ciment Portland composé (CPJ)	65 à 94	6 à 35	0 à 5
CEM III Ciment de haut fourneau (CHF) ou (CLK)	5 à 64	36 à 95	0 à 5
CEM IV Ciment pouzzolaniques (CPZ)	45 à 89	11 à 55	0 à 5
CEM V Ciment composé	20 à 64	26 à 80	0 à 5

**C. suivant le type d'environnement :**

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

➤ **Ciment PM : [EN 197-1]**

Résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

➤ **Ciment ES : [EN 197-1]**

Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

➤ **Ciments CP : [EN 197-1]**

Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure  $SO_{4-2}$  :

➤ **Ciments de la classe CP2**

Contenant moins de 0,2 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension.

➤ **Ciments de la classe CP1**

Contenant moins de 0,7 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques. C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

**II .4.2 L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage est l'eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et de conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité [13].

Pour convenir à la confection des bétons, les eaux ne doivent contenir ni composée risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité risque de modifier ces qualités original [3]. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme [EN 1008] [2].

### II .4.2.1 Caractéristiques de l'eau de gâchage :

#### A. Caractéristiques physiques :

L'eau de gâchage des bétons doit être propre, ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises.

Les tolérances réglementaires sont les suivant [14] :

-2g/l pour les bétons type A

-3g /l pour les bétons type B

-5g/l pour le béton type C.

Les matières en suspension n'ont pas la même nocivité.

-béton type A : béton de haute qualité à résistance élevée.

-béton type B : béton à faible perméabilité

-béton type C : béton à faible résistance peut au non armé.

#### B. Caractéristiques chimiques :

L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de :

-15g/l pour les bétons type A et type B.

-30g/l pour le béton type C.

L'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf certaines prescriptions spéciales

Toute eau douteuse doit être analysée chimiquement au laboratoire spécialisé [14].

### II .4.3 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [3].

#### II .4.3.1 Classification et utilisation :

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement «effets secondaires». Les normes européennes retiennent la classification suivante [3] :

**Tableau II.5 :** *Classification et utilisation des adjuvants selon la norme européenne*

[EN 934-2].

Adjuvant	Utilisation
Super plastifiant	nécessité d'une bonne ouvrabilité. préfabrication. béton a haute résistance. béton très ferrailles.
Plastifiant	transport pneumatique du béton (béton pompé). béton coule sous l'eau (délavage diminué). injection coulis et mortier. béton très ferrailles
Accélérateurs	Décoffrage rapide. temps froid. préfabrication. réparation rapide, piste d'aérodrome.
Retardateur	temps chaud. injection a une grande profondeur (élévation de la température). transport de béton sur longue distance. reprise de bétonnage. coulage en continue.
Entraîneur d'air (antigelifs)	route, barrage, pont. travaux maritimes. ouvrage expose au gel, à l'action des eaux agressives.

#### II .4.4 Les granulats :

On appelle «granulats» les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières qui entre dans la composition des bétons. Ces matériaux sont quelques fois appelés (agrégats).

Les granulats comprennent les sables et pierrailles. Ils sont classés en fonction de leurs grosseurs (comprise entre 0 et 125 mm) [15].

Les granulats représentent, après l'eau et l'air, la matière première la plus importante utilisée dans un pays.

#### II .4.4.1 Les différents types des granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, artificiels ou issu de recyclage leur taille variable déterminera l'utilisation du béton.

Trois grandes familles de granulats sont définies en fonction de leur origine :

##### A. Les granulats alluvionnaires ou de carrière (naturel) :

Leurs gisements sont des matériaux meubles, non consolidés. Ils proviennent de lits ou anciens lits de rivière, les fonds de lacs ou certains fonds marins. L'extraction des granulats alluvionnaires se fait « à sec » ou « dans l'eau », à l'aide de pelles hydrauliques ou de draglines. La technique d'exploitation varie en fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique. Ces granulats peuvent être traités suite à leur extraction. Ils sont concassés si leur granulométrie est trop importante. Cette opération est suivie d'un criblage, d'un lavage et d'un calibrage [15].

Les granulats naturelles issus de différents roches meubles ou massives [16], extrait in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (concassage, criblage, lavage et sélection) [16].

##### B. Les granulats de roches massives et artificiels :

D'origine minérale résultants d'un procédé industriel comprenant des transformations thermique et autre [16].

**Tableau II.6 :** *Différents types des granulats issus de la roche massive [16].*

Types des roches massives	Exemple de famille de granulats
Roche magmatique – roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte...
Roche sédimentaire	Grès, grès quartziques, silex, calcaire, etc.
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc.

##### C. Les granulats de recyclage :

Les granulats sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers [17]. Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours [16].

#### II .4.4.2 Les gros granulats :

Selon leurs natures et leurs prévenances on distingue deux types de granulats :

##### A. Les granulats de rivière :

Ils proviennent de la désagrégation des roches (graviers) ils sont en général très durs et très propres, Cependant leurs grains après par le frottement n'offrent pas une très bonne adhérence au liant [18].

##### B. Les granulats de concassage :

Ils sont obtenus en concassant des roches dures (siliceuses, calcaires ou granitiques).

Les grains sont anguleux, ils doivent être soigneusement lavés afin de les débarrasser des poussières qui les recouvrent au moment du concassage (pierres concassées) [18].

#### II .4.4.3 Les granulats fins (sable) :

Dans le béton le sable occupe presque  $\frac{1}{4}$  de son volume par conséquent la qualité du sable influant considérablement sur la qualité du béton. Il remplit avec le ciment et l'eau les vides entre les grains de gravier donnant ainsi la structure compacte du béton.

#### II .4.4.4 Classification de sable :

##### A. suivant leurs prévenances :

###### ➤ Sable de rivière :

Ils sont extraits par dragage du lit des cours d'eau (matériaux siliceux). Il est bon parce qu'il est bien lavé mais sa forme ronde facilite les mouvements et diminue son adhérence aux mortiers et béton. Le sable gypseux est à éliminer [18].

###### ➤ Sable de mer :

Il provient de la désagrégation des roches sous-marines ou des falaises sous l'action des mouvements des eaux. Il est pur et excellent s'il n'est pas trop fin, il est chargé de sel.

Avant l'utilisation on doit le laver à l'eau douce pour le purifier ou le laisser exposé aux intempéries pendant un certain temps ; afin de le débarrasser au maximum des sels marins qu'il contient. Ces sels sont susceptibles de réagir en présence des liants (ciment) [18].

###### ➤ Sable de dune :

Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très fins (faible résistance mécanique de béton). Il provient d'éléments de désagrégation des roches transportées par le vent [18].

➤ **Sables de carrière :**

Il doit être lavé avant usage pour éliminer les matières terreuses. Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable en l'empêchant d'adhérer aux liants. Le sable quartzeux exempt de matières terreuses ou argileuses est excellent pour la confection du béton et mortier [18].

**B. suivant leurs grosseurs :**

- sable fin 0.08 à 0.315 mm
- sable moyen 0.315 à 2.00 mm
- sable gros 2.00 à 5.00 mm

## **II .5 Les Principaux propriétés du béton :**

### **II .5.1 A l'état frais :**

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci [19].

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'ouvrabilité. Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers [19].

#### **II .5.1.1 L'ouvrabilité du béton frais :**

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique. Affaissement au cône d'Abram.

#### **II .5.1.2 La ségrégation :**

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (transbordements, mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur la qualité [20], [21]. Elle peut résulter d'une séparation entre :

- les différentes fractions granulaires
- les granulats et la pâte de ciment
- les fines et l'eau de gâchage

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

- les «nids de gravier» : concentrations locales de gros granulats
- les «remontées d'eau» : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage
- le «ressuage» : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces plus ou moins horizontales du béton. Il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses
- les micro-ségrégations (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité

### **II .5.2 A l'état durci :**

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et, d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression.

On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité. Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc.

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

#### **II .5.2.1 Résistance à la compression :**

La résistance en compression dépend directement de la composition du béton, c'est à dire de la classe de résistance du ciment, du rapport E/C, de la nature des granulats, du volume de pâte, de la présence d'additions [22].

La résistance en compression simple du béton est le paramètre fondamental du comportement et la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé.

Tout d'abord, l'ingénieur de bureau d'études s'intéresse à une valeur caractéristique le plus souvent à 28 jours. Cette durée ne signifie pas que les réactions d'hydratation du ciment sont terminées. C'est, en fait, un compromis entre un délai trop long pour le contrôle et l'obtention d'une valeur représentative de la résistance finale que l'on peut considérer comme acquise après plusieurs mois de réactions d'hydratation [23].

### II .5.2.2 Résistance à la traction :

La mesure de la résistance en traction est beaucoup plus rare que celle de la résistance en compression. Ceci essentiellement parce que, dans les règlements actuels, le béton tendu est généralement négligé (en béton armé et précontraint, mais pas dans les chaussées, par exemple). De plus, cette résistance en traction étant faible, une estimation à partir de la résistance en compression est souvent suffisante [23].

### II .5.2.3 Variations dimensionnelles des bétons :

#### A. Variation d'origine thermique :

Le coefficient de dilatation des bétons ordinaires est en général de  $1 \times 10^{-5}$ . Dans nos régions, les déformations à attendre pour  $\pm 20^\circ$  par rapport à la température au moment de l'exécution sont donc de [24] :

$$\frac{\Delta l}{l} = \pm 2 \times 10^{-4}$$

#### B. Retrait :

La dilatation thermique est en général compensée par le retrait, phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise et le durcissement du béton, fonction de l'état hygrométrique de l'atmosphère, et dont la vitesse dépend des dimensions de la pièce. Ce retrait tend asymptotiquement vers une limite que l'on ne peut considérer comme pratiquement atteinte qu'au bout de quelques années.

On peut en général admettre que :

$$\frac{\Delta l}{l} = -2 \text{ à } 3 \times 10^{-4}$$

Ce retrait est lié à un phénomène d'équilibre hygrométrique, résultant de l'évaporation d'une partie de l'eau non combinée à l'intérieur du béton. Le retrait est donc faible dans les régions humides, accentué dans les régions sèches à fortes oppositions de température.

Lorsque le retrait est empêché, il crée des efforts de traction internes, qui peuvent atteindre la résistance à la rupture. L'humidité freine le retrait, d'où la nécessité d'arroser le béton dans son jeune âge (cure de béton), car à ce moment, le béton encore peu résistant en traction, se fissure facilement si l'effet du retrait est important.

A l'extrême, un béton conservé sous l'eau augmente de volume : c'est le gonflement du béton qui tend asymptotiquement vers une limite. Il y a cinq types de retrait : Le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation [3].

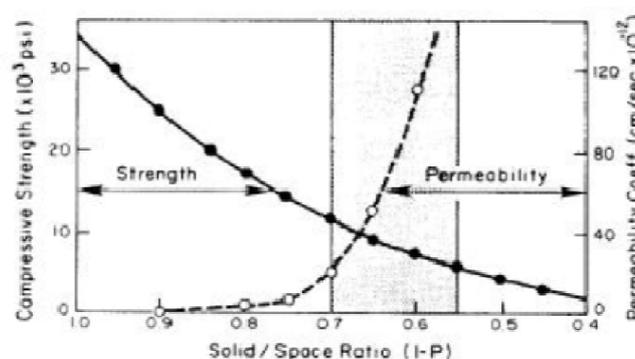
### C. Fluage :

Sous contrainte constante, le comportement rhéologique du béton change et conduit au développement de déformations différées de fluage. Ces déformations diminuent avec le temps. Le comportement du béton est qualifié de visco-élastique, couplage d'un comportement élastique, où le fluage est nul, et d'un comportement visqueux. Comme pour le retrait, le fluage peut être de type endogène ou de dessiccation.

Lorsque le matériau est déchargé, on note une diminution instantanée des déformations due à son comportement élastique et cette diminution peut se poursuivre au cours du temps.

### II .5.2.4 La porosité :

La structure poreuse du béton dépend de l'arrangement granulaire et de la structuration de la matrice cimentaire. La plupart des caractéristiques mécaniques du béton, sa perméabilité, les phénomènes de diffusion ainsi que sa durabilité dépendent essentiellement de sa porosité (Figure II.4). Plus la porosité diminue, plus la perméabilité ne diminue et plus les propriétés mécaniques augmentent [25].



**Figure II.4 :** Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [25].

**II .5.2.5 La durabilité :**

La durabilité est la résistance que présente un matériau sous des actions agressives provenant de processus interne, externe, chimique, physique, et physico-chimique. La durabilité du béton par rapport aux attaques exogènes s'explique en grande partie par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux des bétons [26].

Les paramètres représentant la durabilité peuvent être mesurés et les matériaux doivent être performants dans des limites spécifiques de ces paramètres. La durabilité du béton dépend de la nature chimique, du rapport E/C et de sa relation avec la porosité et la distribution poreuse [27], [28]. Néanmoins, DE BELIE et al, ont nommé d'autres paramètres qui ont une importance considérable sur la durabilité du béton face aux milieux agressifs tels que :

- Type de ciment, composition, degré de pouzzolanicité...;
- Type de granulats : gravier, calcaire...;
- Utilisation des ajouts cimentaires : cendre volante, fumées de silice...;
- Addition des polymères ;
- Application des produits étanches ;
- Durées et conditions des cures.

---

**PARTIE B : BETONS RECYCLE****II.6 Introduction :**

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne [29]. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans de nombreux pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton.

En effet, la thématique des bétons recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie bibliographique ne présente que les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et la caractérisation de ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci.

L'étude bibliographique qui suit, après avoir effectué un rappel sur la classification des déchets de chantier, s'articulera autour des volets suivants :

- Les propriétés des granulats recyclés de béton.
- Les propriétés physicomécaniques des bétons à base de granulat recyclé.

**II.7 Généralités sur les déchets :****II.7.1 Définition du mot « déchet » :**

Le mot « déchet » désigne la perte qu'une chose subit dans son volume, sa valeur ou dans quelque une de ces qualités, il est synonyme de résidu rejeté parce que il n'est plus utilisable ou consommable, parce qu'il n'a pas de valeur [30].

**II.7.2 Source des déchets utilisés en génie civil :**

Deux principales sources de production de déchets utilisés dans le domaine de génie civil, qu'on les rencontre généralement, les déchets de construction et de démolition (C&D) et les sous-produits de l'industrie.

**II.7.2.1 Déchets de construction et de démolition :****A. Production :**

Les déchets de construction et de démolition (C&D) qui sont à la fois lourds et volumineux, à travers le monde entier, ne cessent de se produire en des quantités énormes. En Algérie, les déchets de construction et de démolition, qui sont généralement classés parmi les déchets industriels, restent inconnus et sont estimés approximativement à des millions de tonnes par an [31].

Et selon l'étude réalisée par Bedjou [32], les déchets issus du bâtiment sont estimés à 2,2 millions de tonnes par an.

**B. Répartition :**

Les travaux de construction, de rénovation et de démolition produisent des tas de matériaux de construction : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers, etc. Ces tas sont plus ou moins composites suivant la nature des ouvrages et l'âge de leur construction.

**II.7.2.2 Les sous-produits de l'industrie :**

L'industrie constitue la source principale des sous-produits et déchets utilisés dans le domaine de génie civil. Des quantités énormes qui se produisent sans cesse et qui augmentent toujours, des grandes surfaces de terrains immobilisés par les déchets stockés et de la réduction des disponibilités de terrains, ainsi que de la pollution de l'environnement avec toutes ces conséquences.

Le génie civil se considère comme un domaine d'utilisation des déchets industriels a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles ainsi qu'une large gamme de matériaux de construction.

**II.7.3 Classification des déchets dans le génie civil :**

Dans le cadre de travaux de génie civil, on distingue trois catégories principales de déchets :

**II.7.3.1 Déchets inertes :**

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne présente pas de danger pour l'homme et l'environnement.

Ils sont constitués presque intégralement de minéraux tels que silicates, carbonates ou aluminates ; leur contenu en métaux lourds ou autres polluants est très faible. Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve :

Béton, Briques, Parpaings, Tuiles et céramiques, Terres et granulats non pollués et sans mélange.

**II.7.3.2 Déchets banals :**

Les déchets banals ou les déchets industriels banals (DIB) sont non inertes et non dangereux générés par les activités, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou du service, ce sont des déchets qui ne représentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux, etc. [33].

**II.7.3.3 Déchets dangereux :**

Les déchets dangereux ou les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets qui présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitant d'être éliminés dans une filière spécifique. En citant par exemple :

Pots de peinture, tubes de colle, certains déchets d'amiante, néons, etc. [33].

**II.7.4 Le recyclage des déchets :**

Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement partiel ou total d'une matière première naturelle, il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse.

La brique, le béton et le mortier peuvent être concassés et utilisés comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de construction.

**II.7.5 Intérêt de recyclage des déchets de chantier :**

Chaque année, les activités du bâtiment et des travaux publics produisent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais, qui dans le cas général sont des déchets inertes. Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour les acteurs des travaux publics : maîtrises d'ouvrage, maîtrises d'œuvre, entreprises de BTP, carriers...etc. L'utilisation de tels matériaux dits recyclés offre plusieurs avantages :

- économie des ressources naturelles de granulats.
- réduction des volumes de stockage des déchets inertes.
- économie de transports.

**II.7.6 Utilisation des déchets en Algérie :**

En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20%) connu ces dernières années en granulats et ciment, 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 1982 en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de Construction (C.S.T.C) Belge. Cependant, pour l'emploi des granulats recyclés (en particulier les granulats de béton et de briques concassées) dans le béton hydraulique, il existe plusieurs obstacles dans les textes de codification technique. De plus, le manque de connaissances sur la durabilité de ces bétons engendre la méfiance des usagers. Par conséquent, une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats pourrait contribuer au développement de ce type d'application.

**II.8 Granulats recyclés :**

Les granulats recyclés sont des granulats résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes.

**II.8.1 Elaboration des granulats recyclés :****II.8.1.1 Concassage, criblage :**

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

**II.8.1.2 Élimination des polluants :**

En ce qui concerne les appareillages spécifiques à l'amélioration des granulats recyclés, on trouve tous les appareillages ou méthodes permettant d'éliminer les impuretés. Ces impuretés sont principalement du métal (élimination manuelle ou par séparateur magnétique), du bois (élimination par voie humide), du plâtre (tri manuel), du carton ou papier, du plastique (élimination par air).



**Figure II.5 :** Réception des bétons de démolition.



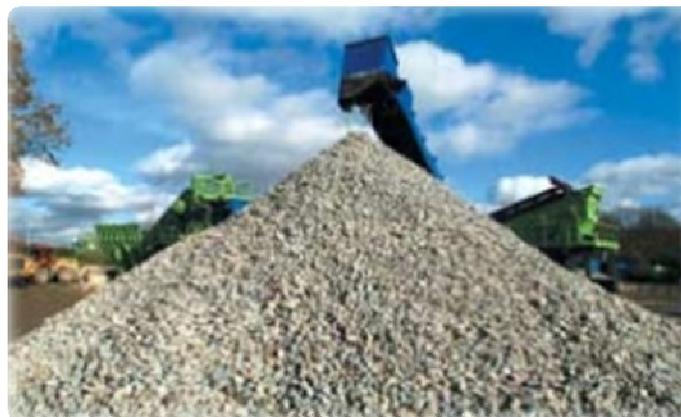
**Figure II.6 :** Stock des matériaux de démolition destiné au recyclage.



**Figure II.7 :** Préparation à la cisaille.



**Figure II.8 :** Dé ferrailage électromagnétique.



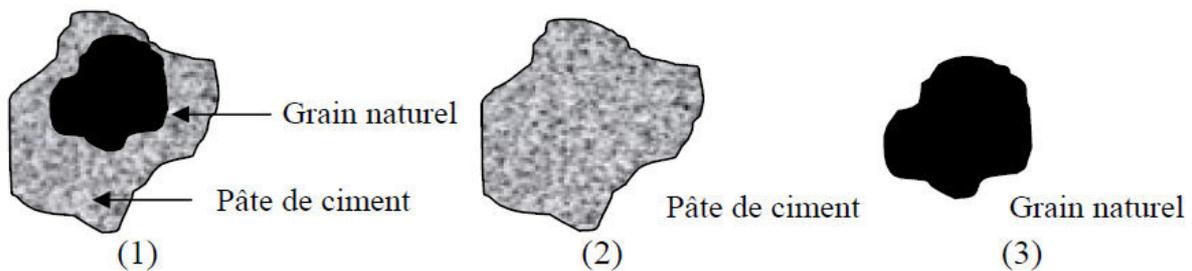
**Figure II.9 :** Agrégats recyclés.

## II.8.2 Composition et propriétés des granulats recyclés de béton :

### II.8.2.1 Composition :

Les agrégats recyclés produit à partir des déchets de démolition (recyclage) se distinguent des agrégats naturels ou artificiels par leur constituant et leur forme [34], en effet un agrégat recyclé peut être :

- un agrégat recyclé partiellement (enrobé par la pâte de ciment).
- une pâte de ciment seul.
- un grain de gravier naturel.



**Figure II.10 :** *Forme des agrégats recyclés [35].*

### II.8.2.2 Propriétés des granulats recyclés de béton :

#### A. Les propriétés héritées du mortier :

Les granulats recyclés se distinguent des granulats naturels puisque ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. Ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés : densité plus faible, absorption plus élevée, teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées [36]. La teneur en mortier dépend du cycle de concassage du béton et est directement liée à la taille du granulat [36]. Il a également été constaté que les caractéristiques du mortier dépendaient des performances du béton d'origine [37].

#### B. Les propriétés chimiques des granulats recyclés :

La présence de mortier dans les granulats recyclés modifie les caractéristiques chimiques des granulats recyclés par rapport à celles des granulats naturels.

Des équipes de chercheurs ont montré la différence de solubilité des chlorures dans l'eau et dans l'acide pour différentes teneurs en mortier [38].

#### C. Les propriétés mécaniques des granulats recyclés :

Des études montrent que la présence d'ancien mortier attache aux granulats réduits la résistance aux chocs, et à l'usure [36], [39], [40].

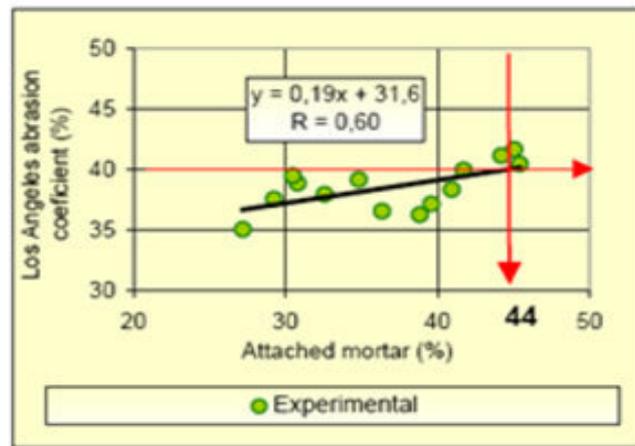


Figure II.11 : Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles [40].

#### D. Propriétés physiques des granulats recyclés :

De nombreuses études montrent que les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels [41, 42, 43]. Ils ont le plus souvent une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée liée à une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influence également sur la porosité des granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [44].

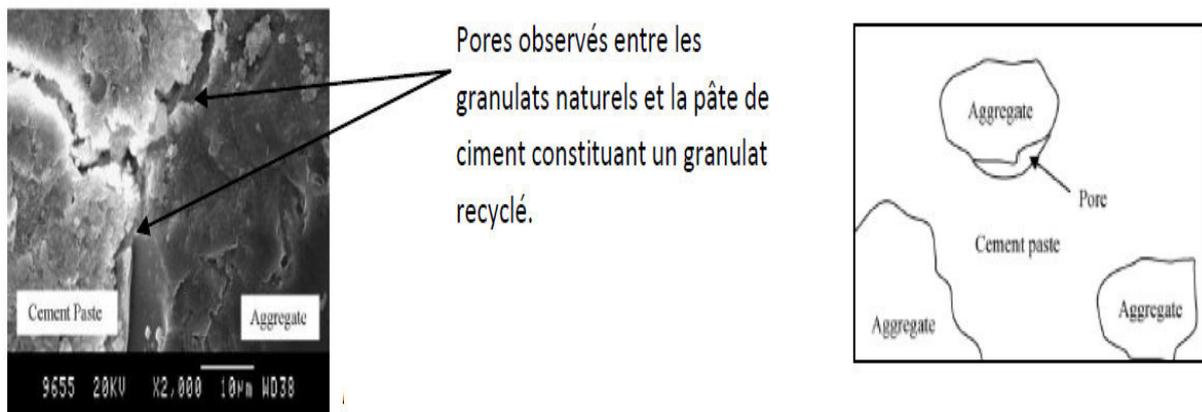


Figure II.12 : Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton [45].

## **II.9 Propriétés des bétons à base d'agrégats recyclés :**

### **II.9.1 À l'état frais et durcissant :**

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

#### **II.9.1.1 Masse volumique à l'état frais :**

Elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 Kg/m<sup>3</sup> [46].

#### **II.9.1.2 Teneur en air «naturelle» du béton frais :**

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6 % [46].

#### **II.9.1.3 Rhéologie du béton à l'état frais :**

La substitue des granulats naturels par des granulats recyclés, cause une perte de maniabilité [46]. Cependant, la formulation est généralement mise au point avec un objectif de consistance initiale (exprimée sous forme d'affaissement au cône). Tout l'éventail des valeurs d'affaissement est à priori envisageable avec des matériaux recyclés, avec des dosages en eau plus forts que pour les bétons ordinaires.

#### **II.9.1.4 Durcissement :**

Le granulat recyclé, surtout s'il est de qualité médiocre, exerce un effet plafond sur la résistance finale plus notable que dans le cas des granulats naturels. De ce fait, à même résistance à 28 jours, la résistance à des âges antérieurs est un peu plus élevée [47], comme on le constate classiquement avec les bétons de granulats légers. Les résistances au très jeune âge sont cependant influencées par le temps de prise, qui peut varier dans un sens ou dans l'autre.

### **II.9.2 À l'état durci :**

#### **II.9.2.1 Performances mécaniques :**

##### **A. Résistance à la compression :**

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

De façon générale, les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend :

- Du taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% [48, 49]. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés et une mauvaise interface granulats/ liant.
- de la nature des ajouts d'origine minérale.
- de la nature du ciment.

Katz a constaté que dans un rapport E/C (entre 0,6 et 0,75), la résistance du béton à base de granulats recyclés est comparable à celui du béton de référence, même à un niveau de remplacement de 75%.

Rao a trouvé que la résistance du béton à base de granulats recyclés et le béton de référence sont comparables avec un remplacement à 100%, à condition que le rapport eau-ciment soit supérieur à 0,55 [50].

### **B. Résistance à la traction et à la flexion :**

Les résultats issus des essais de traction uni axiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés de 15 à 20% par rapport à béton référence à 100% de remplacement [43], [48].

#### **II.9.2.2 Module élastique :**

Plusieurs études ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés [48], [51]. Pour un béton ordinaire, le module élastique augmente en fonction de l'âge du béton tandis que celui des bétons de granulats recyclés ne semble pas dépendent de l'âge de l'éprouvette de béton.

#### **II.9.2.3 Fluage et retrait de séchage :**

La forte absorption due à la présence d'ancien mortier à la surface des granulats et de la porosité élevé, influant sur les déformations de fluage et de retrait, elles sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels [52], [53].

Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulats recyclés à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0,55 à 0,8 mm/m, alors que la valeur pour un béton à base de granulats naturels est seulement d'environ 0,30 mm/m.

Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évident, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est-à-dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieur à celle du béton à base de granulats naturels.

**II.9.3 Propriétés de durabilité des bétons recyclés :****II.9.3.1 Absorption d'eau des bétons :**

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement plus élevées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires [54].

**II.9.3.2 Perméabilité :**

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

**II.9.3.3 Carbonatation :**

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés [54]. Rasheeduzzafar et col [55] ont montré que le potentiel de corrosion dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel.

Cette augmentation de la profondeur de carbonatation peut être attribuée à une augmentation de la perméabilité du béton à base de granulats recyclés. D'une manière générale, les auteurs s'accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels [29].

---

# **CHAPITRE III :**

# **AJOUTS MINERAUX**

---

**III.1 Introduction :**

De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton est intéressée à cette nouvelle orientation ; en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton [56]. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

La section suivante traitera l'effet de l'incorporation de certains ajouts minéraux dans les bétons. On fera le point sur l'effet de ces sous-produits sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons.

**III.2 Classification des ajouts minéraux :**

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. On distingue ;

**III.2.1 Les principaux ajouts minéraux actifs :**

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

**III.2.1.1 Les laitiers de haut fourneau :**

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

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

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

### III.2.1.2 L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons :

#### ➤ A l'état frais :

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [56] 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 [5] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Des recherches sur le sujet trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton [56].

#### ➤ A l'état durci :

Selon Venuat [3], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Les particules de laitier <10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules > 45 µm ont de la difficulté à s'hydrater.

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

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

### III.2.1.3 La pouzzolane :

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [57].

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO<sub>2</sub>) et d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux

(CaO). Elles sont généralement rouge ou noir, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux (CaO) sont en général plus vitreuses. La différence SiO<sub>2</sub>-CaO doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable [58,59]. Les pouzzolanes sont définis comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes [60].



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

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

#### III.2.1.4 Types de pouzzolane :

##### A. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme [CSA A 3001], Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618) [61].

##### B. Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que, le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des

débris de brique et de tuile fabriqués avec des argiles pures. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [62].

### III.2.1.5 L'effet de La pouzzolane sur les caractéristiques des bétons :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

#### ➤ A l'état frais :

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration [63].

#### ➤ 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.

### III.2.2 Principaux ajouts minéraux inertes :

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par

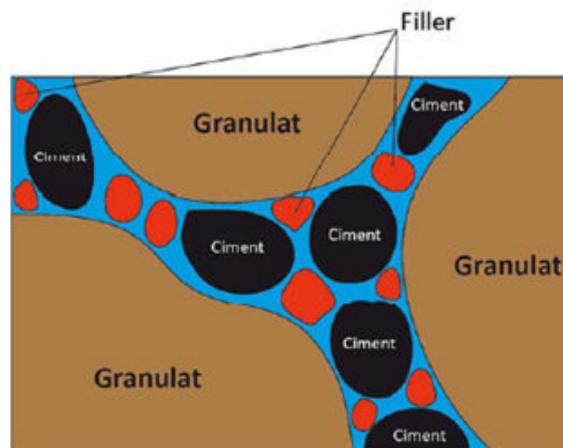
celles de matériaux inertes [N F P 18- 305].

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats [22], [64].

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland et le béton (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau et durabilité) [65, 66]. Parmi ces additifs on distingue les fillers de marbre et la poussière.

### III.2.2.1 Les fillers de marbre :

Un filler est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires [NF P18-508]. L'appellation « filler » vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.



**Figure III.1 :** *Illustration de l'effet filler [67].*

Les additions calcaires sont des additions de type I classées comme quasiment inertes. Les critères qui les définissent dans la norme NF P18-508 [EN 197-1] représentent des propriétés physiques et chimiques.

**Tableau III.1 : Critères sur les propriétés physiques. [67]**

Propriétés	Passant à 63µm	Blaine
Critères	>63%	>2000cm <sup>2</sup> /g

**Tableau III.2 : Critères sur les propriétés chimiques. [67]**

Propriétés	Indice d'activité	Teneur en CaCo <sub>3</sub> total	Valeur de bleu	Teneur en sulfate
Critères	>0.68	>62%	<1.3g/100g	<0.15%

Si l'addition calcaire répond aux critères de conformité de la norme NF P18-508, elle peut alors être prise en compte lors de la formulation du béton pour des dosages prescrits par la norme NF EN 206-1 [NF EN 206-1].

### III.2.2.2 L'effet des fillers de marbre sur les propriétés des bétons :

Si les fillers de marbre sont essentiellement utilisés comme des additions inertes permettant de remplacer une partie du ciment et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton, leur influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances).

#### ➤ A l'état frais :

##### • Amélioration de l'ouvrabilité :

L'ajout d'une quantité d'une fine poudre à un béton, permet de diminuer le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des fillers diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette même consistance l'utilisation des poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire.

La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules.

La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules > 45 µm à un maximum de 34 %.

Alexander [56] rapporte que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse de fillers calcaire jusqu'à 500 m<sup>2</sup>/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

Il est à noter que la présence du fillers calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

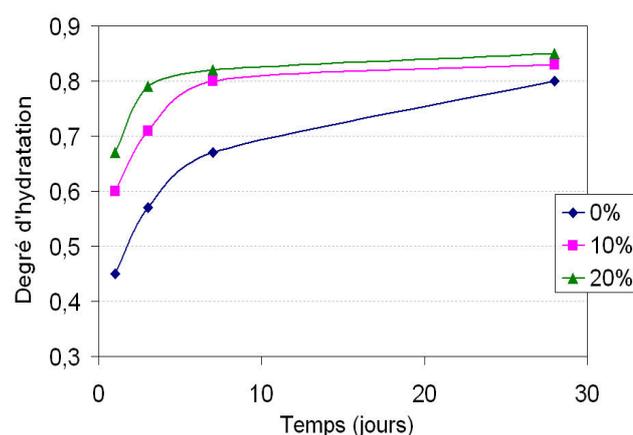
➤ **A l'état durci :**

• **Résistance mécanique :**

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler [68, 69, 70]. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier [71].

Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats [72].

D'un autre côté, les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) et a tendance à être négligeable au long terme [73, 74, 75].



**Figure III.2 :** Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en fillers [73].

- **Durabilité :**

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs (CO<sub>2</sub>, chlorure...). L'étude de la perméabilité des bétons contenant des fillers calcaires est donc un point essentiel si l'on veut étudier leur comportement à long terme. Pour les essais de perméabilité, que ce soit au gaz ou à l'eau, les résultats semblent contradictoires suivant les études réalisées.

Boel [76] trouvent une perméabilité au gaz plus importante pour les bétons contenant du filler calcaire, les essais de Assié [77] et de Zhu [78] montrent qu'elle est égale voir inférieure à celle de bétons sans fillers.

Les résultats trouvés pour la perméabilité et la sorptivité à l'eau varient suivant les recherches effectuées. En effet, plusieurs études [77, 78], montrent que l'ajout de filler n'influe pas sur ces deux caractéristiques alors que d'autres recherches trouvent des valeurs légèrement inférieures pour les bétons fillerisés [79].

---

**CHAPITRE IV :**  
**MATERIAUX,**  
**MATERIELS**  
**ET**  
**ESSAIS**

---

### IV.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.

### IV.2 Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des essais expérimentaux qui concernent leurs caractéristiques au laboratoire de génie civil à l'université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj, et d'autres essais ont été réalisés dans le laboratoire de génie civil à l'université de M'SILA et le laboratoire de la cimenterie de AIN EL KBIRA.

### IV.3 Caractéristiques des matériaux :

#### IV.3.1 Caractéristiques du gravier :

##### IV.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NA EN 933-5]

###### A. gravier concassé :

Le gravier utilisé pour la confection du béton dans notre étude expérimentale provient de la carrière de MECHRI qui se situe à environ 20 Km de la ville de BBA.

###### ➤ But de l'essai:

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.



Figure IV. 1 : La tamiseuse utilisée.

➤ **Principe de l'essai:**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

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

➤ **Matériels utilisés :**

- Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.

**Tableau IV.1 :** *Tamis utilisés pour le tamisage des graviers.*

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
3/8	(8 - 6,3 - 5 - 4 - 3.15 - 2.5 - et le fond)
8/16	(16 - 12.5 - 10 - 8 - 6.3 - 5 - et le fond)

➤ **Préparation de l'échantillon:**

L'échantillon de gravier est préparé selon la norme NF 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.

➤ **Mode Opérateur :**

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.



**Figure IV.2 :** *Fraction du gravier après tamisât.*

**B. Gravier recyclé :**

Le gravier recyclé est obtenu à partir du concassage, tamisage et séparation des éprouvettes cylindriques (16\*32), qui ont été ramenés depuis le Bureau d'Etudes et Suivi Technique de M.BENCHENNAF à Bordj Bou Arreridj.

Les éprouvettes ont été confectionnées à partir d'un béton local fabriqué dans un chantier.

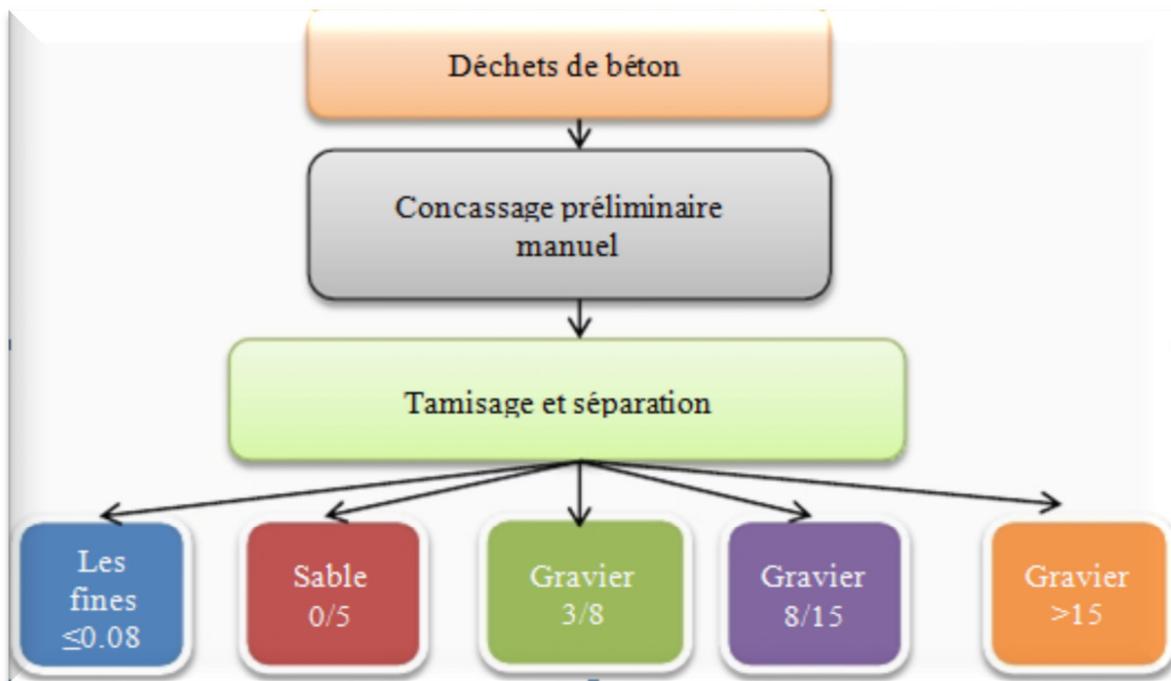


Figure IV.3 : Procédure de préparation des granulats recyclés [80].



Figure IV.4 : Concassage, tamisage et séparation des agrégats recyclés [80].

L'analyse granulométrique du gravier recyclé est effectuée de la même manière que celui du gravier concassé c.-à-d. la même norme. [NA EN 933-5]

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) et (8/16).

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	moyenne			
Gruvier 3/8 1600g	8	18	20	18	18.67	18.67	1.17	99.60
	6.3	310	295	264	289.67	308.34	19.27	80.73
	5	389	459	426	424.66	733	45.81	54.19
	4	487	527	494	502.67	1235.67	77.23	22.77
	3.15	311	253	314	292.67	1528.34	95.52	4.48
	2.5	60	28	65	51	1579.34	98.71	1.29
	Font	18	13	18	16.33	1595.67	99.73	0.27
Gruvier 8/16 3200g	16	156	90	77	107.67	107.67	3.36	99.72
	12.5	855	1036	1060	983.67	1091.34	34.10	65.90
	10	878	850	903	877	1068.34	61.51	38.49
	8	632	621	539	597.34	2565.68	80.18	19.82
	6.3	479	423	422	441.34	3007.02	93.97	6.03
	5	116	125	132	124.33	3131.35	97.85	2.15
	Font	77	51	61	63	3194.35	99.82	0.18

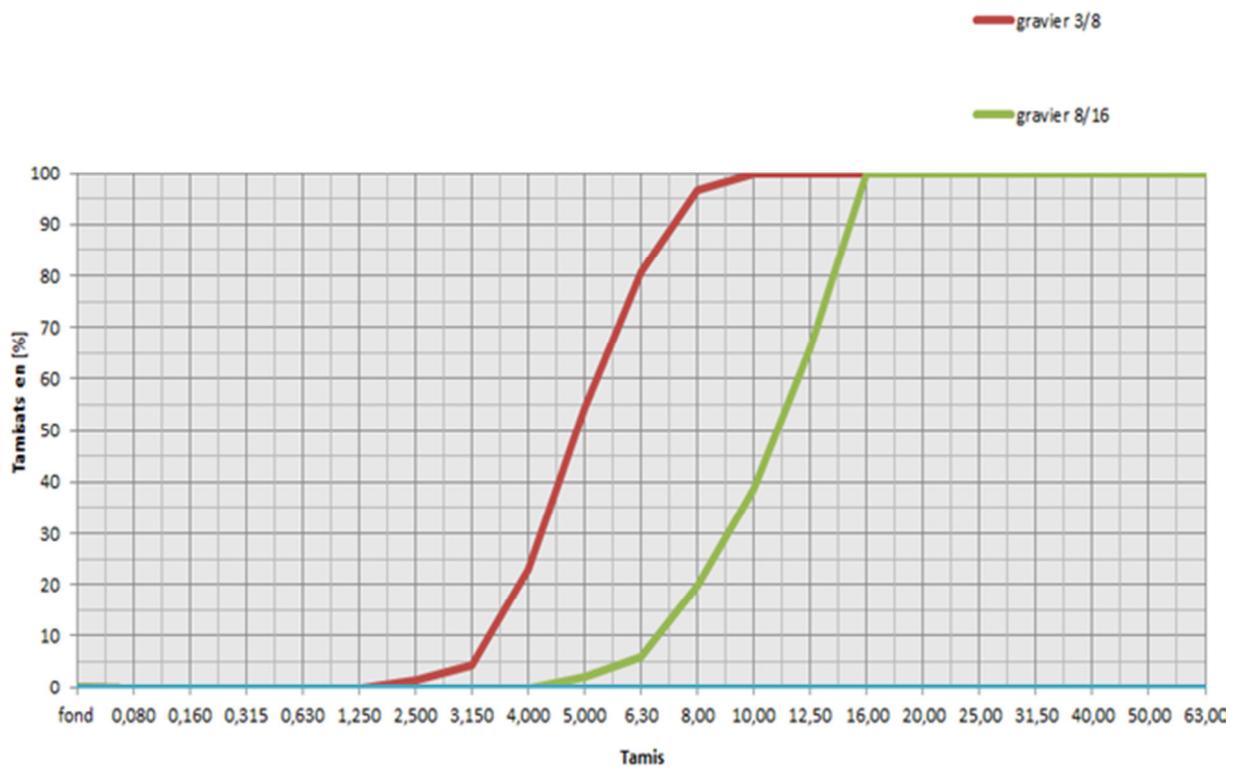


Figure IV.5 : Courbe granulométrique des granules concassés (3/8), (8/16).

Tableau IV.3 : L'analyse granulométrique de gravier recyclé (3/8) et (8/16).

	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)				Refus cumulé	% des refus cumulés	% de tamis cumulé
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	moyenne			
Gavier 3/8 1600g	8	14	18	13	15	15	0.94	99.82
	6.3	424	485	458	455.67	470.67	29.42	70.58
	5	350	353	328	343.67	814.34	50.90	49.10
	4	346	333	348	342.34	1156.68	72.29	27.71
	3.15	291	269	290	383.34	1440.62	90.00	10.00
	2.5	130	115	123	122.67	1562.69	97.67	0.33
	Font	47	27	33	35.67	27	99.90	0.10
Gavier 8/15 3200g	16	160.5	158.5	179	168	168	5.25	99.89
	12.5	1475	1500.5	1507	1494.16	1662.16	51.94	94.75
	10	973	922	901	933	2595.16	81.10	48.06
	8	461.5	482.5	485	476.33	3071.49	95.984	4.016
	6.3	108	115.5	93.5	105.66	3177.15	99.285	0.715
	5	10	10.5	12	10.83	3187.98	99.624	0.376
	Font	7.5	11	15	11.16	3199.14	99.977	0.023

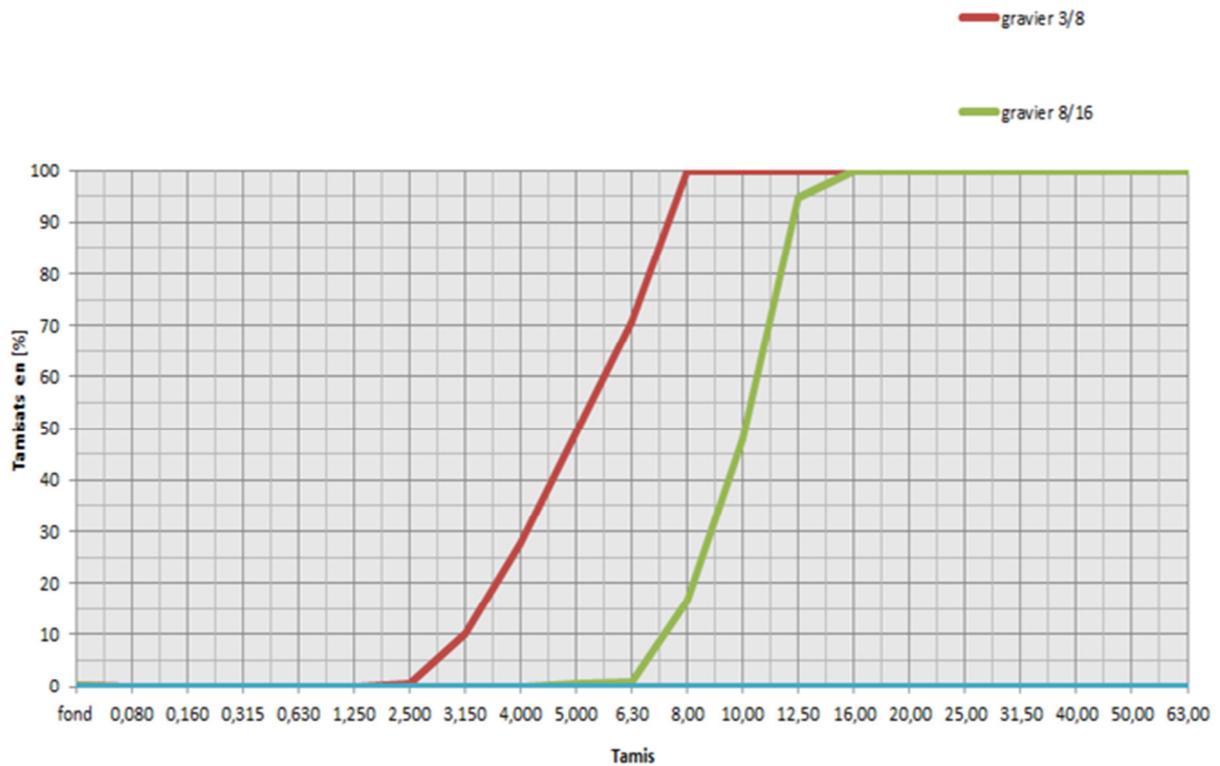


Figure IV.6 : Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/16).

**IV.3.1.2 La masse volumique :**

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

**A. La masse volumique apparente [NA EN 1097] :**

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent (y'compris les vides), Elle est exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, Kg/m<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>).

**➤ Principe de l'essai:**

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

**➤ Matériels utilisés :**

- Une balance avec une précision de 0.01 g.
- Un récipient avec un volume de 5 litre.
- Une règle à araser.

**➤ Mode opératoire :**

- Peser le récipient vide et taré.
- Prendre le matériau (gravier) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

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

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.4 :** *Masse volumique apparente du gravier concassé.*

Gravier	N° d'essai	M (g)	V (L)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
3/8	1	6005	5	1.201	1.202
	2	6006	5	1.200	
	3	6038	5	1.207	
8/16	1	6667	5	1.333	1.331
	2	6656	5	1.331	
	3	6650	5	1.330	

**Tableau IV.5 :** *Masse volumique apparente du gravier recyclé.*

Gravier	N° d'essai	M (g)	V (L)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
3/8	1	5847	5	1.169	1.179
	2	5948	5	1.189	
	3	5899	5	1.179	
8/16	1	6335	5	1.267	1.287
	2	6418	5	1.283	
	3	6562	5	1.312	

### B. La masse volumique absolue : [NA EN 1097]

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, Kg/m<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>) [6].

#### ➤ Principe de l'essai:

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.

#### ➤ Matériels utilisés :

- Une éprouvette graduée en verre.

➤ **Mode opératoire :**

- Remplir l'éprouvette graduée en verre par un volume d'eau ( $V_1 = 400$  ml).
- Peser une masse ( $M = 300$  g) du matériau (gravier).
- Introduire cette masse dans l'éprouvette (s'assuré de bien éliminer les bulles d'air).
- Noter le nouveau volume  $V_2$ .
- Cette opération est répétée 3 fois.
- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1)$$

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.6 :** *Masse volumique absolue du gravier concassé.*

Gravier	N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\gamma_{\text{abs}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\gamma_{\text{abs moy}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
3/8	1	300	400	515	2.608	2.55
	2	300	400	520	2.500	
	3	300	400	518	2.542	
8/15	1	300	400	512	2.678	2.609
	2	300	400	515	2.608	
	3	300	400	518	2.542	

**Tableau IV.7 :** *Masse volumique absolue du gravier recyclé.*

Gravier	N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\rho_{\text{abs}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_{\text{abs moy}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
3/8	1	300	400	520	2.500	2.400
	2	300	400	526	2.380	
	3	300	400	528	2.343	
8/16	1	300	400	520	2.500	2.572
	2	300	400	515	2.608	
	3	300	400	515	2.608	

**IV.3.1.3 La porosité :**

C'est le rapport du volume des vides contenu dans les grains au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante [18] :

$$P(\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

D'après les résultats obtenus précédemment (masse volumique apparente et absolue), on peut exploiter ces données afin de déterminer la porosité du gravier grâce à la relation suivante :

$$P(\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho}{\gamma}\right) * 100$$

D'où ;

$\gamma$  : La masse volumique absolue du gravier.

$\rho$  : La masse volumique apparente du gravier.

**IV.3.1.4 La compacité :**

C'est le rapport du volume des grains solides au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante [18] :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} * 100$$

$$\text{Ou : } C(\%) = 1 - P$$

**IV.3.1.5 L'indice des vides :**

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains solides, définie par la relation suivante :

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\text{Ou : } e(\%) = \frac{1-C}{C}$$

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

**A. Gravier concassé :**

**Tableau IV.8 :** Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

fraction de gravier	Porosité	Compacité	l'indice de vide
3/8	52.90	47.1	1.12
8/16	48.98	51.02	0.96

**B. Gravier recyclé :**

**Tableau IV.9 :** Porosité, compacité et indice des vides du gravier recyclé.

fraction de gravier	Porosité	Compacité	l'indice de vide
3/8	52.86	47.14	1.12
8/16	49.96	50.04	0.99

**IV.3.1.6 Degré d'absorption d'eau : [NA EN 1097-6]**

Le coefficient A mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant, on en tient compte dans la formulation, Elle est exprimée en (%) et définit par la formule [18] :

$$A(\%) = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) * 100$$

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

$M_S$  : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

**A. Gravier concassé :**

**Tableau IV.10 :** Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16) concassés.

Fraction	$M_H$ (g)	$M_S$ (g)	A (%)
3/8	1000	975	2.50
8/16	1000	983	1.17

## B. Gravier recyclé:

Tableau IV.11 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16) recyclés.

Fraction	M <sub>H</sub> (g)	M <sub>S</sub> (g)	A (%)
3/8	1000	938	6.60
8/16	1000	958	4.38

## IV.3.1.7 La résistance à la fragmentation par chocs: Essai Los Angeles : [NA EN 1097-2]

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques .



Figure IV.7 : Appareil de Los Angeles.

Cet essai a été effectué au laboratoire de génie civil université de M'SILA, conformément à la norme (NA EN 1097- 2) sur deux types de granulats (concassé et recyclé).



Figure IV.8 : Tamisage de gravier concassé et recyclé avec un tamis 1.6 mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA :

**Tableau IV.12 :** Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA [81].

Coefficient LA	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 présentés dans les tableaux ci-dessous :

#### A. Gravier concassé :

**Tableau IV.13.** Résultats d'essai de Los Angeles du gravier concassé (3/8), (8/16).

Fraction	LA (%)
3/8	25.00
8/16	11.70

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est très dure et reconnu apte pour la confection du béton.

#### B. Gravier recyclé :

**Tableau IV.14 :** Résultats d'essai de Los Angeles du gravier recyclé (3/8), (8/16).

Fraction	LA (%)
3/8	28.82
8/16	26.5

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est assez dur et reconnu apte pour la confection du béton.

### IV.3.2 Caractéristiques du sable :

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un sable de dune, ce sable a été prélevé de la région de OUED SOUF, il est apprécié pour ses bonnes caractéristiques.

#### IV.3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NA EN 933-1]

➤ **But de l'essai:**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de 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.

➤ **Matériels utilisés :**

- Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.

**Tableau IV.15 :** *Tamis utilisés pour le tamisage du sable.*

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08 et le fond)

➤ **Préparation de l'échantillon:**

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1

La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

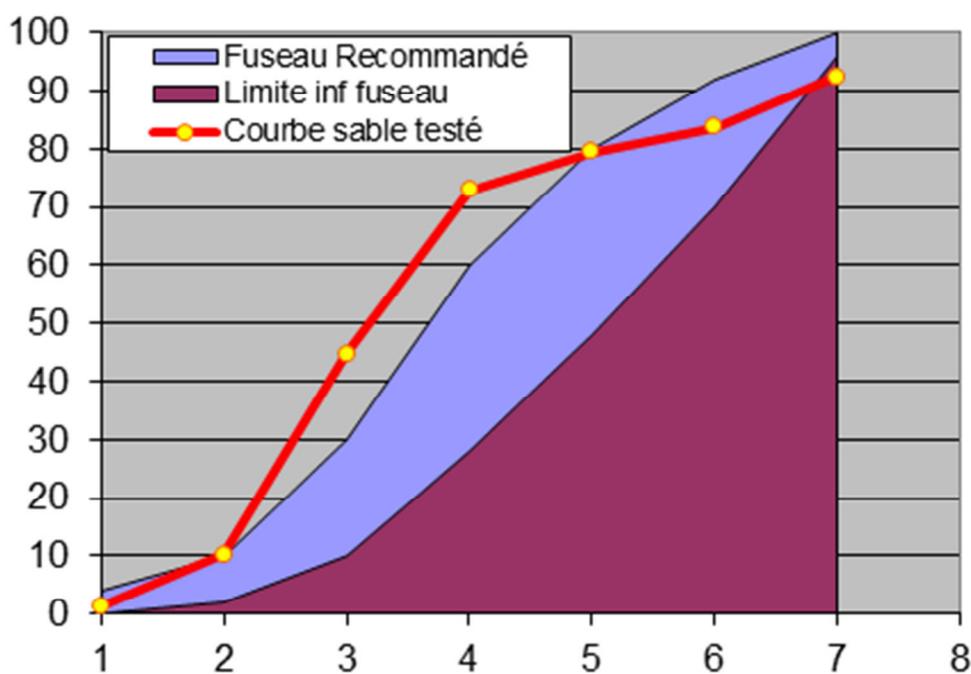
➤ **Mode Opérateur :**

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier, la seule différence est la durée de l'essai ; au lieu de 7 minutes pour le gravier elle va être 3 minutes pour le cas du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.16 :** Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaires (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	1.58	1.58	0.16	100
2,50	17.16	18.74	1.87	99.84
1,25	58.5	77.24	7.72	98.13
0,63	222.33	299.57	29.96	92.28
0,315	423	722.57	72.257	27.74
0,16	225.33	947.9	94.79	5.21
0,08	48.33	996.23	99.62	0.38
Fond	3.66	999.89	99.99	0.01



**Figure IV.9 :** Courbe granulométrique du sable d'OUED SOUF.

### IV.3.2.2 Le module de finesse [82] :

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible plus le sable est riche en éléments fins, il est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08

**Tableau IV.17:** Modules 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

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd son ouvrabilité [3], [83].

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

$$MF = (0.158 + 1.874 + 7.724 + 29.957 + 72.257 + 94.79) / 100 = 2.07$$

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

**MF = 2.07 MF entre 2 et 2.5 (c'est un sable moyen).**

### IV.3.2.3 Equivalent de sable : NA EN 933-8

➤ **But de l'essai :**

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles qui diminuent la qualité du béton et mortier.

➤ **Mode opératoire :**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g), Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10 cm).

- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120 g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminer toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc.
- Placer l'éprouvette dans un agitateur mécanique pendant 3 minutes.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavande au-dessus de l'éprouvette, rincée 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 et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter

**A. Equivalent de sable visuel (E.S.V) :**

- 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  $h_2$  compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

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

Avec :  $h_1$  : hauteur du sable plus flocculat.

$h_2$  : hauteur du sable.

**B. Equivalent de sable piston (E.S.P) :**

- Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\%$$

Avec :  $h_1$  : hauteur du sable plus flocculat.

$h'_2$  : hauteur du sable.

**Tableau IV.18.** *Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP [84].*

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	ES ≥ 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.19 :** *Résultats d'essai d'équivalent de sable d'OUED SOUF testé.*

N° d'essais	h <sub>1</sub> (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	E <sub>s.v</sub> (%)	E <sub>s.v moy</sub> (%)	h <sub>2</sub> ' (cm)	E <sub>s.p</sub> (%)	E <sub>s.p moy</sub> (%)
1	10.1	8.5	84.15	82.65	8.2	81.18	80.36
2	10.9	9	82.5		8.35	78.6	
3	10.7	8.7	81.30		8.25	81.30	

#### IV.3.2.4 La masse volumique :

##### A. Masse volumique apparente:[NA EN 1097-6]

##### A.1. Masse volumique apparente à l'état lâche :

###### ➤ Principe de l'essai:

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

###### ➤ Matériels utilisés :

- Une balance avec une précision de 0.01 g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle à araser.

###### ➤ Mode opératoire :

- Peser le récipient vide et tarer.
- Prendre le matériau (sable) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente à l'état lâche est déterminée par la formule suivante :

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

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.20 :** Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF à l'état lâche.

N° d'essais	M (g)	V (L)	$\rho_{\text{app}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{app moy}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	1419	1	1.419	1.413
2	1405	1	1.405	
3	1415	1	1.415	

##### A.2. Masse volumique apparente à l'état compact:

Le principe de l'essai, matériels utilisés et le mode opératoire sont les mêmes que ceux pour déterminer la masse volumique apparente à l'état lâche, la seule différence est que le récipient qui contient le sable est soumis à des secousses manuelle (25 secousses) afin de le compacter.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

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

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.21 : Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF à l'état compact.**

N° d'essais	M (g)	V (L)	$\rho_{\text{app c}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{app c moy}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	1731	1	1.731	1.732
2	1736	1	1.736	
3	1730	1	1.730	

### B. La masse volumique absolue : [NA EN 1097-6]

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

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V2 - V1) \quad \text{avec : } M=300 \text{ g}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.22 : Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.**

N° d'essais	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\rho_{\text{abs}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{abs moy}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	300	400	425	2.400	2.309
2	300	400	435	2.222	
3	300	400	430	2.307	

### IV.3.2.5 La porosité:

C'est une caractéristique très importante qu'il faut la prendre en considération car elle influe sur certaines propriétés telles que la résistance mécanique.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P(\%) = [1 - (\rho_s/\gamma)] \times 100\%$$

A. à l'état lâche :

$$P_L = [1 - (\rho_L / \gamma_s)] \times 100\%$$

B. à l'état compact :

$$P_c = [1 - (\rho_c / \gamma_s)] \times 100\%$$

#### IV.3.2.6 La compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité est donnée par la relation suivante [18] :

$$C = 1 - P$$

A. à l'état lâche :

$$C_L = 1 - P_L$$

B. à l'état compacte :

$$C_c = 1 - P_c$$

#### IV.3.2.7 L'indice des vides :

Le rapport de volume des vides sur le volume des solides [18]:

$$e = p / (1 - p)$$

A. à l'état lâche :

$$e_L = P_L / (1 - P_L)$$

B. à l'état compacte :

$$e_c = P_c / (1 - P_c)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.23** : La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable d'OUED SOUF.

Porosité (%)		Compacité (%)		l'indice de vide	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
38.80	25.37	61.20	74.63	63.39	33.99

#### IV.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, l'université de Bordj Bou Arréridj.

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

**Tableau IV.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 ( $\text{Cl}^-$ )	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de ( $\text{NO}_2^-$ )	0,15 mg/l	> à la concentration max(0.1)
Taux de ( $\text{NO}_3^-$ )	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Residue sec	100 mg/l	

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

#### IV.3.4 Caractérisation des ajouts :

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont les suivants :

##### ➤ Les fillers de marbre :

Les fillers de marbre utilisés dans notre étude sont récupérés auprès de l'usine de « ZAHRAWI » qui se situe dans la zone industrielle de la wilaya de Bordj Bou Arréridj.

On a traité les déchets de marbre de façon à les pouvoir l'utiliser comme ajout de substitution dans le ciment :

- 1<sup>er</sup> étape consiste à les sécher, on a utilisé l'étuve qui se trouve au niveau de laboratoire de génie civil.
- 2<sup>ème</sup> étape a été de les broyer, cette étape a été réalisée au niveau de laboratoire de la cimenterie d'AIN EL KBIRA.
- **La pouzzolane :**
- **Le laitier**

#### IV.3.4.1 Les caractéristiques chimiques :

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

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.25 : Analyse chimique des ajouts.**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	P.A.F
Fillers de marbre	2.38	0.64	0.46	53.42	2.36	0.49	0.07	0.05	0.03	42.29
pouzzolane	46.66	17.74	8.69	11.01	4.14	0.04	1.10	5.07	0.01	8.94
Laitier	35.88	8.38	0.56	30.96	4.54	1.55	0.62	0.41	0.01	2.79

#### IV.3.4.2 Les caractéristiques physiques :

La procédure, le mode opératoire et matériel utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques des ajouts est quasiment le même que celui utilisé pour le ciment et selon les mêmes normes.

##### A. Masse volumique apparente :

Il s'agit de déterminer la masse volumique apparente des trois (03) types d'ajouts utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé « entonnoir ».



**Figure IV.10 : Entonnoir utilisé.**

##### ➤ Conduite de l'essai:

- Tarer le récipient P<sub>1</sub>.
- Remplir le récipient P<sub>1</sub>. posé au- dessous de l'axe du dispositif entonnoir avec la poudre de ciment.
- Faire l'opération sans vibration. Raser avec la règle appuyée sur les bords de récipient.
- Nettoyer l'extérieur du récipient.
- Peser de nouveau le récipient rempli P<sub>2</sub>

$$\rho_{app} = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

**B. Masse volumique absolue:**

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des trois (03) types d'ajouts utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier".



**Figure IV.11 :** *Le Densimètre de Le Chatelier.*

➤ **Conduite de l'essai:**

- Peser 64 g de ciment
- Introduire le benzène jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V0
- Introduire l'ajout dans le densimètre
- Agiter doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre
- Après stabilisation du niveau lire le volume soit V1
- Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

$$\gamma = \frac{m}{(V1 - V0)}$$

**c. La finesse :**

L'essai consiste à la mesure de la surface des grains contenus dans une masse unité de poudre, elle s'exprime en cm<sup>2</sup>/g.

➤ **Principe de l'essai:**

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de poudre compacté à une dimension et une porosité spécifiées. La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de poudre.



**Figure IV.12 :** *Appareil de Blaine.*

➤ **Conduite de l'essai:**

- Peser une quantité de l'ajout et mettre la poudre dans la cellule puis compacter à l'aide du piston
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2 s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

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

Avec

K: constante de l'appareil.

$\gamma$ : Masse volumique en g/cm<sup>3</sup>.

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

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

e : porosité de l'ajouts dans la cellule.

Les résultats obtenus qui présentent la moyenne de 3 essais sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.26 : Les caractéristiques physiques des ajouts.**

	Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )	Surface spécifique de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
Fillers de marbre	0.826	2.673	4100
Pouzzolane	0.913	2.38	4500
Laitier	0.912	2.90	5500

### IV.3.5 Caractéristiques de ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment CEMI 42.5, c'est un ciment pour les travaux dans les milieux fortement agressifs [85]. Fabriqué à la cimenterie d'AIN EL KBIRA.

Nous avons opté pour ce type de ciment car il est à base de 95(%) de clinker, cela nous permet de réaliser une substitution d'une partie de ciment par des ajouts (pouzzolane, laitier et fillers de marbre) et étudier leur effet sur les propriétés d'un béton à base d'agrégats recyclés. Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment fournie par le fournisseur.



Figure IV.13 : Ciment utilisé CEMI/42,5.

#### IV.3.5.1 Caractéristiques chimiques :

Tableau IV.27 : Analyse chimique du ciment utilisé [85].

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL	P.A.F	Residue insoluble
Valeur(%)	21.57	4.37	5.27	64.31	1.62	0.38	/	0.01	0.98	1.29

Tableau IV.28 : Composition minéralogique du clinker [85].

Composants	Valeur
C <sub>3</sub> S	67.81
C <sub>2</sub> S	9.74
C <sub>3</sub> A	2.13
C <sub>4</sub> AF	16.35

## IV3.5.2 Caractéristiques physiques :

Tableau IV.29 : Propriétés physiques du ciment utilisé [85].

Propriété	Valeur
Consistance normale	23.49 %
Surface spécifique Blaine	3670 cm <sup>2</sup> /g
Retrait à 28 jours	≤1000 μm / m
Expansion	≤ 10 mm
Masse volumique absolue	3.16
Temps de prise	≥ 60 Min

## IV 3.5.3 Caractéristiques mécaniques :

Tableau IV.30 : Propriétés mécaniques du ciment utilisé [85].

Propriété	Valeur	
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4.08
	7 jours	6.68
	28 jours	8.41
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	17.67
	7 jours	36.21
	28 jours	51.12

## IV.4 Formulation de béton :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment ;

- la méthode Baron.
- la méthode Bolomey.
- la méthode de Féret.
- la méthode de Faury.
- la méthode Dreux-Gorisse.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme [NF EN 206-1].

Pour la formulation des bétons à base d'agrégats 100% recyclés (déterminer la dépense en matériaux : ciment, sable, gravier et eau), il n'existe pas d'approche spécifique pour ce type de béton. On a opté dans le cadre de ce travail en faveur de la méthode des volumes absolus dite méthode de SCRAMTAIEV.

#### IV.4.1 Présentation de la méthode de formulation :

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 quantités du liant et des granulats.

##### IV.4.1.1 Définition du rapport (C/E):

- Pour  $(C/E) \leq 2.5$  : correspond aux bétons ordinaires plastiques.

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

- Pour  $(C/E) > 2.5$  : correspond au béton plutôt sec de haute résistance mécanique.

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

$R_b$ : classe de béton.

$R_c$ : activité ou classe du ciment.

A, A': coefficient admis d'après le tableau (IV.27) selon les propriétés et la qualité des matériaux

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

**Tableau IV.31:** Valeurs des coefficients A et A' [18].

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

##### IV.4.1.2 Détermination de la dépense en eau:

Elle est établie approximativement d'après le tableau (32) qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés.

**Tableau IV.32:** *Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton [3].*

La quantité d'eau l/m3 en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons	
70	40	20	10	Maniabilité, sec	Affaissement, cm
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	140	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	-	5-6
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

**IV.4.1.3 Détermination de la dépense en ciment:**

$$C = [(C/E) \times E]$$

**IV.4.1.4 Détermination de la dépense en gravier :**

La détermination du dosage en agrégats doit remplir les conditions suivantes:

La somme des volumes absolus de tous les composants du béton est égale à 1 m<sup>3</sup>.

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_E) + (S/\rho_S) + (G/\rho_G) = 1000 \text{ L} \dots\dots(1)$$

C, E, S et G: dépenses en ciment, eau, sable et gravier en (kg).

$\rho_c, \rho_E, \rho_S$  et  $\rho_G$  : masse spécifiques de ciment, eau, sable et gravier en (kg/m<sup>3</sup>).

$$E + (S/\rho_S) + (C/\rho_c) = [(P_g \times a \times G/\gamma_g)] \dots\dots(2)$$

**Tableau IV.33 :** *Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment [18].*

Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	E/C 0.30	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	1.31	1.40	1.46	-	-	-
500	1.44	1.52	1.56	-	-	-
600	1.52	1.56	-	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations (1) et (2) pour trouver l'expression qui permet de déterminer la quantité nécessaire de gravier.

$$G=1000/ [V_{\text{voi}} \cdot \rho_c \cdot (\alpha / \gamma_{\text{vol.oe}}) + (1/ \rho_{pc})]$$

$$G=1000/ [P_g \times (a/\gamma_g) + (1/\rho_G)]$$

#### IV.4.1.5 Détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en gravier, on calcule la dépense en sable ( $\text{Kg/m}^3$ ) [18].

$$S = [1000 - [(C/\rho_c) + E + (G/\rho_G)]] \times \rho_s$$

#### IV.4.2 Calculs les composants:

Données de base :

- Consistance : Aff = 5-6 cm.
- Résistance souhaitée :  $R_{b28} = 35 \text{ MPa}$ .
- Classe de ciment employée  $R_c = 42.5 \text{ MPa}$ .
- $D_{\text{max}} < 20 \text{ mm}$

**\*Sable d'OUED SOUF :**

$$\gamma_s = 1.413 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = 2.309 \text{ g/cm}^3$$

**\*Gravier:**

$$D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$$

**1) concassé:**

$$\gamma_{pc} = 1.331 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{pc} = 2.609 \text{ g/cm}^3$$

**2) Recyclé:**

$$\gamma_{pc} = 1.287 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{pc} = 2.572 \text{ g/cm}^3$$

**\*Ciment :**

$$\rho_c = 3.05 \text{ g/cm}^3$$

#### IV 4.2.1 Béton témoin :

**A. Détermination du rapport (E/C)**

$$R_b = A \cdot R_c (C/E - 0.5) \text{ donc : } C/E = R_b/A \cdot R_c + 0.5$$

Avec :

- $R_b = 350$  bars classe du béton
- $R_c = 425$  bars classe du béton
- $D_{\max} < 20$  mm
- Affaissement  $A = 5-6$  cm

$$C/E = 1.87$$

### B. Quantité d'eau :

- $Aff = 5-6$ , pierres concassées,  $D_{\max} < 20$  mm

D'après le tableau  $E = 192.5$  L c'est la quantité dans le cas de (CPA, sable moyen).

$$E = 192.5 \text{ L}$$

### C. Quantité du ciment :

$$C = [(C/E) \times E] = 1.872 \times 1925.5$$

$$C = 360.5 \text{ Kg/m}^3$$

### D. Quantité de gravier :

$$G = 1000 / [(P_g \alpha / \delta_g) + 1 / \rho_g]$$

- Déterminer le coefficient d'écartement

On a :  $E/C = 0.53$ , dosage =  $360.5 \text{ Kg/m}^3$

Donc :  $\alpha = 1.40$

- Déterminer la cavité

On a :  $V = 1 - P$

Donc :  $V = 1 - 0.51 = 0.49$

$$G = 1000 / [0.49(1.40/1.331) + (1/2.609)] = 1112.73 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = 1112.73 \text{ Kg/m}^3$$

### E. Quantité de sable :

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

$$S = [1000 - (360.5/3.05 + 192.5 + 1112.73/2.609)] \times 2.309$$

$$S = 606.82 \text{ Kg/m}^3$$

Pour  $1 \text{ m}^3$  de béton frais :

Tableau IV.34 : Dépense en matériaux pour  $1 \text{ m}^3$ .

Matériaux	Eau	Ciment	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Dépense en Kg	192.5	360.5	606.82	445.09	667.63

## IV.4.2.2 Mélange d'essais :

Pour la confection de 9 éprouvettes cubiques et 3 éprouvettes cylindriques :

$$\text{On a } V = [(0.05)^2 \times \pi \times 0.2 \times 3 + (0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 9]$$

$$V = 0.01371 \text{ m}^3$$

Pour  $0.01371 \text{ m}^3$  on a la dépense en matériaux suivante (Après majoration de 20%) :

Tableau IV.35 : Dépense en matériaux pour un mélange.

Matériaux	Eau	Ciment	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Dépense en Kg	3.17	5.93	9.98	7.32	10.98

## IV.4.2.3 Béton recyclé :

## A. Détermination du rapport (E/C) :

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

Avec :

- $R_b = 350$  bars classe du béton
- $R_c = 425$  bars classe du béton
- $D_{\max} < 20$  mm
- Affaissement  $A = 5-6$  cm

$$C/E = 1.87$$

## B. Quantité d'eau :

- Aff=5-6, pierres concassées,  $D_{\max} < 20$  mm

D'après le tableau (IV.32)  $E = 192.5 \text{ L}$  c'est la quantité dans le cas de (CPA, sable moyen).

$$E = 192.5 \text{ L}$$

## C. Quantité du ciment :

$$C = [(C/E) \times E] = 1.872 \times 192.5$$

$$C = 360.5 \text{ Kg/m}^3$$

## D. Quantité de gravier :

- Déterminer le coefficient d'écartement

On a :  $E/C = 0.53$ , dosage =  $360.5 \text{ Kg/m}^3$

Donc :  $\alpha = 1.40$

- Déterminer la cavité

$$\text{On a : } V = 1 - P \quad \text{Donc : } V = 1 - 0.50 = 0.50$$

$$G = 1000 / [(P_g \alpha / \delta_g) + 1 / \rho_g]$$

$$G = 1000 / [0.5(1.40/1.287) + (1/2.572)]$$

$$G = 1072.15 \text{ Kg/m}^3$$

**E. Quantité de sable :**

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

$$S = [1000 - (360.5/3.01 + 192.5/1 + 1072.15/2.572)] \times 2.309$$

$$S = 629.08 \text{ Kg/m}^3$$

**Pour 1 m<sup>3</sup> de béton frais :****Tableau IV.36 : Dépense en matériaux pour 1 m<sup>3</sup>.**

Matériaux	Eau	Ciment	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Dépense en Kg	192.5	360.5	629.08	428.86	643.29

**IV.4.2.4 Mélange d'essais :**

Pour la confection de 9 éprouvettes cubiques et 3 éprouvettes cylindriques :

$$\text{On a } V = [(0.05)^2 \times \pi \times 0.2 \times 3 + (0.1 \times 0.1 \times 0.1) \times 9]$$

$$V = 0.01371 \text{ m}^3$$

Pour 0.01371 m<sup>3</sup> on a la dépense en matériaux suivante (Après majoration de 20%) :

**Tableau IV.37 : Dépense en matériaux pour le mélange.**

Matériaux	Eau	Ciment	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Dépense en Kg	3.17	5.93	10.35	7.05	10.58

**IV.5 Techniques expérimentales :**

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

**IV.5.1 Les essais sur béton frais :****IV.5.1.1 Le malaxage : [NA EN 12390-2]**

La réaction entre les différents composants, est d'autant plus complète que le mélange est homogène. Cinq étapes constituent le mode de fabrication des bétons.

- Introduire : gravier 8/16, ciment, ajout, sable 0/5 et gravier 3/8.
- 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 avec le cône d'Abrams jusqu'à obtenir la consistance voulue [86].

**Figure IV.14 : Malaxeur utilisé.**

### IV.5.1.2 Affaissement au cône d'Abrams (Slump test): [NA EN 12350-2]

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés [3], cet essai est effectué conformément à la prescription de la norme [NA EN 12350-2].

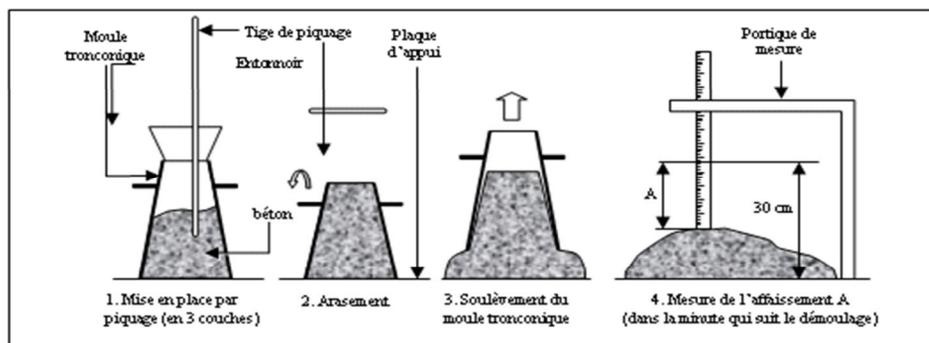
Le dispositif utilisé dans cet essai est :

- Un cône tronconique placé sur une surface lisse (hauteur = 30 cm,  $D = 20$  cm,  $D=30$  cm).
- Une tige en acier de 1.6 cm de diamètre dont l'extrémité est arrondie.

Le principe de cet essai consiste à remplir le cône tronconique avec le béton en trois couches de volume égale, chacune des couches est compactée avec la tige en acier 25 coups.

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.



**Figure IV.15 :** Etape de mesure l'ouvrabilité du béton.

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 [86].

Dans notre étude l'affaissement visé est entre 5 et 6 cm c'est le cas d'un béton plastique.



**Figure IV.16 :** Mesure l'affaissement du béton.

**Tableau IV.38:** *Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône [3].*

Class de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme (F)	0 à 4	±1
Plastique (P)	5 à 9	±2
Très plastique (TP)	10 à 15	±3
Fluide (FL)	16	±3

#### IV.5.1.3 Serrage du béton : [NA EN 12390-2]

Le béton frais est un mélange de ciment, d'eau, de sable, de gravillons, d'adjuvants et de ... bulles d'air. En raison des forces capillaires et des forces de frottement entre les granulats, le béton ne peut, sans effet mécanique, occuper la place des vides d'air. Cela peut être obtenu par le compactage mais principalement par la « VIBRATION ». La vibration met artificiellement en mouvement les éléments du béton (granulats, ciment, eau). Elle assure le bon remplissage des coffrages et des moules, le serrage du béton et sa désaération en favorisant l'imbrication des granulats et en expulsant les bulles d'air [82].

Cette opération consiste à :

- Remplir les moules après avoir déterminé la consistance du béton et les placés sur la table vibrante pendant un certain temps, dans notre cas (10 à 15 Seconde).

#### IV.5.1.4 Teneur en air : [NA EN 12350-7]

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre [87]. Le but de cet essai est de mesurer la teneur en air occlus du béton frais c.-à-d. connaître la contenance en air d'un béton quelconque. La mesure d'air occlus d'un béton frais est basée sur le fait que seul l'air occlus est compressible. L'aéromètre travaille selon le principe de la loi de **BOYLE – MARIOTTE**.



**Figure IV.17 :** *Aéromètre.*

➤ **Mode opératoire :**

- Peser la cuve vide par la balance et noter **M1**, Introduire le béton dans la cuve.
- Placer la cuve sur la table vibrante et vibrer pendant 15 secondes en complétant la quantité de béton, ensuite araser la surface supérieure et nettoyer les bords de la cuve.
- Peser la cuve pleine par la balance et noter **M2** pour calculer la masse volumique apparente.
- Mettre le chapeau sur la cuve, et serrer à l'aide des crochés.
- Régler l'aiguille à 100 %.
- Vider l'air occlus jusqu'au niveau rouge.
- Régler l'aiguille à 0 % à l'aide du bouton noir.
- Appliquer une pression à l'aide du bouton vert jusqu'à la stabilisation de l'aiguille.
- Après finir le mode opératoire, lire le pourcentage de l'air occlus sur l'écran.

**IV.5.1.5 Densité (état frais) :**

La densité des mélanges a été calculée en fonction de l'échantillon introduit dans l'appareil de mesure de l'air occlus. On se sert de la chambre inférieure de l'aéromètre rempli par le mélange, avant la mesure de l'air occlus.

Si les poids de la chambre pleine et vide sont respectivement M1 et M0, la densité du mélange frais est égal à :

$$d = \frac{M1 - M0}{V}$$

Le volume de la chambre inférieure de l'aéromètre V= 8 L.



**Figure IV.18 :** *Mesure de la densité du béton à l'état frais.*

**IV.5.1.6 Mode de conservation et durcissement :**

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à 20°C ±2. Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton [3].

Après démoulage, elles sont conservées dans un bac de conservation jusqu'au moment de l'essai. Ces derniers sont réalisés à 7, 14 et 28 jours.

### IV.5.2 Les essais non destructifs sur béton durci :

#### IV.5.2.1 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 [88]. 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 10 KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal (10 coups).

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



**Figure IV.19** : Mesurer la dureté superficielle 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.

La formule suivante proposée par Dreux [3] permet d'évaluer approximativement la résistance du béton ausculté :

$$R_c = \frac{I^2}{32}$$

Avec :

$R_c$  : la résistance du béton en (MPa)

$I$  : l'indice scléromètre (la moyenne des valeurs obtenues).

#### IV.5.2.2 Auscultation dynamique (Ultra son) : [NA EN 12504-4]

La méthode qui consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est actuellement la seule du genre qui permette d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place.



Figure IV.20 : Mesure la vitesse du son.

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur, les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.

Tableau IV.39 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions [89].

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 – 4575
Douteuse	3050 – 3660
Mauvaise	2135 – 3050
Très mauvaise	Inferieure a 2135

#### IV.5.2.3 La méthode combinée :

Dans certains cas, on combine les deux méthodes, l'essai par scléromètre et ultrason, ce qui permet ensuite l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé [3].

L'objectif de ces tests combinés est d'évaluer la résistance à la compression du béton coulé sur place, la meilleure approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à compression d'échantillon normalisée de laboratoire.

On a un exemple d'une formule combinée proposée par FERET [90] qui associe le résultat de l'essai à l'ultrason et celui du scléromètre :

$$R_c = \left( \frac{S}{3,64 + 0,0235 \cdot S - 0,56 \cdot v} \right)^2$$

Avec :

S : l'indice sclérométrique

V : la vitesse de propagation (mm/μs).

Rc: la résistance à la compression du béton (bars).

#### IV.5.2.4 Module d'élasticité dynamique :

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) selon l'expression suivante :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Dans laquelle :

V : représente la vitesse des ondes, exprimée en Km/s.

$\gamma$  : la masse volumique du béton, exprimée en Kg/m<sup>3</sup>

$\nu$  : coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0.15 pour un béton de haute résistance et de 0.30 pour un béton de faible résistance.

$E_d$  : module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa [91].

#### IV.5.3 Les essais destructifs sur béton durci :

##### IV.5.3.1 La résistance à la compression (essai d'écrasement): [NA EN 12390-3]

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubiques normalisée (10\*10\*10 cm).

##### ➤ La presse hydraulique : [NA EN 12390-3]

La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 3000 KN.



Figure IV.21 : Presse hydraulique.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de  $\pm 0.2$  MPa. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [3].

$$R_c = F/S$$

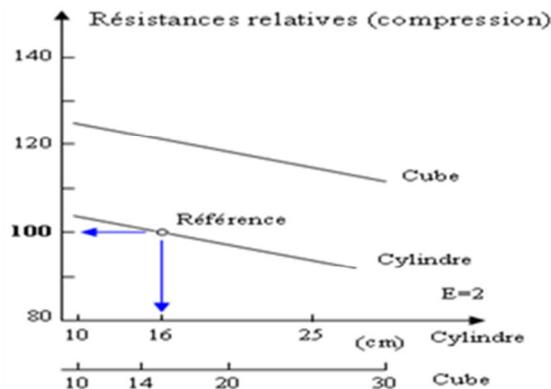
$R_c$ : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

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

#### Remarque :

La résistance sur cylindre est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes [3], [83].



**Figure IV.22 :** Variation des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes.

#### IV.5.3.2 Essai de traction par fendage : [NA EN 12390-6]

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton normalisé (10\*20 cm ; norme NF P 18-406, NA 427), suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse [92]. Cet essai est souvent appelé « Essai Brésilien ». Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, Cet essai nécessite que les éprouvettes présentent des génératrices bien rectilignes.

La mise, en charge s'effectue à la vitesse de **0,25 MPa/s** avec une tolérance de  $\pm 0,1$  MPa par seconds. La résistance en traction par fendage sera :

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

Avec :

P : charge de rupture en newtons.

D et L : diamètre et longueur du cylindre



**Figure IV.23 :** *Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage [3].*

Avec :

$$b = (0.09 \pm 0.01) d$$

$$e = 4 \pm 1 \text{ mm.}$$



**Figure IV.24 :** *Essai de traction par fendage.*

#### IV.5.4 Absorption d'eau : [NA EN 1097]

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

➤ **Préparation des carottes de béton :**

Les carottes de béton utilisés pour cet essai sont des éprouvettes de béton cubique (10\*10\*10), qui ont été coupées en deux par une scie électrique.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à une masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesées effectuées à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15 heures à l'étuve pour éteindre cette masse).

➤ **Mode opératoire :**

On note la masse M1 (en gramme) de chaque éprouvette sèche.

- Au temps t, on place les éprouvettes dans l'eau potable jusqu'au quart de leur hauteur de façon que l'eau remonte perpendiculairement au lit de carrière.
- À [t+1 heure], on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour que le niveau atteigne la moitié de la hauteur des éprouvettes.
- À [t+22 heures] on ajoute de l'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient complètement immergées.
- À [t+48 heures], les éprouvettes sont sorties de l'eau, rapidement essuyées à l'aide d'un chiffon ou d'une peau de chamois humide, puis pesées, soit M2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique [93].

➤ **Expression des résultats :**

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est M2 –M1.

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A(\%) = (M2 - M1) / M1$$

**A** : taux d'absorption.

**M1** : masse d'éprouvette après l'étuvage.

**M2** : masse d'éprouvette saturée d'eau.

**IV.6 Plan d'expérience :**

Le Plan d'expérience choisi pour cette étude est le « plan de mélange » ; ce sont des plans d'expériences que l'on utilise pour étudier des produits composés de plusieurs constituants.

L'objectif est de trouver la loi qui régit une ou plusieurs réponses en fonction de la composition du mélange.

Le principe global se base sur le fait que l'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante : nous nous intéressons à une grandeur,  $y$  qui dépend d'un grand nombre de variables,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction  $f$  telle que:

$$Y = F (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Avec les plans d'expériences, le but est donc d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences dans le but de modéliser ou d'optimiser des phénomènes étudiés [94].

#### **IV.6.1 Modèle représentative d'un mélange :**

Le modèle choisi pour cette étude est le « Modèle quadratique » C'est un modèle de degré 2.

Sa forme générale est :  $Y = a_i X_i + a_{ij} X_i X_j (j > i)$ .

#### **IV.6.2 Présentation de logiciel « Design-Expert » :**

Le logiciel utilisé dans cette étude est le logiciel « Design-Expert 7.0.0 version anglaise ».

Le logiciel Design-Expert permet la conception des stratégies expérimentales optimales, ainsi que l'élaboration des plans d'expériences et l'analyse de leurs résultats. Il s'adapte à tous types de problèmes afin de répondre précisément aux objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales. Pour le traitement des plans d'expériences, le logiciel Design-Expert met à notre disposition des outils d'analyse et des indicateurs statistiques spécifiques de l'objectif poursuivi [95].

#### **IV.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établis. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. 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 V :**  
**RESULTATS**  
**ET**  
**ANALYSES**

---

**PARTIE A : Effet des ajouts fillers de marbre et pouzzolane****V.1 Introduction :**

Dans le présent chapitre, sont exposés les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats, suivi d'une comparaison avec ceux reproduites dans la littérature seront également présentés dans ce chapitre.

Les tableaux ci-dessous regroupent l'ensemble de résultats des mélanges étudiés dans ce présent programme expérimental.

**Tableau V.1 : Différents types de bétons étudiés.**

Désignation des bétons	Agréats		Ciment (%)	Fillers de marbre(FM) (%)	Pouzzolane (PZ) (%)
	Concasse (%)	Recycle (%)			
<b>BT</b>	100	0	100	0	0
<b>BR0</b>	0	100	100	0	0
<b>BR1</b>	0	100	70	0	30
<b>BR2</b>	0	100	70	10	20
<b>BR3</b>	0	100	70	15	15
<b>BR4</b>	0	100	70	20	10
<b>BR5</b>	0	100	70	30	0

**V.2 Etat frais :**

Le tableau (V.2) présente les résultats des essais exercés sur les différents bétons à base de fillers de marbre et pouzzolane à l'état frais.

Tableau V.2 : Propriétés physiques des différents bétons (témoin et recyclé) à l'état frais.

types des bétons	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Affaissement Aff. (cm)	Rapport efficace (E/C)	Teneur en air (%)	Compacité de béton C (%)
BT	2398	2447	6	0.53	2	98
BR0	2325	2395	6	0.63	2.9	97.1
BR1	2250	2318	5.5	0.64	2.9	97.1
BR2	2273	2338	5.5	0.62	2.8	97.2
BR3	2284	2345	7	0.60	2.6	97.4
BR4	2310	2352	5.5	0.59	1.8	98.2
BR5	2362	2375	6	0.62	1.3	98.7

### V.2.1 La masse volumique :

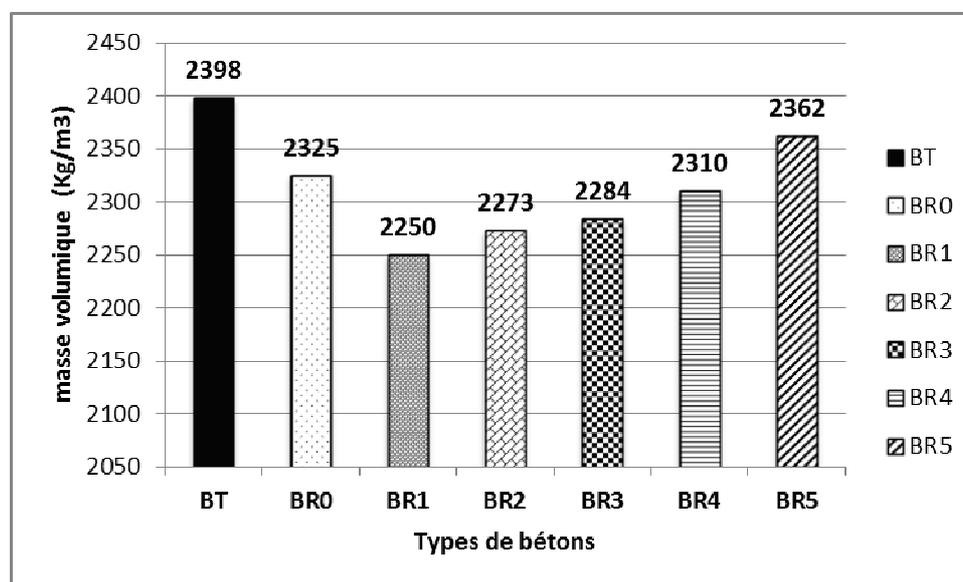


Figure V.1 : La variation de la masse volumique en fonction des différents types de bétons à l'état frais.

La figure (V.1) présente la variation de la masse volumique frais en fonction des différents types de bétons (recyclé et témoin). On remarque que les différents types de bétons recyclés ont une densité inférieure à celle du béton témoin (BT). En effet BR0 présente une masse volumique (2325 Kg/m<sup>3</sup>) plus faible de 5% que celle du béton témoin BT (2398 Kg/m<sup>3</sup>).

Cette diminution peut être attribuée à la nature des agrégats recyclés (masse volumique faible et une porosité élevée) comme reporté par d'autres études antérieures [43,44].

D'autre part la valeur la plus faible de la masse volumique a été enregistrée avec le mélange **BR1** ( $2250 \text{ Kg/m}^3$ ), de 4% de réduction par rapport à celle du **BR0** et de 7% à celle de **BT**. On constate que la substitution du ciment par 30% de pouzzolane lors de la formulation du béton à un effet négative sur la densité des bétons avec des ajouts pouzzolane en dosages élevés.

Les bétons (**BR2, BR3, BR4, et BR5**), on observe une légère augmentation de la masse volumique ( $2273, 2284, 2310, \text{ et } 2362 \text{ Kg/m}^3$ ) respectivement ceci, en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers de marbre (10, 15, 20, et 30%) Cela montre l'effet positive des fillers qui jouent le rôle des micros agrégats c.à.d. diminue la porosité en remplissant les vides et confèrent au béton une compacité élevée comme l'ont montré plusieurs recherches, [22], [64], [72]. L'effet des fillers est remarquable dans le cas de **BR5** qui donne une valeur de la masse volumique ( $2362 \text{ Kg/m}^3$ ) la plus élevée par rapport aux restes des différents types de béton recyclé.

On conclu que tous les mélanges recyclés donnent une masse volumique inférieure au béton témoin ; sauf le mélange **BR5** (avec 30% fillers de marbre) qui montre une densité presque semblable au béton **BT**.

### V.2.2 La teneur en air :

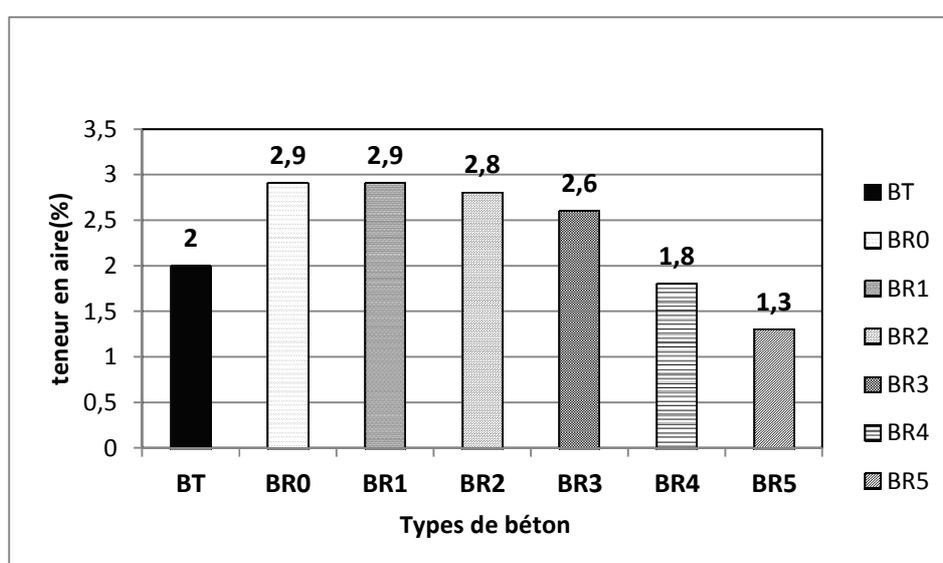


Figure V.2 : la variation de la teneur en air en fonction des différents types de bétons.

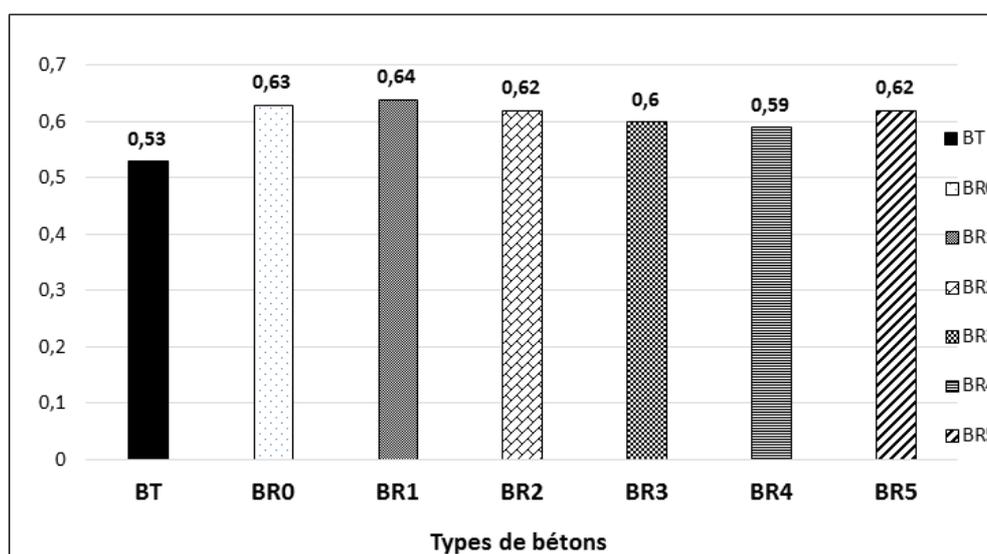
D'après la figure (V.2), la variation de la Teneur en air en fonction des différents types de bétons, On remarque que les bétons **BR0** et **BR1** donnent des valeurs de la teneur en air (**2,9, 2,9**) les plus élevées par rapport aux autres types de béton, avec une augmentation de **30%** par rapport au **BT** qui enregistre une valeur de teneur en air faible de **2%**.

Cela est lié sans aucun doute à la nature des agrégats recyclés qui présente une forme irrégulière et rugueuse en plus de leur porosité élevée, signalé par plusieurs études précédentes [41,43].

La substitution d'une partie de ciment par **30%** de pouzzolane dans le cas de **BR1** n'as pas un effet remarquable sur la teneur en air (**2,9%**).

Par contre on observe une diminution de la teneur en air pour les bétons (**BR2, BR3, BR4, BR5**), (**2,8, 2,6, 1,8, et 1,3 %**) respectivement. Ceci, accompagné par une augmentation du taux de remplacement du ciment par les fillers de marbre lors de la formulation des bétons (**10, 15, 20, et 30%**). Par conséquent, l'effet positif des fillers de marbre diminue la teneur en air des bétons recyclés, la valeur la plus faible a été enregistrée pour **BR5**, avec une réduction de **35%** par rapport à **BT** et **55%** par rapport à **BR0**. Les fillers de marbre remplissent les vides dans la matrice du béton en réduisant sa porosité.

### V.2.3 Le rapport E/C :



**Figure V.3 :** Variation du rapport E/C en fonction des différents types de bétons.

Lors de la confection des bétons recyclés (avec ou sans ajout minérale) on constate que ces bétons nécessitent une quantité d'eau de gâchage supplémentaire afin de garder une maniabilité similaire à celle du béton témoin (c.à.d. affaissement entre **5 à 6 cm**), par conséquent, l'augmentation du rapport E/C, comme le montre la figure (V.3).

Cette demande en eau supplémentaire est liée en premier lieu à la forte absorption d'eau des agrégats recyclés, à cause de leur porosité élevée, mais aussi à la présence d'ancien mortier, comme on peut l'observer dans le béton **BR0** ( $E/C = 0.63$ ) qui présente une augmentation de **17%** par rapport au **BT** ( $E/C = 0.53$ ).

D'un autre côté, la substitution de **30%** du ciment par la pouzzolane lors de la confection du béton **BR1** ne diminue pas la demande en eau efficace, au contraire on a enregistré une augmentation de **1%** par rapport au **BR0** ( $E/C=0,64$  et  $E/C=0,63$ ).

La même chose est observée dans le béton **BR5** lors de remplacement d'une partie du ciment par **30%** des fillers de marbre (**0,64 et 0,63**) où le besoin en eau demeure important en comparaison au béton témoin **BT**.

Par contre, on remarque une légère diminution du rapport  $E/C$  dans les bétons **BR2**, **BR3** et **BR4** (**0.62, 0.6, 0.59**), à **BR0** ( $E/C = 0.63$ ).

D'une manière générale, on constate que la demande en eau des bétons recyclés avec substitution d'une partie du ciment par la pouzzolane ou les fillers de marbre, reste importante.

### V.3 Etat durci

**Tableau V.3** : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 7 jours.

Types des Bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Ultra son (L=100 mm)		$Rc_{moy}$ (MPa)
		$T_{moy}$ ( $\mu$ s)	$V_{moy}$ (Km/s)	
<b>BT</b>	2450	23.89	4.18	31.5
<b>BR0</b>	2340	25.34	3.95	27.5
<b>BR1</b>	2286	28.6	3.5	12.83
<b>BR2</b>	2350	26.6	3.76	17.36
<b>BR3</b>	2371	26.3	3.80	19.26
<b>BR4</b>	2377	25.8	3.87	24.61
<b>BR5</b>	2395	25.55	3.91	21.76

Tableau V.4 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 14 jours.

Types des bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Ultra son (L=100 mm)		Rc moy (MPa)
		T moy ( $\mu$ s)	V moy (Km/s)	
<b>BT</b>	2458	23.48	4.26	37.04
<b>BR0</b>	2362	23.73	4.21	31.11
<b>BR1</b>	2337	26.3	3.80	17.24
<b>BR2</b>	2365	25.86	3.86	21.07
<b>BR3</b>	2373	25.36	3.94	21.47
<b>BR4</b>	2381	25.05	3.99	29.02
<b>BR5</b>	2415	24.22	4.12	26.97

Tableau V.5 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons étudiés à 28 jours.

Types des bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Ultra son (L=100 mm)			Scléromètre		R <sub>us</sub> combiné (MPa)	Rc moy (MPa)
		T <sub>moy</sub> ( $\mu$ s)	V <sub>moy</sub> (Km/s)	E <sub>b moy</sub> (GPa)	Is moy	Rs (MPa)		
<b>BT</b>	2470	21.7	4.61	43.71	34	37	33.78	40.04
<b>BR0</b>	2365	22.1	4.52	35.75	31	30.03	28.69	35.25
<b>BR1</b>	2347	23.62	4.23	31.07	28	22.78	21.26	23.83
<b>BR2</b>	2375	22.32	4.42	34.33	29	26.28	24.84	23.73
<b>BR3</b>	2377	22.61	4.48	35.3	29	26.28	25.67	24.23
<b>BR4</b>	2388	22.31	4.52	35.46	30	28.12	27.47	30.56
<b>BR5</b>	2435	21.85	4.58	37.79	31	30.03	29.66	29.29

Tableau V.6 : Absorption d'eau par immersion des différents bétons.

Type des Bétons	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Taux d'absorption d'eau A (%)
BT	1.810	1.896	4.75
BR0	1.662	1.791	7.73
BR1	1.601	1.759	9.86
BR2	1.619	1.761	8.77
BR3	1.574	1.710	8.63
BR4	1.637	1.759	7.47
BR5	1.685	1.812	7.53

## V.3.1 La masse volumique :

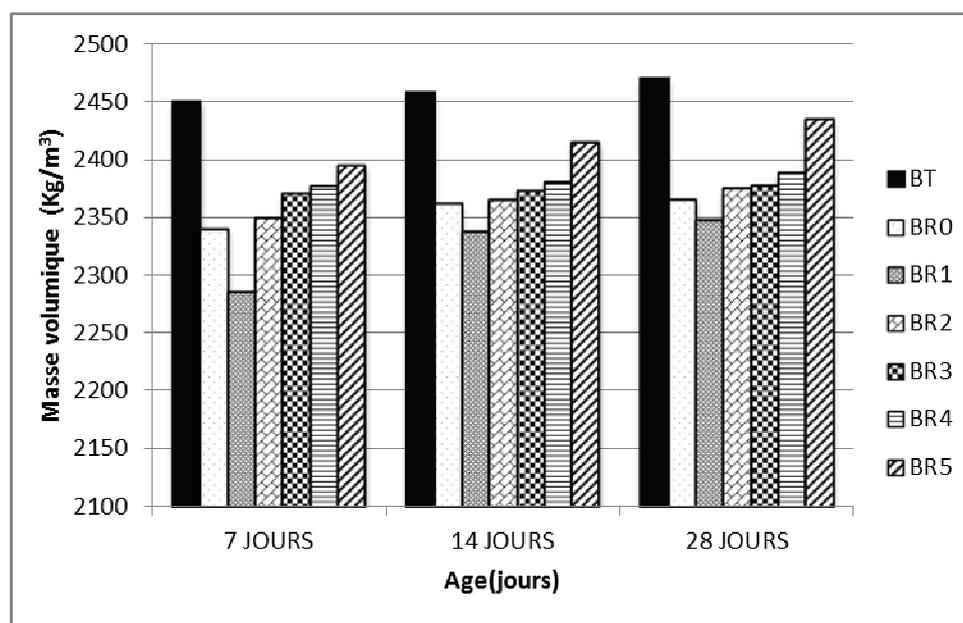
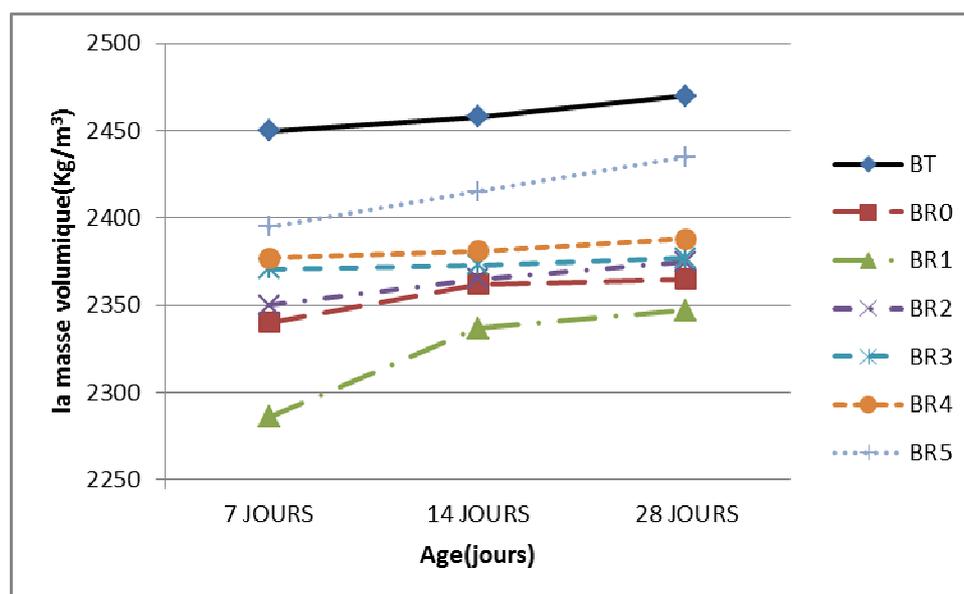


Figure V.4 : La variation de la masse volumique des bétons étudiés en fonction de l'âge (7, 14, et 28 jours).



**Figure V.5 :** Développement de la masse volumique de différents types de béton étudiés en fonction de l'âge (7, 14, et 28 jours).

D'après la figure (V.4) montre la variation de la masse volumique en fonction des différents bétons (recycle et témoin) avec l'âge (7, 14, et 28 jours). On remarque que la densité des bétons recyclés est généralement faible en comparaison avec le bétons témoin, on note que ; Le béton **BR0** présente une densité égale à ( $2365 \text{ Kg/m}^3$ ) avec une diminution de **6%** par rapport au **BT** ( $2470 \text{ Kg/m}^3$ ) à 28 jours d'âge, ceci confirme les résultats trouvés par d'autres chercheurs [46], et indique que le remplacement des agrégats concassés par des agrégats recyclés entraîne une diminution de la densité des bétons à base de ces agrégats recyclés avec une porosité élevée.

-Par ailleurs, on constate que la substitution de **30%** du ciment par la pouzzolane n'apporte pas une amélioration à la densité des bétons recyclés, le béton **BR1** détient la valeur la plus faible comparé aux autres types de béton (recycle et témoin) ; à 7 jours on a enregistré une chute de **3%** par rapport au **BR0**, et **7%** à celle de **BT** ; et à 14 et 28 jours ce béton commence à se rattraper, on observe une évolution rapide de la masse volumique par rapport aux autres bétons, ceci est dû à l'activité de la pouzzolane.

D'un autre côté, on enregistre un développement croissant de la densité des bétons (**BR2**, **BR3**, **BR4**) à différents âges (7, 14, et 28 jours), en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par les fillers de marbre (**10%**, **15%** et **20%**), pour atteindre une valeur maximale dans le béton **BR5** avec **30%** de fillers de marbre, et présente une amélioration de la densité de **3%** par rapport au **BR0** à 28 jours d'âge.

Ce qui montre l'effet positif de cet ajout sur les propriétés physiques des bétons recyclés, en participant à l'amélioration de la compacité par leur effet « filler », comme plusieurs études l'ont signalé [67].

### V.3.2 Résistance à la compression ( $R_c$ ) :

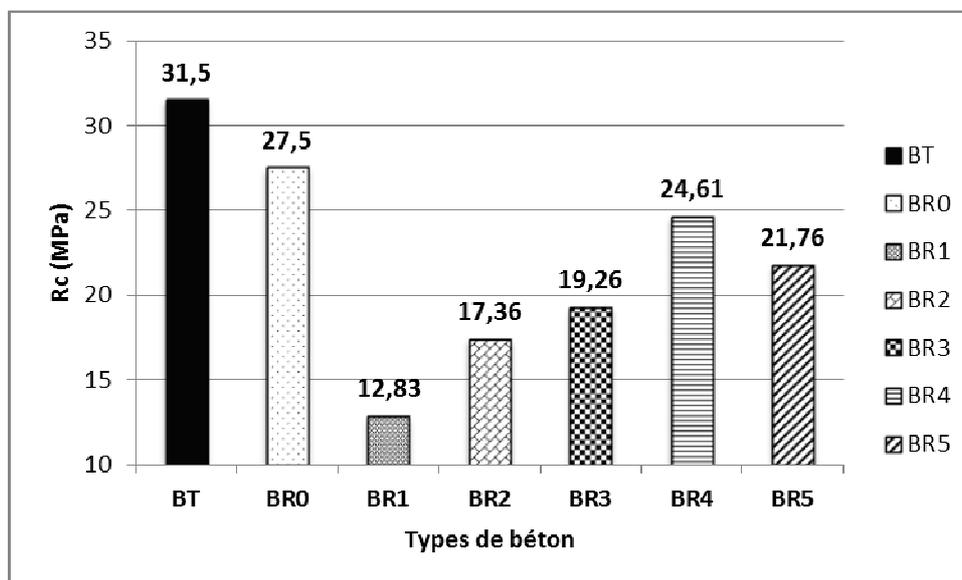


Figure V.6 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de différents types du béton à 7 jours.

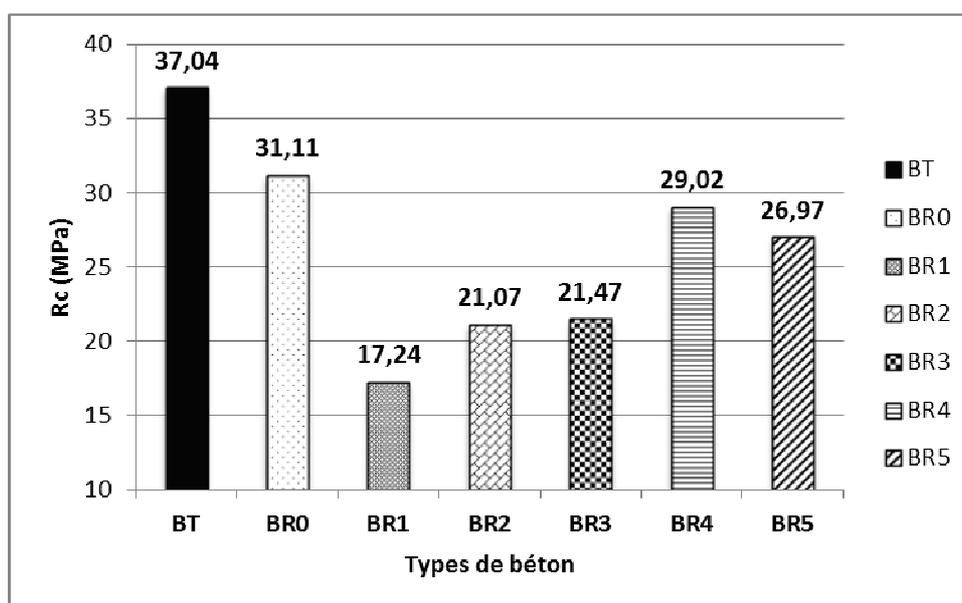


Figure V.7 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction des différents types du béton à 14 jours.

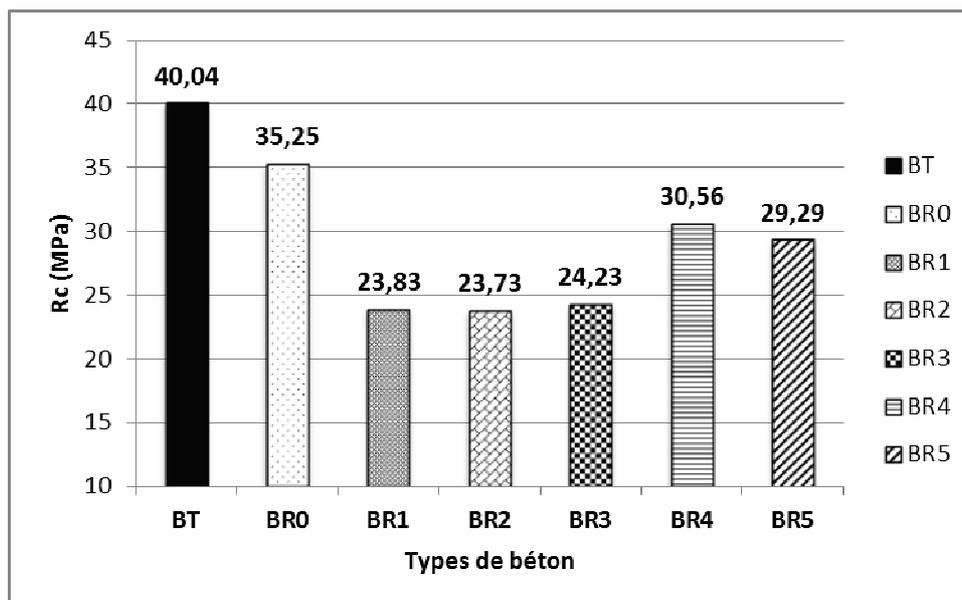


Figure V.8 : La variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction des différents types du béton à 28 jours.

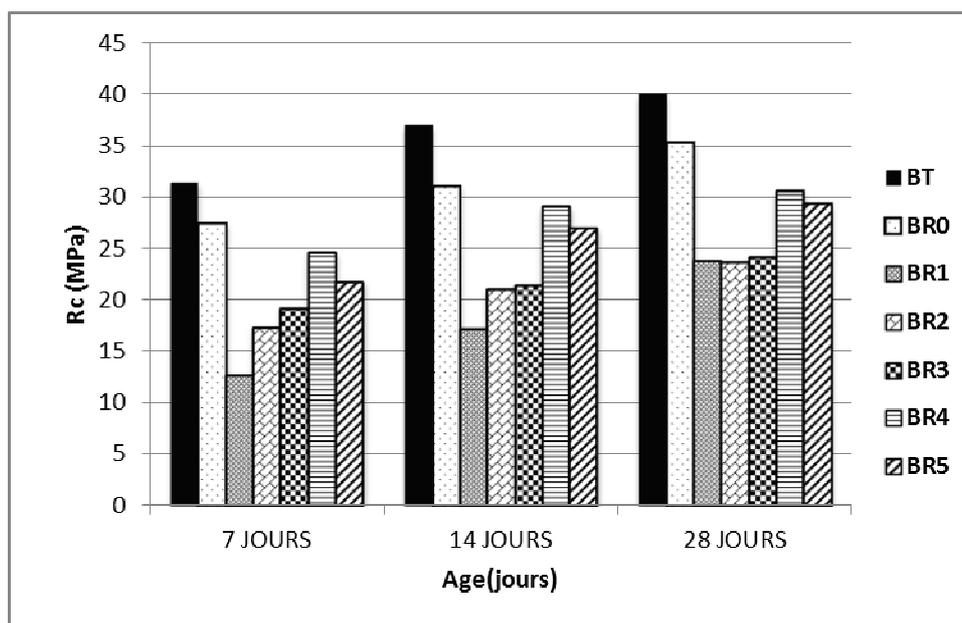
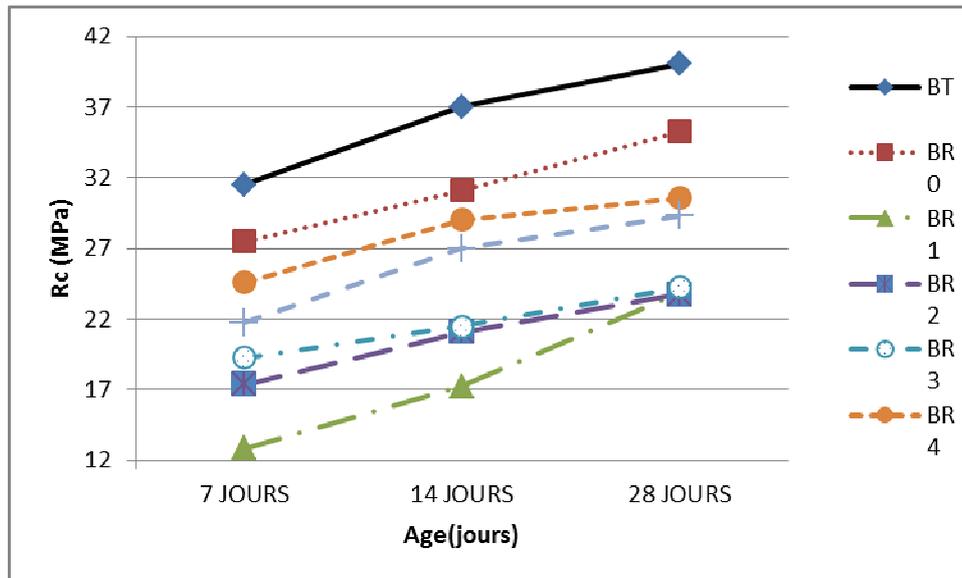


Figure V.9 : la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) des différents types du béton en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).



**Figure V.10 :** Développement de la résistance à la compression ( $R_c$ ) de différents types du béton en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).

La figure (V.9) montre la variation de la résistance en compression en fonction des différents bétons (recyclé et témoin) à différents âges (7, 14, et 28 jours). On remarque que la résistance du béton témoin (BT) est supérieure en comparaison aux autres types de béton recyclé à différents âges (7, 14, et 28 jours).

- le béton **BR0** (sans ajout minéral) présente un développement de la résistance similaire à celui du **BT** à (7, 14, et 28 jours) et la meilleure résistance par rapport aux différents bétons recyclés avec additions (fillers de marbre et pouzzolane), la figure (V.10). A 28 jours d'âge on enregistre une différence de 12% entre la résistance de **BR0** (35.25 MPa) et **BT** (40.04 MPa), le remplacement des agrégats concassés par des agrégats 100% recyclés, a affecté la résistance, car ils présentent une dureté inférieure de 50% par rapport aux agrégats concassés, comme le montre l'essai «L.A», de plus l'augmentation du rapport E/C (à cause de la demande en eau supplémentaire lors de la confection du béton recyclé) rend le béton poreux et moins dense, ce qui influence sur ces performances mécaniques.

-Un autre paramètre qu'il faut prendre en compte, la présence d'ancien mortier et poussière qui gêne l'hydratation du ciment et la formation des hydrates et contribue à la réduction de la résistance. Les résultats trouvés sont corrélés avec ceux trouvés par d'autres études [50].

-La substitution de 30% de ciment par des additions minérales (fillers de marbre et pouzzolane) n'a pas un effet bénéfique, comme l'illustre la figure (V.9), on remarque que ces

bétons présentent des résistances inférieures au **BR0** (sans ajouts) à différent âge (**7, 14, et 28 jours**).

-La figure (V.6) présente la variation de la résistance en fonction des différents bétons a 7 jours, montre que **BR1** donne la valeur la plus faible (**12.83 MPa**), On enregistre une chute de **56%** par rapport au **BR0 (27.5 MPa)** et **60%** vis-à-vis le **BT (31.5 MPa)**. D'autre part on observe une évolution en hausse de la résistance des bétons (**BR2, BR3, et BR4**), (**17.35 MPa, 19.26 MPa, et 24.61 MPa**) respectivement ; suivant l'augmentation du taux des fillers de marbre (**10%, 15%, et 20%**) respectivement

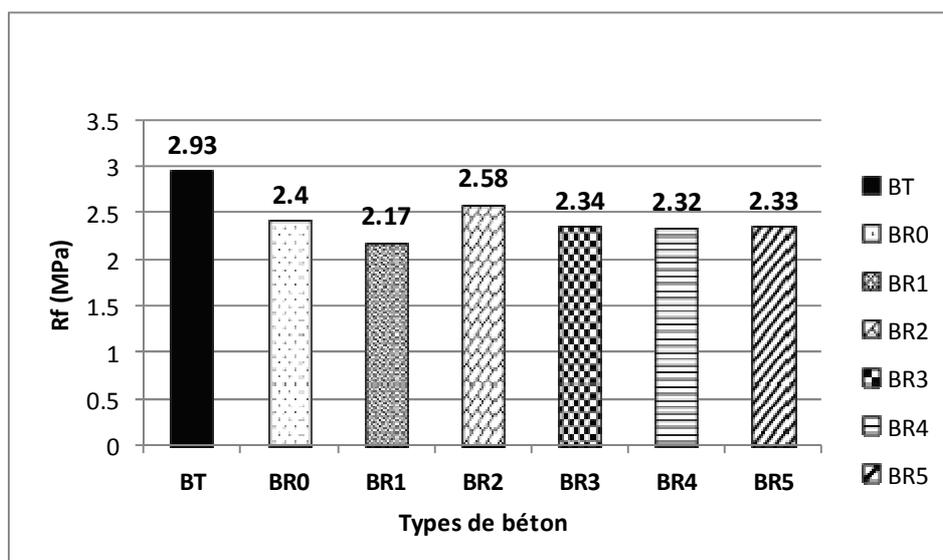
-On constate que la pouzzolane a un effet négatif sur la résistance a jeune âge a des pourcentages élevés (**20% et 30%**), son action ne se manifeste qu'à long terme, comme il est décrit par plusieurs études [63], tandis que les fillers de marbre apporte un effet avantageux sur la réponse mécanique en améliorant les propriétés physiques ( **compacité élevée**), ce qui explique l'évolution croissante de la résistance en fonction du dosage des fillers jusqu'à un pourcentage de (**20%**) .

-L'analyse des figures (V.7, et V.8) qui présentent la variation de la résistance en compression en fonction des différents bétons à 14 et 28 jours, permet de constater que la résistances des bétons (**BR1, BR2, et BR3**) aux pourcentage élevés de pouzzolane (**30%, 20%, et 15%**), commencent à ce rattrapé, cela se traduit par l'activité de la pouzzolane qui réagit avec la portlandite libéré par l'hydratation de ciment pour former des hydrates (C-S-H), qui contribue à l'augmentation de la résistance.

-Par contre les bétons (**BR4 et BR5**) qui ont un faible taux de pouzzolane (**10% et 0%**) respectivement et compensé de présence élevée des fillers de marbre (**20% et 30%**) indiquent un faible développement de la résistance à 7,14, et même 28 jours. Cela montre que les fillers de marbre n'a pas un grand rôle dans le développement de la résistance, ce qui traduit par une faible augmentation de la résistance des bétons (**BR4, et BR5**).

En général, on peut conclure ; que la substitution d'une quantité du ciment par les ajouts dans le cas des bétons recyclés donnent toujours une résistance à la compression ( $R_c$ ) inférieure au béton **BT**, d'autre par le béton **BR4** (10% pouzzolane, et 20% fillers de marbre) et le béton **BR5** (30% fillers de marbre) montrent des résistances ( $R_c$ ) proches au béton recyclé sans additions minérales.

### V.3.3 La résistance à la traction par fendage ( $R_f$ ) :



**Figure V.11 :** La variation de la résistance à la traction par fendage ( $R_f$ ) des différents types du béton a 28 jours.

Les études faites sur les propriétés mécaniques des bétons recyclés montrent que la résistance à la traction par fendage de ces béton est inférieure de (15% à 20%) par rapport aux bétons traditionnels [43] [48], En effet les résultats trouvés dans cette étude sont similaires, d'après la figure (V.11), on remarque que tous les différents bétons recyclés présentent une résistance inférieure au béton témoin (BT). On note que :

-le béton **BR0** présente une valeur (2.4 MPa) inférieure de 18% en comparaison au béton **BT** (2.93 MPa).

-la valeur la plus faible a été enregistrée avec le béton **BR1** (2.17 MPa), une diminution de l'ordre de 10% par rapport au **BR0**, ce qui montre que la substitution de 30% de ciment par la pouzzolane a une action négative.

-le béton **BR2** présente la meilleure valeur (2.58 MPa) par rapport aux autres types de bétons recyclés, on enregistre une augmentation de 7% par rapport au **BR0**, cela montre que la substitution de 30% de ciment par 10% de fillers de marbre et 20% de pouzzolane a un effet bénéfique en améliorant la résistance à la traction par fendage des béton recyclé.

-Les bétons (**BR3**, **BR4**, et **BR5**) donnent des valeurs proches (2.34 MPa, 2.32 MPa, 2.33 MPa) respectivement compare au **BR0** (2.4 MPa) avec une légère diminution de la résistance d'environ 3%. On constate que la substitution d'une partie de ciment par des pourcentage

élevés de marbre (15, 20, 30%), compensé par une diminution du taux de la pouzzolane (15%, 10%, 0%) n'a pas un grand effet sur la résistance à la traction par fendage des bétons recyclés.

En générale, on peut conclure que la substitution d'une quantité de ciment par des ajouts dans le cas des bétons recyclés donne toujours une résistance ( $R_f$ ) inférieure ; sauf le béton **BR2** qui montre une résistance légèrement inférieure au **BT**.

V.3.4 La vitesse du son (V) :

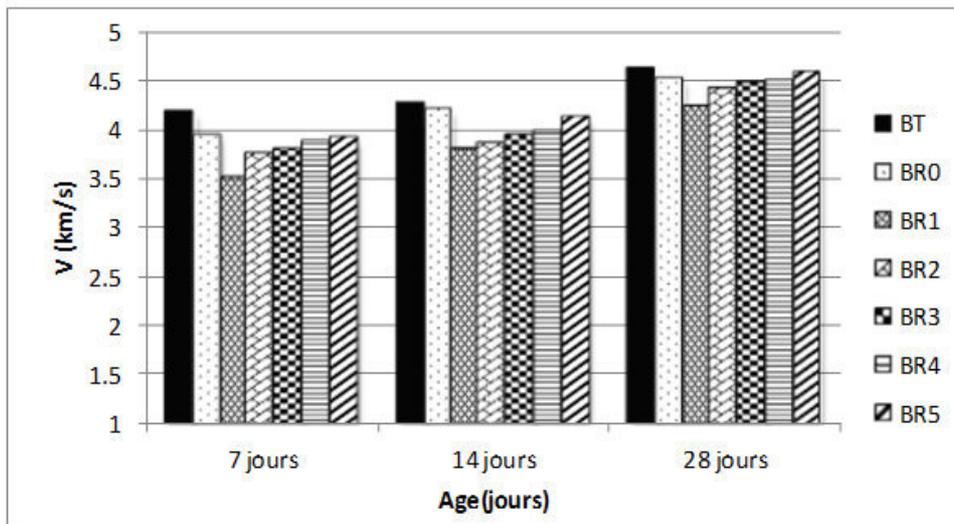


Figure V.12 : La variation de la vitesse du son (V) des différents types du béton en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).

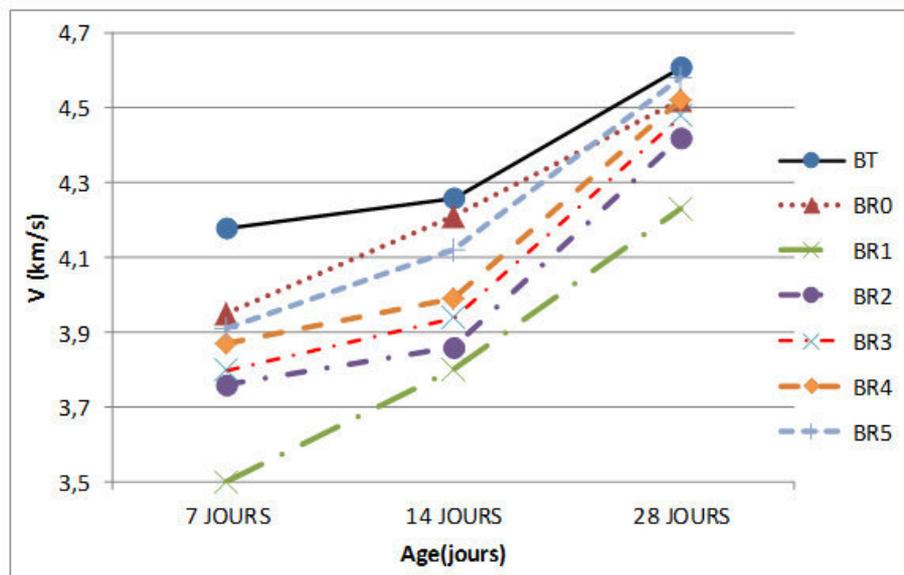


Figure V.13 : Le développement de la vitesse du son (V) des différents types de bétons en fonction de l'âge (7, 14 et 28 jours).

La figure (V.12 et V.13) présente la variation et le développement de la vitesse du son des différents types de béton (recyclé et témoin), en fonction de leur âge (**7, 14, et 28 jours**), on remarque que tous les bétons recyclés indiquent un développement de la vitesse normale en comparaison avec le béton (**BT**), on note que :

-le béton (**BT**), donne des valeurs de propagation du son élevées par rapport aux autres bétons recyclés (**4.18 Km/s, 4.26 Km/s, 4.61 Km/s**), à **7, 14, et 28 jours**, respectivement.

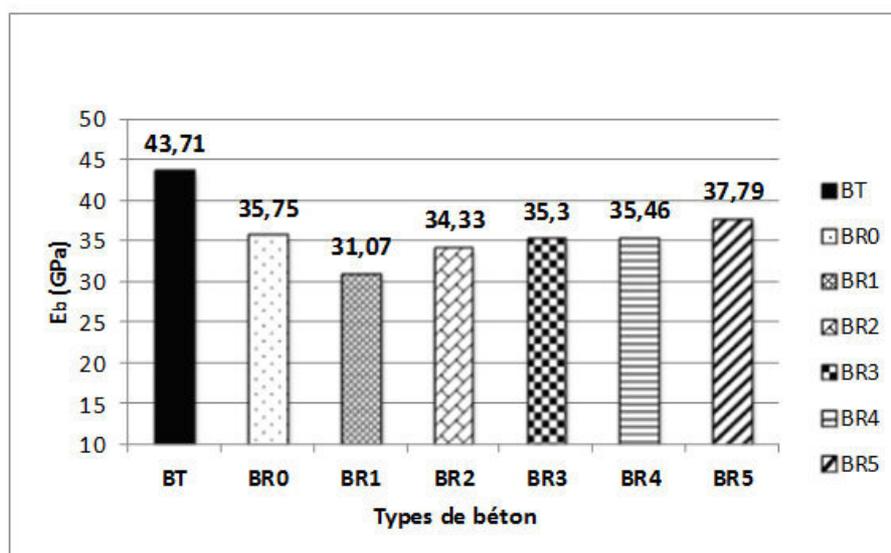
-le béton recyclé **BR0** (sans ajout), donne une vitesse du son légèrement inférieure (**3.96 Km/s, 4.21 Km/s, 4.52 Km/s**) à **7, 14, et 28 jours**, respectivement, compare au béton (**BT**). On enregistre une différence d'environ **2%** à **28 jours d'âge**. On constate que le remplacement des agrégats concassés par des agrégats **100%** recyclés a un impact sur la propagation des ondes ultrasonique en raison de la porosité élevée de ce type de béton [54].

-le béton **BR1** (avec 30% de pouzzolane), présente des faibles valeurs de la vitesse du son (**3.5 Km/s, 3.83 Km/s, 4.23 Km/s**), à **7, 14, et 28 jours**, successivement, par rapport aux autres types de bétons (recyclé et témoin). Cela est dû aux mauvaises propriétés physiques de ce béton (**BR1**), qui présente une densité faible, qui se traduit par une porosité élevée, ce qui ralentit la propagation des ondes dans la matrice du béton.

-d'un autre côté, on remarque une progression croissante de la vitesse du son dans les bétons (**BR2, BR3, BR4, BR5**) à différents âges, en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers de marbre (**10%, 15%, 20%, et 30%**) avec la diminution du taux de la pouzzolane (**20%, 15%, 10%, 0%**) respectivement.

A **28 jours d'âge**, les bétons (**BR2, BR3, BR4**), présentent des vitesses (**4.42 Km/s, 4.48 Km/s, 4.5 Km/s**) comparables au béton **BR0 (4.52 Km/s)** ; pour atteindre une valeur maximale (**4.58 Km/s**) enregistrée dans le béton **BR5** (avec 30% de fillers de marbre), une augmentation de **3%** par rapport au **BR0 (4.52 Km/s)**, et presque similaire à celle du **BT (4.61 Km/s)**. Cela montre l'effet positif des fillers de marbre, contrairement à la pouzzolane, surtout à des taux élevés (**30% de fillers de marbre**), qui vient accroître la densité et par la suite réduire la porosité, ce qui implique une vitesse élevée.

On conclut ; la substitution d'une partie du ciment par 30% des fillers de marbre dans le cas du béton **BR5** donne une vitesse du son (**V**) élevée par rapport au béton sans addition minérale et proche du béton témoin.

V.3.5 Le module dynamique ( $E_d$ ) :

**Figure V.14 :** La variation du module d'élasticité dynamique des différents types de bétons à 28 jours.

D'après la figure (V.14), qui présente la variation du module d'élasticité dynamique en fonction des différents types de bétons (recyclé et témoin) à 28 jours, on constate que les bétons recyclés donnent des valeurs faibles par rapport au béton (BT).

-le béton (BR0) présente une valeur (35.75 GPa) inférieure de 19% par rapport au béton BT (43.71 GPa), ce qui est en corrélation avec les résultats trouvés par d'autres études [48] [51], qui montrent que les bétons à base d'agrégats recyclés possèdent une faible rigidité en comparaison aux bétons à base d'agrégats concassés.

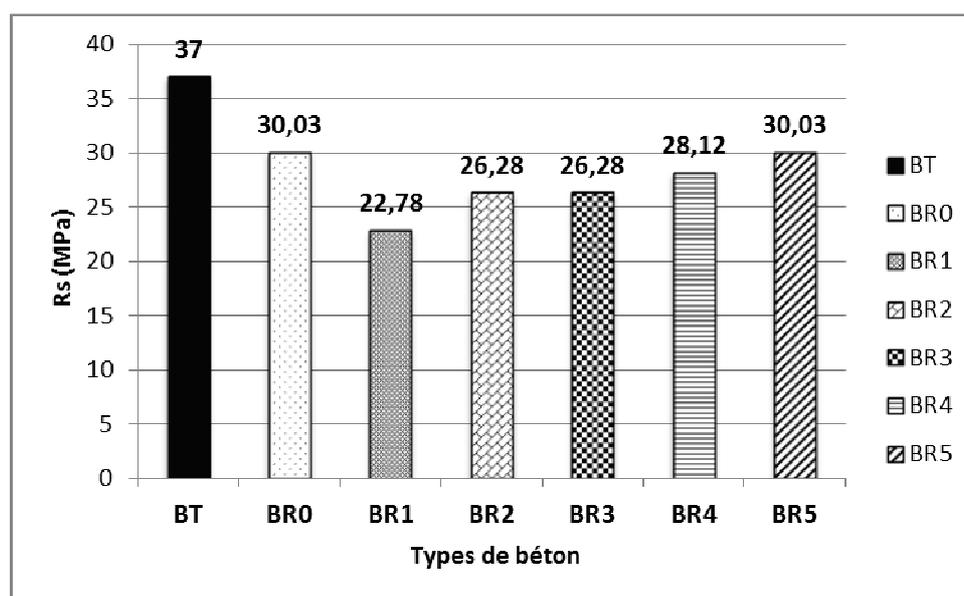
-D'un autre côté, la substitution d'une partie du ciment par 30% de pouzzolane, comme on peut l'observer dans le béton BR1 donne la valeur la plus faible (31.07 GPa) par rapport aux autres types de bétons ; on enregistre une diminution de 15% par rapport au BR0, et 27% par rapport au BT.

-Par ailleurs, l'association des ajouts filler de marbre et pouzzolane (à différentes combinaisons), n'a pas un effet remarquable comme on le constate dans les bétons (BR2, BR3, BR4), qui présentent des valeurs comparables et proches à celui du BR0 (34.33 GPa, 35.3 GPa, 35.46 GPa et 35.75 GPa), respectivement.

-Par contre le béton **BR5** (avec 30% de fillers de marbre), indique une valeur de module d'élasticité (**37.75 GPa**) élevée par rapport aux autres bétons recyclés, on enregistre une amélioration de **6%** par rapport au **BR0**, et une réduction de **14%** par rapport au **BT**.

On déduit que ; la substitution de 30% de ciment par fillers de marbre (**BR5**) donne un module dynamique ( $E_d$ ) légèrement élevé par rapport **BR0** (sans ajouts minéraux) et proche à celui du bétons témoin (**BT**).

### V.3.6 Résistance au choc (scléromètre, $R_s$ ):



**Figure V.15 :** La variation de la résistance au choc (scléromètre  $R_s$ ) en fonction des différents types de bétons à 28 jours.

Les résultats de la résistance au choc (scléromètre) pour les différents bétons (recyclé et témoin) à 28 jours illustrés par la figure (V.15), montrent que les bétons recyclés, donnent des résultats inférieurs au béton témoin, on constate que :

-le béton **BR0**, présente une résistance (**30.03 MPa**) inférieure d'environ **19%** par rapport au béton **BT** (**37 MPa**). Cette diminution est attribuée à la nature des agrégats recyclés.

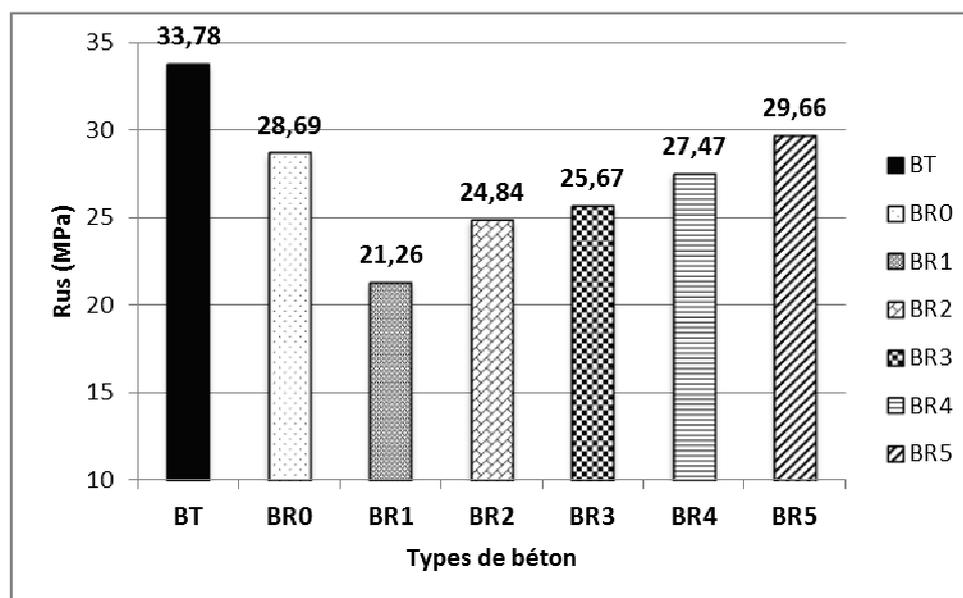
-le béton **BR1** (avec 30% de pouzzolane), indique une résistance faible (**22.78 MPa**) comparé aux différents bétons testés ; on enregistre une diminution de **25%** par rapport au **BR0** et presque **40%** par rapport au **BT**.

-les bétons (**BR2**, **BR3**, **BR4**), donnent des résistances légèrement inférieures (**26.28 MPa**, **26.28 MPa**, **28.12 MPa**) respectivement, par rapport au béton **BR0** (**30.03 MPa**). Ceci montre que la combinaison des ajouts de filler de marbre et pouzzolane à différents pourcentages n'a pas un rôle positif la résistance au choc des bétons recyclés.

-le béton **BR5** (avec 30% de fillers de marbre) indique une valeur semblable à celle du **BR0** (**30.03 MPa**).

D'une manière générale ; on constate que tous les mélanges recyclés montre une résistance ( $R_s$ ) inférieure au béton recyclé **BR0** ; sauf le béton **BR5** (avec 30% fillers de marbre) donne une résistance ( $R_s$ ) similaire au béton **BR0** (sans addition).

### V.3.7 Résistance combinée ( $R_s$ ) :



**Figure V.16 :** La variation de la résistance combinée des différents types de bétons à 28 jours.

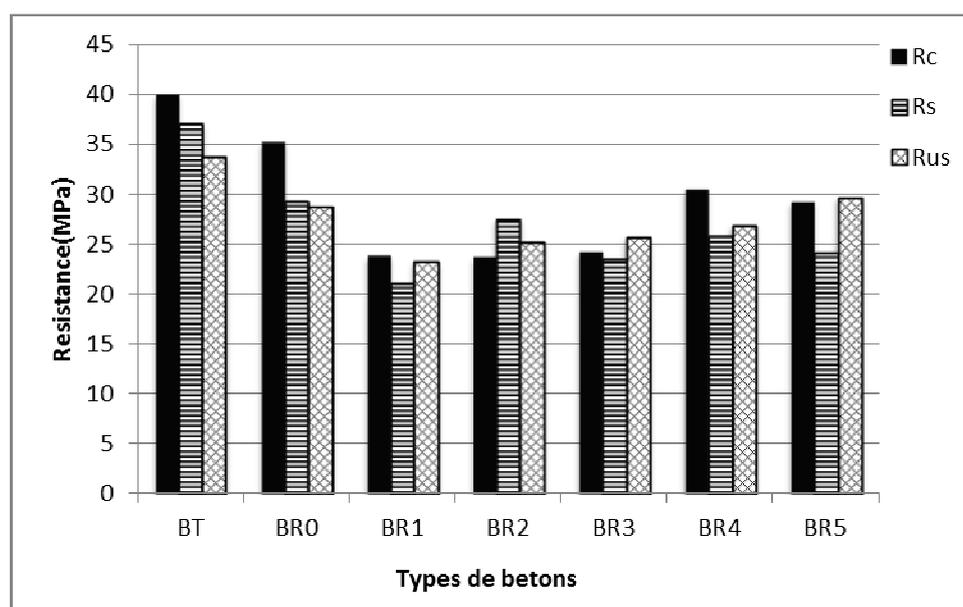
La figure (V.16) présente la variation de la résistance combinée ( $R_s$ ), en fonction des différents bétons (recyclé et témoin) à 28 jours, on constate que les différents bétons recyclés indiquent une résistance combinée inférieure au béton témoin (**BT**). En effet, on note une différence de **16%** entre la résistance ( $R_s$ ) du béton **BR0** (**28.69 MPa**), et celle du béton **BT** (**33.78 MPa**).

-Le béton **BR1** donne une résistance inférieure (**21.26 MPa**), par rapport aux différents bétons testés, la substitution partielle de 30% de ciment par la pouzzolane provoque une chute de la résistance d'environ **25%** par rapport au béton **BR0** (**28.69 MPa**), et **37%** par rapport au béton **BT** (**33.78 MPa**).

-Par ailleurs, on observe une légère croissance de la résistance ( $R_s$ ) dans les bétons (**BR2**, **BR3**, et **BR4**), (**24.84 MPa**, **25.67 MPa**, et **27.47 MPa**) ; selon l'augmentation du taux de substitution de ciment par les fillers de marbre (**10%**, **15%**, et **20%**), et une

diminution de taux de la pouzzolane (20%, 15%, et 10%), respectivement. La valeur maximale (30% fillers de marbre et 0% pouzzolane) dans le béton **BR5 (29.66 MPa)**, présente la meilleure résistance par rapport aux différents bétons recyclés, on enregistre une augmentation de 6% de la résistance par rapport au **BR0 (28.69 MPa)**.

En conclusion ; la substitution d'une partie du ciment par 30% de fillers de marbre cas **BR5** donne une résistance combinée ( $R_{us}$ ) légèrement élevée par rapport béton **BR0** et proche à celle du béton témoin **BT**.



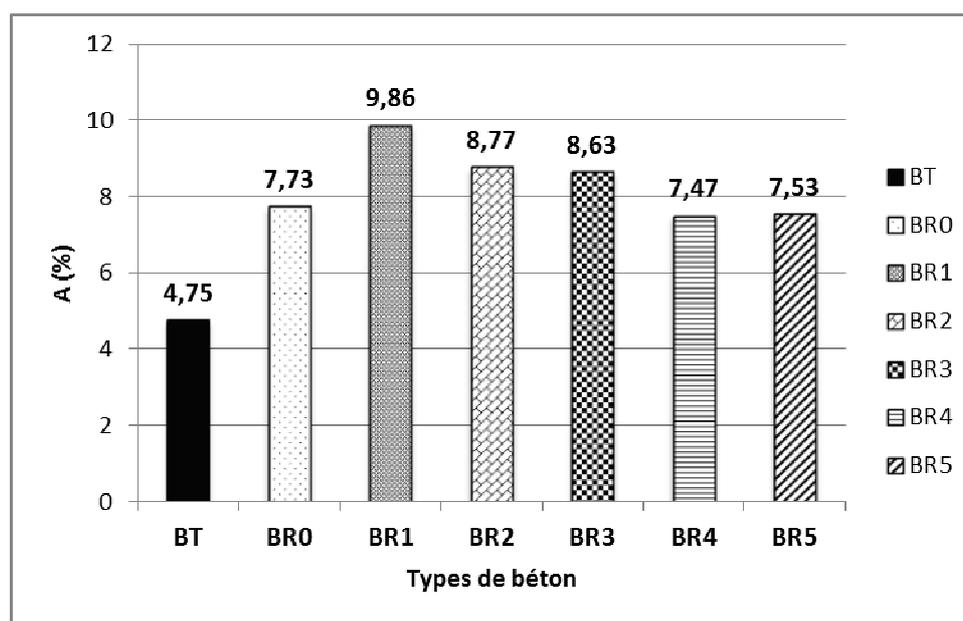
**Figure V.17 :** La variation des résistances à l'écrasement ( $R_c$ ), scléromètre ( $R_s$ ), et combinée ( $R_{us}$ ) en fonction des différents types du béton.

D'après la figure (V.17), on constate qu'il y a une différence entre la résistance obtenue par écrasement ( $R_c$ ) et les essais directs (ED), et les résistances obtenues par scléromètre ( $R_s$ ) et méthodes combinées ( $R_{us}$ ) dite essais non destructifs (END), sur les différents bétons testés (recyclé et témoin).

Il faut mentionner que l'essai d'écrasement ( $R_c$ ) donne des résultats fiables par rapport aux résultats de scléromètre ( $R_s$ ) et la méthode combinée ( $R_{us}$ ), qui sont obtenus à partir de relation et formules empiriques [3], et qui ont beaucoup plus une relation directe avec les propriétés physiques des bétons testés (densité et porosité).

Toutefois, les résultats des essais (END), demeurent indispensables pour évaluer la qualité des bétons et donnent une estimation de leurs résistances mécaniques.

## V.3.8 Absorption d'eau par immersion :



**Figure V.18** : La variation du taux d'absorption d'eau en fonction des différents types de bétons.

L'analyse des résultats d'essai d'absorption d'eau par immersion, mentionnée au tableau (V.6) et la figure (V.18) ci-dessus, permet de constater que les différents bétons recyclés présentent des taux d'absorption supérieurs au béton témoin (**BT**), on observe que :

-Le béton **BR0** (**7.73%**), indique une augmentation d'environ **40%** par rapport au béton **BT** (**4.73%**), ceci en corrélation avec les travaux antérieurs [54], qui reportent une valeur de l'absorption des bétons recyclés nettement élevée en comparaison avec les bétons traditionnels.

-D'un autre côté, la présence de l'ajout pouzzolane à un pourcentage élevé (30%) dans le béton **BR1**, augmente le taux d'absorption (**9.86 %**) de **22%** par rapport au béton **BR0** (**7.73 %**), et **65%** par rapport au béton **BT** (**4.75 %**).

-De même, la combinaison de la pouzzolane à des taux élevés (**20%**, **15%**), avec les fillers de marbre (**10%**, **15%**), ne diminue pas l'absorption d'eau, ce qui est constaté dans les bétons (**BR3**, **BR4**), (**8.77%**, **8.63%**) respectivement.

-Les bétons (**BR4**, **BR5**), donnent des valeurs légèrement inférieures (**7.47 %** et **7.53 %**) respectivement, par rapport au béton **BR0** (**7.73**). Cela peut être dû à la présence des fillers de marbre à des taux élevés (**20%**, **30%**), compensé par une diminution de pouzzolane (**10%**,

**0%**) avec un rôle physique de remplissage des pores et vides dans la texture du béton recyclé par addition inerte de fillers de marbre. Ceci contribue favorablement à la diminution du taux d'absorption, jugé avantageux.

En conclusion ; tous les mélanges recyclés donnent des taux d'absorption élevés par rapport au béton **BR0** ; sauf le béton **BR4** (20% fillers de marbre et 10% pouzzolane) et **BR5** (30% fillers de marbre) donnant un taux d'absorption légèrement inférieure par rapport au **BR0**.

**PARTIE B : Effet des ajouts fillers de marbre, pouzzolane, et laitier****V.4 Introduction :**

La partie suivante présente les différents résultats des essais effectués sur les bétons recyclés (à l'état frais et durci) confectionnés à base des différents ajouts (fillers de marbre, pouzzolane et laitier) à différents pourcentages et combinaisons. Pour l'interprétation des résultats nous avons opté pour la méthode des « plans d'expérience », à l'aide du logiciel « Expert-Design » pour mieux comprendre l'effet de l'association de plusieurs facteurs agissant sur les propriétés d'un béton recyclé.

## V.5 Désignation des bétons :

Tableau V.7 : Différents types des bétons étudiés.

Désignation des bétons	Agréments		Ciment (%)	Fillers de marbre(FM) (%)	Pouzzolane (PZ) (%)	Laitier (S) (%)
	Concassé (%)	Recyclé (%)				
<b>BT</b>	100	0	100	0	0	0
<b>BR0</b>	0	100	100	0	0	0
<b>BR1</b>	0	100	70	0	30	0
<b>BR2</b>	0	100	70	10	20	0
<b>BR3</b>	0	100	70	15	15	0
<b>BR4</b>	0	100	70	20	10	0
<b>BR5</b>	0	100	70	30	0	0
<b>BR6</b>	0	100	70	0	0	30
<b>BR7</b>	0	100	70	10	10	10
<b>BR8</b>	0	100	70	15	0	15
<b>BR9</b>	0	100	70	0	15	15
<b>BR10</b>	0	100	70	15	10	5
<b>BR11</b>	0	100	70	15	5	10
<b>BR12</b>	0	100	70	10	5	15
<b>BR13</b>	0	100	70	5	10	15
<b>BR14</b>	0	100	70	10	15	5
<b>BR15</b>	0	100	70	5	15	10

## V.6 Etat frais :

Tableau V.8 : Propriétés physiques des bétons étudiés (témoin et recyclé) à l'état frais.

Les types des bétons	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Aff (cm)	Rapport (E/C) efficace	Teneur en air (%)
BT	2398	6	0.53	2
BR0	2325	6	0.63	2.9
BR1	2250	5.5	0.64	2.9
BR2	2273	5.5	0.62	2.8
BR3	2284	7	0.60	2.6
BR4	2310	5.5	0.59	1.8
BR5	2362	6	0.62	1.3
BR6	2325	5.5	0.58	2.4
BR7	2310	5	0.56	2.6
BR8	2311	5	0.57	2.6
BR9	2300	5	0.57	2.8
BR10	2293	5	0.56	2.8
BR11	2303	5	0.57	2.4
BR12	2306	5	0.58	2.6
BR13	2304	5	0.58	2.6
BR14	2315	5	0.56	2.8
BR15	2324	6	0.56	2.8

## V.6.1 La Masse volumique :

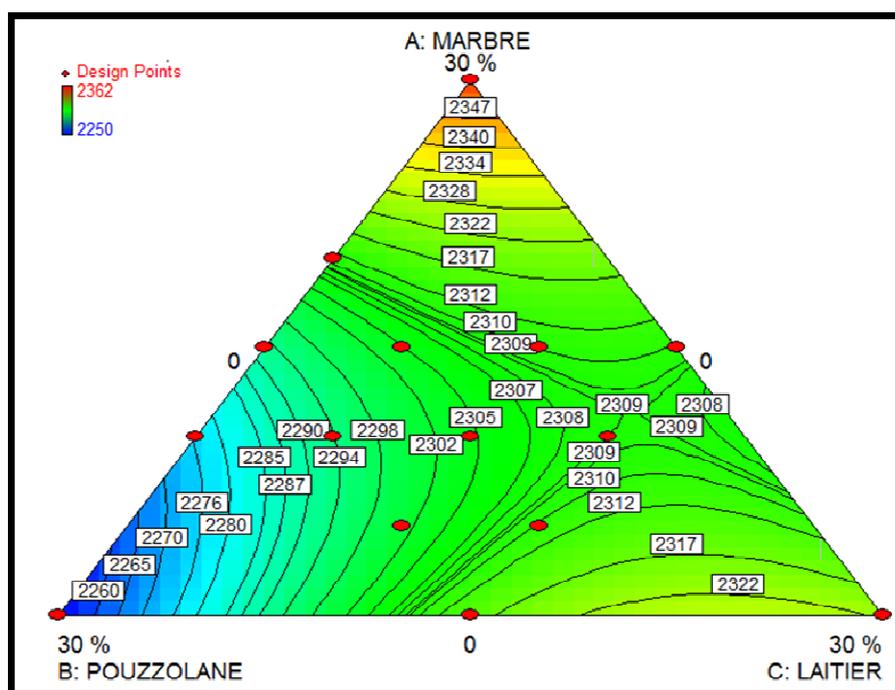


Figure V.19 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique (frais).

## Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Masse volumique} = +78.58609 * \text{marbre} + 75.06831 * \text{pouzzolane} + 77.38498 * \text{laitier} - 0.055734 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 0.13051 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.12630 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

D'après le diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique à l'état frais (figure V.19), on constate que la masse volumique des bétons recyclés varie en fonction du type et pourcentage des différents ajouts, on note que :

- Les bétons recyclés ; confectionnés à base d'un ciment binaire et ternaire contenant des taux élevés de la pouzzolane (15%, 20%, 30%) par rapport aux fillers de marbre et laitier (10%, 5%, 0%), présentent des faibles valeurs de la densité qui varie entre (2250 Kg/m<sup>3</sup> et 2284 Kg/m<sup>3</sup>), on remarque que plus en s'approche du point « B » plus la densité diminue (bétons recyclés situés dans la zone bleu).

-D'un autre côté, la substitution de 30% du ciment par les fillers de marbre et le laitier à des taux élevés par rapport à la pouzzolane améliore la masse volumique (bétons recyclés situés dans la zone rouge et verte), plus en s'approche du point « A et C », plus la densité augmente 2293 Kg/m<sup>3</sup> à 2362 Kg/m<sup>3</sup>. Cette variation de la densité est attribuée à la nature des ajouts, les fillers de marbre qui augmentent la compacité par le remplissage des vides,

tandis que la pouzzolane augmente la porosité des bétons recyclés à cause de son besoin d'eau supplémentaire.

Selon le tableau (V.8), on constate que les bétons **BR5** et **BR6**, présentent des masses volumiques (**2362 Kg/m<sup>3</sup>** et **2325 Kg/m<sup>3</sup>**) respectivement, similaires au béton **BR0** (**2325 Kg/m<sup>3</sup>**), et une réduction d'environ de **4%** par rapport au **BT** (**2398 Kg/m<sup>3</sup>**).

### V.6.2 La teneur en air :

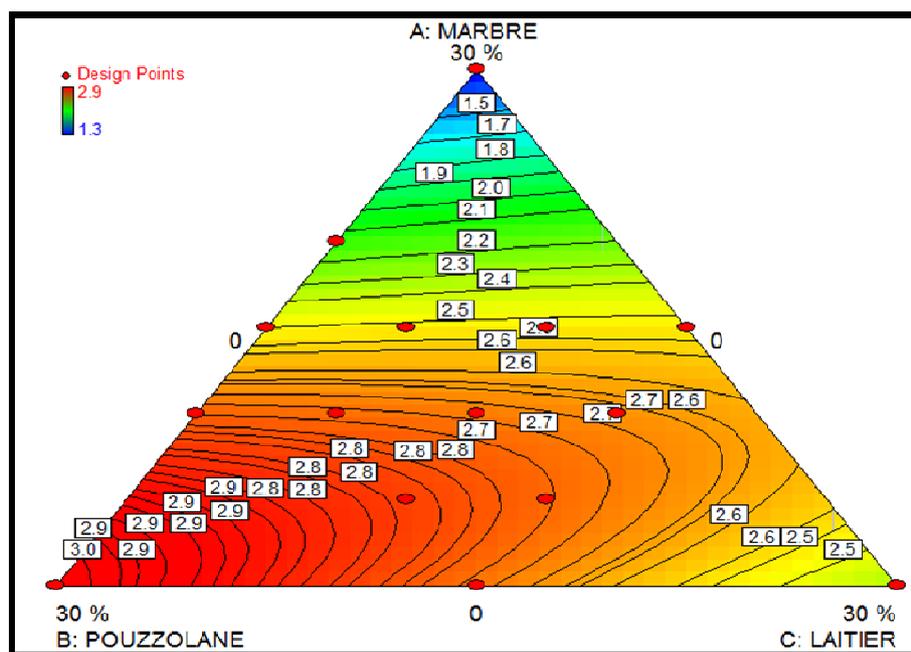


Figure V.20 : Diagramme triangulaire de la variation de la teneur en air.

### Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Teneur en air} = +0.041236 * \text{marbre} + 0.098908 * \text{pouzzolane} + 0.079346 * \text{laitier} + 1.68863E-003 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} + 3.12885E-003 * \text{marbre} * \text{laitier} + 1.95759E-004 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

La teneur en air des différents bétons recyclés varie en fonction du type et pourcentage des ajouts, comme on peut le constater d'après l'analyse de la figure (V.20), en effet, on remarque que :

- Les bétons recyclés confectionnés à partir d'un ciment binaire qui contient (30% pouzzolane ou 30% laitier), et un ciment ternaire qui contient (15% pouzzolane et 15% latier), indiquent une porosité élevée (varie entre **2.6** et **2.9**), présentée par la **zone rouge**.
- Les bétons recyclés à base d'un ciment ternaire (15% fillers de marbre et 15% pouzzolane ou laitier), presentent une légère diminution de la teneur en air (allant de **2.4** à **2.6**), liée à la

présence des fillers de marbre qui remplissent les vides (**bétons recyclés situés dans la zone jaune et verte**).

- Par contre, on remarque que plus on s'approche du point « A », plus la teneur en air des bétons recyclés diminue (varie entre **1.3** et **1.8**), on constate que la substitution du ciment par des taux élevés des fillers de marbre améliore considérablement la compacité des bétons recyclés (**bétons recyclés situés dans la zone bleu**).

On peut conclure que les ajouts (pouzzolane et laitier) ont un effet négatif sur la porosité des bétons recyclés par rapport aux fillers de marbre qui par leur rôle « filler » diminue le volume de l'air en remplissant les vides, et augmente la compacité des bétons recyclés, ce qui est en corrélation avec les études antécédentes [67]. D'après les résultats de la teneur en air mentionnés dans le tableau (V.8), les bétons **BR4** et **BR5** (**1.8%**, **1.3%**) respectivement présentent une diminution d'environ de **45%** par rapport au béton **BR0** (**2.9%**) et **35%** par rapport au béton **BT** avec une teneur en air de (**2%**).

### V.6.3 Rapport E/C :

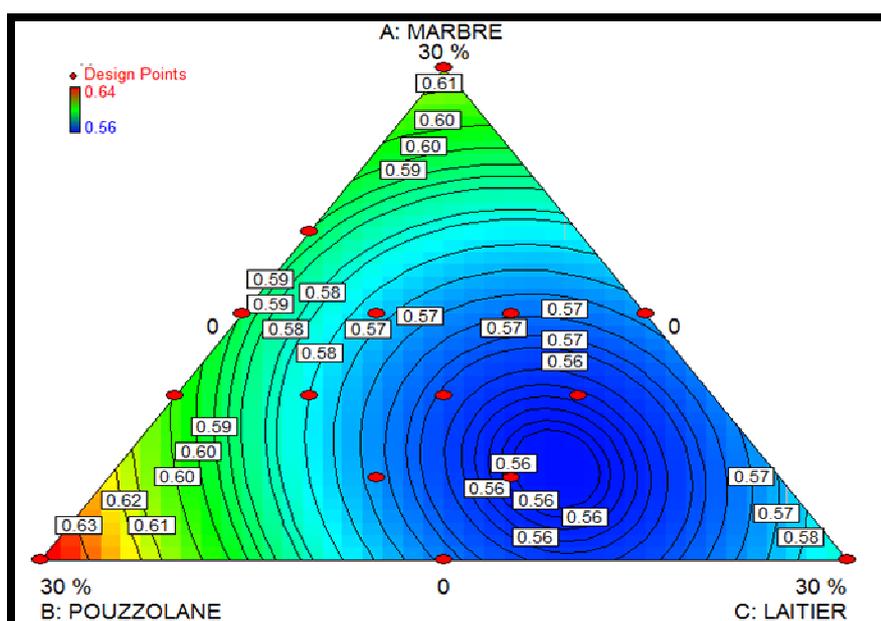


Figure V.21 : Diagramme triangulaire de la variation du rapport E/C.

Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Rapport E/C} = +0.020576 * \text{marbre} + 0.021432 * \text{pouzzolane} + 0.019520 * \text{laitier} - 1.65421\text{E-}004 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 1.25925\text{E-}004 * \text{marbre} * \text{laitier} - 2.03285\text{E-}004 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

D'après la figure (V.21), on constate que le rapport E/C des différents bétons recyclés varie (**0.56 à 0.64**) en fonction du type et pourcentage de substitution du ciment par les ajouts (fillers de marbre, pouzzolane et laitier). On note que :

-Les bétons recyclés confectionnés à base d'un ciment (binaire ou ternaire), qui contient des taux élevés de pouzzolane (**zone rouge et jaune**), et fillers de marbre (**zone verte**), présentent des valeurs de rapport E/C supérieures (**0.64, 0.62, 0.60, 0.59**) par rapport aux autres mélanges. En effet, lors de la confection de ces bétons, on a augmenté la quantité d'eau de gâchage pour garder un affaissement entre **5 et 6 cm** (béton plastique), ceci a pour conséquence directe une augmentation du rapport E/C et indique la forte demande en eau des ajouts (fillers de marbre et pouzzolane).

-Par contre, la substitution d'une partie de ciment par 30% de laitier, pour confectionner un béton recyclé à base d'un ciment binaire, ou l'association de laitier à des taux dominants aux ajouts (fillers de marbre et pouzzolane), pour ceux à base d'un ciment ternaire ou quaternaire, diminue nettement la demande en eau supplémentaire (**bétons recyclés se situent dans la zone bleu**), ceci se traduit par des faibles rapports E/C (**0.58, 0.57, 0.56**), ce qui montre que l'ajout laitier améliore l'ouvrabilité des bétons recyclés, comme rapporté par des études antérieures [56].

Les résultats obtenus dans le tableau (V.8), indiquent une diminution du rapport E/C d'environ **9%** pour les bétons (**BR7, 8, 9, 10, 11, 14 et BR15**) par rapport au béton **BR0 (0.63)** et comparable au béton **BT (0.53)**.

## V.7 Etat durci :

**Tableau V.9 :** *Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 7 jours.*

Les types des bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Rc moy (MPa)
BT	2450	31.5
BR0	2340	27.5
BR1	2286	12.83
BR2	2350	17.36
BR3	2371	19.26
BR4	2381	24.61
BR5	2395	21.76
BR6	2395	22.28
BR7	2335	23.03
BR8	2378	25.84
BR9	2370	23.67
BR10	2357	21.59
BR11	2363	23.34
BR12	2378	25.54
BR13	2349	24.90
BR14	2394	23.57
BR15	2324	25.04

**Tableau V.10 :** *Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à 14 jours.*

Les types des bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Rc moy (MPa)
BT	2458	37.04
BR0	2362	31.11
BR1	2337	17.24
BR2	2365	21.07
BR3	2373	21.47
BR4	2388	29.02
BR5	2415	26.97
BR6	2401	30.56
BR7	2369	28.46
BR8	2401	30.64
BR9	2387	26.53
BR10	2367	28.13
BR11	2390	30.3
BR12	2395	28.97
BR13	2411	30.53
BR14	2396	28.06
BR15	2419	28.19

Tableau V.11 : Propriétés physiques et mécaniques des différents bétons étudiés à 28 jours.

Les types des bétons	$\rho_{app}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Rc <sub>moy</sub> (MPa)	A (%)
BT	2470	40.04	4.75
BR0	2365	35.25	7.73
BR1	2347	23.83	9.86
BR2	2375	23.73	8.77
BR3	2377	24.23	8.63
BR4	2400	30.56	7.47
BR5	2435	29.29	7.53
BR6	2439	35.67	7.14
BR7	2403	31.57	7.70
BR8	2432	33.82	7.23
BR9	2397	34.4	7.18
BR10	2371	29.91	7.42
BR11	2408	29.97	7.40
BR12	2400	30.79	7.36
BR13	2426	32.17	7.49
BR14	2400	30.45	7.39
BR15	2425	30.64	7.29



Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Masse volumique à 14 jours} = +80.39024 * \text{marbre} + 78.04909 * \text{pouzzolane} + 80.04757 * \text{laitier} - 0.012087 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 0.056178 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.13953 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

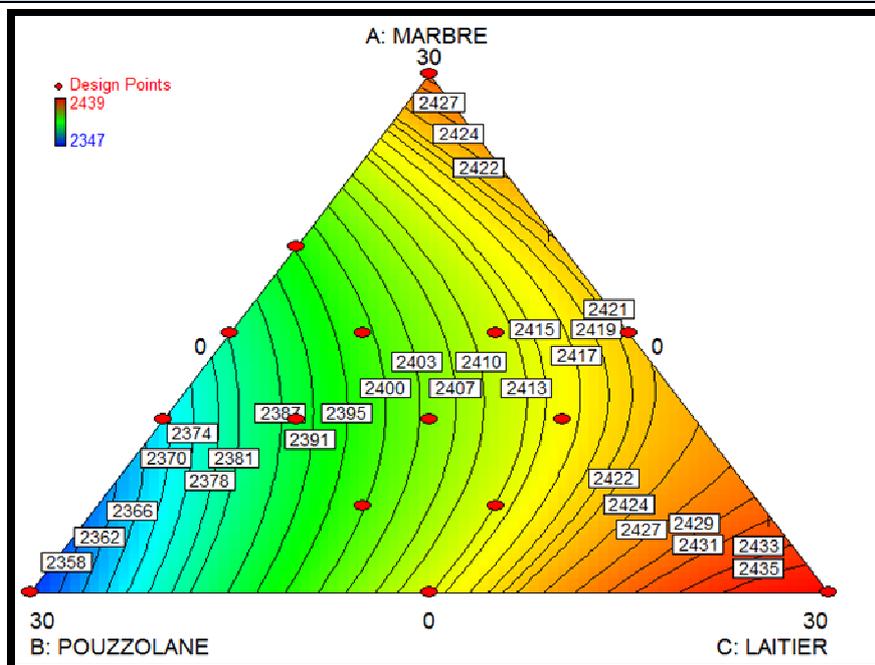


Figure V.24 : Diagramme triangulaire de la variation de la masse volumique à 28 jours.

Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Masse volumique à 28 jours} = +81.05902 * \text{marbre} + 78.39642 * \text{pouzzolane} + 81.28489 * \text{laitier} - 0.047457 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 0.061965 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.079795 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

Selon les diagrammes de la variation de la masse volumique à 7, 14 et 28 jours (figure V.22, V.23 et V.24), on note que :

- Les bétons recyclés confectionnés à partir d'un ciment (binaire, ternaire ou quaternaire) qui contiennent des taux de substitution élevés par les fillers de marbre (15%, 20%, 30%) et laitier (15%, 30%) compensés par des faibles taux de pouzzolane (5%, 0%), présentent des masses volumiques importantes à 7, 14 et 28 jours (**bétons recyclés situés dans la zone rouge et jaune**), en comparaison avec les bétons recyclés à base d'un ciment qui contient des taux de substitution élevés par la pouzzolane (10%, 15%, 20% et 30%), comme illustré dans les figure (V.22, V.23 et V.24), au voisinage du point « B » plus le pourcentage de pouzzolane augmente, et plus la densité diminue (**bétons recyclés se situent dans la zone verte et bleu**), ce qui montre l'effet négatif de la pouzzolane contrairement à ceux de fillers de marbre et laitier.

D'après les résultats de la masse volumique à 28 jours présentés dans le tableau (V.11), on constate que les bétons (BR5, BR6, BR8, BR13 et BR15) indiquent des masses volumiques légèrement supérieures ( $2435 \text{ Kg/m}^3$ ,  $2439 \text{ Kg/m}^3$ ,  $2432 \text{ Kg/m}^3$ ,  $2426 \text{ Kg/m}^3$  et  $2426 \text{ Kg/m}^3$ ) respectivement, d'environ de 3% par rapport au béton BR0 ( $2365 \text{ Kg/m}^3$ ), et comparables au béton BT ( $2470 \text{ Kg/m}^3$ ).

### V.7.2 La résistance à la compression :

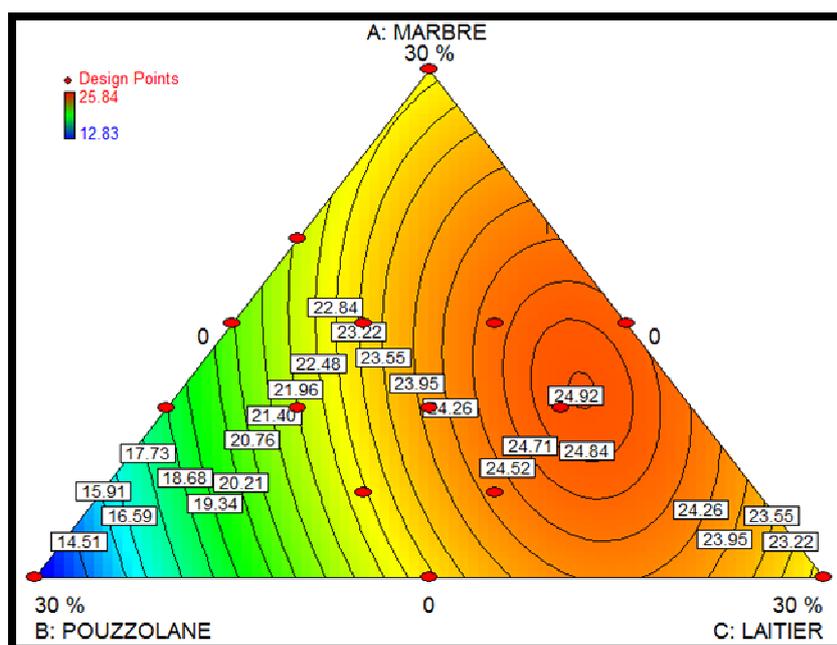


Figure V.25 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 7 jours.

Equation finale du modèle quadratique :

$$\begin{aligned} \text{Résistance à 7 jours} = & +0.74343 * \text{marbre} + 0.42355 * \text{pouzzolane} + 0.74739 * \text{laitier} \\ & + 0.012696 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} + 0.010454 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.029037 * \text{pouzzolane} * \text{laitier} \end{aligned}$$

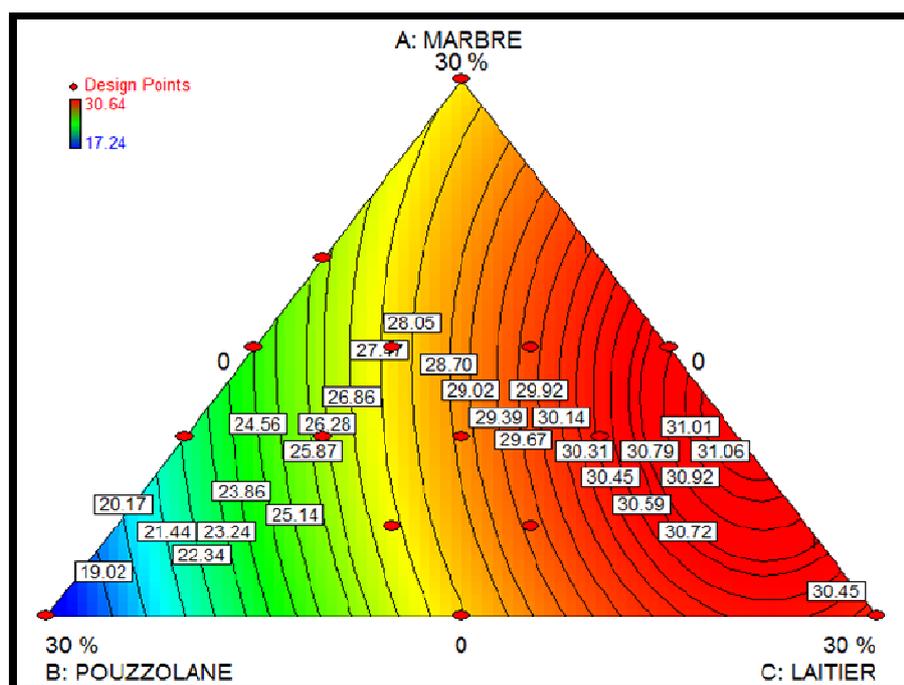


Figure V.26 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 14 jours.

Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Résistance à 14 jours} = +0.91849 * \text{marbre} + 0.55335 * \text{pouzzolane} + 1.00623 * \text{laitier} + 0.011053 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} + 9.03192\text{E-}003 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.020390 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

D'après l'analyse des deux diagrammes triangulaires de la variation de la résistance à 7 et 14 jours (figure V.25 et V.26), on note que :

- Les bétons recyclés formulés à base d'un ciment (binaire, ternaire et quaternaire) qui contenant des taux de substitution élevés par les fillers de marbre (10%, 15%, 20% , 30%) et par le laitier (10%, 15%, 30%), compensés par des faibles taux de pouzzolane (5%, 0%), présentent des meilleures résistances à la compression (**bétons recyclés situés dans la zone rouge et jaune**) par rapport aux autres mélanges.
- Par contre, on remarque qu'on s'approche du point « B », le pourcentage de remplacement du ciment par la pouzzolane augmente (10%, 15%, 20%, 30%) et en parallèle, la résistance à la compression des bétons recyclés diminue (**zone verte et bleu**) par rapport aux autres mélanges.

On constate qu'à court terme (7 et 14 jours), la pouzzolane a un effet négatif sur la résistance des bétons recyclés, alors que les fillers de marbre ont un impact positif sur les performances

mécaniques des bétons recyclés. En effet, elles participent au développement de la résistance au jeune âge en améliorant les propriétés physiques des bétons recyclés (compacité élevée, bonne résistance), comme le montrent d'autres études [73, 74, 75], tandis que le laitier se manifeste dès le jeune âge en réagissant avec la portlandite qui se forme suite à l'hydratation du ciment, pour former des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique), qui contribuent à accroître la résistance, ce qui est en corrélation avec les résultats de certains chercheurs [3].

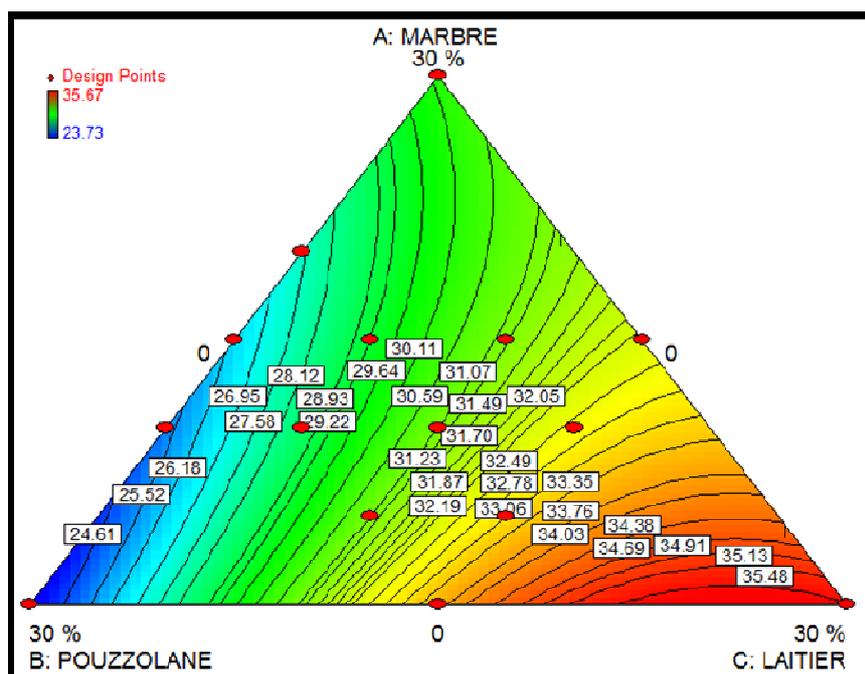


Figure V.27 : Diagramme triangulaire de la variation de la résistance à la compression à 28 jours.

Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Résistance à 28 jours} = +1.00752 * \text{marbre} + 0.78192 * \text{pouzzolane} + 1.18398 * \text{laitier} - 2.28760\text{E-}003 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 2.73456\text{E-}003 * \text{marbre} * \text{laitier} + 0.018414 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

L'analyse du diagramme triangulaire de la variation de la résistance à 28 jours (figure V.27),

- Nous permet d'observer d'une part, l'effet remarquable de la substitution du ciment par le laitier à des taux élevés (15%, 30%) seul (ciment binaire), ou combiné (ciment ternaire) avec les fillers de marbre (15%), ou la pouzzolane (15%), sur la résistance à la compression des bétons recyclés (zone rouge et jaune), comparé aux autres mélanges.

- D'un autre côté, on remarque qu'on s'écarte du point « C » vers le point « A » ou « B », la résistance à la compression des bétons recyclés diminue c.-à-d. l'augmentation du taux de

substitution du ciment par les fillers de marbre (10%, 15%, 20%, 30%) ou par la pouzzolane (10%, 15%, 20%, 30%) ou même la combinaison de ces deux derniers ajouts affecte négativement la résistance des bétons recyclés (zone verte et bleu).

On constate qu'à moyen terme (28 jours), l'ajout laitier a une action plus efficace que la pouzzolane qui son effet ne se manifeste qu'à long terme, concernant les fillers de marbre qui sont des ajouts inertes, elles améliorent la résistance au jeune âge, après elles n'ont aucun rôle sur le développement de la résistance, ceci rapporté par d'autres études [73, 74, 75].

Selon les résultats de la résistance à la compression des différents bétons (recyclé et témoin) à 28 jours, mentionnés dans le tableau (V.11), on note que :

- Le béton **BR6** (30% laitier), indique une valeur de la résistance (**35.56 MPa**) similaire à celle du béton **BR0** (**35.25 MPa**), et une diminution de **11%** par rapport au béton **BT** (**40.04 MPa**).
- Les bétons **BR8** (15% fillers de marbre +15% laitier) et **BR9** (15% pouzzolane +15% laitier), donnent des résistances (**33.82 MPa**, **34.4 MPa**) comparables au béton **BR0** (**35.25 MPa**).

### V.7.3 Absorption d'eau :

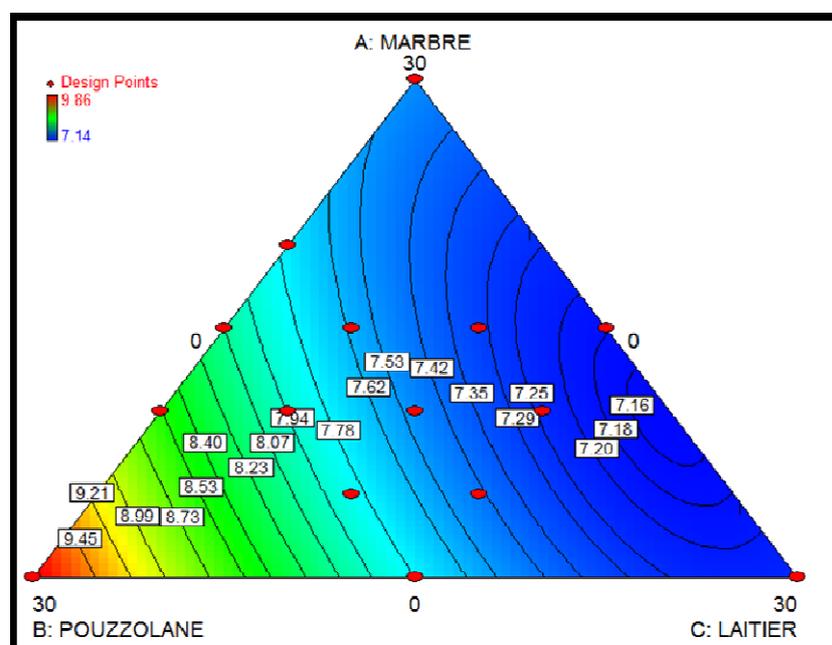


Figure V.28 : Diagramme triangulaire de la variation du taux d'absorption d'eau.

## Equation finale du modèle quadratique :

$$\text{Absorption d'eau} = +0.25074 * \text{marbre} + 0.33029 * \text{pouzzolane} + 0.24159 * \text{laitier} - 2.83773\text{E-}003 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} - 9.07837\text{E-}004 * \text{marbre} * \text{laitier} - 3.54065\text{E-}003 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

D'après le diagramme triangulaire de variation du taux d'absorption d'eau des différents bétons recyclés (figure V.28), on note que :

- Les bétons recyclés qui se situent dans la **zone bleu**, présentent des taux d'absorption d'eau inférieurs par rapport aux autres mélanges (7.14% à 7.53%), ces bétons sont confectionnés à base d'un ciment (binaire, ternaire et quaternaire) incorporant des pourcentages de substitution élevés par les fillers de marbre (15%, 20%, 30%) et par le laitier (10%, 15%, 30%), compensés par des faibles taux de pouzzolane (10%, 5%, 0%). Cela indique l'effet positif de ces deux ajouts (fillers de marbre et laitier), et leur rôle dans la contribution de l'amélioration de la compacité des bétons recyclés.

- D'un autre côté, on constate que le taux d'absorption d'eau est proportionnel au taux de remplacement du ciment par la pouzzolane. En effet, plus on s'approche du point « B » plus le pourcentage de la pouzzolane augmente (5%, 10%, 15%, 20%, 30%) accompagné par l'augmentation du taux d'absorption d'eau (bétons recyclés se situent dans la zone verte, jaune et rouge), ceci montre l'effet négatif de la pouzzolane sur la compacité des bétons recyclés.

## V.7.4 Perte de masse :

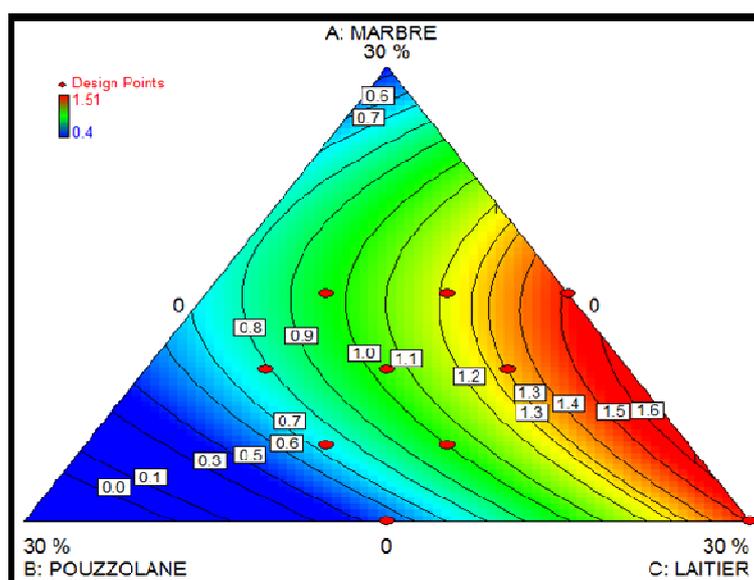


Figure V.29 : Diagramme triangulaire de la Perte de masse des bétons étudiés.

**Equation finale du modèle quadratique :**

$$\text{Perte de masse} = +0.013219 * \text{marbre} - 0.010543 * \text{pouzzolane} + 0.049983 * \text{laitier} + 2.90292E - 003 * \text{marbre} * \text{pouzzolane} + 2.47590E - 003 * \text{marbre} * \text{laitier} - 3.52675E - 004 * \text{pouzzolane} * \text{laitier}$$

Selon la figure (V.29) qui indique la perte de masse des différents bétons étudiés on note que :

-les mélanges à base d'un ciment binaire, ternaire et quaternaire à des dosages élevés de laitier et fillers de marbre (15 % et 30 %) par rapport à la pouzzolane (5 %, 0 %) donnent des pertes de masse élevées (**zone rouge et jaune**).

-par contre les mélanges qui contiennent des taux élevés de substitution du ciment par la pouzzolane (15 % et 30 %) donnent de faibles pertes de masses (**zone bleu**).

On constate que la pouzzolane à un rôle positive vis-à-vis la durabilité dans le milieu agressif (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

---

**CHAPITRE VI :**  
**CONCLUSION**  
**GENERALE ET**  
**PERSPECTIVES**

---

**Conclusion générale :**

Les objectifs visés dans ce mémoire sont -à notre avis- largement réalisés, nous considérons que le travail expérimental effectué dans le cadre de ce projet a touché la problématique posée au début.

Dans la première partie, les résultats obtenus à travers l'étude de l'effet des additions minérales (fillers de marbre et pouzzolane) sur les propriétés d'un béton recyclé local ; nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le dosage de 30% par la pouzzolane diminue d'une façon remarquable la densité, à l'état frais et durci (mélange BR1) par rapport au béton recyclé sans additions minérales (BR0), ce qui montre le rôle négatif de l'ajout pouzzolane sur cette propriété.
- Le pourcentage de 30 % d'ajout de fillers de marbre donne des masses volumiques à l'état frais et durci légèrement élevées (mélange BR5) en comparaison avec le béton sans additions minérales (BR0) et des valeurs plus proches au béton témoin (BT).
- La demande en eau des bétons recyclés avec substitution du ciment par pouzzolane ou fillers de marbre reste importante par rapport au béton témoin avec des valeurs 0.59 à 0.64 et 0.53, respectivement.
- L'augmentation du taux de substitution du ciment avec les fillers de marbre (10%, 15%, 20% et 30%) provoque une diminution de la teneur en air en comparaison avec le béton recyclé sans ajouts (BR0).
- Le mélange BR5 avec 30% de fillers de marbre donne une diminution considérable de la teneur en air par rapport au béton recyclé sans additions minérales environ 55% et 35% par rapport au béton témoin. Ce pourcentage élevé peut être jugé avantageux pour la structure interne du béton recyclé.
- La résistance à la compression ( $R_c$ ) à différents âges 7, 14 et 28 jours de tous les bétons recyclés est inférieure au béton témoin.
- La substitution du ciment avec 30% pouzzolane influe négativement sur la résistance à la compression ( $R_c$ ) (mélange BR1) ; Cependant, les mélanges BR4 (avec 10% pouzzolane +20% fillers de marbre) ; et BR5 (avec 30% fillers de marbre) donnent des réponses mécaniques ( $R_c$ ) proches à celle du béton sans additions minérales.
- Le mélange BR2 avec 20% pouzzolane et 10% fillers de marbre donne une résistance à la flexion par fendage ( $R_f$ ) légèrement élevée par rapport au béton sans additions minérales de l'ordre de 7% et proche à celle du béton témoin.

- Le développement de la vitesse ultrason (V) croit d'une façon normale à 7, 14 et 28 jours pour tous les mélanges par rapport au béton recyclé sans additions minérales et même au béton témoin.
- D'après les résultats obtenus par les essais non destructifs (scléromètre et ultrason), on peut conclure que ces résultats restent toujours approximatifs ; cependant les résultats obtenus par essai d'écrasement demeurent plus fiables pour l'évaluation de la qualité du béton.
- Les taux d'absorption de tous les types de bétons recyclés avec ou sans additions minérales sont supérieurs en comparaison avec le béton témoin.
- Le remplacement d'une partie du ciment par 30% de pouzzolane (mélange BR1) augmente fortement le taux d'absorption d'eau par rapport au béton recyclé sans additions minérales.
- La présence des fillers de marbre à des taux élevés (20% et 30%) dans les mélanges BR4 et BR5 montre des taux d'absorption légèrement inférieurs au béton sans additions minérale.

En second lieu, selon la méthode des plans d'expériences (Design-Expert), utilisée pour l'analyse de l'effet de la combinaison d'un ciment binaire, ternaire et quaternaires sur le comportement d'un béton recyclé avec ajouts vis-à-vis ses propriétés physico-mécaniques et durabilité, ceci permet de constater ;

- L'utilisation d'un ciment binaire avec un dosage 30 % fillers de marbre ou de laitier pour la formulation des bétons BR5 et BR6 ; donnent des masses volumiques similaires au béton sans additions minérales (BR0) et proches à celle du béton témoin (BT).
- Les mélanges recyclés à base d'un ciment binaire (30% fillers de marbre ou laitier), ternaire (15% fillers de marbre + 15% laitier) montrent une diminution de la teneur en air par rapport au béton recyclé (BR0) sans additions minérales.
- L'utilisation d'un ciment binaire, ternaire et quaternaire ; contenant des dosages élevés de laitier au-delà de 15 % permet de diminuer le besoin en eau des bétons recyclés ; il paraît que le laitier contribue d'une façon prometteuse à la bonne ouvrabilité de ces bétons.

- L'incorporation au-delà de 15 % de laitier en substitution du clinker ; ciment binaire ou ternaire (mélange BR6, BR8 et BR9) donne une résistance à la compression ( $R_c$ ) satisfaisante par rapport au béton sans additions minérales et une diminution d'environ 10 % par rapport au béton témoin.
- La substitution d'une quantité du ciment par 30% des additions minérales (fillers de marbre, pouzzolane et laitier), n'est pas avantageux compte à l'absorption des bétons recyclés par rapport au béton témoin. Toute fois, la pouzzolane avec des dosages élevés enregistre une absorption importante en comparaison avec un béton recyclé sans ajout (BR0) ainsi que le béton témoin (BT).
- Le remplacement du ciment par des taux élevés de pouzzolane et fillers de marbre (15% et 30%) a un effet positif sur la durabilité des bétons recyclés à base de cette addition vis-à-vis le milieu agressif ( $H_2SO_4$ ).

**Perspectives et recommandations :**

Sur la base de ce travail de recherche, nous recommandons de mener de futur travaux de recherche portant sur les sujets ;

- 1- Etude de l'effet des additions minérales sur les propriétés d'un béton recyclé local à long terme au-delà de 28 jours (90 jours voir même plus).
- 2- Etudier l'effet de la combinaison des additions minérales et adjuvant (réducteur d'eau) sur les propriétés d'un béton recyclé locale.
- 3- Etudier la durabilité d'un béton recyclé local à base d'addition minérale vis-à-vis différents milieux agressifs.
- 4- Approfondir notre étude en effectuant des essais MEB (microscope électronique à balayage) et DRX (diffraction par rayon X) pour mieux apprécier la micro structure du béton recyclé avec additions minérales.
- 5- Elargir l'utilisation de la méthode des plans d'expérience pour mieux estimer l'effet d'un ou plusieurs facteurs agissants dans ce cas d'étude .

## Références bibliographiques

---

- [1] **Michel. F**, « les granulats, industrie, géologie et environnement », UNICEM , (en ligne), disponible sur [http : aquitaine.unicem.fr/documentation/les granulats-goologie-industrie-envernement](http://aquitaine.unicem.fr/documentation/les_granulats-geologie-industrie-environnement), consulte le 28/04/2014.
- [2] **Lott. J.-P, al, 2005** CIMBÉTON : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation, Edition 2005, Am principe Paris
- [3] **Dreux. G, Festa. J**, « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.
- [4] **Frahtia. S**, « l'influence de la concentration des fibres sur l'ouvrabilité de béton de fibre », thèse magistère, université de m'sila, 2010.
- [5] **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.
- [6] **Ghomari. F**, « Science des matériaux de construction », Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, 2006.
- [7] **Romilliat. E**, « Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker », Thèse de Doctorat Université Jean Monnet de Saint-Etienne, 2006,136p.
- [8] **Norme EN-197-1**, 2000, « Ciments Partie 1 : Composition, spécifications et critères et conformité des ciments courants ».
- [9] **Baron. J, Olivier. JP et Weiss. JC** : « Les ciments courants », « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles, 806p-1997.
- [10] **Verbeck. G.J, Helmuth. R.H**, «Structures and physical properties of cement paste», Proc. 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 3, 3-1, pp.1-44, 1968.
- [11] **Taylor. H.F.W**, 1997, « Cement chemistry », 2nd ed., Thomas Telford, London.
-

## Références bibliographiques

---

- [12] **Boutiba. A**, « Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci », Thèse de Magister, sino dato à l'Université de M'Hamed Bougrra Boumerdes.
- [13] **Info Ciment** disponible sur, « [www.infociment.fr](http://www.infociment.fr) », consulter le 14/03/2014.
- [14] **NF EN 206-1** : Norme française partie 1 «béton : spécification, performance, production et conformité ».
- [15] **Maucuit. G, Lecomte**, Cimbéton : Fiches techniques Tome 2 : « Les bétons, composition, fabrication et mise en œuvre »,2005.
- [16] **Cours en ligne**, Matériaux de construction, les granulats, Chapitre 3,  
Disponible sur site web <http://www.coursenligne.refer.org>, consulter le 12/03/2014.
- [17] **Attia. L**, « court valorisation et recyclage des déchets », université de Bachir Ibrahim Bordj Bou Arreridj, 2eme master, département de génie civil, 2014.
- [18] **Belagraa. L**, « court Matériaux de construction », université de Bachir Ibrahim Bordj Bou Arreridj, 3eme licence, département de génie civil, 2012.
- [19] **Cours en ligne**, Matériaux de construction, le béton, Chapitre 6, Disponible sur site web, « <http://www.coursenligne.refer.org> », consulter le 03/03/2014.
- [20] **Bensebti. S, Aggouneh. H**, Sciences & Technologie « Essai de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplaçants », N°25, Juin 2007, 59-64.
- [21] **Materials & Applications Center Holcim Western Europe**, « Guide pratique », 1ère édition 2007.
- [22] **De Larrard. F**, « Structures granulaires et formulation des bétons », Collection Etudes recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, série Ouvrage d'Art OA34-LCPC, Paris, France.2002, page 12.
- [23] **Torrenti. J.M**, « Du béton frais au béton durci », sino dato, Eléments de comportement par Directeur scientifique de l'Ecole française du béton (EFB).
-

## Références bibliographiques

---

- [24] **Congnon. J.M**, « génie civile », école centrale de paris, 1998. PP, 44-50.
- [25] **Mehta. P.K**, «Concrete: structure, properties and Materials», Prentice-Hall Inc., Englewood NJ, P. 450, (1986).
- [26] **Bensted. J**, «l'hydratation du ciment portland», World Cement, Aout, 1991, p.27-32.
- [27] **Hearn. N, Young. F**, «W/C ratio, porosity and sulfate attack», a review. In: Skalny J, Marchard J, editors. Materials science of concrete: sulfate attack mechanisms. The American Ceramic Society, 1999, p. 189-205.
- [28] **Taylor. H.F.W**, «Cement chemistry», 2nd edition, London, 1997.
- [29] **Khalaf. F.M, DeVenny AlanS**. «Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review». ASCE J Mater Civil Eng 2004 :331-40.
- [30] **Lefèvre. M**, « la gestion des déchets en Europe : Notions de Droit Communautaire, Droit Allemand et Droit Français », Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides, Recueil des communications, Éditeur GTZ, Alger, 2000.
- [31] **Allal. M.A, Sayagh. C**, « Recyclage des Déchets de Construction en Voiries IIIème Congrès Algérien de la Route », recueil de la communication, Tome I, ARAL, Alger, 2001, p. 102.
- [32] **Bedjou. S**, « contribution à la valorisation des déchets de Construction, Étude du Recyclage des débris de terre cuite », mémoire de magister en génie civil, ENP d'Alger, 2003.
- [33] **Grondin. A**, « valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des Bétons de granulats recyclés de béton »Mémoire Projet de fin d'étude, 2011 à Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg.
- [34] **De Juan. M.S, Gutiérrez. P.A**, «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009, Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 872-877.
- [35] **Douara. T.H, Benhoua. M, et Nezergui. B**, « caractéristiques physique et chimiques des granulats recycle et granulats naturelle », SBEIDCO, 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
-

## Références bibliographiques

---

- [36] **Sánchez de Juan. M, Alaejos Gutierrez. P**, «Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate», RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne
- [37] **Padmini. A.K, Ramamurthy. K, et Mayhews. M.S**, «Influence of the parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», *Construction and Building Materials*, 2009(23), pp. 829-836
- [38] **Mahmoud. S**, «Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures», Thèse de doctorat, Université de Kassel, Allemagne, 2005.
- [39] **Québaud. M**, «Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats », Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [40] **Ravindrarajah. R.S, Loo. Y.H and Tam. C.T**, «Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregates», *Magazine of Concrete Research*, vol.3, 1985.
- [41] **Djerbi. A, Nguyen. T.D, and Ramanich. S**, «Autogenous shrinkage of at very early Age: Effect of recycled aggregates», 3rd fib International Congress, 2010.
- [42] **Angulo. S.C, Carrijo. P.M, Figueiredo. A.D, Chaves. A.P, and V. M. John**, « On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete», *Materials and Structures*, 2010, 519–528.
- [43] **Kou. S.-C, Poon. C.-S**, «Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*», 2010, pp. 649-654.
- [44] **Katz. A**, «Propriétés du béton à base de granulats recyclés à partir de vieux béton partiellement hydraté », *Cement and concrete research*, pp. 703-711, 2003.
- [45] **Tam. V.W.Y, Wang. K, and Tam. C.M**, «Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis», *Journal of Hazardous Materials*, pp. 703-714, 2008.
- [46] **Topçu. I.B, Sengel. S**, «Properties of concretes produced with waste concrete aggregate», *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 1307-1312, 2004.
- [47] **Ravindrarajah. R.S, Loo. Y.H, et Tam. C.T**, «Propriétés du béton à base de béton concassé comme agrégats grossiers», *Magazine of Concrete Research*, vol.3, 1985.
-

## Références bibliographiques

---

- [48] **Chakradhara. R.M, Bhattacharyya. S and Barai. S**, « Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete », in *Materials and Structures*. 2011, Springer Netherlands, p. 205-220.
- [49] **Gonzalez-Fonteboa. B, Martinez-Abella. F**, « Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties », *Building and Environment*, 43 (2008), 429–437.
- [50] **Rao. A**, « Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete ». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.
- [51] **Corinaldesi. V**, « Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates » *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1616–1620.
- [52] **Achtemichuk. S, Hubbard. J, Sluce. R, et Shehata. M.H**, « L'utilisation de granulats de béton recyclé pour produire des matériaux à faible résistance contrôlée sans l'aide de ciment Portland », *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 564–569.
- [53] **Domingo. A, Lazaro. C, Gayarre. F.L, Serrano. M.A, et Lopez-Colina. C**, (2010) « Déformations à long terme par fluage et le retrait en béton de granulats recyclés ». *Materials and structures*, Vol 43, pp 1147-1160.
- [54] **De Brito. J, Alves. F**, (2010) « Béton avec granulats recyclés : la recherche expérimentale portugais ». RILEM.
- [55] **Rasheeduzzafar, Khan. A**, (1984) « Recycled concrete: a source of new aggregate ». *Cement, Concrete and Aggregates (ASTM)*, 6, No 1, pp. 17-27, 1984.
- [56] **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.
- [57] **Meukam. P**, « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.
- [58] **Meatf**, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, « les pouzzolanes et les basalts », bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69.
- [59] **Vernet. C, Cadoret. G**, (1991), Compte- rendus du Colloque « Voies Nouvelles du Béton », Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours, Cachan, France, pp.p. 17.
-

## Références bibliographiques

---

- [60] **Miller. E.W,** « Blended cements - Applications and implications », *Cément and Concrete Composites*, Vol. 15, No. 4, PP. 237-245, 1993.
- [61] These an overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, *Canadian Journal of Civil Engineering*. / Caijun Shi / *Rev. can. Génie civ.* 28(5) : 778-786 (2001).
- [62] **Macleod. F,** « l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage », *Cement Association of Canada*, ing. Mars 2005 page 10-12.
- [63] **Husson. S,** « Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers ». Application aux mortiers, Thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991.
- [64] **Bombed. R,** « Rhéologie du béton frais : influence des ajouts de fillers au ciment ». 8th Congrès Int. De Chimie des Ciments, RIO DE JANEIRO. Sept. 1986, IV, 190-196.
- [65] **Gegout. P, Hornain. H, Thuret. B, Mortureux. B, Volant. J, et Regourd. M,** « Texture et performance des ciments fillérisés ». *Ciment, Bétons, Plâtres et Chaux*, 1986, 4, 197-203.
- [66] **Gegout. P, Hornain. H, Thuret. B, et Regourd. M,** « Résistance au gel des ciments fillérisés calcaires ». 8th Congrès Int, de Chimie des Ciments, RIO DE JANEIRO. Sept. 1986, V, p. 47-51.
- [67] **Diederich. P,** «Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton », these doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010, pp32-33.
- [68] **Michel .F, Pierard. J, Courard. L, et Pollet. V,** «Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances», *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC*, p205-210, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.
- [69] **Topçu. IB, Uğurlu. A,** «Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete», *Cement and Concrete Research* 33, p1071-1075, 2003.
- [70] **Felekoglu. B,** «Utilization of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case) », *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 51, Issue 4, p770-791, 2007.
- [71] **Lawrence. P,** « Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires », Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2000.
-

## Références bibliographiques

---

- [72] **Bosiljkov. VB**, «SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler», *Cement and Concrete Research* 33, p1279-1286, 2003.
- [73] **Escadeillas. G**, « Les ciments aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés », Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, 1988.
- [74] **Zhu. W, Gibbs. JC**, « Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete», *Cement and Concrete Research* 35, p1457-1462, 2005.
- [75] **Bonavetti. V, Donza. H, Menéndez. G, Cabrera. O, et Irassar. E.F**, « Limestone filler cement in low w/c concretes: A Rational use of energy», *Cement and concrete research* 33, p865-871, 2003, DOI: 10.1016/S0008-8846(02)011087-6.
- [76] **Assié. S, Escadeillas. G, et Waller. V**, « Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability», *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 10, p1909-1917, 2007.
- [77] **Tsivilis. S, Batis. G, Chaniotakis. E, Grigoriadis. Gr, et Theodossis. D**, « Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar», *Cement and concrete research* 30, p1679-1683, 2000.
- [78] **Tsivilis. S, Tsantilas. J, Kakali. G, Chaniotakis. E, et Sakellariou. A**, «The permeability of Portland limestone cement concrete», *Cement and Concrete Research* 33, p1465– 1471, 2003.
- [79] **Zhu. W, Gibbs. JC**, «Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete», *Cement and Concrete Research* 35, p1457-1462, 2005.
- [80] **Maafi. N, Zamit. A**, « L'effet des différents types d'agrégats sur le comportement mécanique d'un béton » PFE Master 2, 2013, département de génie civil, université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [81] **Hammouche. Y, Laalaoui. A**, « Etude du comportement d'un béton en fibres Polypropylène aux moyens des essais non destructifs » mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- [82] **Dupain. R, Lanchon. R, et Saint-Arroman. J.-C**, « Granulats, Sols, Ciments et Bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » Éditions Casteilla, 2ème Édition, Paris, 2000, p. 26 - 394.
-

## Références bibliographiques

---

- [83] **Neville Adam. M**, «propriété des bétons » Editions Eyrolles, paris p. 103 - 726
- [84] **Brette. A** : fascicule de cours réalisé pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, 2007.
- [85] **Fiche technique ciment CRS**, « S.C.AEK », AIN EL KABIRA, SETIF, mars 2014.
- [86] **Daupin. R, Saint-Arroman. J-C**, « Granulats, sols, ciments et bétons », édition, 2009.
- [87] **Delih, H**, « Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire, Caractérisation - Comportement monotone, Microstructure », thèse doctorat, 2007, Département de Génie Civil, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE, Algérie.
- [88] **Bouakkaz. M.A**, « Caractérisation du béton par les méthodes non destructives– application de la méthode de fréquence de résonance », thèse Magister, 2012, Département de Génie Civil, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Algerie.
- [89] **Solis-Carcaño. R, Moreno. E. I**, «Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity». Construction and Building Materials, volume 22, numéro 6, pp. 1225-1231, 2008.
- [90] **Deghfel. M**, 2010 : « Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton », Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.
- [91] **Bencherai. S**, « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables » Mémoire de fin d'étude, 2007, Université Abd Rahman MIRA de Bejaia.
- [92] **Cours en ligne**, Matériaux de construction, le béton, Chapitre 6 Disponible sur <http://www.civilmania.com/forum/topic/10262-essai-de-traction-par-fendage-des-eprouvette-cylindrique/>), consulter le 03/04/2014.
- [93] **Ayadi. B, Hammache. Y**, « Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agrégats recyclés adjuvanté », mémoire Master 2, 2012, Département de génie civil, Université Mohamed el Bachir l'Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
-

## Références bibliographiques

---

[94] **M. Pillet**, « Introduction aux plans d'expérience par la méthode Taguchi », Editions d'organisation université ,1992.

[95] **Bengrine. Z, Nefnaf. A**, «Etude de la réponse mécanique et la durabilité d'un mortier à base d'un ciment quaternaire par la méthode des plans d'expérience», mémoire Master 2, 2013, Département de génie civil, Université Mohamed el Bachir l'Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

---

