

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master  
en Génie Civil  
Option : Structures**

Thème

**Analyse expérimentale d'un béton avec ajout de déchet de verre  
coloré et non coloré (étude comparative)**

**Présenté par : M<sup>elle</sup>DAHRI Lila**

***Devant le jury composé de :***

M<sup>me</sup> KHELOUI F.

Maître de conférences UMMTO

Présidente

M<sup>me</sup> HADDAD O.

Maître de conférences UMMTO

Examinatrice

M<sup>me</sup> AKMOUSSI O.

Maître de conférences UMMTO

Encadreur

**Promotion 2019**

# *Dédicaces*

Je suis très heureuse de dédier cet humble travail aux êtres les plus chers à mon cœur :

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; mes parents que j'adore.

Mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans tous les moments de cette mystérieuse vie ; mes adorables frères (Abderrahmane, M<sup>ed</sup> Amine, Omar et Yanis)

Ma chère famille du grand au petit (grands-parents, oncles, tantes, cousins, cousines...)

# *Remerciements*

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu Seigneur tout puissant pour nous avoir donné l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissances, pour nous avoir donné toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire aboutir ce modeste travail. Nous prions pour que nous restions fidèles à lui.

Je tiens à exprimer mes profonds sentiments de respects et de remerciements à : ma promotrice **M<sup>me</sup> AKMOUSSI OURDI** pour son encadrement, sa disponibilité, son écoute. Ainsi que pour son orientation, son aide très précieuse et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.

Je remercie également **M<sup>me</sup> KHELOUI FATMA** pour ses conseils, ses orientations, son aide à accomplir ce travail.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement **M. BENCHABANE TARIK** pour sa disponibilité permanente, ses judicieux conseils et son aide très précieuse.

Je remercie très sincèrement tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Leurs commentaires, leurs critiques et leurs questions sont autant d'encouragements à poursuivre ce travail.

Merci pour votre amitié précieuse aux étudiants du génie civil et toute la promotion 2018/2019.

Mes remerciements vont enfin à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## **RESUME**

Le but de ce travail est d'étudier le comportement mécanique des bétons confectionnés avec un ajout de déchet de verre. Deux types de verre ont été utilisés : le verre coloré et le verre non coloré. La poudre de verre et le sable de verre ont été utilisés en substitution du ciment et du sable de carrière. Les pourcentages de substitution sont de 0%, 5%, 10% et 15%.

Dans cette étude, nous avons présenté les résistances à la compression des différents bétons étudiés. Les résultats ont montré que les bétons avec ajout de déchet de verre présentent des résistances légèrement inférieures comparées à celle du béton témoin. Les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté des résistances supérieures par rapport aux bétons avec ajout de verre non coloré.

**Mots clés :** analyse expérimentale, déchet de verre, verre coloré, verre non coloré.

## **ABSTRACT**

The purpose of this work is to study the mechanical behavior of concretes made with the addition of glass waste. Two types of glass were used: colored glass and non-colored glass. Glass powder and glass sand were used to replace cement and quarry sand. The substitution percentages are 0%, 5%, 10% and 15%.

In this study, we presented the compressive strengths of the different concretes studied. The results showed that concretes with the addition of glass waste have slightly lower resistances compared to that of the control concrete. The concretes with addition of colored glass exhibited higher resistances compared to concretes with addition of non-colored glass.

**Key words:** experimental analysis, glass waste, colored glass, non-colored glass.

# Sommaire

Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

## Chapitre I

### Le béton et ses constituants

I.1 Introduction.....	3
I.2 Constituants du béton.....	3
I.2.1 Le ciment.....	3
I.2.1.1 Définition.....	3
I.2.1.2 Composition du ciment.....	4
I.2.1.3 Classification des ciments.....	5
I.2.2 Les granulats.....	6
I.2.2.1 Définition.....	7
I.2.2.2 Caractéristiques des granulats.....	7
I.2.2.3 Différents types de granulats.....	8
I.2.3 L'eau de gâchage.....	9
I.2.3.1 Caractéristiques et tolérances.....	9
I.2.4 Les superplastifiants.....	10
I.3 Différents types d'ajouts minéraux.....	10
I.3.1 Les cendres volantes.....	10
I.3.2 Laitier de haut fourneau.....	11
I.3.2.1 Effet du laitier de haut fourneau.....	12
I.3.3 Fumée de silice.....	13
I.3.3.1 Effet de la fumée de silice.....	13
I.3.4 Pouzzolanes.....	14
I.3.4.1 Effet des pouzzolanes.....	14
I.3.5 Les fillers calcaires.....	15
I.3.5.1 Effet des fillers calcaires.....	15

I.3.6 La poudre de verre.....	16
I.4 Conclusion.....	17

## Chapitre II

### Comportement mécanique des bétons avec ajouts de verre

II.1 Introduction.....	18
II.2 L'influence du rapport eau/liant.....	19
II.3 Résistance à la compression .....	21
II.3.1 Evolution de la résistance à la compression à court terme (0-28 jours).....	21
II.3.1 Evolution de la résistance à la compression à long terme (28-112 jours).....	22
II.4 Résistance à la flexion .....	24
II.5 Travaux de A. AMARNI (2015) (encadré par Mme Akmoussi).....	26
II.6 Conclusion.....	28

## Chapitre III

### Les matériaux et essai

III.1 Introduction.....	29
III.2 Matériaux.....	29
III.2.1 Les granulats.....	29
III.2.2 L'eau.....	30
III.2.3 Le ciment.....	30
III.2.4 Ajouts minérales .....	30
❖ Poudre de verre.....	30
III.2.4.1 Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré.....	31
III.2.4.2 Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré.....	31
❖ Sable de verre.....	32
III.3 Analyse granulométrique.....	33
III.3.1 Equipements utilisés.....	34
III.3.2 Description de l'essai.....	34
III.4 Module de finesse.....	36
III.5 Masse volumique apparente et absolue.....	36

III.6 Equivalent de sable.....	36
III.7 Formulation du béton ordinaire.....	37
III.8 Fabrication du béton.....	39
III.9 Essai sur béton durci.....	40
III.9.1 Essai de résistance à la compression.....	40
III.10 Conclusion.....	41

## Chapitre IV

### Résultats et interprétation

IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Les différentes variantes utilisées pour la confection des bétons.....	42
IV.3 Résistance en compression des bétons à 28 jours.....	43
IV.4 Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage d'ajout du sable de verre.....	47
Conclusion générale.....	49

### Références bibliographiques

# Liste des figures

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1</b> : Le ciment, un liant hydraulique.....	3
<b>Figure I.2</b> : Exemples de granulats.....	6
<b>Figure I.3</b> : Cendres volantes.....	11
<b>Figure I.4</b> : Cendres volantes.....	11
<b>Figure I.5</b> : Laitier.....	12
<b>Figure I.6</b> : Fumée de silice.....	13
<b>Figure I.7</b> : Une pouzzolane naturelle.....	14
<b>Figure II.1</b> : L'ensemble des résultats des recherches sur la relation entre le rapport E/L et la résistance à la compression des matériaux cimentaires.....	19
<b>Figure II.2</b> : Evolution des résistances en compression (a) et en flexion (b) à l'âge de 56 jours de 4 concentrations de microbilles de verre en fonction du rapport eau/liant. Ciment CEM 32.5.....	20
<b>Figure II.3</b> : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps à court terme des mortiers M0, M15, M20, M25.....	22
<b>Figure II.4</b> : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps à long terme des mortiers M0, M10, M20, M35.....	23
<b>Figure II.5</b> : L'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps à court terme (3-28 jours).....	25
<b>Figure II.6</b> : L'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps à long terme (56-112 jours).....	25
<b>Figure II.7</b> : Variation de la masse volumique.....	26
<b>Figure II.8</b> : variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en granulats de verres.....	27
<b>Figure II.9</b> : Courbe force-pourcentage en granulat de verre.....	27
<b>Figure II.10</b> : courbe force-pourcentage de verre (sable de verre et granulat de verre).....	28
<b>Figure III.1</b> : Les granulats utilisés.....	29
<b>Figure III.2</b> : La poudre de verre utilisée.....	30
<b>Figure III.3</b> : Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré.....	31
<b>Figure III.4</b> : Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré.....	31
<b>Figure III.5</b> : Les bouteilles ramassées (verre coloré et verre non coloré).....	32
<b>Figure III.6</b> : Broyage des bouteilles (verre coloré et verre non coloré).....	33

<b>Figure III.7 :</b> le sable de verre coloré et non coloré.....	33
<b>Figure III.8 :</b> La tamiseuse utilisée.....	35
<b>Figure III.9 :</b> Courbes granulométriques des granulats utilisés.....	35
<b>Figure III.10:</b> L'essai d'équivalent du sable.....	37
<b>Figure III.11 :</b> Démoulage des éprouvettes.....	39
<b>Figure III.12 :</b> Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	40
<b>Figure III.13 :</b> Presse utilisée pour essai de compression.....	40
<b>Figure III.14 :</b> Rupture d'une éprouvette par essai de compression.....	41
<b>Figure IV.1 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre coloré...44	
<b>Figure IV.2 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre non coloré.....	44
<b>Figure IV.3 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre coloré.....	45
<b>Figure IV.4 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre non coloré.....	45
<b>Figure IV.5 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre coloré.....	46
<b>Figure IV.6 :</b> Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre non coloré.....	46
<b>Figure IV.7 :</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du sable de verre coloré.....	47
<b>Figure IV.8 :</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du sable de verre non coloré.....	47

# Liste des tableaux

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Stades de fabrication du ciment.....	5
<b>Tableau I.2</b> : Les différents types de ciment.....	6
<b>Tableau I.3</b> : Classe granulaires des granulats.....	7
<b>Tableau II.1</b> : Compositions des mélanges pour mesurer la résistance mécanique à court terme.....	21
<b>Tableau II.2</b> : Compositions des mélanges pour mesurer la résistance mécanique à long terme.....	23
<b>Tableau III.1</b> : La composition chimique des poudres de verres utilisées.....	30
<b>Tableau III.2</b> : Mélanges des bétons préparés avec la poudre de verre.....	32
<b>Tableau III.3</b> : Mélanges des bétons préparés avec sable de verre.....	33
<b>Tableau III.4</b> : Module de finesse du sable.....	36
<b>Tableau III.5</b> : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	36
<b>Tableau III.6</b> : Valeur de l'équivalent de sable.....	37
<b>Tableau III.7</b> : Formulation des bétons avec les granulats de verre.....	37
<b>Tableau III.8</b> : Composition volumique et pondérale du béton témoin et béton avec déchet de verre coloré pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	38
<b>Tableau III.9</b> : Composition volumique et pondérale du béton témoin et béton avec déchet de verre non coloré pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	38
<b>Tableau IV.1</b> : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.....	43

# **Introduction générale**

### **Introduction générale**

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics.

Le béton de ciment Portland va toujours être le matériau de construction le plus couramment utilisé dans l'avenir. Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Ces produits, qui sont à l'origine des déchets, devenus ajouts cimentaires, présentent de nombreux avantages, tant écologiques, qu'économiques et techniques tels que le comportement rhéologique, les performances mécaniques et la durabilité du matériau durci [Ladang, 2006]. En plus de la préservation des ressources naturelles (argiles, calcaire), ils permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>), tout en améliorant les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la pâte cimentaire.

L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres, dont la partie bibliographique est présentée dans les deux premiers chapitres et le travail expérimental (essais, caractérisations, résultats et discussion) fait l'objet des deux derniers chapitres.

Le **chapitre I** est consacré aux bétons et ses constituants dans le but d'enrichir nos connaissances et définir la démarche à suivre tout au long de cette recherche, à savoir un bref historique sur le béton, ses principaux constituants et les déchets de verre.

Le **chapitre II**, est consacré aux différents travaux de certains auteurs qui ont étudié le comportement des bétons avec ajouts de déchets de verre.

**Le chapitre III** présente les différents essais de caractérisation, leurs modes opératoires (analyse granulométrique, l'équivalent du sable) et les étapes pour la confection des éprouvettes pour les différents mélanges.

**Le chapitre IV** présente les résultats expérimentaux effectués sur ces bétons (essai d'écrasement à la compression), une comparaison des résultats par rapport au béton témoin (BT) et entre les différents bétons avec déchets de verre coloré et non coloré sont également présentés.

En dernier, nous terminons par des conclusions sur le travail mené et des perspectives.

# Chapitre I

## Le béton et ses constituants

## I.1 Introduction [1, 2, 3]

Le Béton a été depuis longtemps les matériaux le plus utilisé dans la construction. Economique et facilement manipulable, le béton peut être utilisé dans **divers domaines** tels que la construction ou l'art. A la fois **résistant et durable**, il répond à de nombreux **critères de performance**, ce qui explique son omniprésence actuelle. Sa composition **variant** en fonction des différents constituants présents dans le mélange, il est dorénavant possible de fabriquer le béton de vos envies !

Avant d'entrer dans les détails de sa composition, il est nécessaire de donner une définition au béton. Ce dernier est un matériau composite obtenu en gâchant des proportions convenables de ciment, d'eau et de granulats (gravier et sable).

## I.2 Constituants du béton

### I.2.1 Le ciment



**Figure I.1** : Le ciment, un liant hydraulique [4]

#### I.2.1.1 Définition

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 par suite de réactions et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [5, 6, 7]

Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois la poudre de ciment, la pâte de ciment et le produit obtenu après durcissement.

Le ciment a plusieurs états :

- le ciment anhydre, la poudre de ciment avant son gâchage avec l'eau,
- le ciment hydraté, les composés, insolubles dans l'eau, obtenus par combinaison chimique de l'eau avec les grains de ciment anhydre,

-pâte fraîche de ciment, le mélange d'eau et de ciment anhydre avant que l'hydratation n'ait conduit à en faire un solide appelé pâte de ciment durcie.

Maintenant que nous savons qu'est-ce que le ciment, nous allons voir les différents composants que l'on rajoute afin de fabriquer le ciment.

### **I.2.1.2 Composition du ciment**

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

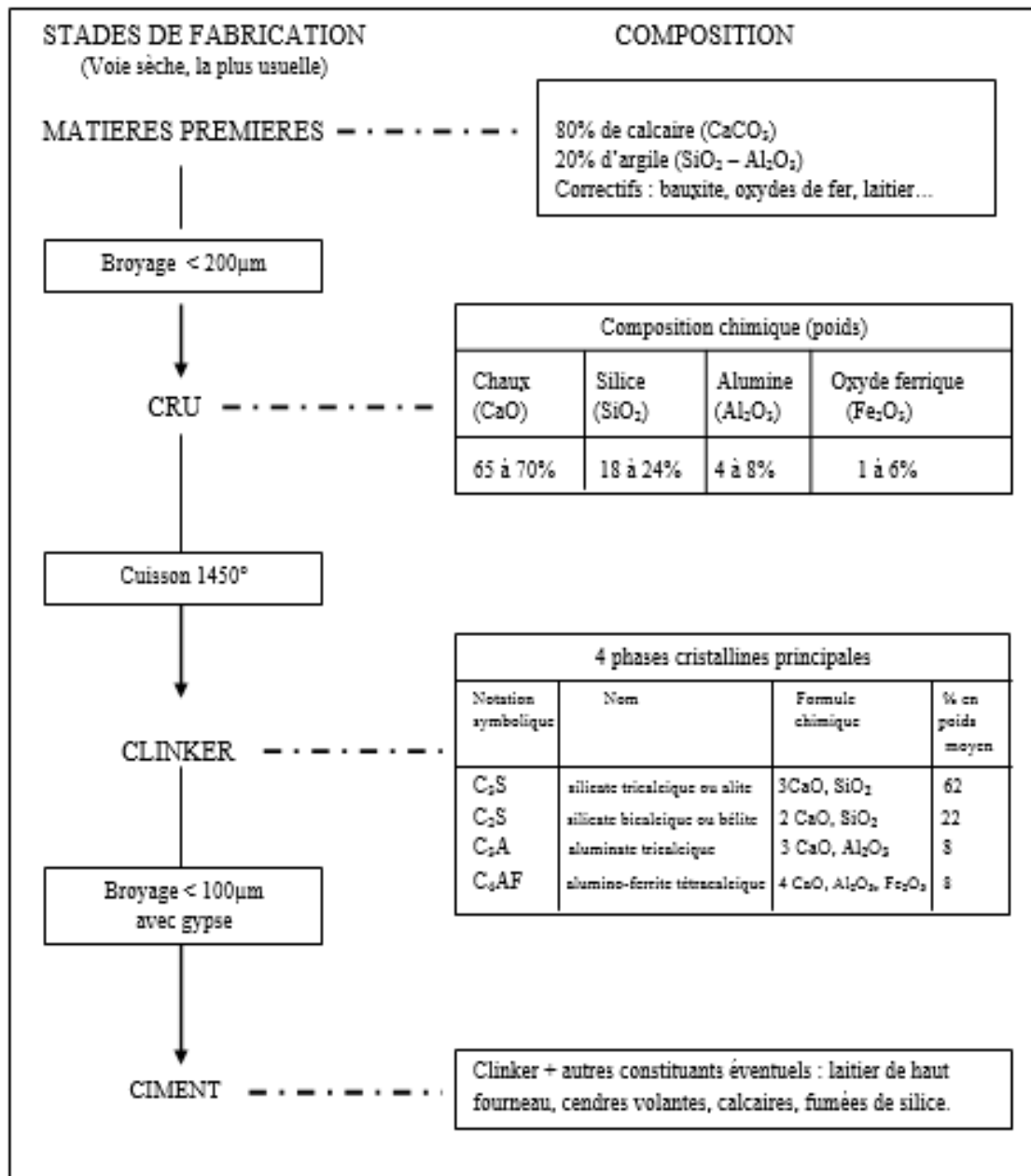
Les argiles et calcaires sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le **clinker portland** (Tableau I.1)

Les oxydes se combinent en début de fusion pour former des silicates et aluminates hydrauliques :

- Le silicate tricalcique:  $3\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit C<sub>3</sub>S et qui représente 50 à 70 % du clinker,
- Le silicate bicalcique :  $2\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit C<sub>2</sub>S (10 à 30 %),
- L'aluminate tricalcique :  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit C<sub>3</sub>A (2 à 15 %),
- L'alumino-ferrite tétracalcique :  $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$  que l'on écrit C<sub>4</sub>AF (5 à 15%).

Le clinker, auquel on ajoute quelques pourcentages de gypse, est ensuite finement broyé (moins de 1/10<sup>e</sup> de mm) de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

Tableau I.1 : Stades de fabrication du ciment [8]



### I.2.1.3 Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés suivant leur résistance, leur composition (Tableau I.2). Ainsi, il est divisé en plusieurs catégories :

- **Le CEM I (ciment Portland)** est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.

- Les **CEM II A ou B (ciment Portland composé)** ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les **CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau)** sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les **CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique)** sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- Les **CEM V A ou B (ciment composé)** ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

**Tableau I.2** : Les différents types de ciment [3].

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
<b>Ciment Portland</b>	<b>CPA -CEM I</b>	95-100	---	0-5
<b>Ciment Portland composé</b>	<b>CPJ-CEM II/A</b>	80-94	6-20	---
	<b>CPJ-CEM II/B</b>	65-79	21-35	---
<b>Ciment de haut fourneau</b>	<b>CHF-CEM III/A</b>	35-64	36-65	0-5
	<b>CHF-CEM III/B</b>	20-34	66-80	0-5
	<b>CLK-CEM III/C</b>	5-19	81-95	0-5
<b>Ciment pouzzolanique</b>	<b>CPZ-CEM IV/A</b>	65-89	11-35	0-5
	<b>CEM-CPZ IV/B</b>	45-64	36-55	0-5
<b>Ciment composé</b>	<b>CLC-CEM V/A</b>	40-64	18-30	0-5
	<b>CLC-CEM V/B</b>	20-38	31-50	0-5

### I.2.2 Les granulats



**Figure I.2** : Exemples de granulats.

### I.2.2.1 Définition

Les granulats sont un constituant essentiel du béton, en effet ils constituent son squelette et influence grandement ses caractéristiques. Ils sont définis comme un ensemble des grains minéraux de dimensions variables (entre 0 et 125 mm). Ils sont obtenus :

- en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine ;
- en concassant des roches massives ;
- ou encore par recyclage de produits tels que les bétons de démolition.

Leurs natures, leurs formes et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

Les granulats sont désignés par leur classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande dimension du produit (Tableau I.3).

**Tableau I.3** : Classe granulaires des granulats [9].

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$0 \text{ mm} < D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D < 6.3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
ballast	d/D	$d \geq 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

### I.2.2.2 Caractéristiques des granulats

Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent, d'une part, de la nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physico-chimiques,...) et, d'autre part, de caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats (dimensions, formes, propreté,...).

Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques :

- a- **Caractéristiques intrinsèques** : liées à la qualité de la roche exploitée. On peut citer par exemple :

- La masse volumique réelle,
- L'absorption d'eau et la porosité,
- La sensibilité au gel,
- La résistance à la fragmentation et au polissage,
- La gélivité.

**b- Caractéristiques de fabrication :** elles résultent généralement des conditions de fabrication. On cite en particulier :

- La granularité,
- La forme (aplatissement),
- La propreté des sables.

### **I.2.2.3 Différents types de granulats**

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

**A- Naturel :** d'origine minérale, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, lavage...). Ils sont classés en deux catégories :

- Les **granulats alluvionnaires ou de roches meubles**, dits roulés, dont la forme arrondie a été acquise par l'érosion.

Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses (nuisibles à la résistance du béton) et criblés pour obtenir différentes classes granulaires. Ils sont exploités dans les cours d'eau ou à proximité ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est réalisée donc en fonction du gisement, de la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique à sec ou dans l'eau.

- Les **granulats de roches massives** (sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

**B- Artificiel :** d'origine minérale résultant d'un procédé industriel.

On distingue plusieurs types de granulats artificiels qui peuvent être utilisés pour des usages spécifiques.

- Sous-produits industriels, concassés ou non. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.
- Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement. Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment des granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, ...) ou des granulats réfractaires.

**C-Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées.

### **I.2.3 L'eau de gâchage**

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ces matériaux.

L'eau remplit essentiellement deux fonctions : une fonction physique, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant un écoulement sans ségrégation dans les coffrages ; Une fonction chimique qui contribue au développement des réactions d'hydratation et la formation de la pâte liante dans le béton. [5]

#### **I.2.3.1 Caractéristiques et tolérances [1]**

##### **A- Physiques**

Les eaux employées pour le gâchage du béton ne doivent pas contenir de matière en suspension au-delà des proportions suivantes :

- 2 grammes par litre pour béton type A et B.
- 5 grammes par litre pour béton type C.

##### **B- Chimiques**

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de sels dissous au-delà des proportions suivantes :

- 15 grammes par litre pour béton type A et B
- 30 grammes par litre pour béton type C.
- **Béton A** : Béton de haute qualité à résistance élevée.
- **Béton B** : Béton à faible perméabilité.

- **Béton C** : Béton à faible résistance peu au non armé.

### **I.2.4 Les superplastifiants**

Les superplastifiants ou hauts réducteurs d'eau sont des adjuvants pour matériaux cimentaires tels que les coulis, les mortiers de ciments et les bétons de ciment. Ils sont ajoutés à des ratios entre 0.8 et 3% de la masse de ciment utilisé. [10]

Ces adjuvants permettent :

D'améliorer la maniabilité sans augmenter le dosage en eau : dans ce cas la quantité d'eau n'est pas modifiée, mais l'ouvrabilité évolue avec le changement du pourcentage en superplastifiants ; quant à la résistance mécanique, elle reste aussi constante ;

D'améliorer les performances mécaniques ; de réduire le rapport E/C : dans ce cas la quantité d'eau est réduite pour une même maniabilité, et la résistance augmente.

A l'heure actuelle, cinq familles de superplastifiants sont utilisées dans les matériaux de constructions, elles se résument comme suit :

- Les sels sulfonés de polycondensés de naphthalène et de formaldéhyde, couramment appelés les polynaphthalènessulfonâtes (PNS) ou encore les superplastifiants à base de naphthalène ;
- Les sels sulfonés de polycondensés de mélamine et de formaldéhyde, appelés couramment les polymélaminessulfonâtes (PMS) ou encore les superplastifiants à base de mélamine ;
- Les lignosulfonates d'ammonium, de calcium et de sodium ayant de très faibles teneurs en sucre ;
- Les polyacrylates ;
- Les étherspolycarboxyliques modifiés.

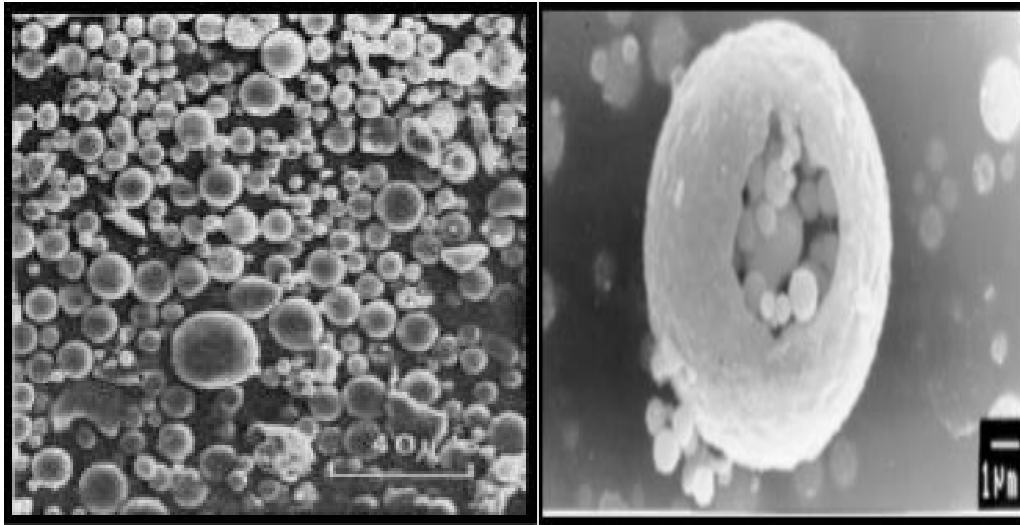
## **I.3 Différents types d'ajouts minéraux**

### **I.3.1 Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont des poudres très fines résultant de la combustion du charbon en centrales thermiques.

Lors de la combustion, les composants volatiles et le carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérales telles que l'argile, le feldspath et le quartz passent en fusion. Les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes. La majorité de ces sphères sont

emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique. [5, 11]



**Figure I.3 :** Cendres volantes [12].

**Figure I.4 :** Cendres volantes [13].

Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcique :

- Les cendres volantes siliceuses (V), sont obtenues par la combustion de la houille. Elles sont essentiellement constituées de silice ( $\text{SiO}_2$ ) réactive et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le restant contient de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'autres composants. Elles titrent moins de 10% de chaux ( $\text{CaO}$ ), la teneur en oxyde de calcium libre ne devant pas dépasser 1%. La teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ) réactive doit être supérieure à 25% de la masse des constituants [14]. Elles ont des propriétés pouzzolaniques.

- Les cendres volantes calciques (W), sont obtenues à partir de lignite dont le stérile est de nature calcaire lors de dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de combustion des chaudières fonctionnant au charbon pulvérisé. Elles sont essentiellement constituées de calcium ( $\text{CaO}$ ) réactif, de silice ( $\text{SiO}_2$ ) réactive et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le restant contient de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'autres composants. La proportion de calcium ( $\text{CaO}$ ) réactif doit être supérieure à 10%. Les cendres volantes calciques, contenant entre 10 à 15% d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) réactif, doivent contenir au moins 25% de silice ( $\text{SiO}_2$ ) réactive [14]. Elles titrent jusqu'à 50% de chaux et contiennent des sulfates sous forme d'anhydrite  $\text{CaSO}_4$ . Elles ont des propriétés hydrauliques et, parfois, pouzzolaniques [15].

### I.3.2 Laitier de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Il est ensuite broyé à une finesse de moins de 45  $\mu\text{m}$  pour former du laitier de haut fourneau (LHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , fourni par le ciment Portland, le laitier broyé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques. [16].

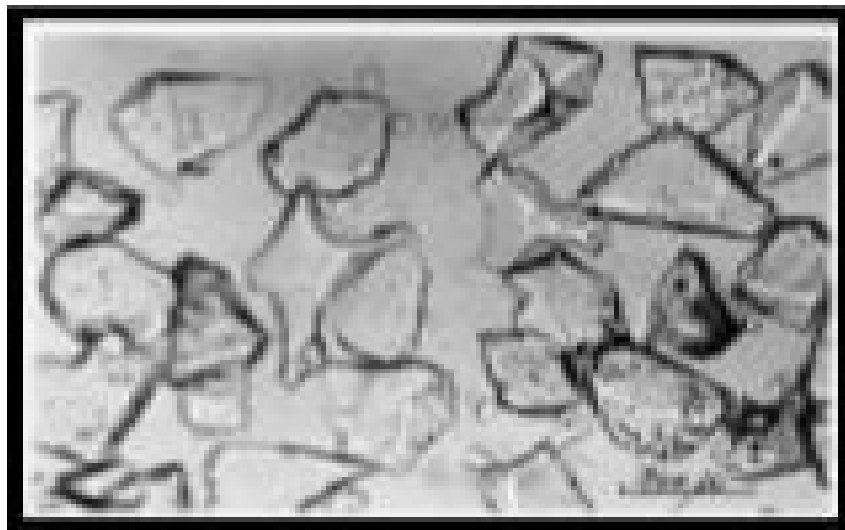


Figure I.5 : Laitier [12].

#### I.3.2.1 Effet du laitier de haut fourneau

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc davantage la dessiccation. Mais chimiquement, il résiste normalement mieux tant à l'action destructrice des sulfates qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif [17].

### I.3.3 Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de Ferro silicium. La fumée de silice est produite lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique, à la température de 2000°C. La fumée de silice se présente sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 µm. Leur surface spécifique est de 20 m<sup>2</sup>/g à 25 m<sup>2</sup>/g. La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95% [16].



Figure I.6 : Fumée de silice [18].

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

#### I.3.3.1 Effet de la fumée de silice

- La fumée de silice peut s'insérer entre les grains de ciments pour combler l'espace existant, ce qui améliore donc le remplissage des vides [19] et aussi diminue le dosage en eau.
- Elle est utilisée dans les bétons pour augmenter la fluidité, diminuer la porosité et la perméabilité.

- La fumée de silice améliore aussi les propriétés physiques du béton. Comme la résistance en compression, la résistance au gel-dégel, la résistance à la pénétration des ions chlore, la résistance aux attaques par les sulfates et la résistance à la réaction alcali-granulat [20-21].

### I.3.4 Pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes [22]. Elles sont composées essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique. Les pouzzolanes sont employées en cimenterie pour leur propriété « pouzzolaniques » c'est-à-dire une aptitude à fixer la chaux à une température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation [23].



Figure I.7 : Une pouzzolane naturelle [DOM 99] [18].

#### I.3.4.2 Effet des pouzzolanes

Les pouzzolanes confèrent 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. [24]

**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.

**I.3.5 Les fillers calcaires**

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassant pas 80 microns ayant une finesse à peu près Identique à celle du ciment Portland. Ils sont obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier, bentonite, cendres volantes...). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leur composition chimique et minéralogique, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [25].

**I.3.5.1 Effet des fillers calcaires**

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés aux ciments peuvent avoir plusieurs effets :

- Remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).

- Accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carbo-aluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration [25] [11].

### I.3.6 La poudre de verre

Malgré l'existence de grandes quantités de déchets industriels tels que laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumée de silice, scories et résidus agricoles tels que les cosses de riz, utilisés depuis de nombreuses années en grande quantité comme matières premières et composants dans l'industrie du ciment, il existe encore de nombreux autres déchets industriels non encore utilisés [26], tels que les déchets de verre. En fait, quelques études ont étudié avec succès l'utilisation potentielle de déchets de verre finement broyés en tant que matériau pouzzolanique, en se concentrant sur le développement de la résistance et la réactivité alcali-silice [27–28].

Le verre est le résultat de la fusion de plusieurs matières premières minérales inorganiques qui, après avoir subi un processus de refroidissement contrôlé, deviennent un matériau dur, homogène, stable, inerte, amorphe et isotrope [29]. Sur la base de la composition principale, le verre peut être classé en plusieurs catégories, mais le verre sodocalcique est le plus largement utilisé pour la fabrication de contenants, de verre plat et de verre à vitre et constitue donc plus de 80% en poids de déchets de verre [27].

À l'exception de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et du  $\text{CaO}$ , les pourcentages des principaux constituants de différents types de verre sont similaires [30,31]. Pour le verre sodocalcique, la composition typique du verre est d'environ 70% de silice, 13-17% de  $\text{Na}_2\text{O}$  et 10% de  $\text{CaO}$  [27].

En fait, le verre peut être considéré comme un matériau ciment-pouzzolanique selon les exigences chimiques de la norme ASTM C 618 [32] si la teneur en alcali n'est pas prise en compte.

Les alcalis peuvent provoquer une réaction et une expansion des agrégats alcalins si les agrégats sont réactifs aux alcalis. Par conséquent, la teneur élevée en verre du verre dans les alcalis est une préoccupation typique pour son utilisation dans le béton, mais des études ont montré que le verre finement broyé ne contribue pas à la réaction alcali-silice [33,34,35].

Les propriétés pouzzolaniques du verre sont d'abord remarquables par la taille des particules au-dessous de 300  $\mu\text{m}$  environ. En dessous de 300 $\mu\text{m}$ , le verre peut avoir une Réactivité

pouzzolanique supérieure à celle des cendres volantes lorsque le pourcentage de remplacement du ciment est faible et après 90 jours de mûrissement [36]. En fait, selon Shi et Zheng [27], les poudres de verre dépoli présentent une très bonne réactivité pouzzolanique et peuvent être utilisées comme produit de remplacement du ciment. Comme prévu, son activité pouzzolanique augmente à mesure que la finesse augmente [27]. L'utilisation combinée d'autres matériaux de cimentation supplémentaires tels que la cendre de houille, le laitier de haut fourneau broyé et le métakaolin peut également réduire l'expansion de la réaction alcali-silice. Le sel de lithium peut également être très efficace pour empêcher l'expansion de cette réaction de béton contenant des poudres de verre [37]. Dans tous les cas, la résistance à la compression est souvent inférieure lorsque les déchets de poudre de verre sont utilisés pour remplacer le ciment, en particulier au tout jeune âge [33,38,34].

Les avantages environnementaux et économiques de la réutilisation des déchets de verre recyclés dans la production de ciment et de béton peuvent également être très importants, en fonction des utilisations finales et de l'échelle de la production [27].

#### **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents constituants du béton. En effet, ce chapitre nous a permis de faire la recherche bibliographique sur les différents constituants du béton, notamment : le ciment, les granulats, l'eau de gâchage, les adjuvants et les différents ajouts qu'on peut additionner aux bétons.

Pour finir, on voit que le béton fait partie de notre vie quotidienne, car il est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics grâce à ses performances et sa souplesse d'emploi.

# Chapitre II

## Comportement mécanique des bétons avec ajout de verre

**II.1 Introduction**

Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans les années soixante sur les agrégats de verre comme ajouts dans le béton (Limbachiya et al., 2012) (Idir, 2009). Tous ces travaux ont montré que les bétons gonflaient et se fissaient (Bhandari et Tajne, 2013). Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une quinzaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. L'utilisation de la poudre de verre à bouteille en remplacement partiel du ciment présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets (Matos et Sousa Coutinho 2012) (Behim et Boucetta, 2014), la poudre de verre (PV) est en général considérée comme étant pouzzolanique (Idir et al., 2010), (Idir et al, 2011) puisqu'elle contient des quantités relativement appréciables de silice. Cette valorisation de la poudre de verre dans les bétons présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques (Kamali et Ghahremaninezhad, 2015). En effet, le verre remplace une fraction du ciment qui entre dans la composition du béton, il est donc utilisé comme ajout cimentaire alternatif. Le recyclage du verre dans le béton permet de contribuer au développement durable de ce matériau de construction indispensable. De plus, la poudre de verre (PV) est utilisée telle quelle, sans changement dans sa composition chimique et sans ajout d'additif. Les efforts de recherche ont permis de mettre au point une technologie qui permet d'utiliser le verre broyé grossièrement ou en poudre pour fabriquer un béton plus résistant (Zeghichi et al., 2012), (Topçu et Canbaz, 2004) peu perméable et plus durable (Zidol, 2014).

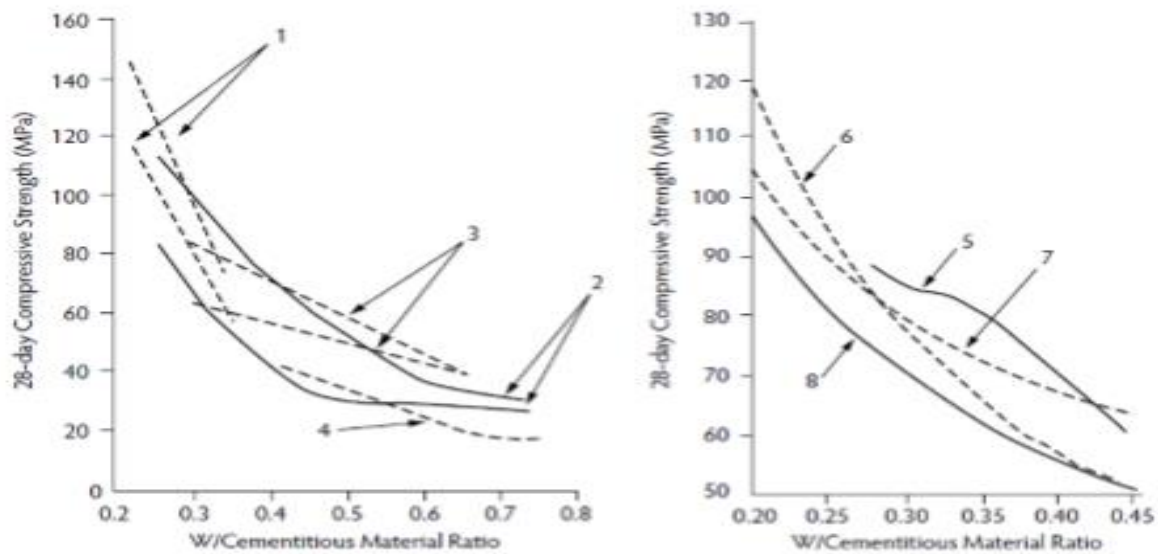
La valorisation du verre de bouteilles dans les bétons et mortiers (Zidol, 2014) pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres de bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîné des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulats (Idir, 2009) [39].

## II.2 L'influence du rapport eau/liant

La résistance du mortier est représentée par la valeur limite de résistance de l'éprouvette en essai de compression. Cette résistance évolue grâce à la réaction d'hydratation entre le liant (ciment + addition) et l'eau. Il est donc bien entendu que la résistance du mortier dépend directement du rapport eau/liant. Depuis 1919, D.A. Abrams a conclu que la résistance d'un matériau cimentaire ne dépend que d'un seul facteur : le rapport eau/ciment (E/C), avec une expression :

$$f = \frac{K_1}{K_2^{(w/c)}}, \text{ dont : } K_1, K_2 \text{ sont des constantes, } w/c : \text{ rapport eau/ciment en masse.}$$

Plusieurs chercheurs ont construit d'autres relations directes entre la résistance et le rapport E/C [Gilkey, 1961] (Figure II.1). L'influence majeure du rapport E/C sur la résistance du matériau cimentaire est aussi confirmée par [Kosmatka, 2008][Chaussadent, 2001][Wong, 2009].



**Figure II.1** : L'ensemble des résultats des recherches sur la relation entre le rapport E/L et la résistance à la compression des matériaux cimentaires. [40]

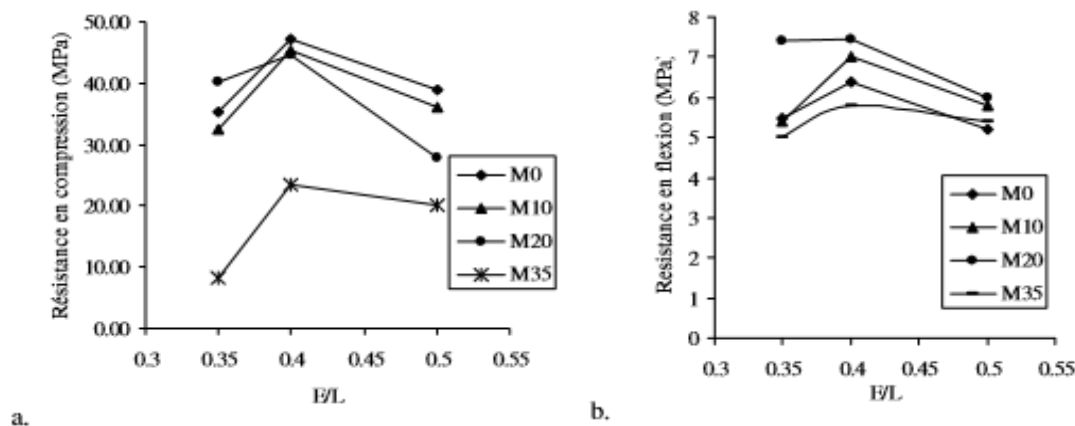
(1)[Aitcin, 1992], (2)[Fiorato,1989], (3)[Cook, 1989], (4)[CPCA, 1991], (5)[Addis et Alexandre 1990], (6)[Hattori, 1979], (7)(8)[Suzuki, 1987].

Afin d'étudier l'influence du rapport E/L sur la résistance mécanique du mortier, une série d'expériences a été réalisée en se basant sur un rapport E/L = 0.5 proposé par l'essai standard

sur le mortier normalisé. Il est estimé qu'avec la présence des Mortiers de verre, la quantité d'eau nécessaire pour le mortier doit diminuer.

Trois rapports E/L ont été testés : 0,5, 0,4 et 0,35. Les mortiers désignés M0, M10, M20, M35 ont été fabriqués respectivement à partir des liants composés PC0, PC10, PC20, PC35 et avec la même quantité de sable de  $1350 \pm 5g$ . Les mortiers ont été testés à l'âge de 56 jours.

A partir des résultats, on a pu construire des graphiques présentant l'évolution de la résistance à la compression en fonction de rapport E/L des mortiers M0, M10, M20, M35. Ces courbes sont présentées dans la figure II.2.a



**Figure II.2 :** Evolution des résistances en compression (a) et en flexion (b) à l'âge de 56 jours de 4 concentrations de microbilles de verre en fonction du rapport eau/liant. CimentCEM 32.5. [40]

Pour les quatre formulations de mortiers, la résistance à la compression à 56 jours semble atteindre la valeur maximale au rapport  $E/L = 0,4$ . Ceci correspond à la conclusion: il existe une quantité limite d'eau qui assure à la fois une consistance normalisée de la pâte et une bonne condition d'hydratation. La quantité d'eau minimum et maximum correspondant respectivement aux rapports E/L à 0,35 et 0,5 diminue la résistance pour tous les mélanges. La chute de résistance pour les mortiers avec le rapport E/L de 0,35 peut être attribuée à la quantité insuffisante d'eau pour l'hydratation. Pour les mortiers dont le rapport E/L est de 0,5, ce qui représente une quantité d'eau trop importante, cela peut rendre le système moins compact et donc augmente la porosité dans le mortier après séchage.

Les mêmes résultats sont observés dans le cas de la résistance à la flexion (figure II.2.b).

### II.3 Résistance à la compression

Pour la conception d'un matériau cimentaire, la résistance à la compression est une donnée importante. Les autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à l'effort tranchant, le module d'Young, la relation résistance – déformation, sont reliées diversement à la résistance en compression. Les résultats sur la résistance à la compression sont également employés pour qualifier et quantifier l'efficacité des additions minérales remplacées du ciment dans un système cimentaires [40].

Le rôle des additions minérales dans un système cimentaire dans un premier temps est d'améliorer la résistance à la compression grâce à leur finesse et leur réaction pouzzolanique. De nos jours, l'addition minérale la plus efficace du point de vue de la résistance mécanique est la fumée de silice. Issue de l'industrie du silicium et ferro-silicium, la fumée de silice possède une excellente finesse avec une taille des particules inférieure à 1  $\mu\text{m}$  et une surface spécifique de 13000 – 30000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Plusieurs recherches ont montré une augmentation de la résistance mécanique des mortiers en présence de la fumée de silice. [Huang et Feldman, 1985] [Cong et al., 1992] [Gleize et al. 2003] [Gutiérrez et al., 2005]. Ces résultats sont également confirmés à l'échelle du béton par d'autres auteurs [Mazloom et al., 2004 ; Sobolev, 2004]

Dans cette étude, les essais en compression ont pour but d'examiner le développement de la résistance en compression des mortiers contenant des MV à court terme et à long terme.

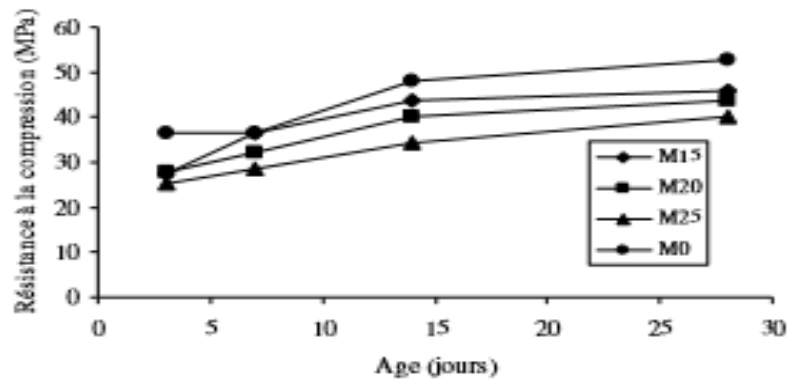
#### II.3.1 Evolution de la résistance à la compression à court terme (0-28 jours)

Des essais en compression ont été réalisés conformément à la norme ASTM C109, sur des éprouvettes 40x40x160 mm avec un rapport Sable/Liant de 2.75 en masse. Le pourcentage de MV a été varié entre 0% et 25% en masse par rapport à la quantité du Ciment Portland ordinaire (PC). Le rapport E/L est maintenu constant à 0.484.

Les compositions des mortiers sont détaillées dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1** : Compositions des mélanges pour mesurer la résistance mécanique à court terme.

Désignation	Liant	Eau/Ciment	Ciment/Sable
M0	100% Ciment Portland (PC)	0.484	0.3636
M15	85% PC+15% MGP	0.569	0.309
M20	80% PC+20% MGP	0.605	0.29
M25	75% PC+25% MGP	0.645	0.27



**Figure II.3:** L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps à court terme des mortiers M0, M15, M20, M25. [40]

La résistance à la compression augmente en fonction du temps pour tous les mélanges. Tous les mortiers avec MV possèdent des résistances à court terme plus faibles que celles du mortier de référence. Elles représentent 70 à 90%, en exception 100% (mortier M15 à 7 jours), de la valeur de référence du mélange M0.

Les résistances à la compression baissent proportionnellement au pourcentage de ciment remplacé par les MV dès le court terme. En particulier à 3 jours, la résistance des mortiers modifiés reste loin de la valeur de résistance du mortier de référence. Ceci s'explique par une hydratation plus lente à cause de la dispersion des particules en présence des MV. En plus, la baisse de résistance à jeune âge est la conséquence de l'absence de réaction des MV comme les autres matériaux pouzzolaniques qui ont une réaction assez lente avec un effet vers 56 jours ou plus [Wong et Razak, 2005] [Mehta, 1983]. La résistance des mortiers M15, M20, M25 a tendance à s'approcher des valeurs du M0 à l'âge de 7 jours et 14 jours.

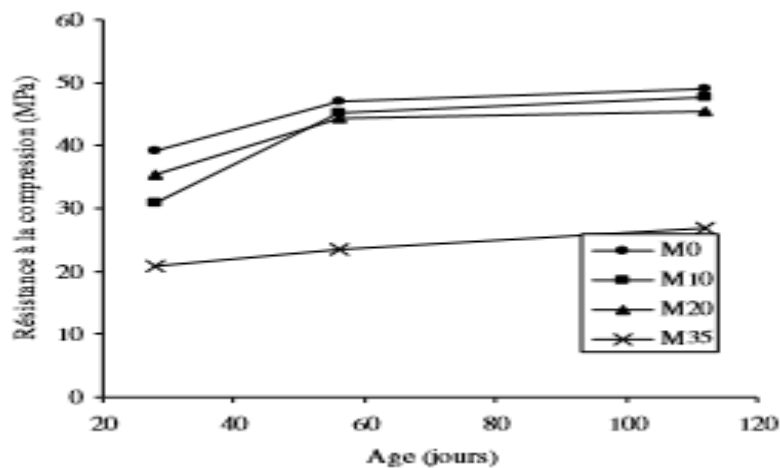
Ultérieurement, à 28 jours, la résistance du mortier de référence présente un écart notable par rapport aux mortiers modifiés. Cela peut s'expliquer par la prise assez rapide des suspensions en présence des MV.

### II.3.2 Evolution de la résistance à la compression à long terme (28-112 jours)

Afin d'examiner l'évolution de la résistance à la compression à long terme en fonction des pourcentages des MV, des essais ont été réalisés sur des mortiers dont les compositions détaillées dans le tableau II.2. Les essais ont été accordés à la norme EN 196-1. Le pourcentage des MV varie entre 0% et 35% en masse par rapport la quantité du Ciment Portland ordinaire (PC). Le rapport E/L est maintenu constant à 0,4.

**Tableau II.2** : Compositions des mélanges pour mesurer la résistance mécanique à long terme.

Désignation	Liant	Eau/Ciment	Ciment/Sable
M0	100% Ciment Portland (PC)	0.4	0.333
M10	90% PC+10% MGP	0.44	0.3
M20	80% PC+20% MGP	0.5	0.2667
M35	65% PC+35% MGP	0.615	0.2167



**Figure II.4** : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps à long terme des mortiers M0, M10, M20, M35. [40]

La figure II.4 présente l'évolution de la résistance de quatre mortiers M0, M10, M20 et M35 en fonction du temps de 28 jours à 112 jours. Les mortiers M10 et M20 développent une résistance comparable à celle du mortier de référence, résistance qui atteint plus de 90% de la valeur de M0 aux âges de 56 jours et 112 jours. Ce gain de résistance peut être attribué à un effet pouzzolanique des MV qui produisent, grâce à leur finesse, un effet filler entre les grains du ciment.

Par contre, la résistance du mortier M35 n'est que de 50% par rapport à celle du mortier de référence. La quantité de MV peut être en excès par rapport à la quantité nécessaire pour remplir les porosités interstitielles des granulats. Cet excédant là disperse les grains de ciment et rend la matrice cimentaire moins résistante.

**II.4 Résistance à la flexion**

Il est connu que les matériaux cimentaires sont plus résistants à la compression qu'à la traction. Pour un béton ordinaire sans ferrailage, la résistance à la traction directe est de l'ordre de 8-12% de celle à la compression, la résistance à la traction sous flexion est de 5 à 7 fois la racine carrée de la résistance à la compression [Kosmatka, 2008]. Elle est donc considérée comme négligeable pour qualifier un comportement mécanique d'un matériau cimentaire. Cependant, ils doivent parfois satisfaire à une résistance minimale en traction.

Par exemple la capacité de distribution de charge transversale des chaussées en béton ciment sans renforcement dépend particulièrement de leur résistance en flexion [Mtallib and Marke, 2010].

Les deux paramètres qui caractérisent le comportement en flexion des matrices cimentaires sont la première fissure et la résistance ultime en flexion [Elayesh, 2009]. Ces paramètres sont très importants et utiles pour des structures cimentaires sans renforcement. Dans cette partie, nous allons examiner le comportement à la flexion des mortiers en présence des MV en mesurant la résistance ultime à la flexion à court terme et à long terme.

Les résistances moyennes en flexion ont été déterminées par essais directs « flexion à trois points » conformément à la norme EN 196-1 sur trois éprouvettes de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm de 4 formulations différents détaillées dans les Tableau II.1 et Tableau II.2.

Les éprouvettes testées jusqu'à 28 jours sont fabriquées avec le ciment CEM I 42.5R fourni par Calcia. Le pourcentage de MV varie de 0 à 25%. Le rapport E/L est maintenu constant à 0,484. Les éprouvettes testées jusqu'à 112 jours sont fabriquées avec le ciment CEM II 32.5 Classique fourni par Lafarge. Le pourcentage de MV varie de 0 à 35%. Le rapport E/L est constant et égale à 0,4. L'évolution de la résistance en flexion en fonction du temps est tracée dans les figure II.5 et II.6.

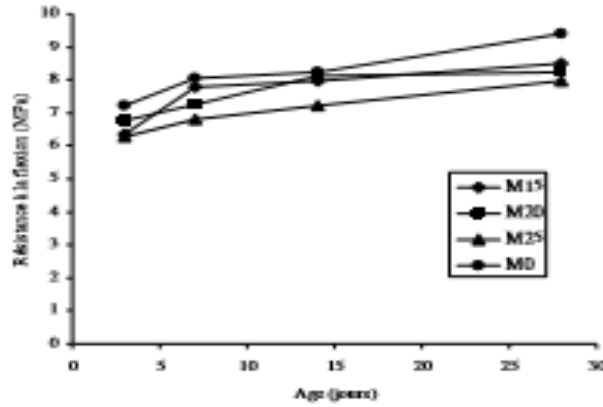


Figure II.5 : L'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps à court terme (3-28 jours) [40]

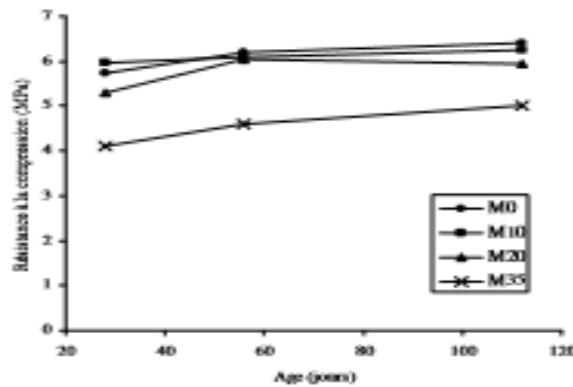


Figure II.6 : L'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps à long terme (56-112 jours) [40]

Les courbes d'évolution des résistances à la flexion suivent sensiblement le même comportement que les résistances à la compression. Pour toutes les concentrations de MV, les valeurs de résistance à la flexion des mortiers ont tendance à stabiliser au-delà de l'âge de 7 jours. Il n'y a pas de différence notable entre la résistance en flexion entre les différentes concentrations de MV et par rapport le mortier de référence.

A long terme, une légère croissance en fonction de temps est observée sur toutes les courbes des mortiers M10, M20, M35. Cette croissance est négligeable par rapport à celle observée dans le cas de mortier de référence à court terme, mais elle assure nous pouvons conclure l'effet pouzzolanique des MV. Cette propriété pouzzolanique permet à la résistance en flexion du mortier de se développer au cours du temps.

### II.5 Travaux de A. AMARNI (2015) (encadré par Mme Akmoussi) [41]

L'objectif de son travail est de recycler le verre dans les bétons en substituant partiellement le sable (0/3) et le gravier (3/8) par les granulats de verre (0/3) et (3/8). Dans ce contexte, plusieurs formulations des bétons avec les granulats de verre (0/3 et 3/8) et béton témoin ont été mises au point afin d'évaluer leurs résistances mécaniques.

Les masses volumiques des différents bétons préparés en fonction des ajouts en granulats de verre sont présentées sur la figure (II.7).

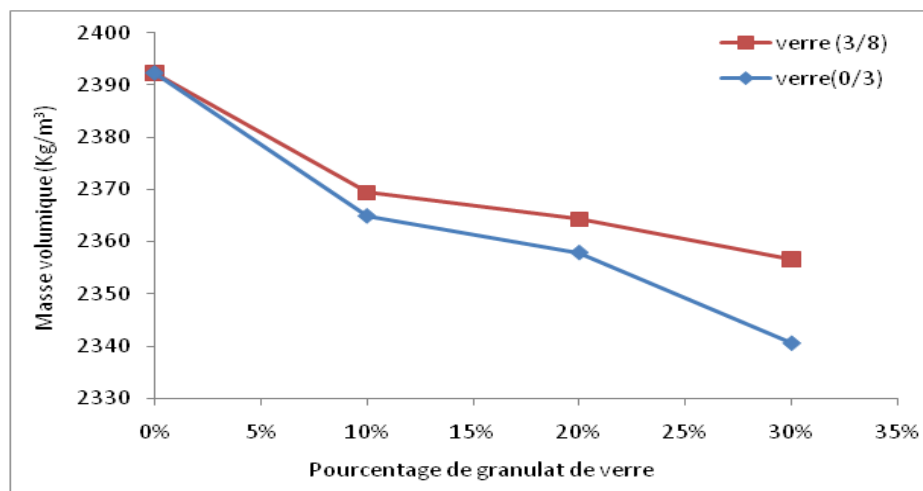
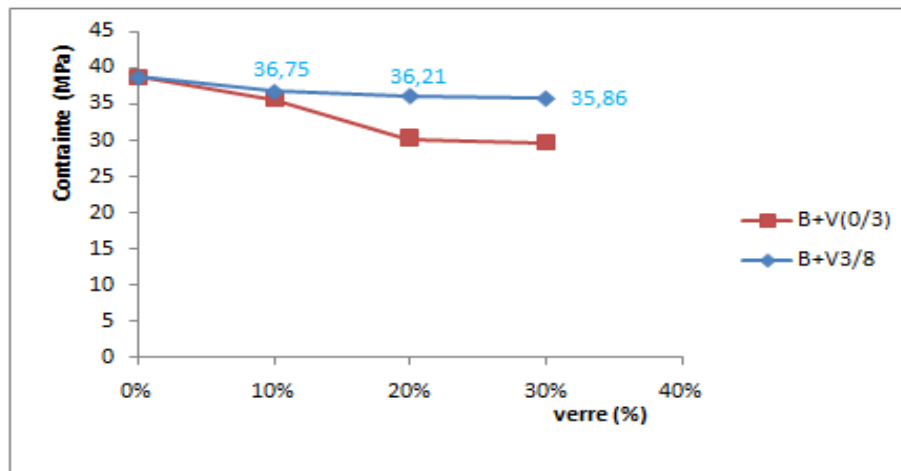


Figure II.7 : Variation de la masse volumique.

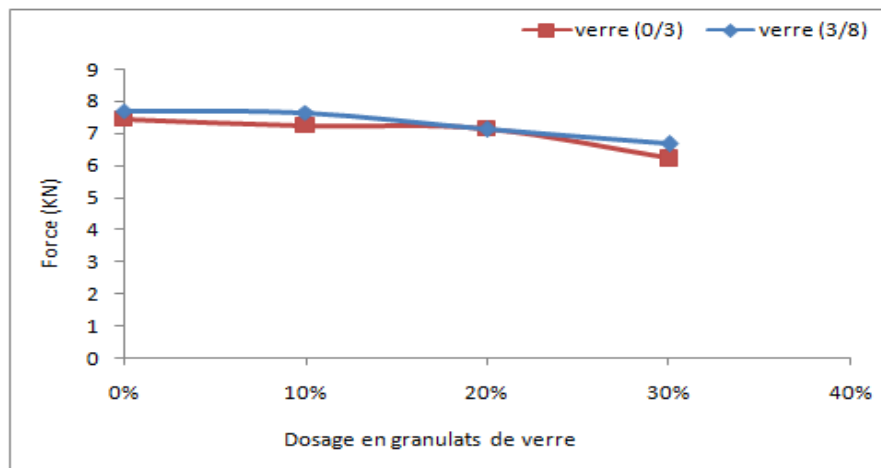
AMARNI a constaté que l'augmentation de la teneur en granulat de verre dans le béton, influe sur la masse volumique. Elle note une réduction de la masse volumique.

L'ajout du granulat de verre diminue la résistance en compression du béton. L'auteur constate que plus le pourcentage en sable de verre augmente, les résistances diminuent figure (II.8). La diminution de la résistance des bétons avec le gravier de verre (3/8) est faible par rapport à la diminution de béton avec le sable de verre.



**Figure II.8:** variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en granulats de verres.

Pour les essais de flexion, ils sont effectués sur des éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ )  $\text{cm}^3$ . L'auteur remarque une légère diminution de résistance lorsqu'elle augmente le pourcentage en granulats de verre. Les charges maximales supportées par les bétons avec le sable de verre sont un peu plus élevées par rapport à celles obtenues sur les bétons avec gravier de verre figure (II.9).



**Figure II.9 :** Courbe force-pourcentage en granulat de verre.

Une augmentation de la flèche est observée. La flèche à la rupture des bétons avec les différents dosages en granulats de verre est supérieure à celle du béton ordinaire. Les flèches des bétons avec sable de verre sont supérieures à celles des bétons avec graviers de verre figure (II.10).

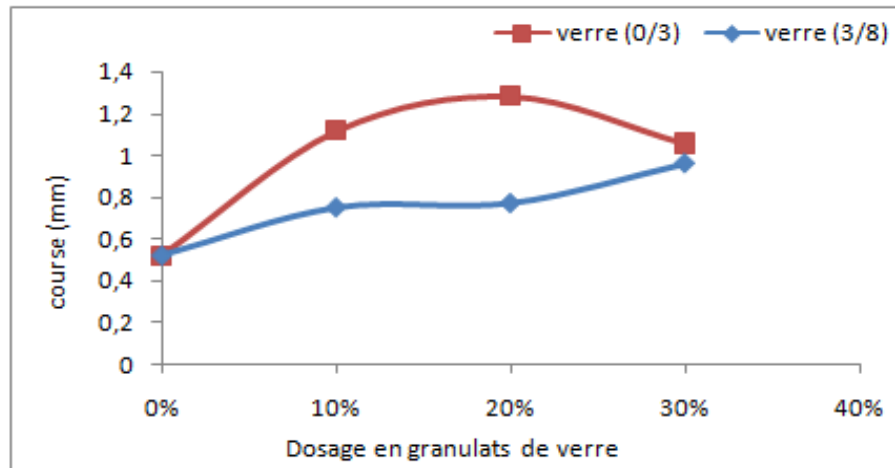


Figure II.10 : courbe force-pourcentage de verre (sable de verre et granulat de verre).

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux de certains auteurs qui ont étudié les bétons fabriqués avec ajout des déchets de verre. Nous nous sommes principalement focalisé sur la résistance à la compression et à la flexion des bétons avec déchets de verre.

La première observation est que les résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion des mortiers durcis avec la présence des déchets de verre évoluent régulièrement dans le temps. Par contre, nous avons constaté une diminution de la résistance mécanique des mortiers contenant les déchets de verre par rapport au mortier de référence.

La masse volumique des bétons avec granulat de verre, est légèrement réduite par rapport à celle du béton de référence, suite à la faible masse volumique absolue du verre.

Une addition de 10%, 20%, 30%, de granulat de verre (0/3 et 3/8) diminue la résistance mécanique à la compression et à la flexion.

Une amélioration considérable en termes de déformabilité des bétons avec granulat de verre (0/3 et 3/8) par rapport au béton de référence

# Chapitre III

## Programme expérimental

### III.1 Introduction

Le secteur du bâtiment est un grand consommateur de granulats naturels. Il est également l'un des plus gros producteurs de déchets dont 97% sont inertes. D'où la nécessité de considérer ces déchets inertes comme un gisement de matériaux alternatifs utilisables. Dans cette étude on s'est intéressé au recyclage du verre coloré et verre non coloré dans le béton.

Ce chapitre décrit les matériaux utilisés dans cette étude et le programme expérimental réalisé tels que les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux.

La caractérisation des propriétés des bétons avec ajout de déchets de verre a été réalisée expérimentalement afin de les confronter à celles du béton formulé sans déchets (béton témoin). Le déchet verre en poudre ou en sable a été utilisé comme remplacement partiel au ciment et au sable avec les pourcentages suivants : 0 ; 5 ; 10 et 15%.

*La caractérisation expérimentale de ces matériaux (sable, granulat, poudre et sable de verre coloré et non coloré) est présentée. A préciser que cette partie a été réalisée en collaboration avec Melle SEDKI Meriem (la caractérisation d'un béton à base de déchets de verre coloré) et Mr Touati Mohand Ameziane ( ) étant donné qu'on a travaillé en groupe sous la direction de Mme Akmoussi et Mme Kheloui.*

### III.2 MATERIAUX

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et des déchets issus du recyclage du verre.

#### III.2.1 Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures roulés pour le sable (0/3) et concassés pour les graviers (3/8 et 8/15). Ils ont été lavés puis séchés à l'étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures puis conservés.



**Figure III.1** : Les granulats utilisés.

### III.2.2 L'eau

Pour la confection du béton, nous avons utilisé l'eau du robinet (eau potable) pour le gâchage de béton.

### III.2.3 Ciment

Pour notre étude, nous avons utilisé un ciment de type CPJ CEM II/ 42, 5R provenant de LAFARGE d'Alger pour confectionner toutes les éprouvettes.

### III.2.4 Ajouts minérales

#### ❖ poudre de verre

La poudre de verre provient essentiellement des déchets de verre (colorés et non colorés) de bouteilles. Elles sont ramassées puis lavées et séchées. Le verre est concassé ensuite broyé au niveau du laboratoire de département de Génie Civil de l'université de Boumerdès afin d'obtenir une poudre fine. Cette dernière a été utilisée en substitution du ciment (Figure III.2) et la composition chimique des poudres de verre utilisées est donnée dans le tableau (III.1).



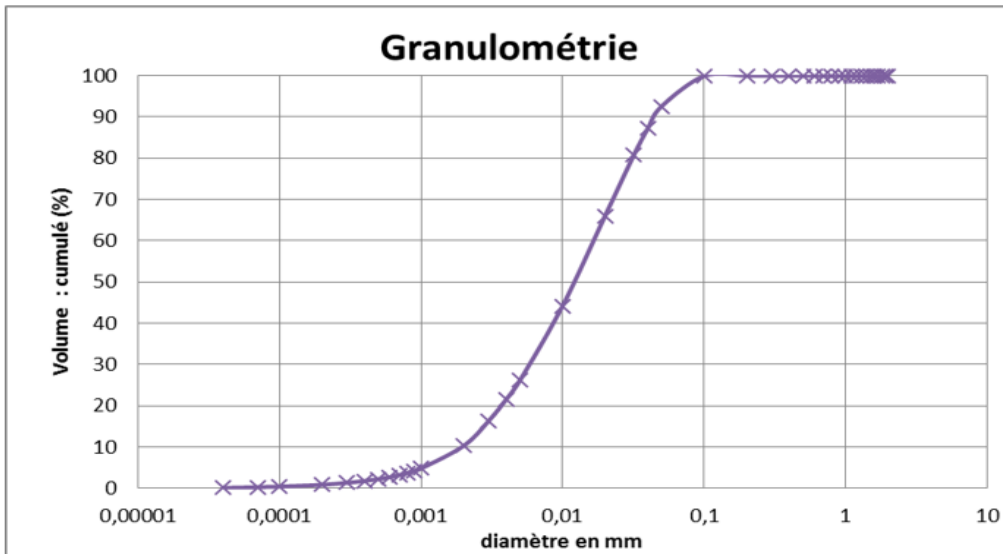
Figure III.2 : La poudre de verre utilisée.

Tableau III.1 : La composition chimique des poudres de verres utilisées.

Teneur (%)	Verre coloré	Verre non coloré
SiO <sub>2</sub>	73.53	73.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.64	1.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.28
CaO	10.68	10.00
MgO	0.65	0.75
SO <sub>3</sub>	0.09	0.35
K <sub>2</sub> O	0.22	0.09
Na <sub>2</sub> O	11.83	13.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.05
PAF	0.63	0.51

**III.2.4.1 Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré**

L'analyse granulométrique par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré est donnée dans la figure (III.3).



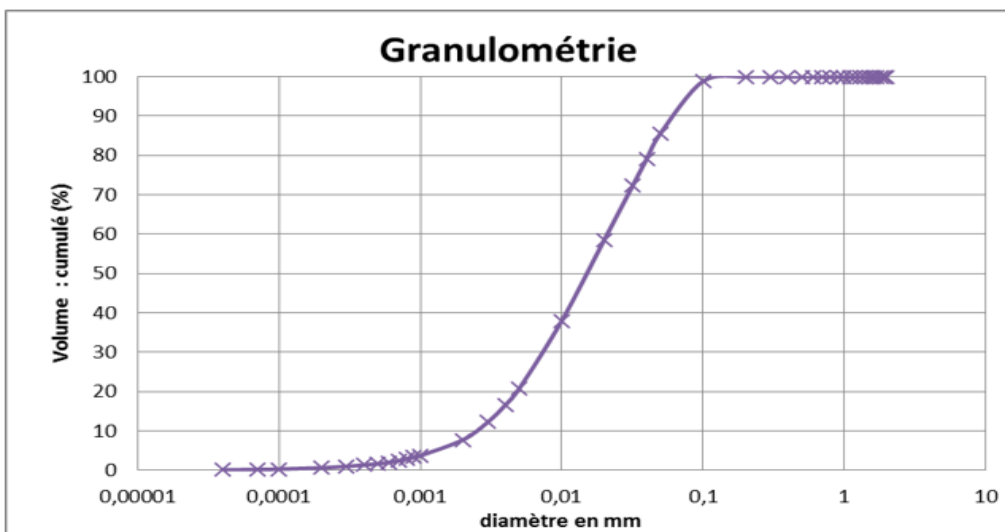
**Figure III.3 :** Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré.

L'analyse granulométrique par Diffraction Laser de la poudre de verre coloré, a donné les résultats suivants :

- Diamètre à 10% : 1,95  $\mu\text{m}$
- Diamètre à 50% : 12,11  $\mu\text{m}$
- Diamètre à 90% : 44,74  $\mu\text{m}$ .

**III.2.4.2 Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré**

L'analyse granulométrique par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré est donnée dans la figure (III.4).



**Figure III.4 :** Granulométrie par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré.

L'analyse granulométrique par Diffraction Laser de la poudre de verre non coloré, a donné les résultats suivants :

Diamètre à 10% : 2,50 $\mu$ m

Diamètre à 50% : 15,05 $\mu$ m

Diamètre à 90% : 59,34  $\mu$ m.

Les mélanges des différents bétons préparés avec les poudres de verre sont donnés dans le tableau (III.2).

**Tableau III.2 :** Mélanges des bétons préparés avec la poudre de verre.

Mélanges	ciment	Poudre de verre
1 <sup>er</sup> mélange	95%	5%
2 <sup>ème</sup> mélange	90%	10%
3 <sup>ème</sup> mélange	85%	15%

#### ❖ **Sable de verre**

Le sable de verre provient essentiellement des déchets de verre de bouteilles. Après lavage et séchage de ces dernières, le verre est concassé puis séché à une température de 105°C dans l'étuve. Ensuite il est passé au broyage. La classe granulaire de déchet de verre recyclé est formée du sable (0/3).



**Figure III.5 :** Les bouteilles ramassées (verre coloré et verre non coloré).



**Figure III.6 :** Broyage des bouteilles (verre coloré et verre non coloré).



**Figure III.7 :** le sable de verre coloré et non coloré.

Les mélanges des bétons préparés avec sable de verre sont donnés dans le tableau (III.3).

**Tableau III.3 :** Mélanges des bétons préparés avec sable de verre.

Mélanges	sable	Sable de verre
1 <sup>er</sup> mélange	100%	0%
2 <sup>ème</sup> mélange	95%	5%
3 <sup>ème</sup> mélange	90%	10%
4 <sup>ème</sup> mélange	85%	15%

### III.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 et EN 933-2)

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont

décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé et séché afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse [2].

### III.3.1 Equipements utilisés

- Des tamis de différents diamètres.
- Un échantillon de **3000 g** pour chaque matériau.
- Une balance de 5 kg.
- Une étuve thermostatée.
- Un vibrotamis électrique.

### III.3.2 Description de l'essai

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de diamètre 0/3, 3/8 et 8/15. Une fois ces matériaux sont lavés, ils sont placés dans l'étuve à une température maximale de 105°C pour séchage.

On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle –ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R1, la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R2, la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés Rn, aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.



Figure III.8 : La tamiseuse utilisée.

Les courbes granulométriques pour chaque type de granulats (0/3 ; 3/8 et 8/15) sont présentées dans la figure (III.9).

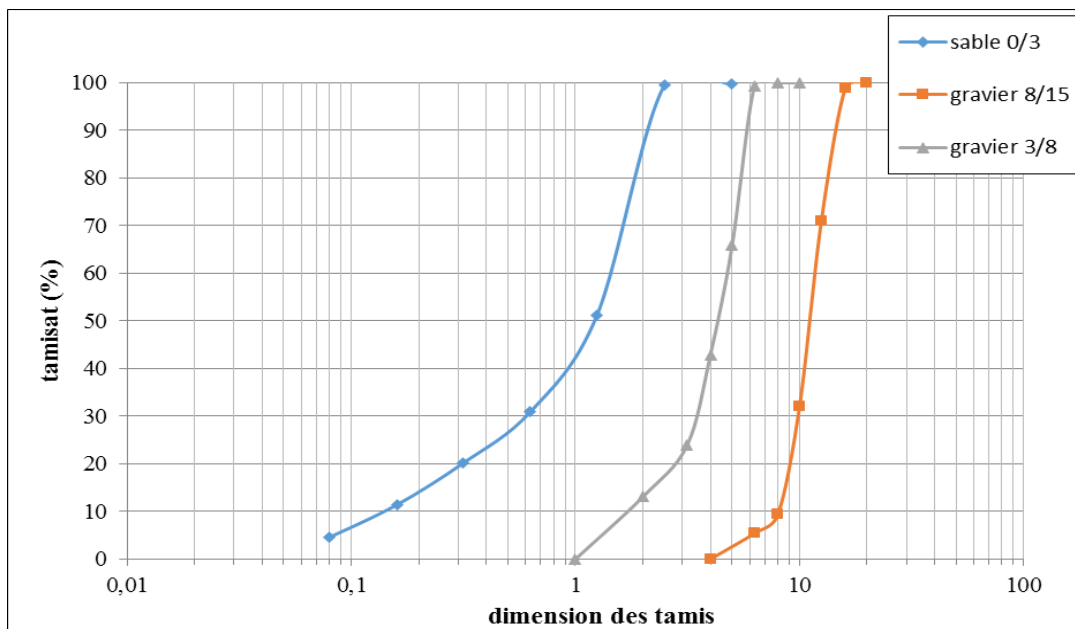


Figure III.9 : Courbes granulométriques des granulats utilisés.

### III.4 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne doivent exister ni en excès, ni en trop faible proportion s'il y'a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être pontifié par le calcul du module de finesse (MF).

Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramener à l'unité, pour les tamis de modules **0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5**. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à béton.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.4).

**Tableau III.4 : Module de finesse du sable.**

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
<b>Module de finesse MF</b>	2,87	2,8 < MF < 3,2 Sable grossier 2,2 < MF < 2,8 Sable moyen 1,8 < MF < 2,2 Sable fin

En conclusion, on dira que le sable qu'on a utilisé est donc moyen, c'est un bon sable à béton.

### III.5 Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555)

Les résultats des masses volumiques apparente et absolue des différents granulats utilisés sont présentés dans le tableau (III.5) :

**Tableau III .5 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.**

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
<b>Masse volumique absolue (<math>g/cm^3</math>)</b>	2,63	2,6	2,72
<b>Masse volumique apparente (<math>g/cm^3</math>)</b>	1,485	1,46	1,42

### III.6 Equivalent de sable (NFP18-598)

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'équivalent de sable exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact. L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C ce qui fait diminuer la résistance.



Figure III.10: L'essai d'équivalent du sable.

Les résultats sont présentés dans le tableau (III.6).

Tableau III. 6 : valeur de l'équivalent de sable.

Granulats	Sable (0/3)	spécification
Equivalent de sable visuel (ESV) %	86,14	70 à 80 pour un sable roulé > 65 pour un sable concassé
Equivalent de sable sous le poids d'un piston (ES) %	85,15	

En conclusion, on dira que le sable utilisé est propre.

### III.7 FORMULATION DU BETON ORDINAIRE

Pour l'élaboration du béton témoin, nous avons utilisé la méthode de **DREUX GORISSE**. Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié.

Après calcul, les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1 m<sup>3</sup> de béton sont donnés comme suit :

**Masse du sable : 585,75 Kg**

**Masse du gravier (3/8) : 272,32 Kg**

**Masse du gravier (8/15) : 1003,37 Kg**

La composition finale du notre béton de référence est résumée dans le tableau (III.7) :

Tableau III.7 : Formulation des bétons avec les granulats de verre.

	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau	Ciment	E/C
<b>Volume (1m<sup>3</sup>)</b>	222,72	104,39	368,86	200	695,97	0,287
<b>Poids (kg/m<sup>3</sup>)</b>	585,75	272,32	1003,3	200	400	0,5

L'incorporation des granulats de verre dans notre béton s'est effectuée par substitution d'une partie du ciment et d'une partie du sable (0/3) allant de 0 % à 15 % avec un pas de 5% tout en fixant le rapport E/C à 0,483 pour tous les bétons testés. Les compositions des différents bétons avec granulats de verre sont résumées dans les tableaux (III.8) et (III.9) :

**Tableau III.8 :** Composition volumique et pondérale du béton témoin et béton avec déchet de verre coloré pour 1m<sup>3</sup> de béton.

Composants	Ciment	Poudre de verre	Sable de verre	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	eau
<b>BT</b>	8,487	/	/	12,43	5,778	21,28	4,243
<b>B5P0S</b>	8,06	0,424	/	12,43	5,778	21,28	4,243
<b>B5P5S</b>	8,06	0,424	0,621	11,80	5,778	21,28	4,243
<b>B5P10S</b>	8,06	0,424	1,243	11,18	5,778	21,28	4,243
<b>B5P15S</b>	8,06	0,424	1,864	10,56	5,778	21,28	4,243
<b>B10P0S</b>	7,639	0,848	/	12,43	5,778	21,28	4,243
<b>B10P5S</b>	7,639	0,848	0,621	11,80	5,778	21,28	4,243
<b>B10P10S</b>	7,639	0,848	1,243	11,18	5,778	21,28	4,243
<b>B10P15S</b>	7,639	0,848	1,864	10,56	5,778	21,28	4,243
<b>B15P0S</b>	7,214	1,273	/	12,43	5,778	21,28	4,243
<b>B15P5S</b>	7,214	1,273	0,621	11,80	5,778	21,28	4,243
<b>B15P10S</b>	7,214	1,273	1,243	11,18	5,778	21,28	4,243
<b>B15P15S</b>	7,214	1,273	1,864	10,56	5,778	21,28	4,243

**Tableau III.9 :** Composition volumique et pondérale du béton témoin et béton avec déchet de verre non coloré pour 1m<sup>3</sup> de béton.

Composants	Ciment	Poudre de verre	Sable de verre	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau
<b>BT</b>	8,896	/	/	13,02	6,056	22,31	4,448
<b>B5P0S</b>	8,451	0,448	/	13,02	6,056	22,31	4,448
<b>B5P5S</b>	8,451	0,448	0,65	12,37	6,056	22,31	4,448
<b>B5P10S</b>	8,451	0,448	1,30	11,72	6,056	22,31	4,448
<b>B5P15S</b>	8,451	0,448	1,95	11,07	6,056	22,31	4,448
<b>B10P0S</b>	8,006	0,889	/	13,02	6,056	22,31	4,448
<b>B10P5S</b>	8,006	0,889	0,65	12,37	6,056	22,31	4,448
<b>B10P10S</b>	8,006	0,889	1,30	11,72	6,056	22,31	4,448
<b>B10P15S</b>	8,006	0,889	1,95	11,07	6,056	22,31	4,448
<b>B15P0S</b>	7,561	1,334	/	13,02	6,056	22,31	4,448
<b>B15P5S</b>	7,561	1,334	0,65	12,37	6,056	22,31	4,448
<b>B15P10S</b>	7,561	1,334	1,30	11,72	6,056	22,31	4,448
<b>B15P15S</b>	7,561	1,334	1,95	11,07	6,056	22,31	4,448

### III.8 FABRICATION DU BETON

Préparer les moules cylindriques (16 – 32) cm prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Nous avons préparé les pesées des matériaux à utilisés (gravillons, ciment, poudre de verre, sable de verre...).

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical. Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- ❖ Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- ❖ Introduire le sable et le sable de verre, les gravillons dans le malaxeur ;
- ❖ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s ;
- ❖ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
- ❖ Ajouter le ciment et la poudre de verre, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
- ❖ Verser l'eau restante graduellement et laisser malaxer pendant 60 s ;
- ❖ Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.
- ❖ Remplir les moules d'éprouvettes par simple versement (avec vibration).

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés de compression. Les bétons ont subi des vibrations pour mieux les compacter et éliminer les bulles d'air à l'intérieur.

Le démoulage a été effectué après 24h. Une fois décoffré, les échantillons ont été émergés dans l'eau pour éviter l'évaporation de l'eau.

Après la période de durcissement requise, les échantillons ont été retirés du bac d'eau et leurs surfaces ont été essuyées. Outre la mesure des propriétés fraîches (ouvrabilité), nous avons réalisé l'essai de compression sur le béton durci.



Figure III.11 : Démoulage des éprouvettes.



Figure III.12 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.

### III.9 ESSAIS SUR BETON DURCI

#### III.9.1 Essai de résistance à la compression (NF EN 12390-3)

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette, Figures (III.13) et (III.14).



Figure III.13 : Presse utilisée pour essai de compression.



**Figure III.14 :** Rupture d'une éprouvette par essai de compression.

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 KN, Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s.

### III.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes suivies pour la détermination des quantités des différents constituants du béton en utilisant la méthode de DREUX GORISSE. Les propriétés physiques et mécaniques des bétons avec déchets de verre ont été déterminées. Plusieurs pourcentages de déchets de verre ont été utilisés dans les formulations de nos bétons, Ces derniers ont été soumis à des essais de compression afin de déterminer leurs résistances.

# Chapitre IV

## Résultats et interprétation

**IV.1 Introduction**

Ce chapitre sera consacré à la présentation et interprétation des résultats expérimentaux relatifs aux différentes variantes de composition des bétons. Les résultats des essais de compression de laboratoire sont représentés sous forme d'histogrammes, sur lesquels nous avons représenté les résistances à la compression. Les résultats obtenus ont été par la suite comparé à ceux d'un béton témoin (sans ajouts) élaboré avec les mêmes constituants et dans les mêmes conditions de laboratoires.

**IV.2 Les différentes variantes utilisées pour la confection des bétons**

- ❖ **BT** : Béton témoin
  
- ❖ **B5P0S** : Béton avec 5% de poudre de verre et 0% de sable de verre
- ❖ **B5P5S** : Béton avec 5% de poudre de verre et 5% de sable de verre
- ❖ **B5P10S** : Béton avec 5% de poudre de verre et 10% de sable de verre
- ❖ **B5P15S** : Béton avec 5% de poudre de verre et 15% de sable de verre
  
- ❖ **B10P0S** : Béton avec 10% de poudre de verre et 0% de sable de verre
- ❖ **B10P5S** : Béton avec 10% de poudre de verre et 5% de sable de verre
- ❖ **B10P10S** : Béton avec 10% de poudre de verre et 10% de sable de verre
- ❖ **B10P15S** : Béton avec 10% de poudre de verre et 15% de sable de verre
  
- ❖ **B15P0S** : Béton avec 15% de poudre de verre et 0% de sable de verre
- ❖ **B15P5S** : Béton avec 15% de poudre de verre et 5% de sable de verre
- ❖ **B15P10S** : Béton avec 15% de poudre de verre et 10% de sable de verre
- ❖ **B15P15S** : Béton avec 15% de poudre de verre et 15% de sable de verre

Pour tous les essais de compression nous avons confectionné 78 éprouvettes cylindriques (16x32) cm<sup>2</sup>, soit 39 éprouvettes pour les bétons avec ajout de verre coloré et 39 éprouvettes pour les bétons avec ajout de verre non coloré. Nous avons confectionné 3 éprouvettes de béton pour chaque variante d'étude.

### IV.3 Résistance en compression des bétons à 28 jours

Les essais de compression, sur les éprouvettes cylindriques, ont été réalisés à 28 jours d'âge après leur confection et mûrissement. Ils ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance en compression du béton. Les résultats des résistances obtenus à 28 jours sont présentés dans le tableau (IV.1).

**Tableau IV.1 : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.**

Béton	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	
	Verre non coloré	Verre coloré
BT	30,00	35,00
B5P0S	30,26	32,65
B5P5S	29,50	33,86
B5P10S	28,33	34,27
B5P15S	30,40	33,59
B10P0S	30,23	34,26
B10P5S	26,53	32,77
B10P10S	29,45	31,98
B10P15S	28,47	32,05
B15P0S	26,98	32,36
B15P5S	28,19	32,14
B15P10S	27,33	33,68
B15P15S	28,80	31,29

Des histogrammes représentant les valeurs des résistances moyennes, au pic enregistrés pour les différentes variantes de béton, sont tracés et représentés un à un sur les figures ci-dessous.

## ➤ Le béton à 5% de poudre de verre

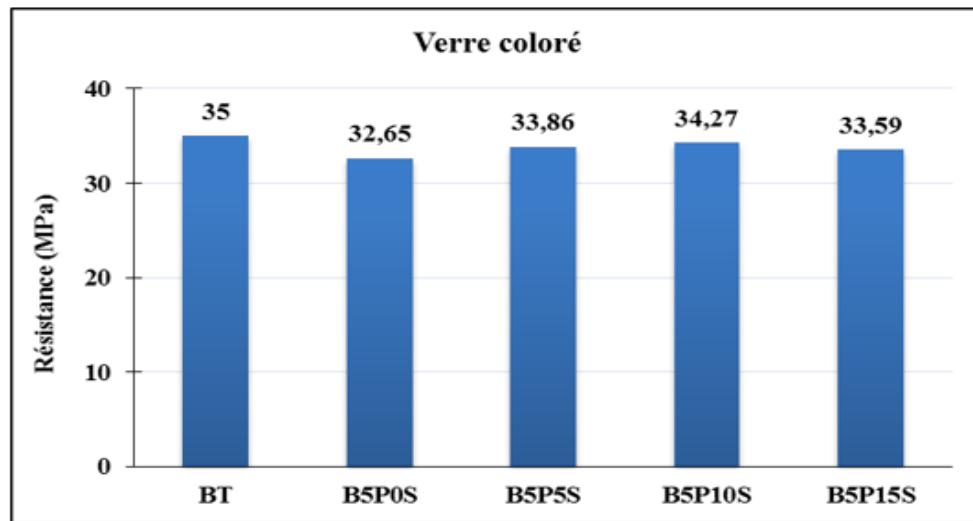


Figure IV.1 : Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre coloré.

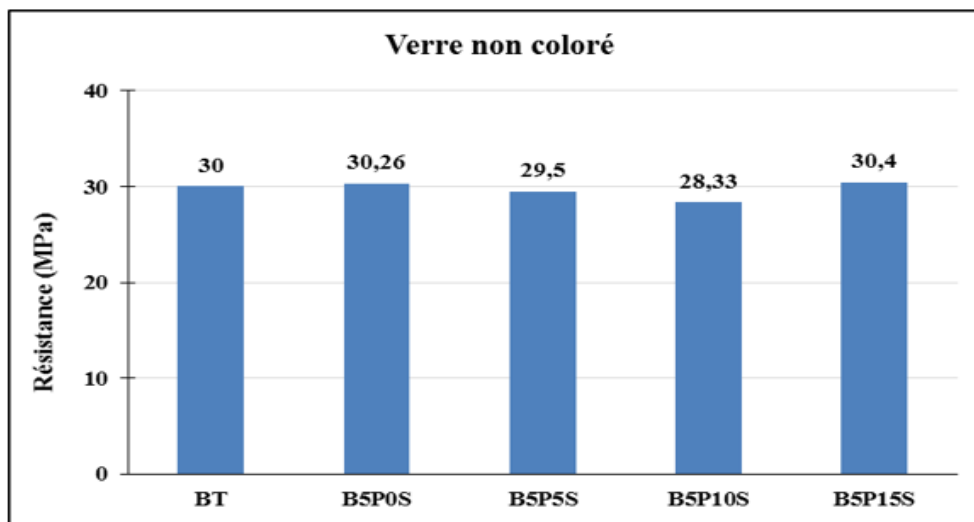


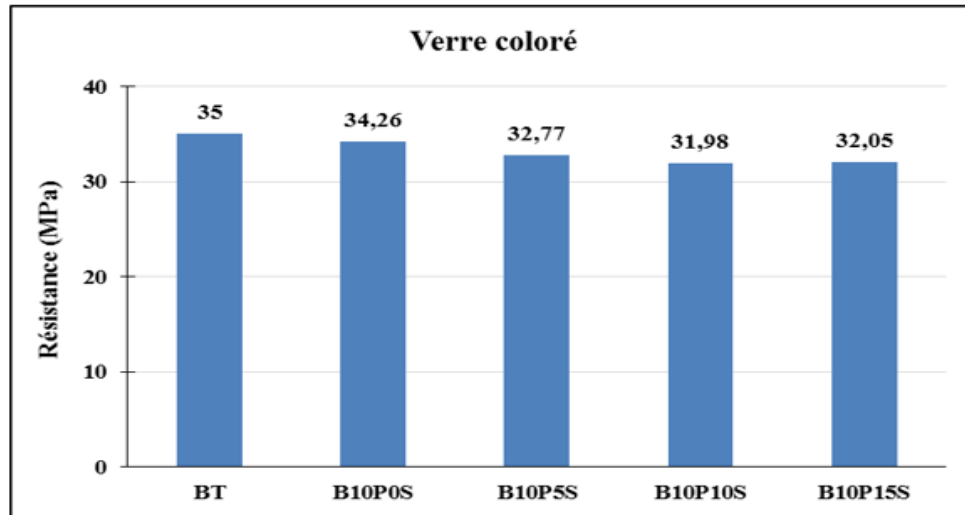
Figure IV.2 : Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre non coloré.

Sur ces figures, on constate que les bétons avec ajout de verre (verre coloré et verre non coloré) et pour les différents pourcentages en sable de verre (0% ; 5% ; 10% ; 15%) ont présenté des résistances légèrement inférieures comparées à la résistance du béton témoin.

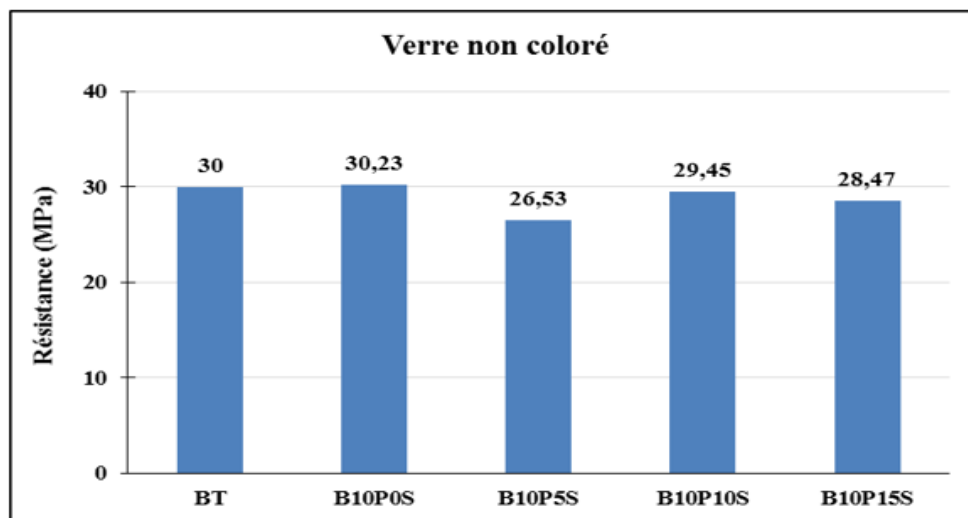
Les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté des résistances supérieures par rapport aux bétons avec ajout de verre non coloré. Pour le béton avec ajout de verre coloré, le béton (B5P10S) a présenté la meilleure résistance qui est de 34,27 MPa. Alors que pour le béton

avec ajout de verre non coloré, la meilleure résistance est donnée par le béton (B5P15S), elle est de 30,40 MPa.

➤ **Le béton à 10% de poudre de verre**



**Figure IV.3 :** Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre coloré.

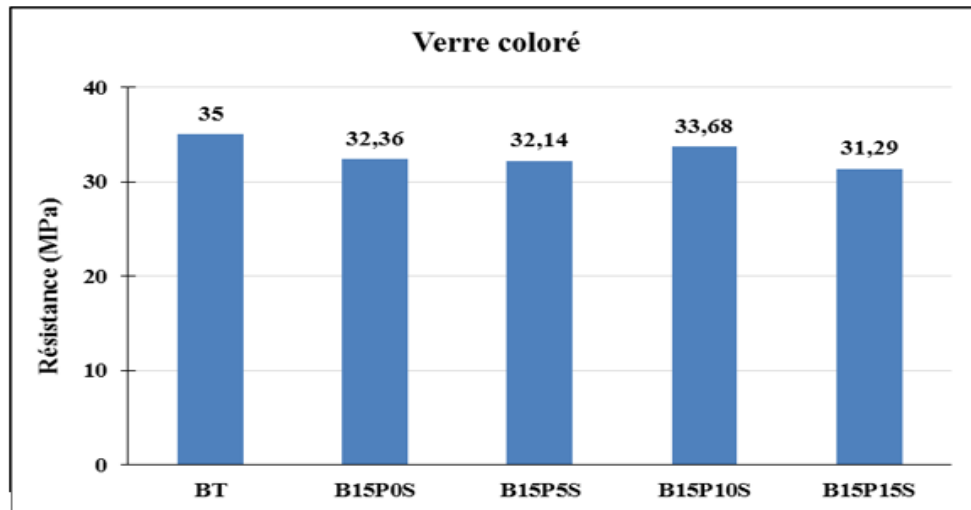


**Figure IV.4 :** Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre non coloré.

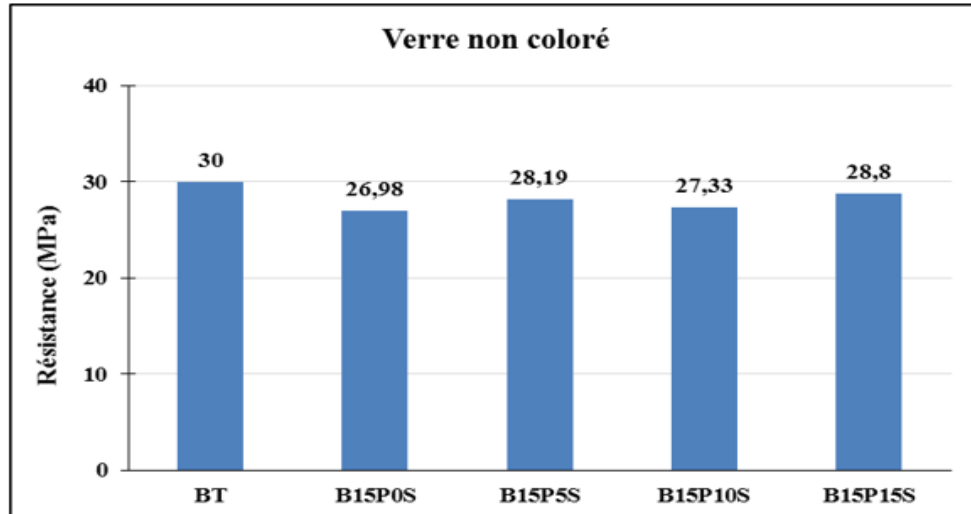
Sur ces figures, on remarque que le béton (B10P0S) a présenté une résistance à la compression supérieure à celles des autres bétons (B10P5S, B10P10S et B10P15S) et cela pour les deux types de verre étudié. En comparant les bétons avec ajout du verre au béton témoin, on

constate une légère diminution des résistances qui varie entre 2% à 8% pour le verre coloré et entre 0,7% à 11% pour le verre non coloré.

➤ **Le béton à 15% de poudre de verre**



**Figure IV.5 :** Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre coloré.



**Figure IV.6 :** Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre non coloré.

Avec un ajout de poudre de verre plus important qui est de 15%, toutes les résistances à la compression subissent une légère diminution. Cette chute de résistance atteint une valeur de l'ordre de 3.02 MPa pour le béton B15P0S (verre non coloré) et de 3.71 MPa pour le béton B15P0S (verre coloré). A noter que c'est la petite valeur de résistance enregistrée. On constate

aussi que les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté des résistances à la compression supérieures à celles des bétons avec ajout de verre non coloré.

**IV.4 Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage d'ajout du sable de verre**

L'évolution de la résistance en compression des différents bétons en fonction du pourcentage d'ajout du sable de verre est présentée en figures (IV.7) et (IV.8).

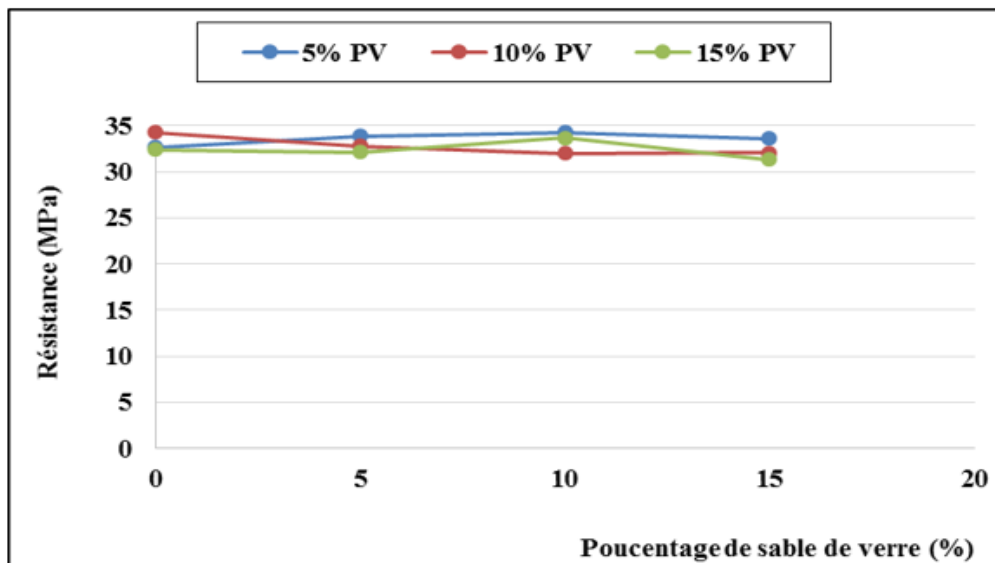


Figure IV.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du sable de verre coloré.

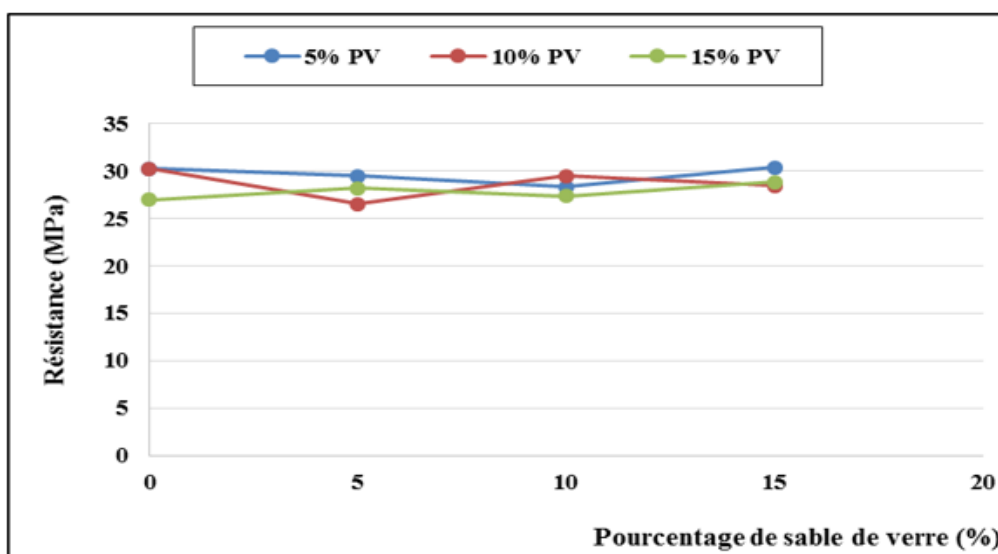


Figure IV.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du sable de verre non coloré.

Pour les bétons avec ajout du verre coloré, la résistance des différentes variantes est comprise entre 30 MPa et 35 MPa, alors que pour les bétons avec ajout de verre non coloré, la résistance est comprise entre 25 MPa et 30 MPa. Les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté de meilleures résistances.

# **Conclusion générale**

## **CONCLUSION GENERALE**

Le but de notre travail est la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre et le sable par du sable de verre. Deux types de verre ont été utilisés : le verre coloré et le verre non coloré.

Pour les différents bétons, nous avons utilisé quatre pourcentages de substitution : 0%, 5%, 10% et 15%. Les bétons ont été confectionnés afin d'étudier leur comportement mécanique à l'état durci.

Les résultats obtenus ont permis de faire les conclusions suivantes :

- Pour tous les pourcentages en poudre de verre, les bétons avec ajout de verre (verre coloré et verre non coloré) et pour les différents pourcentages en sable de verre (0% ; 5% ; 10% ; 15%) ont présenté des résistances légèrement inférieures comparées à la résistance du béton témoin.
- Les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté des résistances supérieures par rapport aux bétons avec ajout de verre non coloré.
- Les bétons avec ajout du verre coloré ont présenté des résistances comprises entre 30 MPa et 35 MPa, alors que les bétons avec ajout de verre non coloré, la résistance est comprise entre 25 MPa et 30 MPa. Les bétons avec ajout de verre coloré ont présenté de meilleures résistances.

En perspective il serait intéressant d'étudier :

- Le comportement mécanique de ces bétons à long terme.
- La durabilité de ces bétons.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

[1] Berroukche Hakim, Boualem Mohamed Akram Houcin. « Etude de la durabilité d'un béton ordinaire à base d'un tuf calciné local ». Mémoire de master en génie civil, option bâtiment et risque géotechnique. Saïda : Université Dr. Tahar Moulay Saïda, 2017, 78p.

[2] [www.guidebeton.com/composition-beton](http://www.guidebeton.com/composition-beton) (à revoir)

[3] R. Dupain, R. Lanchon, J.-C. Saint-Arrom, « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Terminal STI Génie Civil, BTS bâtiment, BTS Travaux publics, DUT Génie Civil, MST Génie Civil, Ecole d'ingénieurs, Editions Casteilla, 2009.

[4]

[5] FEDAOUI-AKMOUSSI, Ourdia. « Étude du comportement mécanique et durabilité des bétons fibrés : influence de différents environnements et de la nature des fibres ». Thèse de doctorat : génie civil. Tizi Ouzou, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2016, 153p.

[6] LAFUMA H., (1964). Liants hydrauliques : Propriétés, choix et conditions d'emploi. Dunod, Paris, 3e Ed., 117p.

[7] ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION

Béton et constituants du béton. 1, Spécification du béton et ses constituants / Association française de normalisation – 5 éd.. – Paris : Afnor, 2002. – 432p.

[8]

[9] <https://www.infociment.fr/beton/caracteristiques-et-types-de-granulats>.

[10]

[11] BOUGLADA Mohamed Salah, « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier ». Mémoire de magister en génie civil, option matériaux. M'sila : Université Mohammed Boudiaf de M'sila, 2008, 139p.

[12] GROUPE CIMENTS LUXEMBOURGEOIS, Séminaire – BETON 2001: Journée d'information technique 23 novembre 2001 Carlo KIRPACH

[13] PIERRE-CLAUDE AITCINE, Béton de haute performance, Edition Eyrolles 2001, pp, 134 :171,175 :193.

[14] Norme AFNOR. NF EN 197-1, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2011.

- [15] Dupain R., Granulats, sols, ciments et bétons, 2ème édition, Edition Casteilla, P. 80-81, 2000.
- [16] 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 \* Par Norman F. MacLeod, ing. Mars 2005 page 10-12
- [17] Chikoune M. A., Effets des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires, Magister Université de M'sila, 2008.
- [18] BEN AOUIRA Hafsa, BOUHALI Nour El Houda. « Etude de l'influence des ajouts pouzzolaniques sur l'évolution du propriété d'une matrice cimentaire ». Mémoire de Master Académique en génie civil, option matériaux. M'sila : Université Mohammed Boudiaf de M'sila, 2017, 57p.
- [19] ASHBY M. F., JONES D. R. H., (1991). Matériaux 2. Edition Dunod.
- [20] NEVILLE A. M., (2000). Propriété des bétons. Edition Eyrolles, 806 pages.
- [21] FELDMAN R.F, CHENG-HY H., (1985). Properties of Portland cement-silica fume pastes, 1, Porosity and surface properties. Cement and Concrete Research, Vol. 15, N°5, pp.765-774.
- [22] M Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [23] Dreux G., (1979) Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2ème édition. P 17.
- [24] CYR, Martin. « Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires ». Thèse en cotutelle entre l'INSA de Toulouse et l'Université de Sherbrooke (Québec) : génie civil. Toulouse : l'INSA de Toulouse, 17 décembre 1999, 273p.
- [25] BELABID Jouhra. « Comportement mécanique et durabilité des matériaux cimentaires avec ajouts de cendre et fumée de silice ». Mémoire de Master II en Génie des Procédés Organiques et Macromoléculaires. Boumerdes : Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2016.
- [26] Uchikawa Horishi, Hanehara Shunsuke, Recycling of waste as an alternative raw material and fuel in cement manufacturing. Noyes publications : United States of America ; 1997. p. 430-551.
- [27] Shi Caijun, Zheng Keren. A reviewe on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resour Conserv Recycl 2007 ;52 :234-47

- [28] Taha Bashar, Nounu Ghassan. Properties of concrete contain mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Constr Build Master* 2008 ;22 :713-20.
- [29] Ortiz SA, O Vidro e as Embalagens de Vidro. Campinas, Brasil : CETTA/ITAL ; 1996.
- [30] Frederico LM, Chidiac SE. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – critical review of treatment methods. *Cem Concr Compos* 2009 ;31 ::606-10.
- [31] Miao Liu. Incorporing ground glass in self-compacting concrete. *Constr Build Master* 2011 ;25 :919-25.
- [32] ASTM. ASTM C618-12 standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete ? Philadelphia ; 2012.
- [33] Shi C, Wu Y, Shao Y, Riefler C. Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder. In : Proceedings of the 12th international conference on AARin, concrete ; 2004. p. 789-95.
- [34] Nathan Schwarz, Hieu Cam, Narayanan Neithalat. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cem Concr Compos* 2008 ;30 :486-96.
- [35] Saccani Andrea, Bignozzi Maria Chiara. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. *Cem Concr Res* 2010 ;40 :531-6.
- [36] Papadakis VG, Tsimas S. Supplementary cementing materials in concrete Part I : efficiency and design. *Cem Concr Res* 2002 ;32 :1525-32.
- [37] Byars EA, Morales-Hernandez B, Zhu HY. Waste glass as concrete aggregate and pozzolan. *Waste glass as concrete aggregate and pozzolan : laboratory and industrial projects. Concr Soc* 2004 ;38(1) :41-4.
- [38] Nathan Schwarz, Narayanan Neithalat. Influence of a fine glass powder on cement hydration : comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cem Concr Compos* 2008 ;30 :486-96.
- [39]
- [40] Hau NGUYEN « Valorisation du verre dans le béton : Etude expérimentale du comportement de pâte de ciment et du mortier : rhéologie, mécanique et durabilité »Thèse de doctorat, Ecole Doctorale 353, Marseille, soutenue le 17 décembre 2013, p119
- [41] AMARNI Akila. « Valorisation des déchets de verre dans les bétons : étude expérimentale». Mémoire de master académique en génie civil, option Structures et matériaux. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.