

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



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Thème

**Etude expérimentale d'un béton à base de
déchets de verre**

Etudié par : M^{elle} SEDKI MERIEM

Devant le jury:

M^{me} CHAHOUR.K	MCA U.TIZI OUZOU	Président
Mme ALI AHMED	Maître de conférences UMMTO	Examineur
M^{me} KHELOUI.F	Maître de conférences UMMTO	Encadreur
M^{me} AKMOUSSLO	Maître de conférences UMMTO	Co-Encadreur

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier énormément le bon Dieu le tout puissant, pour m'avoir accordé la santé, le courage, la patience et la volonté jusqu'à l'aboutissement de mes études, et l'accomplissement de ce modeste travail

Ensuite, j'exprime mes sincères remerciements à :

*- ma promotrice **Mme. KHELOUI FATMA** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.*

*-ma Co-encadreur **Mme AKMOUSSI OUARDIA** Pour son aide et son suivi, ses orientations et nombreuses interventions qui ont facilité l'aboutissement de ce travail.*

*Comme Je remercie chaleureusement tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail, en commençant par : **M^{er} Ben CHABANE.T** pour ses explications et ses précieux conseils.*

Je ne manquerai pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury qui ont accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce mémoire à sa juste valeur, et de me faire part de leurs remarques sûrement pertinentes qui contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.

*J'ai effectué ma thèse au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU. Je remercie chaleureusement les membres de ce laboratoire en particuliers Madame **BEN MEDJBAR Fadhila** et Monsieur **BOUHERRAOUA Rachid**, pour leur aide, amitié, et leur disponibilité durant les investigations expérimentales.*

Je dois une grande reconnaissance à mes parents, qui ont toujours été présents et qui m'ont toujours soutenue, pour leur dévouement et surtout pour leur

amour et leurs sacrifices. Aussi, je ne manquerai pas de remercier chaleureusement mes frères : NACER, TOUFIK, MOUMOUH et ALI et sœurs : NOUARA, ROZA et SALIHA et mes belle- sœurs HAKIMA, LILIA, AUDREY et mes cousin FARID bien sur toute ma famille.

A celui qui s'est dévoué et sacrifié pour moi, celui qui ma encouragé et soutenu à combattre les aléas et donner le meilleur de moi, mon fiancé Malik

A ma belle famille, particulièrement à ma belle mère HOURIA, et belle- sœurs HAKIMA et KAHINA et mes beaux frères

Un grand merci aussi à mes chers amis et collègues de promotion : Celia, Sofiane, Lylia...et à tous ceux que j'aime, et qui m'ont aidé de prés ou de loin à accomplir ce modeste travail.

Merci 

Résumé

Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables, tels que les bouteilles non réutilisables (verre), devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les réutiliser dans les procédés de construction (béton), leur valorisation présentent plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques.

Les travaux présentés dans ce document portent sur l'incorporation des déchets de verre. Elle porte sur un béton confectionné avec déchets de verre concassé et broyée en poudre de verre et en sable de verre.

Dans la première ces déchets qui sont broyer sous forme de poudre de verre et du sable de verre ont été incorporés à du béton en variant le pourcentage d'ajout :

-) Poudre de verre à 5, 10 ,15 % comme remplacement partiel du ciment.
-) Sable de verre à 0, 5, 10,15% comme remplacement partiel du sable (0/3).

Nous traitons à partir de cette étude l'influence de cet ajout sur le comportement mécanique du béton par des essais non destructif tel que l'ultrason et destructif tel que l'écrasement. Les résultats de ces essais sont :

-) D'après l'essai d'ultrason, les mesures des vitesses ultrasoniques (V_{OU}) sont très influencées par les déchets de verre, à savoir l'augmentation des vitesses qui prend des valeurs supérieure à 4200m/s ce qui nous permet de dire que ces des bétons de très haute résistance.
-) les essais d'écrasements ont montré qu'il y une diminution dans les propriétés de résistances (à la compression)

Mots clés : Ajout, verre, béton, déchets.

Abstract

The environmental problem posed by non-biodegradable waste, such as non-refillable bottles (glass), is becoming a major concern in view of the huge quantities produced in large cities. One of the few ways to recycle these wastes is to reuse them in construction processes (concrete), and their valorization has several advantages: economic, ecological and technological.

The work presented in this document deals with the incorporation of glass waste. It concerns a concrete made with waste glass crushed glass powder and sand glass. In the first, this waste, which is ground and crushed in the form of glass powder and glass sand, has been incorporated into concrete by varying the percentage of addition:

-) 5, 10, 15% glass powder as a partial replacement of cement.
-) 0, 5, 10, 15% glass sand as partial sand replacement (0/3).

We study from this study the influence of this addition on the mechanical behavior of concrete by non-destructive tests such as ultrasound or destructive tests such as crushing. The results of these tests are:

-) According to the ultrasound test, the measurements of the (V_{OU}) are very influenced by the glass waste, namely the increase in speeds which takes values higher than 4200m / s which allows us to say that these concretes are of very high resistance.
-) The crush tests showed that there was a decrease in the compressive strength.

Key words: Addition, glass, concrete, waste.

SOMMAIRE

Résumé

Abstract

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Principales notations

Liste des travaux

Introduction générale.....1

I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON 3

I.1 INTRODUCTION 3

I.2 Historique 3

I.3 Définition 5

I.4 Composition du béton..... 5

I.4.1 Le ciment 6

I.4.1.1 Les types de ciment 7

I.4.2 L'eau de gâchage 8

I.4.3 Les granulats..... 8

I.4.4 Sable 10

I.4.5 Les adjuvants 10

I.4.5.1 Types d'adjuvants..... 11

I.5 Types de béton 12

I.5.1 Les bétons courants..... 12

I.5.2 Béton de haute performance (BHP) 12

I.5.3 Le béton auto plaçant (BAP)..... 13

I.5.4 Les bétons spéciaux..... 13

I.6 Avantages et inconvénients du béton 14

I.7 Domaine d'application du béton..... 15

II. CHAPITRE II : LES DECHETS 17

II.1 INTRODUCTION 17

II.2 DEFINITIONS DES CONCEPTS 17

II.3 LES TYPE DE DECHETS..... 18

II.4 LA GESTION DES DECHETS..... 19

II.5 GISEMENT DES DECHETS RECYCLABLES 20

II.6	LE RECYCLAGE.....	20
II.7	LA NATURE DES DECHETS.....	21
II.8	LE VERRE.....	23
II.8.1	Historique.....	23
II.8.2	Définition.....	24
II.8.3	Composition chimique du verre.....	25
II.8.4	Propriétés du verre.....	25
II.8.4.1	Propriétés physiques.....	25
II.8.4.2	Propriétés mécaniques.....	26
II.8.4.3	Propriétés électriques.....	26
II.8.4.4	Fragilité.....	26
II.8.4.5	Propriétés chimiques.....	27
II.9	RECYCLAGE DES VERRES.....	27
II.9.1	Le verre récupéré : le calcin.....	27
II.10	COMPORTEMENT DU VERRE DANS UN MILIEU CIMENTAIRE.....	29
II.10.1	Réaction alcali-silice.....	29
II.10.1.1	Mécanismes de la réaction alcali-silice.....	30
II.10.2	Réaction pouzzolanique.....	32
II.11	ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'UTILISATION DU VERRE DANS LA FORMULATION DU BETON.....	33
II.12	Conclusion.....	34
III. CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE.....		36
III.1	INTRODUCTION.....	36
III.2	MATERIAUX.....	36
III.2.1	Matériaux.....	36
III.2.1.1	Les granulats.....	36
III.2.1.2	L'eau.....	37
III.2.1.3	Ciment.....	37
III.2.1.4	Ajouts minérales.....	37
III.2.2	ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 et EN 933-2).....	40
III.2.2.1	Principe de l'essai.....	40
III.2.2.2	Equipements utilisés.....	40
III.2.2.3	Description de l'essai.....	40
III.2.3	Module de finesse.....	42
III.2.4	Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555).....	43

III.2.5	Equivalent de sable (NFP18-598)	44
III.3	FORMULATION DU BETON ORDINAIRE	45
III.4	Fabrication du béton	51
III.5	Essais sur béton durci	53
III.5.1	Essai de résistance à la compression (NF EN 12390-3)	53
III.5.2	Essai non destructif	54
III.5.2.1	Préparation des éprouvettes.....	54
III.5.2.2	Description de la procédure	54
III.6	CONCLUSION	55
IV. CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION.....		57
IV.1	INTRODUCTION	57
IV.2	CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASON (ASTM C597-97; 1993).....	58
IV.3	RESISTANCE DES BETONS A 28 JOURS.....	60
IV.4	Conclusion générale :	67

Références

ANNEXE

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Coupole du Panthéon de Rome.	4
Figure I.2 : La Tour Perret	4
Figure I.3 : le matériau béton	5
Figure I.4: Composants d'un béton	6
Figure I.5: Différents types de granulats [DEGEIMBRE (2003)].	9
Figure I.6 : Différentes formes de granulats [DEGEIMBRE (2003)].	9
Figure I.7: Types de sable [DEGEIMBRE (2003)].	10
Figure I.8: L'adjuvant	11
Figure II.1 : Déchets de verre jetés dans la nature	18
Figure II.2: Déchets carton.	21
Figure II.3 : Déchets plastique	23
Figure II.4: Représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) [Philip Gibbs (1996)].	24
Figure II.5: représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse.	24
Figure II.6 : Impuretés du verre (papiers, plastiques)	28
Figure II.7 : verre débarrassé des ses impuretés	28
Figure II.8 : Transformation des déchets de verre en poudre de verre	29
Figure II.9: Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique.	30
Figure II.10: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des	31
Figure II.11: Fissurations causées par l'alcali réaction	31
Figure II.12: Le cycle de transformation	32
Figure II.13: Exemples d'utilisation de la poudre de verre	34
Figure II.14: Exemples d'utilisation d'agrégats de verre.	34
Figure III.1: Sable passé au tamis.	37
Figure III.2: Les différents granulats utilisés.	37
Figure III.3: La poudre de verre utilisée.	38
Figure III.4: Déchet de verre ramassé.	38
Figure III.5: Nettoyage des déchets de verre.	38
Figure III.6: Séchage et broyage.	39
Figure III.7: le sable de verre.	39
Figure III.8 : Tamiseuse.	41
Figure III.9: Courbes granulométriques.	42
Figure III.10: Essai de la masse volumique.	43
Figure III.11: L'essai d'équivalent du sable.	44
Figure III.12: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.	47
Figure III.13: Courbe granulométrique et la courbe de référence OAB.	49
Figure III.14: confection, moulage et démoulage des éprouvettes.	52

Figure III.15: Conservation des éprouvettes pour 28 j avant écrasement.	52
Figure III.16: La presse utilisée.....	53
Figure III.17: Rupture de l'éprouvette.	54
Figure III.18: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.....	55
Figure IV.1: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 5% en poudre de verre.....	58
Figure IV.2: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 10% en poudre de verre.....	59
Figure IV.3: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 15% en poudre de verre.....	59
Figure IV.4: Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre.....	61
Figure IV.5: Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre.....	62
Figure IV.6: Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre.....	63
Figure IV.7: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 5% de poudre de verre.....	64
Figure IV.8: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 10% de poudre de verre.....	65
Figure IV.9: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 15% de poudre de verre.....	66
Figure IV.10: Module de Young des bétons avec 5% de poudre de verre..	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV.11: Module de Young des bétons avec 10% de poudre de verre.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV.12: Module de Young des bétons avec 15% de poudre de verre.....	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Capacité de recyclage. (Source : MATE 2004).....	20
Tableau II.2: Valeurs de densité des différents types de verre	25
Tableau II.3: Propriétés physiques du verre	26
Tableau III.1: Mélanges des bétons préparés avec poudre et sable de verre.....	39
Tableau III.2: Module de finesse du sable.	42
Tableau III.3: Masse volumique apparente et absolue des granulats.	43
Tableau III.4: valeur de l'équivalent de sable.	44
Tableau III.5 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire.....	46
Tableau III.6: Composition volumique et pondéral du béton témoin pour $1m^3$	50
Tableau III.7: Quantités du différent composant des bétons.....	50
Tableau IV.1: Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.	60

Principales notations

C : Ciment

E : Eau

E/C : Rapport massique eau sur ciment

P : Poudre de verre broyé

S : Sable de verre broyé

V_{ou} : Vitesses des ondes ultrasoniques

Introduction générale

Introduction générale

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

IL a été observé ces dernières années dans le secteur du BTP, une augmentation conséquente du nombre de constructions, qui se traduit par un besoin toujours croissant de matières premières. Or, les gisements naturels de granulats potentiellement exploitables se raréfient, et les industriels font face à une difficulté d'approvisionnement croissante.

Le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat – GIEC – conclut que « l'essentiel de l'accroissement constaté de la température moyenne de la planète depuis le milieu du XXe siècle est « très vraisemblablement » dû à l'augmentation observée des émissions d'activités humaines de gaz à effet de serre ».

On comprend alors la nécessité de trouver rapidement une alternative moins impactant sur l'environnement qui permettrait d'une part la préservation des ressources naturelles, mais également l'économie de matériaux mis en décharge, et une réduction des transports. Il serait en effet alors idéal de n'employer que des matériaux locaux. Il s'agit alors de raisonner en termes d'analyse de cycle de vie .

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette présente étude qui a comme objectif principal la contribution au recyclage et à la valorisation des déchets inorganiques en particulier ; les déchets de l'industrie de verre (déchets de verre) dans la fabrication de certains bétons permettant ainsi de les éliminer ou au moins de les minimiser. En plus de la protection de l'environnement, cette initiative conduit aussi à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats à savoir les granulats traditionnels (sable et gravillon).

Pour permettre une gestion optimisée de ces déchets, une politique globale doit être mise en œuvre, mais elle ne peut reposer que sur des éléments tangibles et démontrés. Il est ainsi primordial de mettre en place un plan d'action via des spécialistes pour analyser le problème et ses caractéristiques, déterminer des voies de valorisation, tester différentes solutions envisagées, puis optimiser les systèmes les plus viables.

Ainsi, le présent manuscrit est subdivisé en quatre chapitres, dont la partie bibliographique (théorique) est présentée dans les deux premiers chapitres et le travail expérimental (tests, caractérisations, résultats et discussion) fait l'objet des deux autres chapitres

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les bétons 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 et ses principaux composants.

Le **chapitre II**, composée de deux parties. Dans la première partie nous avons traité des notions sur les déchets tels que les déchets minéraux. Dans ce même chapitre, un état de l'art sera présenté sur l'utilisation de ces déchets dans le domaine du génie civil. Puis nous avons repris les définitions du verre.

Tandis que le **chapitre III** présente les différents essais de caractérisation et leurs modes opératoires (analyse granulométrique, l'équivalent du sable et masse volumique) et illustre la méthode de formulation des bétons utilisés. Les étapes pour la confection des éprouvettes pour les différents mélanges sont présentées à la fin de ce chapitre.

Chapitre V : dans ce chapitre sont décrits et présentés les résultats expérimentaux effectués sur ces bétons (essais d'ultrason, et 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 (sable et poudre de verre) est également présenté.

En dernier, nous avons récapitulé nos conclusions sur le travail mené et proposé des perspectives

CHAPITRE I :
Généralités sur le béton

I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON**I.1 INTRODUCTION**

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction le plus utilisé à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Selon les chiffres statistiques fournis par Cem bureau en 2004, la consommation annuelle de béton atteint 6 milliards de mètres cube soit à peu près un mètre cube par habitant de la planète. En Europe, la consommation moyenne était de 528kg par habitant en 2004 et une tonne par habitant en Amérique du Nord. Le béton est la deuxième substance exploitée par l'homme après l'eau [1].

Le béton varie en fonction de ses composants : nature des granulats, des adjuvants, du ciment, mais aussi en fonction de la mise en œuvre et du traitement de surface. Ainsi, en combinant ces différents produits on peut produire des bétons avec des propriétés très variables : en résistance, isolation thermique, résistance au feu, isolation phonique, durabilité. On peut également se permettre avec le béton des réalisations de formes très complexes, de différentes teintes et textures. [2]

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes. D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR) [3].

I.2 Historique

Le mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau est très ancien. Les Egyptiens l'utilisaient déjà 2600 ans av .J.-C. Vers le I^{er} siècle, les Romains perfectionnèrent ce « Liant » en y ajoutant de la terre volcanique, ce qui lui permettait de prendre sous l'eau, on y ajoutant de la tuile broyée (tuileau), ce qui améliorait la prise et le durcissement. Un des premiers grands ouvrages en béton est le Panthéon de Rome, construit sous Adrien en 128 après .J.-C avec une coupole de 43.20m de diamètre à base de béton de pouzzolane. La découverte du ciment est

attribuée à Louis Vicat, jeune ingénieur de l'école nationale des ponts et chaussées, en 1818, il fut le premier au monde à fabriquer, de manière artificielle et contrôlée, des chaux hydrauliques, dont il détermina les composants ainsi que leurs proportions.



Figure I.1: Coupole du Panthéon de Rome. [4]

Le béton de ciment est apparu en architecture grâce aux bétons moulés et aux pierres factices, imitation des pierres de taille coulées en béton, souvent du béton de ciment prompt naturel (dit aussi ciment romain). La pratique du moulage débutera au début du XIXe siècle dans les régions où l'on connaissait déjà le branchage, François Cointeraux faisait déjà des moulages à Lyon et Grenoble à la fin du XVIIIe siècle. On moulait tout : Canalisations d'égouts, vases, statues, balustrades, pierres d'angles, corniches, etc. [4]

Cette pratique s'est répandue ensuite dans de nombreuses grandes villes d'Europe : la Tour Perret 1925 en témoigne (fig. I.2).

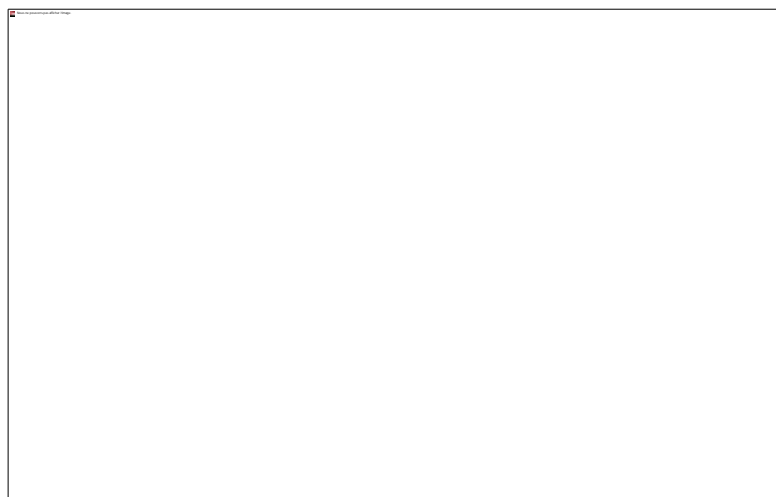


Figure I.2 : La Tour Perret [4].

I.3 Définition

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué de grains minéraux (granulats) et d'un liant (ciment) qui durcit en présence d'eau. A ces composants de base s'ajoutent des adjuvants qui améliorent sensiblement les performances du matériau. Chacun de ces constituants (granulats, ciment, eau, adjuvant, air) présente des caractéristiques très différentes dont il faut tenir en compte dans l'élaboration d'un bon béton. Des éléments plus fins encore sont aussi introduits pour améliorer la compacité des bétons [5].



Figure I.3 : le matériau béton [4].

I.4 Composition du béton

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et dès fois on ajoute des adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné. Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant hydraulique. Il est lui-même composé de clinker, associé parfois à des constituants secondaires

Autres composants essentiels du béton, les granulats, qui se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton. Les granulats sont également traités mécaniquement pour obtenir une forme particulière, une granulométrie et une propriété donnée. Ces traitements influencent très fortement ses propriétés comme la demande en eau, l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton.

Les adjuvants sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m^3). Les réducteurs d'eau vont permettre d'utiliser moins d'eau (5 à 10 %) pour produire un béton présentant un affaissement donné, une baisse du rapport eau/liant, une réduction de la quantité de ciment et d'eau. Les superplastifiants ou fluidifiants ont des propriétés similaires à celles de réducteurs

d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent des fluidités extrêmes, c'est pourquoi ils sont utilisés pour produire des bétons autoplaçants. D'autres adjuvants permettent de modifier la prise et le durcissement comme les accélérateurs ou les retardateurs de prise.

Enfin, l'eau de gâchage est le quatrième élément nécessaire. Trop d'eau augmente la porosité du béton et modifie ses propriétés mécaniques et sa durabilité. L'association ciment eau génère des réactions extrêmement complexes. Silicates et aluminates se développent pendant la phase d'hydratation. Ils forment alors un gel cristallin qui marque le début du phénomène de prise. Au cours de la phase de durcissement, qui peut durer plusieurs mois, la multiplication des microcristaux augmentent la résistance mécanique : Le béton se transforme alors en une véritable roche composite [6].

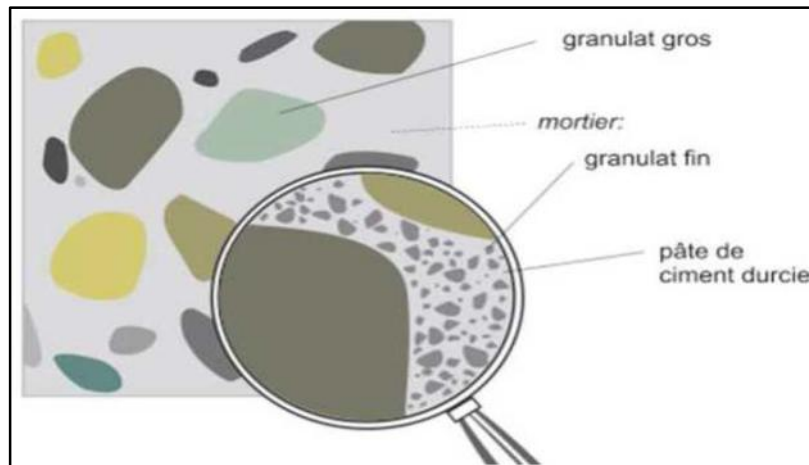


Figure I.4: Composants d'un béton [7].

I.4.1 Le ciment

Le ciment anhydre est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitées, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...). [2]

❖ Les constituants principaux

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

-) Du calcaire,
-) Du laitier de haut fourneau,
-) Des cendres volantes,
-) Des fines calcaires,
-) De la pouzzolane naturelle,

-) Des schistes calcinés,
-) Des fumées de silice,

Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.

I.4.1.1 Les types de ciment

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV197-1.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 4 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

-) CEM I: Ciment Portland Artificiel (CPA).
-) CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).
-) CEM III : Ciment de haut fourneau(CHF).
-) CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

❖ Ciments portland CPA-CEM

Le ciment portland ordinaire est de loin le ciment le plus utilisé, il convient bien aux utilisations générales lorsque le béton n'est pas exposé à des sulfates provenant du sol ou de la nappe phréatique. Ces ciments doivent être conformes à la norme NF P 15-301 [8].

❖ Ciments portland composés CPJ-CEM II/A ou B

Les Ciments portland composés résultent d'un mélange de clinker en quantité au moins égale à 65% et d'autre constituants tels que les laitier, les cendres volantes, les pouzzolane, fumée de silice, dont le total ne dépasse pas 35%. Ils sont définis par la norme NF P15-301.

De façon générale, ils sont adaptés pour :

- Les travaux courants, armée ou non armée, et tous travaux de génie civil n'exigeant pas des contraintes particulièrement élevées
- Travaux de maçonnerie, réalisation de dallage, confection d'enduit travaux routiers notamment traitement de graves, réalisation de chaussées, de pistes... ;
- Bétons prêts à l'emploi ;
- Travaux de bétonnage en grande masse, barrage, piles...

❖ Les ciments de haut- fourneau CHF et CLK CEM III

Ces ciments doivent être conformes à la norme NF P 15-301. Ils sont constitués d'au moins 36 à 65% de laitier, le reste étant composé de clinker, ils peuvent en outre comporter jusqu'à 5% de constituants secondaires

Les principaux domaines d'utilisation sont :

- Les bétonnages en milieu humide
- La construction d'ouvrages à la mer

- La construction d'ouvrage souterrain tel que tunnels, galerie...
- Les travaux de fondation profonde tels que les pieux forés, voiles...

Les ciments pouzzolaniques CPZ-CEM IV

Ces ciments bien que normalisés ne sont pas, pour l'instant, fabriqués en France. Ils ne sont mentionnés que pour le mémoire.

I.4.2 L'eau de gâchage

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau. D'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais [1].

Remarque : un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre (eau potable) et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme **NF EN 1008h**.

I.4.3 Les granulats

Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. Les granulats se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, propriété mécanique et physico-chimique. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulat utilisé ne doit donc pas être prit à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton.

Les granulats sont classés en deux catégories :

- La catégorie A correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiment ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C sont tolérées.
- La catégorie B est destinée à de bons bétons ainsi ceux pouvant situés dans un environnement agressif.
- La catégorie C et D convient pour les bétons courants [9].

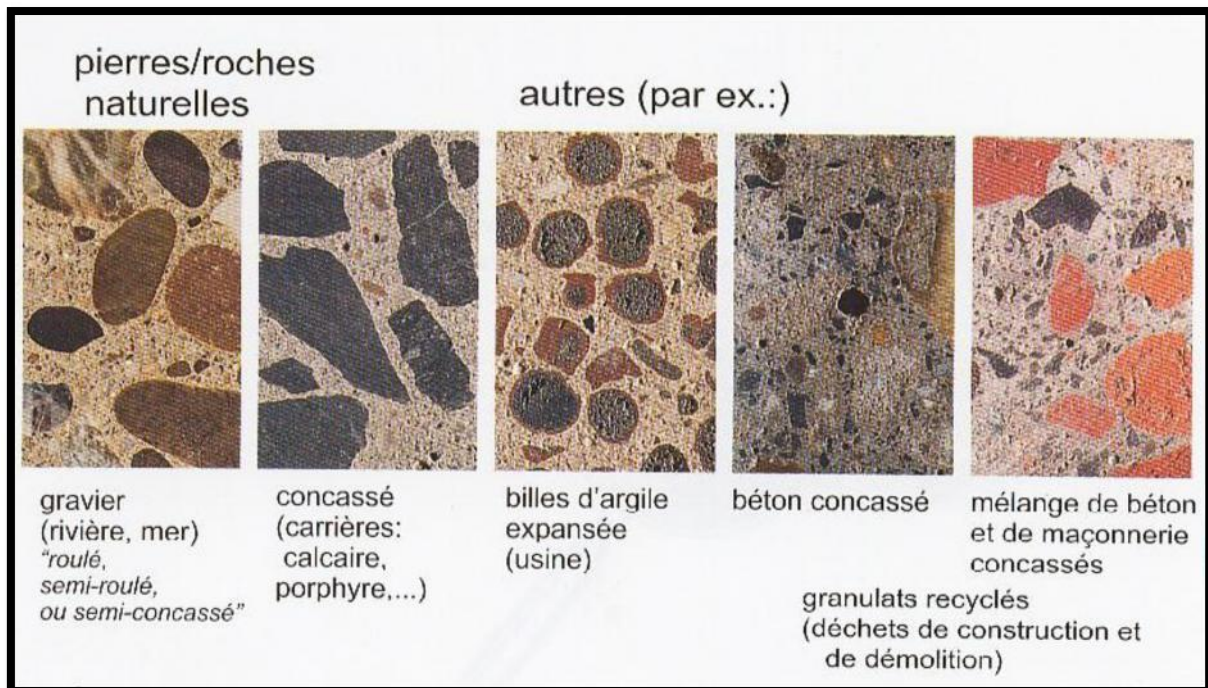


Figure I.5: Différents types de granulats [DEGEIMBRE (2003)].

❖ **Forme des granulats**

Les granulats ont généralement différentes formes comme l'indique la **figure (I.6)**

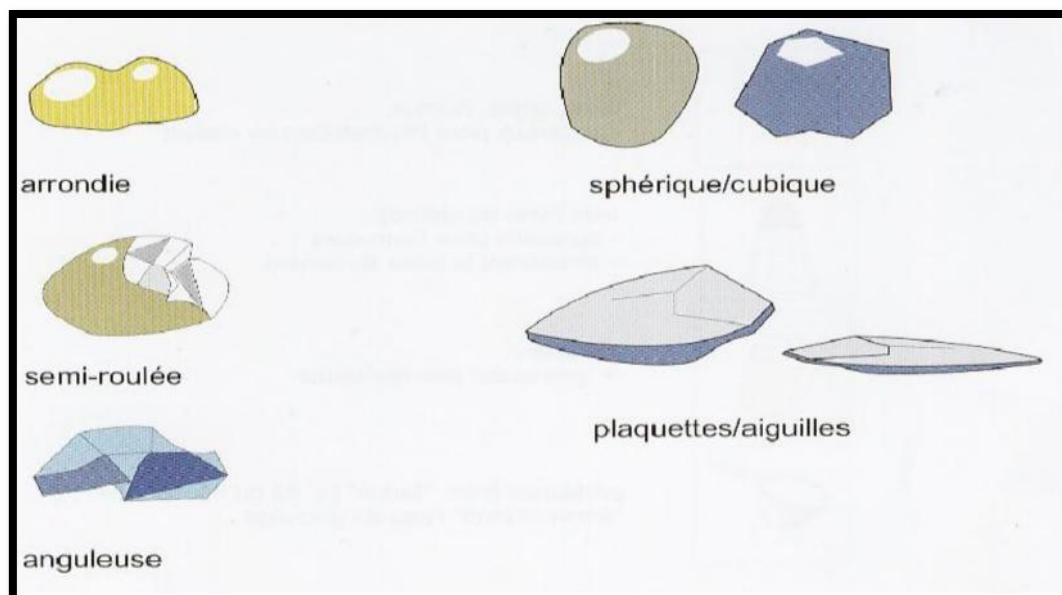


Figure I.6 : Différentes formes de granulats [DEGEIMBRE (2003)].

I.4.4 Sable

Les grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 2 mm. Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau. Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs. Le sable de sablière présenté en **figure (I.7)** est mono granulaire. Pour cette raison, il ne convient pas à priori pour faire du béton [DEGEIMBRE (2003)].



Figure I.7: Types de sable [DEGEIMBRE (2003)].

I.4.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, sont incorporés dans les bétons lors de leurs malaxages ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids du ciment. Ils provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvant dans le commerce sont des liquides. Certains adjuvants existent en poudre [9].



Figure I.8: L'adjuvant [4]

I.4.5.1 Types d'adjuvants

Ils existent plusieurs types d'adjuvants, on peut citer :

) Adjuvants réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité.

) Entraineurs d'air

Ils se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage. Ils permettent comme leur nom l'indique, d'entraîner à l'intérieur du béton des microbulles d'air parfaitement réparties, qui servent de vase d'expansion dans le béton durci, ils améliorent essentiellement :

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton
- La résistance au gel du béton durci

) Les accélérateurs

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment ; cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froid ou pour les travaux urgents. On distingue :

- Les accélérateurs de prises : utilisés surtout par temps froid

- Les accélérateurs de durcissement : employés afin de réduire certains délais pour décoffrer.

) **Les retardateurs**

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps d'hydratation et le début de prise du ciment. Les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales

Ces produits sont employés en particulier :

- Pour les bétonnages par temps très chaud ;
- Pour les transports de béton sur une grande distance ;
- Pour des reprises de bétonnage.

) **Hydrofuges**

Ce sont des adjuvants qui, introduit dans la masse du béton, leurs fonctions principales est de diminuer l'absorption capillaire.

I.5 Types de béton

Le béton varie en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

I.5.1 Les bétons courants

Ce sont des bétons les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2200 kg/m^3 et 2500 kg/m^3 pour les bétons armés.

I.5.2 Béton de haute performance (BHP)

C'est au début des années 1980 que les bétons de hautes performances (BHP) ont vu le jour. Ces bétons, dont la résistance à la compression dépasse les 60 MPa, sont de plus en plus utilisés dans des structures importantes. Les BHP possèdent de très bonnes propriétés de compacité, d'étanchéité et de durabilité par comparaison à un béton ordinaire. Malgré tous ces avantages, le béton reste un matériau fragile ayant une faible résistance à la traction surtout pour les BHP où l'augmentation de la résistance à la compression est accompagnée par une fragilité excessive qui freine leur développement [4].

Ces propriétés ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant :

- Les granulats qui doivent être de très bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes ;
- L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super-fluidifiants réducteurs d'eau ainsi que des fumés de silice, ces derniers s'avérant indispensables dès que la résistance recherchée est supérieure à 80 MPa ;

- L'emploi du ciment de classe élevée (52,5 MPa) à des dosages généralement compris entre 400 et 450 Kg /m³.

Concernant les techniques de fabrication et de mise en œuvre de ces bétons, ils indiquent que la durée de malaxage doit être généralement prolongée par rapport à celle des bétons courants [9].

I.5.3 Le béton auto plaçant (BAP)

Les bétons auto-plaçant (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de super-plastifiant et l'augmentation du volume de pâte pour assurer une bonne dispersion des gros granulats. Pour assurer un volume de pâte suffisant deux possibilités sont offertes: la première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration par une exo-thermicité importante, sur le plan technique. La deuxième voie consiste en l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous-produits ou des déchets [10].

I.5.4 Les bétons spéciaux

❖ Les bétons de granulats légers

Ces types de matériaux sont surtout employés en préfabrication pour leurs qualités : la légèreté, le pouvoir isolant, l'amplitude à se travailler après durcissement. Parmi les principales applications des bétons légers on peut citer: les tabliers de pont, les passerelles, les coques de couverture pour bâtiments industriels, etc.

❖ Les bétons lourds

La fabrication des bétons lourds a déjà été depuis longtemps, envisagée mais l'emploi de ces bétons était très limité en raison du coût élevé de leurs granulats, on les utilise pour les contrepoids. Le développement de l'énergie nucléaire a donné à cette question une importance nouvelle par la nécessité de créer des écrans de protection biologique contre les radiations atomiques, neutrons et rayons gamma en particulier.

❖ Les bétons cellulaires

Il ne s'agit pas de bétons à proprement parler mais plutôt de mortier. Ce dernier est constitué d'un mélange de ciment et d'un granulat fin (sable naturelle siliceux ou sable artificiel de granulat léger). On additionne à ce mortier gâché un fluide :

- Soit une matière génératrice de gaz en présence du ciment
- Soit un produit moussant à base de savon ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de petites bulles, ce qui donne un béton mousse pouvant répondre aux problèmes d'isolation dans le bâtiment.

❖ Les bétons réfractaires

Ce sont des bétons capables de résister à des températures élevées (cheminées, fours sidérurgiques, etc.) [5].

❖ Béton de fibre

Le béton de fibre est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibre isolée [11].

Il y'a longtemps que l'on a cherché à améliorer la résistance à la traction des bétons de ciment (ou des mortier) en y incorporant des fibres résistantes; les plaques de « fibrociment » sont un exemple bien connu de mortier de ciment comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction.

Parmi les principales applications des bétons de fibres, on peut citer :

- Les structures hydrauliques et portuaires, barrages, retenues d'eaux,
- Piste d'atterrissage, revêtements de voies et parking, quais d'entrepôt,
- Bétons projetés (tunnels, pentes) et pieux forés, plates-formes de ponts,
- Panneaux de façades, corniches, cloisons...,
- Eléments préfabriqués de structure (voussoirs, pannes...),
- Plancher industriel, coque de coupole, chapes,
- Les structures soumises à des explosions et les ouvrages parasismiques [9].

La nature des fibres peut avoir une incidence sur une telle ou telle propriété du béton, de sorte que leur choix dépend en partie des applications auxquelles elles sont destinées.

❖ Le béton projeté

Il est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projetés grâce à l'air comprimé.

On distingue deux techniques de projection :

➤ Projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage)

Le mélange de ciment et de granulats, sans eau, est entraîné par air comprimé dans le conduit qui relie le malaxeur à la lance. L'eau n'est ajoutée qu'en dernière minute à l'extrémité de la lance pour hydrater le mélange sec. Cette méthode permet de mettre peu d'eau et assure grâce à la vitesse de projection un bon compactage du béton.

➤ Par voie mouillée ou humide

Le mélange de ciment et de granulats est mouillé dans le malaxeur, comme pour le béton courant, puis véhiculé jusqu'à la lance par pompage ou par air comprimé [12].

I.6 Avantages et inconvénients du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, ainsi sa durabilité avec une durée de vie comprise entre 40 et 90 ans. La formulation du béton est modifiable et adaptable aux contraintes de tout type de structure. Ses performances constamment améliorées rendent ce matériau prédominant dans les ouvrages modernes, [13] et aussi sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en

compression, et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.... [12]. Mais, à côté de ces avantages, le béton a un énorme impact sur l'environnement. Pour fabriquer des milliards de tonnes de béton chaque année, il faut autant de ressources naturelles. Bien évidemment, cette fabrication demande une grande quantité de ciment qui rejette dans l'atmosphère une tonne de CO₂ pour chaque tonne de ciment fabriqué. Enfin, la démolition et la dégradation des structures en béton créent également des problèmes pour l'environnement. Ces inconvénients montrent bien que le béton nécessite des améliorations.

Beaucoup de recherches sont menées pour répondre aux désavantages de l'industrie du béton, une des pistes est l'utilisation de sous-produits pour améliorer le système cimentaire en progrès depuis des décennies. 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 (CO₂), tout en améliorant les propriétés physico-chimiques et mécaniques.

I.7 Domaine d'application du béton

- **Le bâtiment :** Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements), écoles, hôpitaux... aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (usines, ateliers, commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socioculturelles, sportives ou de loisir...). Ses qualités lui permettent de répondre aux exigences des différentes parties de la construction :
 -) Structure
 -) Enveloppe
 -) Plancher
 -) Couverture
- **Les ponts :** Les progrès techniques et, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant 800 m pour les ponts haubanés.
- **Les tunnels :** Pour les tunnels, le béton est soit coulé en place, soit utilisé sous forme de voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer « le tunnelier » et permettent de chemiser la galerie.
- **Les barrages :** Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.
- **Les routes :** La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface, ainsi que dans les pistes de chars et d'aérodromes. Les voiries à faible trafic montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

- **Autres ouvrages :** Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et de durabilité élevées.

CHAPITRE II

LES DECHETS

II. CHAPITRE II : LES DECHETS**II.1 INTRODUCTION**

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique. Donc plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction et spécialement dans le ciment ou béton comme poudre, fibres ou agrégats.

Les sources de déchets sont nombreuses et variées : activité des ménages (ordures ménagères, déchets encombrants...), commerces (emballages, invendus...), activités de soins (déchets hospitaliers, médicaments...), industries diverses, bâtiment et travaux publics, agriculture (élevage, cultures, engrais, produits phytosanitaires...), effluents liquides (boues d'épuration, matières de vidange...) résidus de traitement (cendre volantes, mâchefers, déchets ultimes...). La liste est longue, le gisement hétérogène est diffus. Parce qu'ils sont une conséquence de notre mode de vie dans un monde développé, ils ne cessent de croître en quantité, en nocivité et en complexité.

L'augmentation de leur quantité résulte pour une part de l'évolution des processus de production, des méthodes de marketing et des modes de consommation.

L'augmentation de leur complexité est souvent due, paradoxalement, à l'évolution de la réglementation qui améliore de plus en plus la protection de l'environnement au prix d'un accroissement du nombre d'équipements de dépollution qui créent un flux important de déchets dangereux, tandis que l'appréciation de plus en plus sévère des risques liés aux déchets conduit à en traiter une plus grande quantité. Ceci se traduit finalement par l'augmentation du flux des déchets ultimes qui résultent du traitement ou de la valorisation. [14]

II.2 DEFINITIONS DES CONCEPTS

Les déchets au sens de la réglementation algérienne comprennent trois grandes catégories :

- Les déchets ménagers et assimilés.
- Les déchets spéciaux (industriels, agricoles, soins, services, ...)
- Les déchets inertes.

La définition des différents types des déchets et des modes de traitement pouvant varier d'un pays à l'autre, il est nécessaire de définir précisément les termes que nous utiliserons par la suite.

) Les déchets

Ce sont les résidus d'un processus de production, de transformation ou de consommation, dont le propriétaire ou le détenteur a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.

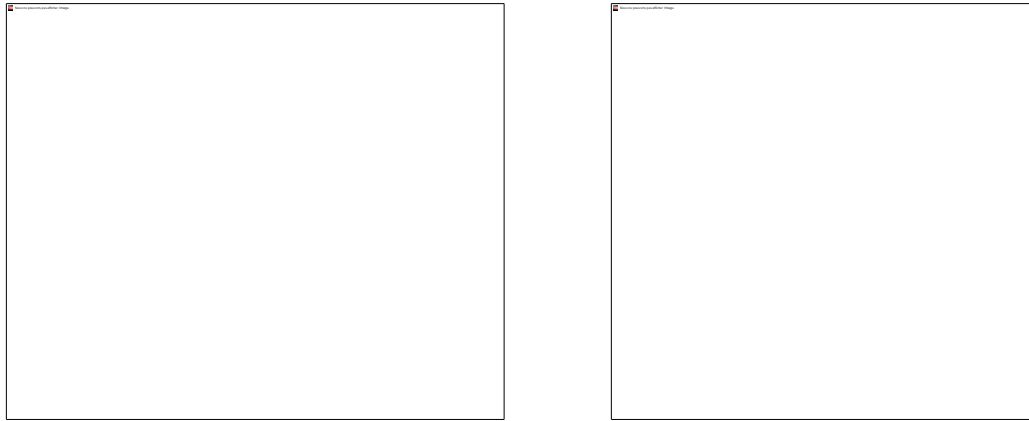


Figure II.1 : Déchets de verre jetés dans la nature [15].

➤ Les déchèteries

Les déchèteries, équipement créés, exploités et financés par les collectivités locales, sont essentiellement destinées à la collecte et au traitement des déchets provenant des particuliers [16].

II.3 LES TYPE DE DECHETS**❖ Les déchets solides urbains**

Ils sont définis par l'article 2 du décret n° 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement des déchets solides urbains qui sont les déchets domestiques et qui sont assimilables par la nature et le volume. Il s'agit notamment :

- ✓ Des ordures ménagères industrielles ou collectives,
- ✓ Des produits résultant du nettoyage tels que balayage, curage des égouts,
- ✓ Des déchets encombrants, objets volumineux, ferrailles, gravats, décombres, carcasses automobiles,
- ✓ Des déchets anatomiques ou infectieux provenant des hôpitaux, chimiques ou autres de soins,
- ✓ Des déchets issus d'abattoirs,
- ✓ Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales.

❖ Déchets ménagers et assimilés

Ce sont les déchets issus des ménages, des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres, qui sont assimilables aux déchets ménagers par leur nature et leur composition, tel que, déchets de cuisine, emballages...etc.

❖ Déchets encombrants

Ce sont les déchets issus des ménages qui ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés en raison de leur caractère volumineux. Nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager...

❖ Déchets spéciaux

Ce sont les déchets qui ne sont pas assimilés aux déchets ménagers, et qui nécessitent un mode spécifique de traitement en raison de leur nature et de leur composition. L'origine de ces déchets est l'activité industrielle, agricole, les soins, les services et toutes autres activités, qui ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés. Il existe un cas particulier des déchets spéciaux, qui sont l'introduction générale E susceptibles de nuire à la santé publique et à l'environnement via leurs constituants ou par leurs matières nocives, on parle ici de déchets spéciaux dangereux.

❖ Déchets d'activité de soins

Ce sont des déchets spéciaux issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.

❖ Déchets inertes

Ce sont notamment, les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge. Ces déchets proviennent de l'exploitation des mines, des carrières, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation. Ils ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et à l'environnement.

II.4 LA GESTION DES DECHETS

Elle consiste en toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie :

- ✓ **La collecte des déchets** est l'opération de ramassage et/ou le regroupement des déchets en vue de les transférer vers un lieu de traitement.
- ✓ **Le tri des déchets** est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, plastique...
- ✓ **La valorisation des déchets** est la réutilisation, le recyclage ou le compostage des déchets. Le recyclage consiste à valoriser des produits de déchets usés. Le compostage est un processus biologique dans lequel les déchets organiques sont transformés par les microorganismes du sol en un produit stable et hygiénique appelé compost.

- ✓ **L'élimination des déchets** comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet. Immersion des déchets : tout rejet de déchets dans le milieu aquatique. Enfouissement des déchets : tout stockage des déchets en sous-sol. L'incinération est un processus d'oxydation de la partie combustible du déchet dans une unité adaptée aux caractéristiques variables des déchets. Ce processus permet une forte réduction de volume des déchets à éliminer.

- ✓ **L'enfouissement technique** : Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère dangereux et polluant. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles [17].

II.5 GISEMENT DES DECHETS RECYCLABLES

Selon les services de MATE, l'Algérie a la capacité de récupérer une quantité de déchets estimée à 760 000 tonnes par an, ce qui représente 3.5 milliards de Da, dont le papier représente une partie essentielle dans la possibilité de récupération et de recyclage avec une quantité de 385 000 tonnes par an (le système de récupération des journaux non vendus). Sur plus de 2 millions de tonnes d'emballage plastique produit en Algérie par 192 unités, seulement 4 000 tonnes sont récupérées (soit 0,0002%).

Tableau II.1 : Capacité de recyclage. (Source : MATE 2004).

Nature des déchets	Quantité tonne/an
Papier	385.000
Plastique	130.000
Métaux	100.000
Verre	50.000
Matière diverse	95.000
Total	760.000

II.6 LE RECYCLAGE

C'est un procédé de traitement des métaux, plastiques, déchets (déchet industriel ou ordures ménagères) qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication. L'un des exemples qui illustre ce procédé est celui de la fabrication

de bouteilles neuves avec le verre de bouteilles usagées, même s'il est considérablement moins efficace énergétiquement que le système des récipients de verre consignés (lait, eau minérale, vinaigre, huile, vin, pots de yaourts...) dans les années 1950.

Le recyclage à deux conséquences écologiques majeures :

-) La réduction du volume de déchets, et donc de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voir des siècles, pour se dégrader).
-) La préservation des ressources naturelles, puisque la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

II.7 LA NATURE DES DECHETS

➤ Le carton

Le carton est largement utilisé aujourd'hui pour le conditionnement de la nourriture et de divers équipements. Ce matériau représente plus de 30% des déchets municipaux (David, Salvador et al. 2003).

Le recyclage n'est pas toujours possible, soit c'est difficile lors du tri, soit c'est le matériau qui est trop sale. Le carton est fabriqué à partir du bois et il est essentiellement formé de cellulose et d'air, ce qui lui permet d'avoir une masse volumique comprise entre 1,1 et 1,3 g.cm⁻³. Les caractéristiques fondamentales du carton varient en fonction de l'origine des fibres de cellulose, du mode d'élaboration de la pâte et des traitements qu'il subit. [18]

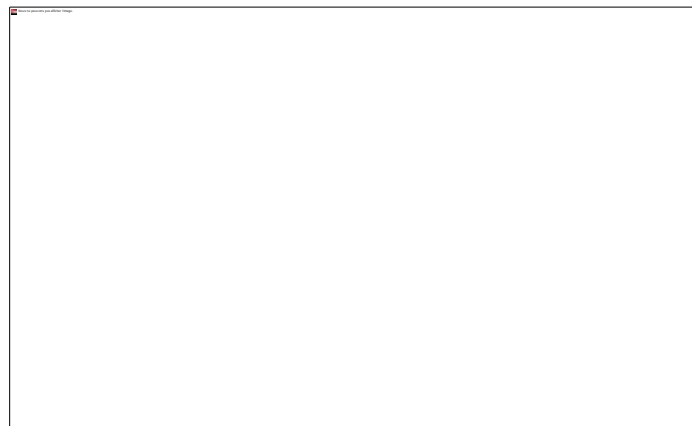


Figure II.2: Déchets carton

➤ Acier et Ferrailles

Les métaux ferreux et plus particulièrement l'acier sont liés à l'ère industrielle. Ils ont des caractéristiques particulières :

-) Une propriété fondamentale, le magnétisme, utilisé pour leur séparation d'un stock de déchets, permet de les récupérer même s'ils ne sont pas triés à la source et quel que soit le mode de traitement de ces déchets, hormis la mise en décharge sauvage.
-) La grande quantité produite

-) Un traitement de recyclage qui requiert des installations moins importantes que les hauts fourneaux utilisés pour le minerai. L'acier peut, en effet, être fabriqué indifféremment par les aciéries qui traitent le minerai par production de fonte ou par des aciéries électriques étiques, qui traitent les ferrailles à recycler. Cette dernière est plus économique : elle consomme trois fois moins d'énergie que la filière dite de « conversion ». Exclusivement réservée aux ferrailles, elle n'utilise pas de minerai et consomme beaucoup moins d'eau.

➤ **Les Inertes**

Les inertes sont des déchets non polluants, chimiquement stables dans le temps et donc neutres pour l'environnement. Mais ils sont produits en grande quantité et leur accumulation pourrait avoir un impact significatif. Ils sont facilement valorisables.

Deux sources principales :

-) Le bâtiment et les travaux publics : déchets de démolition, de construction étude terrassement
-) Les industries extractives minérales (carrières, mines)

➤ **Les déchets marins (les coquilles de mer)**

Des travaux ont été initiés pour recycler les déchets marins tels que les coquilles de mer ces dernières années. Les résultats de caractérisation de ce type de déchets à montrer qu'ils contiennent un pourcentage élevé en oxyde de calcium (CaO), ils ont conclu que ces coquilles peuvent être comme source appropriée de matières premières pour la production de suppléments de calcium par l'industrie alimentaire indigène.

L'utilisation d'huîtres et de coquilles pour le traitement de l'eau contaminée par l'arsenic et par d'autres métaux lourds a été aussi démontrée par les auteurs Badmus et al. Ces déchets ont été utilisés pour la production d'adsorbants pour le traitement de l'hypertension COD et l'élimination du plomb dans les eaux usées industrielles [18].

Une des utilisations prometteuses des déchets de coquilles est comme granulats (gravillons) dans le béton ou ajout filler dans la fabrication du ciment aux ajouts, dans le domaine des matériaux de construction.

Une étude a été récemment menée par Dang Nguyen et al [19], pour recycler les coquilles de mer comme gros granulats pour la fabrication du béton ordinaire [20].

➤ **Le plastique**

Les applications sur l'utilisation du plastique sont étendues. Certains articles en plastique tels que les emballages alimentaires deviennent des déchets juste après leurs achats. D'autres articles en plastique peuvent être réutilisés plusieurs fois. La réutilisation des plastiques est préférable au recyclage car elle consomme des quantités moindres d'énergie et des ressources. En plus de la nécessité réduire les quantités des déchets en plastique par élimination.



Figure II.3 : Déchets plastiques

➤ **Le bois**

Les déchets en bois ont plusieurs origines :

-) L'exploitation forestière : souvent brûlés sur place (branchages, écorces,...), ou laissés à l'abandon (sciures), la nature faisant le reste.
-) Les industries de première transformation : chutes de scieries.
-) Les industries de deuxième transformation (menuiseries, charpentes,...) où les déchets de bois peuvent avoir été traités et doivent alors entrer dans des circuits de traitements spécifiques.
-) Les objets en bois ou partiellement en bois, parvenus ou non en fin de vie et dont le propriétaire se débarrasse : ces déchets peuvent être aussi composés de bois traités.
-) La restauration de mobilier ancien, méthode de traitement d'une forme de déchet en bois qui en génère elle-même d'autres. Il peut s'agir également de bois traités.

II.8 LE VERRE

Le verre est un matériau unique en son genre tant par sa structure que par ses propriétés. Il est présent à tous les stades de vie de l'homme et cela depuis des siècles. Son usage sous des formes diverses et variées ont fait de lui l'un des matériaux le plus utilisé par l'homme.

Le verre trouve sa place à la maison (vaisselle, emballages, décoration, télévision, vitres, etc.), dans les transports (pare-brise, rétroviseurs, etc.), au bureau (écran, photocopieuse, etc.) ainsi que dans nombreux autres lieux. Les objets en verre hors d'usage sont abandonnés et deviennent des déchets, tels qu'ils sont définis par la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux.

Le verre, par son recyclage, constitue une source de matière première secondaire pour de nombreuses applications. Cette idée chemine depuis longtemps dans les universités, d'ailleurs, les premières recherches pour incorporer le verre au béton datent des années 1960 (Shi et Zheng 2007).

II.8.1 Historique

Le verre était connu dans l'antiquité (3.500 avant J.C en Egypte) mais ne fut utilisé comme vitre qu'à partir du 17^{ème} siècle. L'industrie de miroiterie florissante à Venise, puis en France, utilisait des techniques délicates et secrètes, aujourd'hui dépassées.

Le verre est devenu un matériau architectural, et son emploi s'accroît de plus en plus dans la construction sous des formes variées : vitre pour baies, toiture, glasses pour vitrines, blocs de verre pour dallages, cloisons, murs...etc. [21].

II.8.2 Définition

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable). Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe, c'est à dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance. Il peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal figure (II.3), mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. Comparons, par exemple, la structure de la silice (SiO_2) cristalline (sous sa forme Cristobalite) et celle de la silice vitreuse figure (II.4).

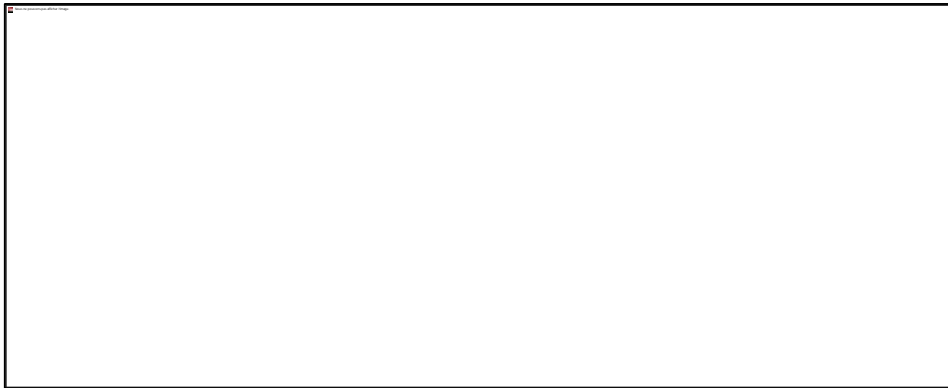


Figure II.4: Représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) [Philip Gibbs (1996)].

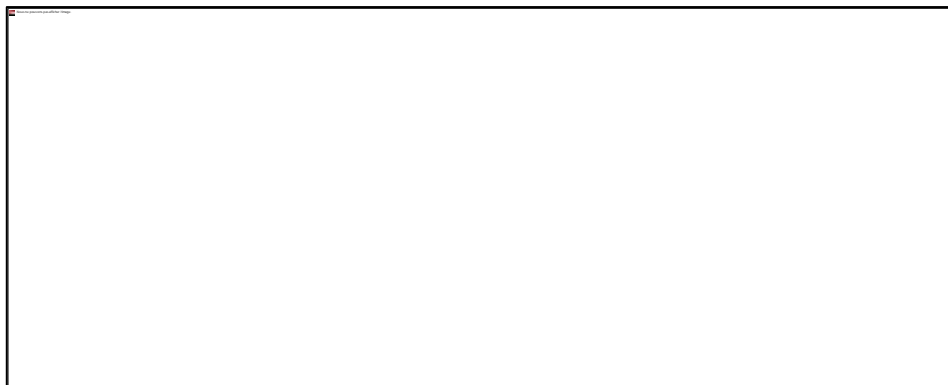


Figure II.5: représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse [Philip Gibbs (1996)].

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres SiO_4 ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de

l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques SiO_4 , la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques SiO_4 .

II.8.3 Composition chimique du verre

La composition des verres dépend des propriétés recherchées et du mode de fabrication, l'ingrédient de base est la silice issue du sable ou du quartz. Les verres sont constitués des tétraèdres SiO_4 qui s'enchainent les uns aux autres par leurs sommets pour donner la silice SiO_2 . La silice portée à son point de fusion, retrouve difficilement sa structure cristalline au refroidissement et tend vers une structure amorphe.

Les cinq oxydes essentiels qui rentrent dans la fabrication du verre sont les mêmes et sont : CaO , MgO , Al_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 . D'autres produits (généralement des oxydes) peuvent être ajoutés aux verres en fonction de l'application recherchée afin de modifier ses propriétés chimiques, physiques ou mécaniques telle que la viscosité et la durabilité chimique.

La composition chimique du verre, dépend des conditions d'utilisation (chimique et mécanique). Chaque domaine exige une composition bien spécifique.

II.8.4 Propriétés du verre

II.8.4.1 Propriétés physiques

➤ **La densité :** La densité du verre dépend de sa composition et jusqu'à un certain degré de son passé thermique. Le verre à l'état solide ne possède qu'une faible dilatation thermique et lorsqu'il commence à se ramollir (dans la zone de transformation) sa densité diminue très rapidement.

Tableau II.2: Valeurs de densité des différents types de verre [22].

Type de verre	Densité (g/cm^3)
Verre de quartz	2.21
Glasses	2.49
Verre armé	2.59
Verre creux et verre pressé	2.46
Verre au plomb (demi lourd)	3.00
Verre pour appareils optiques	2.34

➤ **La porosité et l'absorption de l'eau :** Les valeurs de ces caractéristiques physiques, déterminées suivant la procédure européenne normalisée NF EN 1097-6 sont indiquées dans le (Tableau II.3).

Tableau II.3: Propriétés physiques du verre [22].

Le granulat	La volumique (g/cm ³)	masse	L'absorption d'eau (%)	La porosité (%)
Le verre	2.31		1.34	0.03

➤ **La surface spécifique :** La mesure de la surface spécifique est importante parce que de nombreux processus physiques et chimiques se déroulent à la surface des solides. Elle pourrait être un indicateur de réaction alcali-silice ou pouzzolanique selon qu'elle est petite ou très grande. Elle est petite lorsque la taille des granulats est grande (favorisant la réaction alcali-silice) et grande lorsque la taille des granulats est très petite (favorisant la réaction pouzzolanique).

➤ **La morphologie des grains :** Le temps de broyage modifie la morphologie des granulats de verre. En effet, plus les particules sont broyées plus elles perdent leur forme allongée et deviennent arrondies, à faciès sans arêtes [22].

II.8.4.2 Propriétés mécaniques

Le verre est un corps fragile qui n'admet pas de changement de formes notables, provoquées par la pression, les chocs ou les coups. La grande dispersion des valeurs dépend de la résistance des verres. On suppose que dans la structure du verre, il y a des failles de réseau qui agissent comme des entailles et diminuent fortement la résistance locale. Des rayures et des fissures à peine visibles diminuent fortement la résistance. La durée et la vitesse de l'effort exercé sur le verre ont une influence remarquable [23].

II.8.4.3 Propriétés électriques

Les verres ne sont pas conducteurs d'électrons comme les métaux, mais ce sont des conducteurs d'ions. A noter que la constante diélectrique d'un verre normal est entre 5 et 7 [23].

A l'état solide et sec, les verres sont d'excellents isolants et diélectriques, mais il suffit que la surface du verre entre un instant en contact avec la vapeur d'eau pour que la résistance électrique diminue et qu'il y ait conductivité superficielle. Ces notamment le cas pour les verres riches en alcalis. De 200 à 300°C, la conductivité électrique du verre augmente fortement, aux hautes températures elle atteint une valeur considérable.

II.8.4.4 Fragilité

La fragilité aux variations de température s'explique par un coefficient de dilatation élevé et une faible conductivité thermique. Un échauffement localisé provoque la dilatation d'une

partie seulement de la masse d'où les tensions qui provoquent la cassure. Cette fragilité à la chaleur est d'autant plus grande que le verre est épais. Pour les récipients destinés à subir des changements de température, on utilise donc soit des verres très minces, se mettant très vite en équilibre de température, soit des verres peu dilatables (borosilicates) [23].

II.8.4.5 Propriétés chimiques

Étant donné que les verres sont des silicates minéraux, les produits organiques sont pratiquement sans action sur eux (avantage sur de nombreuses matières plastiques). En revanche, ils sont attaqués par les réactifs minéraux tels que l'eau, les acides et les bases. Il y aura toujours des échanges chimiques entre l'eau et le verre. Les cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ... sont dans un état de mobilité relativement grande dans le réseau de silice, ce qui explique la possibilité de leur passage dans les solutions aqueuses qui se trouvent au contact du verre. Les acides attaquent les verres en hydrolysant les liaisons oxygène-métal, mais l'attaque n'est pas profonde car il se forme une pellicule de silice hydratée insoluble. Les bases alcalines ont une action plus énergétique car elles dissolvent la silice elle-même, elles détruisent les liaisons Si-O qui forment le réseau semi-organisé du verre. Donc, avec l'eau et les acides, il y a seulement échange des cations entre le verre et l'eau mais les liaisons Si-O ne sont pas touchées, tandis qu'avec les bases, ces dernières sont attaquées et le verre est totalement détruit [23].

II.9 RECYCLAGE DES VERRES

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier (Saadani, 2006). Il est utilisé sous deux formes principalement : les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

Le verre récupéré : le calcin

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets (ménagers et assimilés, etc.) ou directement à partir de chutes de fabrication, Il est d'abord trié et nettoyé pour éliminer toutes les impuretés. Ensuite, avant d'être introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion, il est broyé très finement.

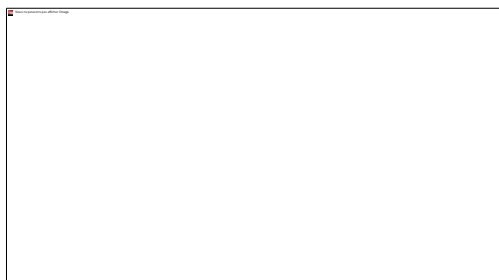


Figure II.6 : Impuretés du verre (papiers, plastiques) [24].**Figure II.7 :** verre débarrassé des ses impuretés [24]

L'utilisation du calcin présente de nombreux avantages pour l'environnement, ainsi que pour le verrier. En effet :

- Elle ne nécessite pas l'extraction de matières premières naturelles et évite la consommation de 60 Kg de fuel par tonne de calcin utilisé pour l'extraction des matières premières naturelles ;
- Elle évite le transport de matières premières naturelles sur de longues distances pour transporter le calcin sur de plus courtes distances. Elle limite donc la pollution atmosphérique due au déplacement ;
- Elle limite le rejet dans l'atmosphère de polluants (dioxyde de carbone et dioxyde de soufre) causé par la fabrication du verre à partir de matières premières naturelles, les matières se trouvant déjà sous la forme d'oxyde (Au moins 200 kg de CO₂ rejeté par tonne de calcin utilisé) ;
- Elle diminue la température de fusion⁷ (le calcin doit être chauffé à une température plus basse que les matières premières naturelles pour être fondu). Ce qui permet une économie de 40 kg de fuel par tonne de calcin utilisé.

Cependant, l'industrie ne peut pas fabriquer de verre uniquement à partir de calcin. Il est nécessaire d'introduire des matières premières naturelles afin de corriger les propriétés du lit de fusion (couleur, propriétés optiques, mécaniques, etc.) et ainsi obtenir une homogénéité dans la qualité du produit fabriqué [25].

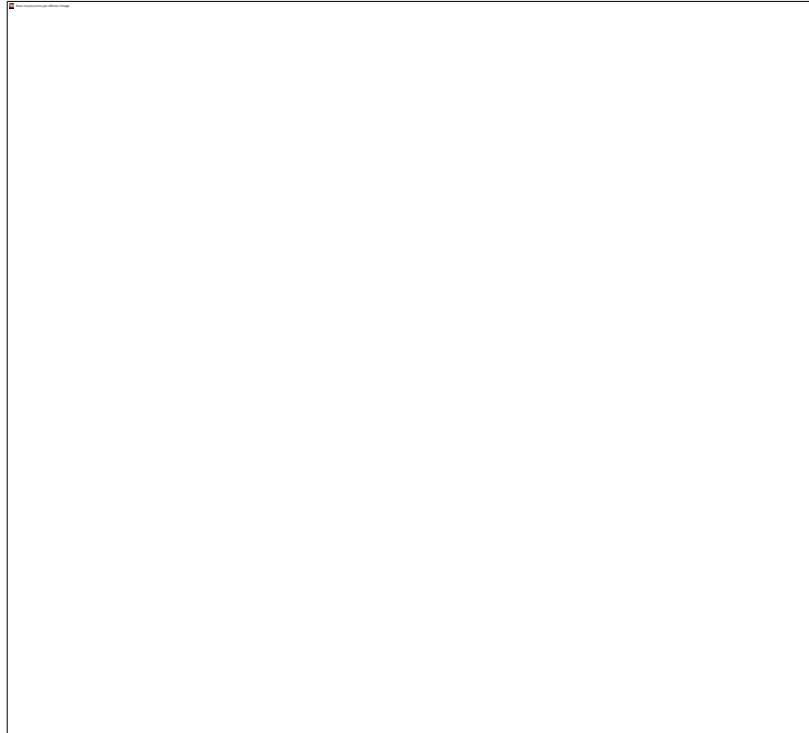


Figure II.8 : Transformation des déchets de verre en poudre de verre [24].

II.10 COMPORTEMENT DU VERRE DANS UN MILIEU CIMENTAIRE

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique [26].

II.10.1 Réaction alcali-silice

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés : silice, alcalin, calcium et hydroxydes et produisent toutes deux des gels amorphes. La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines d'années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives [24].

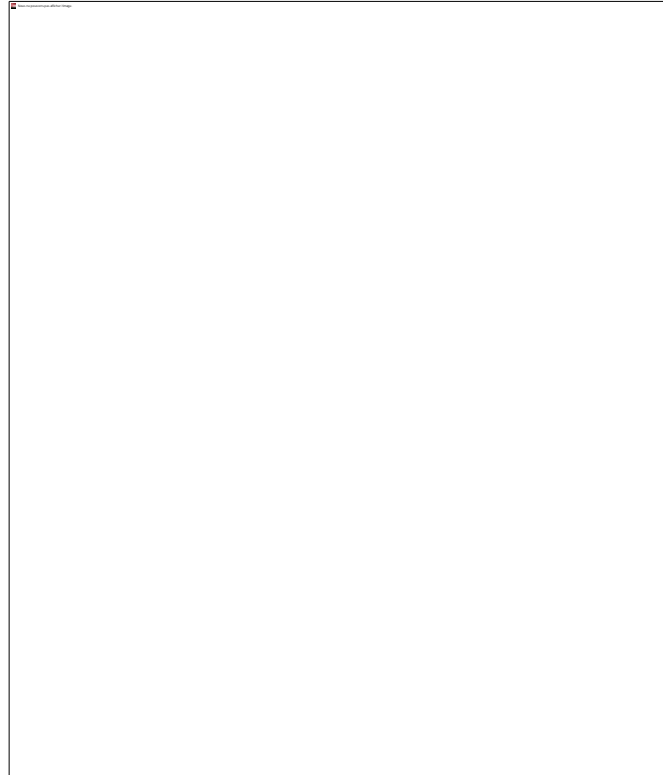


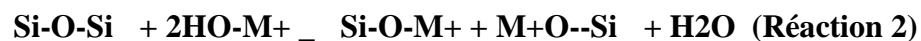
Figure II.9: Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique [24]

II.10.1.1 Mécanismes de la réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines d'années après la fabrication du béton. Les minéraux composant les bétons peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives. Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle [POOLE, 1992] :



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situe plus profondément à lieu ensuite :



Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit [POOLE, 1992] (Figure 1) :



Figure II.10: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [SPRUNG et coll., 1998].

Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle [6]. Des travaux antérieurs ont permis de montrer que la réaction alcali-silice est très affectée par la taille des granulats réactifs conduisant à un impact important sur les gonflements entraînés par la réaction alcali-silice. Cependant la taille des granulats qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de leur nature (Figure II.11).

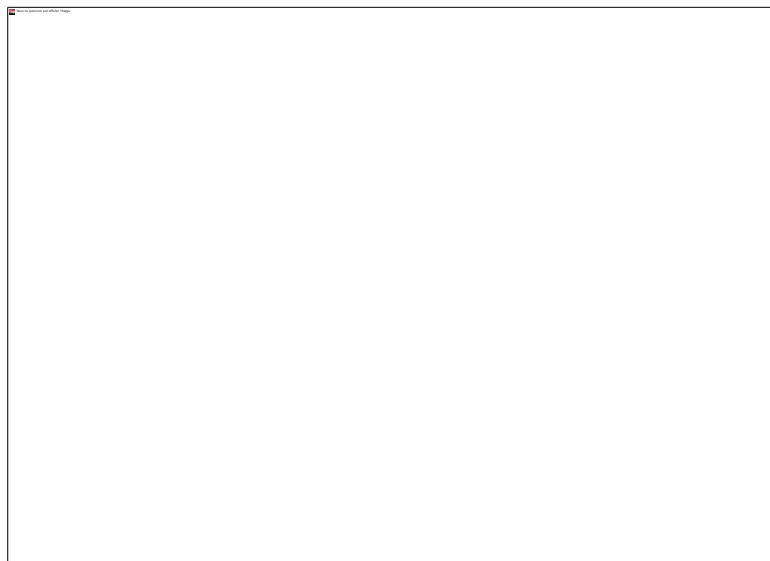


Figure II.11: Fissurations causées par l'alcali réaction [27].

D'autres études ont montré qu'il existe une teneur « pessimum » des granulats réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale, c'est le pessimum du rapport (granulats réactifs/alcalins) dans le béton qui est d'une importance critique.

D'un autre côté, comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température « loi d'Arrhenius » [28].

L'eau est aussi un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espèces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative > 80 % est nécessaire, un rapport eau/ciment de 0,4 provoquerait aussi des expansions (Figure II.12).



Figure II.12: Le cycle de transformation [9].

Ainsi, L'utilisation d'un ciment à basse teneur en alcalins (< 0,6 % Na_2O_{eq}) est recommandé pour éviter ou réduire l'expansion. Hobbs recommande de limiter la quantité d'alcalins dans la composition des bétons à 3 kg/m³. Des inhibiteurs chimiques comme les sels de lithium sont également utilisés pour empêcher cette réaction, probablement en arrêtant la dissolution de la silice. L'utilisation de quantités appropriées de base, comme le NaOH, peut également réduire l'expansion. Le gel d'alcali-silice produit dans ce cas-ci serait trop liquide pour provoquer des pressions internes.

D'après certains auteurs, les agents entraîneurs d'air sont également indiqués pour réduire l'expansion du béton en créant des espaces libres pour les gels. Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolaniques (15 – 30% du poids de ciment) ou l'utilisation des ciments de laitiers.

II.10.2 Réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciments (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité.

L'addition de petites quantités de bases tel NaOH ou une température élevée s'avèrent de bons accélérateurs de la réaction pouzzolanique. La teneur en chaux, le rapport (eau/ciment) du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique [29].

La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + Ca(OH)₂ + Eau => silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés

II.11 ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'UTILISATION DU VERRE DANS LA FORMULATION DU BETON

Le verre – une vaste source de déchet industriel, devient un thème de recherche dans le béton pour quatre raisons principales [Byars *et al.* 2003] :

- Étant un matériau artificiel, la composition chimique du verre est stable et bien définie. Cela permet de prévenir les réactions chimiques inattendues et de modifier ou de traiter le verre si nécessaire. L'aspect chimique est bien donc maîtrisé.
- L'absorption d'eau dans le verre est négligeable voir nulle. C'est un avantage pour la formulation du béton car les autres matériaux naturels comme le gravier ou le sable absorbent plus ou moins une quantité d'eau initiale dépendante de leur nature et leur origine. Grâce à cette propriété du verre, la maniabilité du béton ou le rapport entre eau et liant pourrait être amélioré sans besoin d'ajouter des plastifiants. Cet avantage favorise les propriétés rhéologiques du béton frais.
- Un autre atout du verre est sa résistance abrasive et sa dureté par rapport à celle des granulats naturels. En plus la résistance en compression du verre concassée est bien mentionnée. De ce côté, nous pouvons considérer la nature mécanique du verre concassée comme bien adapté pour l'utilisation comme granulats dans le béton.
- Enfin, l'intérêt le plus important est de profiter de la source de verre recyclé qui augmente de millions de tonnes chaque année dans le monde entier (41 milliards d'objets de verre en moyenne chaque année aux Etats-Unis). Étant un matériau très durable et recyclable à 100% et à l'infini, il est nécessaire de profiter de cette ressource par rapport à l'environnement.

Grâce à ces avantages, l'utilisation du verre dans la fabrication du béton devient un sujet intéressant dans plusieurs pays. Au cours des dernières années, de nombreux progrès ont été apportés à ce sujet. Malgré plusieurs avantages, le verre est chimiquement incompatible avec le ciment et présente un phénomène insurmontable dans le système cimentaire. La réaction alkali-silice (en anglais alkali silice réaction, ou ASR) se produit entre l'alcalin dans le ciment et la silice amorphe dans le verre. Cette réaction crée un gel qui gonfle en présence d'humidité et qui cause dans un premier temps des fissures dans le béton durci. A cause de ce phénomène qui est qualifié de « cancer des bétons », les premières recherches sur l'utilisation du verre n'ont pas été très réussies [Phillips *et al.* 1991].

Exemples d'utilisation de la poudre de verre :

- Béton pour la construction de trottoirs municipaux
- Utilisation de la poudre dans le pavé uni
- Intégration de la poudre de verre dans les peintures, les encres, etc....



Figure II.13: Exemples d'utilisation de la poudre de verre [15].

Exemples d'utilisation d'agrégats de verre :

- Intégration dans les dalles de béton des planchers de succursales
- Paillis de verre pour aménagement paysager

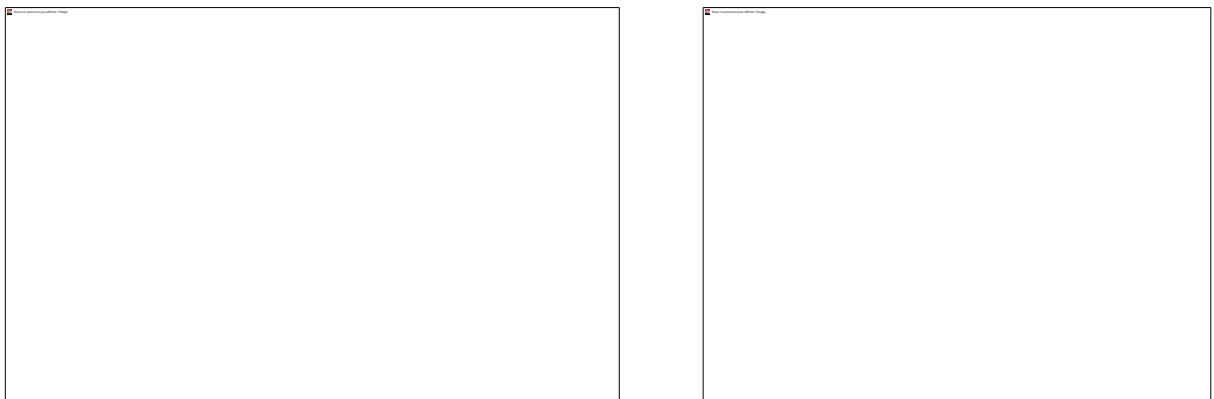


Figure II.14: Exemples d'utilisation d'agrégats de verre [15].

II.12 Conclusion

D'un côté, la construction nécessite des volumes de matière très importants. Son impact environnemental est réel, tant au niveau de l'extraction et de l'utilisation de ressources naturelles qu'au niveau des rejets de gaz à effet de serre.

D'un autre côté, certains secteurs industriels ou résidentiels produisent des volumes de déchets importants. Le choix des filières d'élimination de ces déchets subit des contraintes économiques, juridiques et écologiques croissantes.

L'utilisation de sous-produits industriels en tant que constituants du béton est ainsi une des pistes envisagée pour limiter l'impact environnemental du secteur de la construction et ouvrir

des voies de valorisation à des déchets dont la gestion peut poser problème ou dont la valeur est très faible. En revanche, les matériaux doivent répondre à un certain nombre de critères pour être utilisés dans ce cadre. L'étude de leur comportement en matrice cimentaire est donc une étape primordiale.

Chapitre III :
Etude expérimentale

III. CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE**III.1 INTRODUCTION**

L'élimination de certains déchets est un enjeu important. A l'heure actuelle, il est nécessaire de considérer ces déchets comme un gisement de matériaux alternatifs utilisables. Dans cette étude on s'est intéressé au recyclage du verre dans le béton.

Ce chapitre décrit le détail du programme expérimental réalisé tels que les matériaux utilisés avec leurs propriétés physiques et mécaniques, les différentes formules de béton étudiées, les mesures des propriétés à l'état frais et durci.

La caractérisation de ces propriétés a été réalisée expérimentalement afin de les confronter à celles du béton formulé sans déchets (béton ordinaire). Pour cela, différentes formules de bétons à base du verre recyclés ont été comparées au béton formulé sans déchets.

Un test de propagation des ondes ultrasoniques a été effectué pour estimer la porosité et la connectivité des pores et de déterminer la corrélation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (VOU), Pour estimer la variation du degré de connectivité des pores du béton en fonction du taux des déchets de verre. 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 ; 15%.

III.2 MATERIAUX**III.2.1 Matériaux**

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

III.2.1.1 Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de nature 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 dans des sacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres).

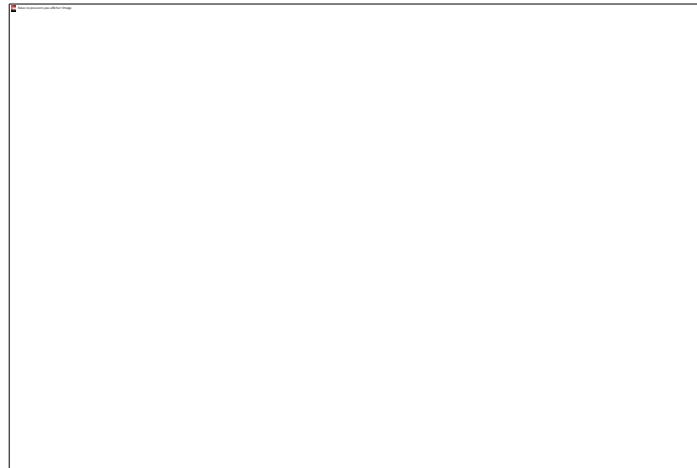


Figure III.1: Sable passé au tamis.



Figure III.2: Les différents granulats utilisés.

III.2.1.2 L'eau

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet (eau potable).

III.2.1.3 Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ CEM II/ 42,5R provenant de LAFARGE d'Alger.

III.2.1.4 Ajouts minérales

❖ La poudre de verre :

La poudre de verre provient essentiellement des déchets de verre de bouteilles colorées. Elles sont ramassées puis lavées et séchées. Le verre est concassé d'une manière traditionnelle

manuellement, les bouts de verre obtenu sont par la suite broyés au niveau du laboratoire de département de Génie Civil de l'université de BOUMERDES.

La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines que nous avons utilisées dans le béton.

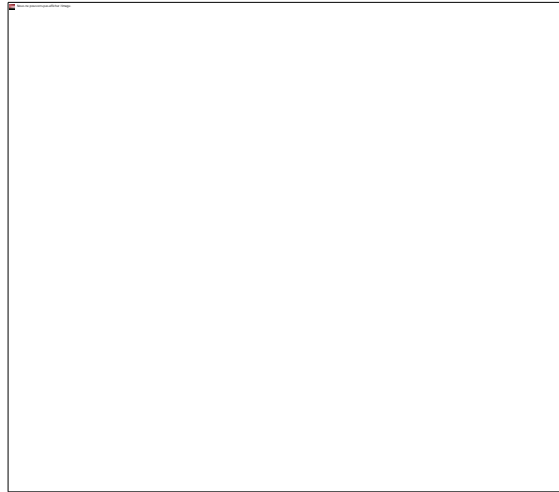


Figure III.3: La poudre de verre utilisée.

❖ **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.4: Déchet de verre ramassé.



Figure III.5: Nettoyage des déchets de verre.



Figure III.6: Séchage et broyage.

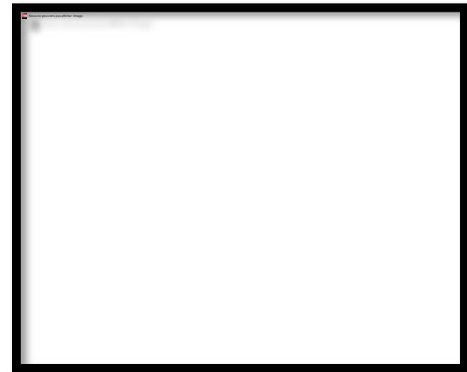


Figure III.7: le sable de verre.

Les différents mélanges sont représentés dans le (tableau III.1) :

Tableau III.1: Mélanges des bétons préparés avec poudre et sable de verre

Mélanges	Ciment	Poudre de verre	Sable (0/3)	Sable de verre
1 ^{er} mélange	95%	5%	100%	0%
2 ^e mélange	95%	5%	95%	5%
3 ^e mélange	95%	5%	90%	10%
4 ^e mélange	95%	5%	85%	15%
5 ^e mélange	90%	10%	100%	0%
6 ^e mélange	90%	10%	95%	5%
7 ^e mélange	90%	10%	90%	10%
8 ^e mélange	90%	10%	85%	15%
9 ^e mélange	85%	15%	100%	0%
1 ^e mélange	85%	15%	95%	5%
1 ^e mélange	85%	15%	90%	10%
1 ^e mélange	85%	15%	85%	15%

III.2.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 et EN 933-2)

L'étude d'une composition de béton consiste à définir le mélange des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [1].

La définition de ces proportions passe d'abord par l'essai de l'analyse granulométrique puis de choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel...etc.

III.2.2.1 Principe de l'essai

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 afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse [2].

III.2.2.2 Equipements utilisés

-) Des tamis de différents diamètres.
-) Un échantillon de **3000 g** pour chaque matériau.
-) Une balance de 5 kg, pesant au gramme près.
-) Une étuve thermostatée.
-) Un vibrotamis électrique.

III.2.2.3 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 séchés à l'étuve à une température maximale de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du haut 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.

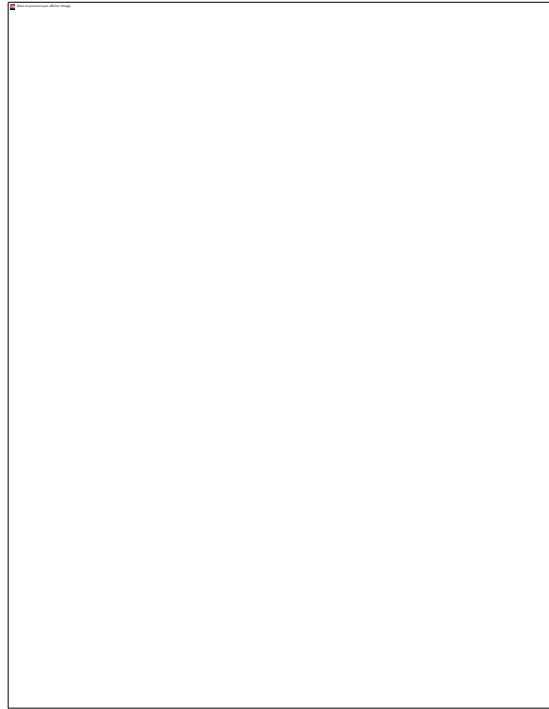


Figure III.8 : Tamiseuse.

Les granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure ci-dessus : résultats de l'essai pour les granulats utilisés (**voir Annexe1**) et nous permettent de tracer les courbes

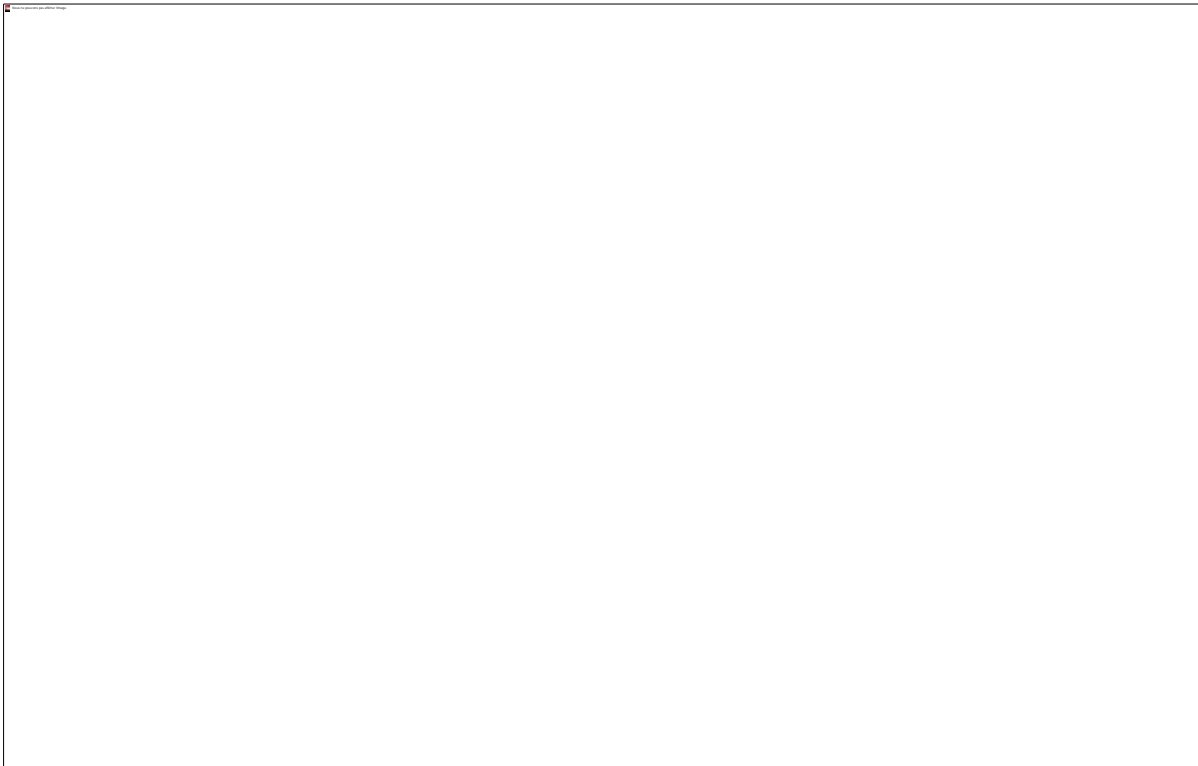


Figure III.9: Courbes granulométriques.

III.2.3 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 indiqués dans le tableau III.2 :

Tableau III.2: Module de finesse du sable.

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

En conclusion, le sable est donc moyen c'est **un bon sable à béton.**

III.2.4 Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555)

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps, le volume absolue ne prend pas en considération les vides inclus et le volume apparent fait intervenir les vides intra et inter-granulaires.

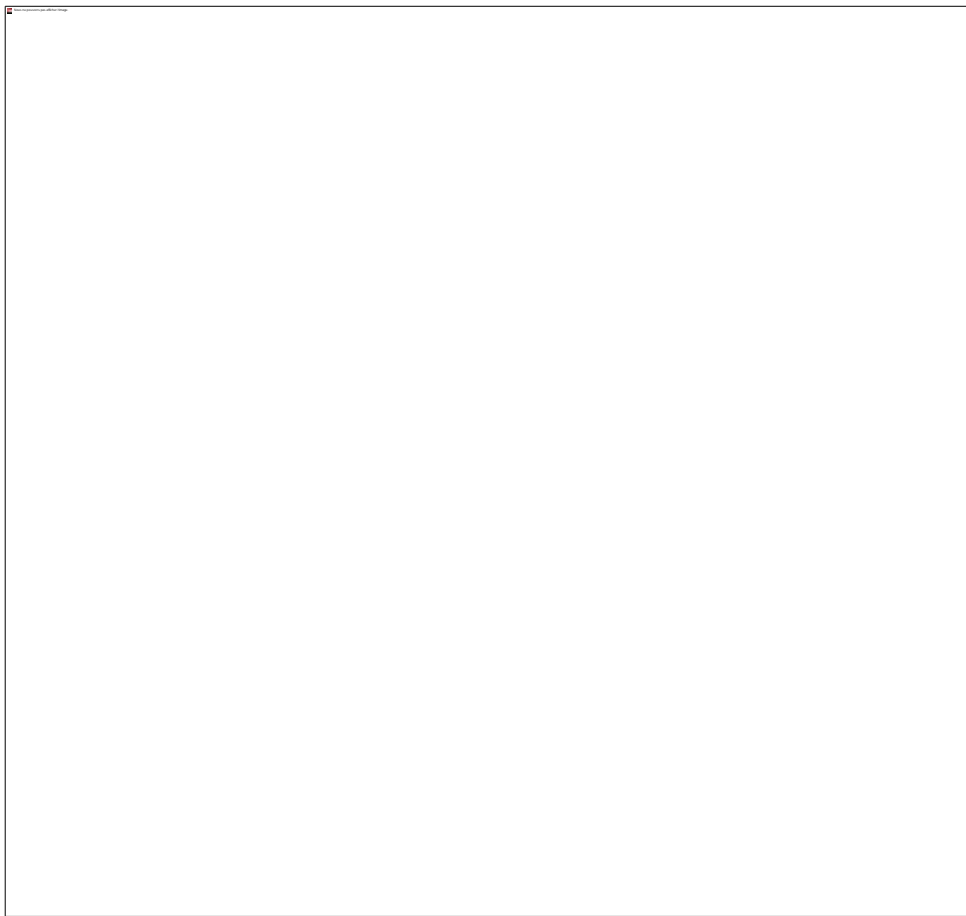


Figure III.10: Essai de la masse volumique.

Les résultats sont indiqués dans le tableau (III.3) :

Tableau III.3: Masse volumique apparente et absolue des granulats.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique absolue (g/c ³)	2,63	2,6	2,72
Masse volumique apparente (g/c ³)	1,485	1,46	1,42

III.2.5 Equivalent de sable (NFP18-598)

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S 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 donc une faible résistance.

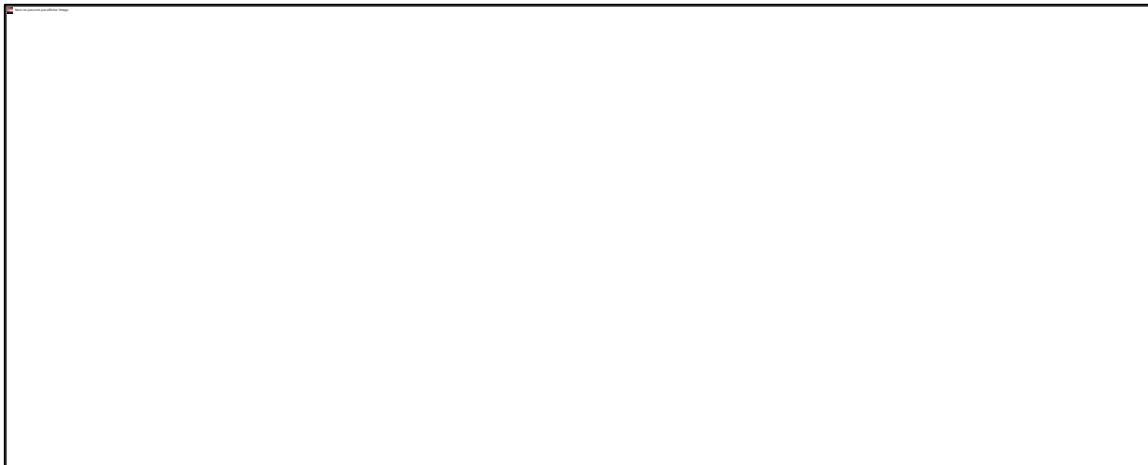


Figure III.11: L'essai d'équivalent du sable.

L'essai a donné les résultats présentés dans le tableau (III.4) :

Tableau III.4: 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 est propre.

III.3 FORMULATION DU BETON ORDINAIRE

Une méthode pratique et simplifiée a été utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire, celle de **DREUX GORISSE**. Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié.

❖ Critère de résistance

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28j} . Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15% à la résistance minimale en compression σ_{28j} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_2 = 1,15 \sigma_2$$

La résistance désirée pour le béton témoin à 28 jours est:

$$\sigma_2 = 2 \text{ M}$$

D'où la résistance moyenne visée pour le béton témoin à 28 jours :

$$\sigma'_2 = 1,15 \times 2 = 2,3 \text{ M}$$

❖ Dosage en ciment et en eau

Le rapport C/E est déterminé grâce à la formule de Bolomey

$$R'_2 = G\sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R'_2}{G\sigma'_c} + 0,5$$

R'_2 : Résistance visée à 28 jours.

σ'_c : Classe vraie de ciment en Mpa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment/ m^3 de béton).

E : Dosage en eau potable (Kg d'eau/ m^3 de béton ou litre d'eau/ m^3 de béton).

❖ Choix approprié du coefficient granulaire G :

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau II.5 ci-après établi par George DREUX.

Tableau III.5 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire.

Qualité granulats	Dimension D des granulats		
	D 16mm	25 D 40mm	D 63mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 16 mm, et sont d'une bonne qualité ce qui donne le coefficient granulaire **G= 0,45**.

❖ **Choix de la classe vraie de ciment**

Parmi la liste des ciments disponibles sur le marché des matériaux de construction, nous avons retenu le ciment CEM CPJII42.5. Sa classe vraie est estimée à 47.5 MPa.

Le rapport est donné par :

Connaissant le rapport : $\frac{C}{E} = \frac{2,7}{0,4 \cdot 5} + 0,5 = 2,0$

❖ **Dosage en ciment par 1m³ de béton :**

Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, grâce à l'abaque, $\frac{C}{E}$ en fonction de A, le dosage en ciment C correspondant:

$$\frac{C}{E}=2,00$$

$$A=6\text{cm}$$

L'abaque donne la valeur du dosage en ciment **C=400kg**. L'abaque permet d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

$$\frac{C}{E}=2,00$$

$$C=400\text{kg}$$

On en déduit la valeur de E qui est : **E=200kg**

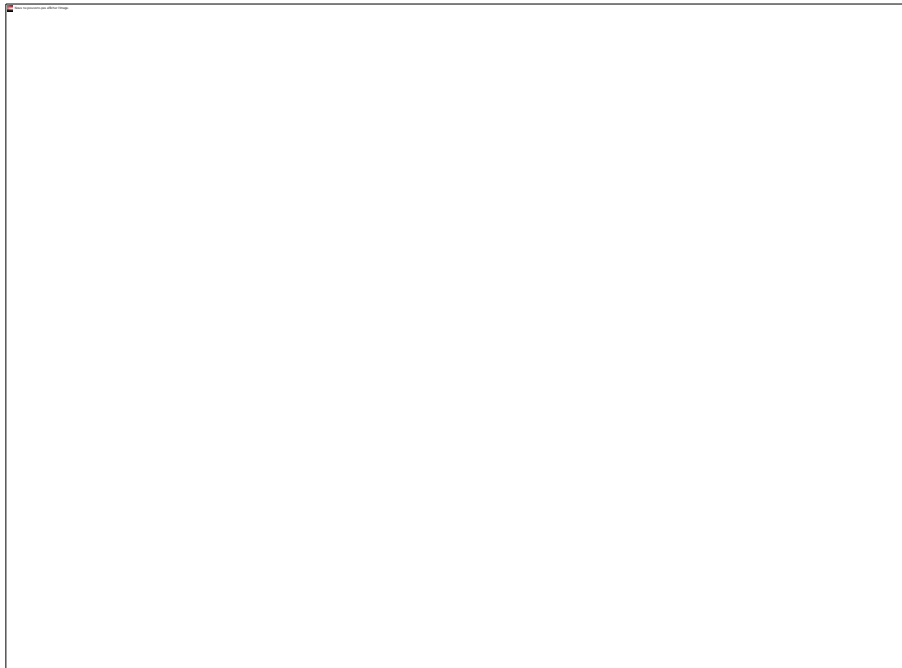


Figure III.12: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

❖ **Tracé de la courbe granulaire de référence**

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable+graviers, mais ciment non compris). Sur le même graphe d'analyse granulométrique, Type AFNOR (pourcentage des tamisât en fonction du module ou diamètre des tamis) déjà obtenu, on trace une composition granulaire de référence OAB avec :

Le point O est repéré par ses coordonnées : **[0.080 ; 0]**.

Le point B est repéré par ses coordonnées : **[D ; 100] = [20,100]**, (D : le diamètre du plus gros tamis).

Le point de brisure A à des coordonnées :

En abscisse :

- Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est de $D/2$
- Si $D > 20\text{mm}$ l'abscisse est située au milieu limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D. Le plus gros granulat est $D= 15\text{mm}$, donc le point de brisure a pour abscisse:

$$\mathbf{X = D/2 = 7,5\text{mm.}}$$

En ordonnée :

$$\mathbf{Y = 50 - \bar{D} + K}$$

Avec : $\mathbf{K = K_s + K_p + k}$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés). Dans cette étude, le dosage en ciment vaut 400kg/m^3 , la vibration est normale les granulats sont concassés, d'où le coefficient **k=0 (DREUX [1981])**.

Avec :

KS : coefficient tenant compte du module de finesse du sable MF.

Le module de finesse du sable vaut 2,87, la valeur de KS est calculée par la formule suivante :

$$K_s = 6M_f - 15 = 6(2,87) - 15 \text{ Soit } K_s = 2,22$$

K_p: coefficient de pompabilité, on peut prendre en générale $K_p = +5\%$ à 10% .

Notre béton n'est pas de qualité pompable d'où **K_p = 0**.

$$\text{D'où : } Y = 50 - 15 + 2,22 + 0 + 0 = 48,34$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure **A** sont : [7,5 ; 48,34].

Les lignes de partage

La droite de partage relie le point 95% (tamisât) d'un granulat au point 5% du granulat suivant. Les points d'intersection des lignes de partage avec la courbe brisée donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs. Il s'agit de pourcentages en volume absolus. Sur la courbe granulométrique, les points d'intersections entre les lignes de partage et la courbe de référence OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Sable (0/3) = 32%

Gravier (3/8) = 15%

Gravier (8/15) = 53%



Figure III.13: Courbe granulométrique et la courbe de référence OAB.

❖ Coefficient de compacité

C'est le rapport des volumes absolus en litres des matières solides : $V_M = V_g + V_c$ au volume total du béton frais soit 1 m^3 .

$$= V_M / 1000$$

En utilisant le tableau des valeurs du coefficient de compacité (**Tableau 10-13 [DREUX (1981)]**). Après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 15 mm, on trouve une valeur de 0,825

$$\text{D'où : } V_M = V_g + V_c = 0,825 \times 1000 = 825 \text{ l.}$$

Avec :

V_g : Volume absolu des granulats.

V_c : Volume absolu du ciment.

❖ Dosage des Granulats

Les dosages en volume de chacun des constituants du béton sont donnés par les relations ci-dessous:

Volume absolu du ciment :

$$\text{Avec : } V_c = \frac{m_c}{\gamma_c} = \frac{4}{3,1} = 129,03 \text{ L}$$

m_c : Dosage (en masse) de ciment

γ_c : Masse volumique du ciment.

- **Volume absolu des granulats (l'ensemble):**

$$V_g = 1000 \times \dots - V_c = V_M - V_c = 1000 \times 0,825 - 129,03 = 695,97 \text{ L}$$

- Volume absolu du sable :

$$V_s = \frac{V_g \times \dots}{1} = 0,3 \quad V_g = 222,72 \text{ L}$$

- Volume absolu du gravier (3/8)

$$V_{G/8} = 0,15 \times V_g = 0,15 \times 695,97 = 104,39 \text{ L}$$

- Volume absolu du gravier (8/15)

$$V_{G/15} = 0,53 \times V_g = 0,53 \times 695,97 = 368,86 \text{ L}$$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1 m³ de béton sont donnés par:

Masse du sable : $M_s = V_s \times \gamma_s = 585,75 \text{ Kg}$

Masse du gravier (3/8) : $M_{G/8} = V_{G/8} \times \gamma_{G/8} = 272,32 \text{ Kg}$

Masse du gravier (8/15) : $M_{G/15} = V_{G/15} \times \gamma_{G/15} = 1003,37 \text{ Kg}$

La composition finale du notre béton de référence est résumée dans le tableau(III.6) :

Tableau III.6: Composition volumique et pondéral du béton témoin pour **1m³**

Volume (1m³)	222,72	104,39	368,86	200	695,97	0,287
Poids (kg/m³)	585,75	272,32	1003,3	200	400	0,5

La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée car elle ne prend pas en compte les additions, alors que ce sont des composants essentiels du béton étudié. 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 le tableau (III.7) :

Tableau III.7: Quantités du différent composant des bétons

Composants	Ciment	Poudre de verre	Sable de verre	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	eau
BT	8,487	/	/	12,43	6.06	22.35	4,243
B5P0S	8,06	0,424	/	12,43	6.06	22.35	4,243
B5P5S	8,06	0,424	0,621	11,80	6.06	22.35	4,243
B5P10S	8,06	0,424	1,243	11,18	6.06	22.35	4,243
B5P15S	8,06	0,424	1,864	10,56	6.06	22.35	4,243
B10P0S	7,639	0,848	/	12,43	6.06	22.35	4,243
B10P5S	7,639	0,848	0,621	11,80	6.06	22.35	4,243
B10P10S	7,639	0,848	1,243	11,18	6.06	22.35	4,243
B10P15S	7,639	0,848	1,864	10,56	6.06	22.35	4,243
B15P0S	7,214	1,273	/	12,43	6.06	22.35	4,243
B15P5S	7,214	1,273	0,621	11,80	6.06	22.35	4,243
B15P10S	7,214	1,273	1,243	11,18	6.06	22.35	4,243
B15P15S	7,214	1,273	1,864	10,56	6.06	22.35	4,243

III.4 Fabrication du béton

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à température ambiante et les mettre en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Préparer 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. Les bétons ont subi des vibrations pour mieux compacter le béton et éliminer les bulles d'air à l'intérieur.

Le démoulage a été effectué après 24h. Une fois le décoffrage est fait, 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), les essais suivants ont été réalisés sur le béton durci : Essai de compression et essai à l'ultra son.



Figure III.14: confection, moulage et démoulage des éprouvettes.



Figure III.15: Conservation des éprouvettes pour 28 j avant écrasement.

III.5 Essais sur béton durci**III.5.1 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 (voir Figure suivante :

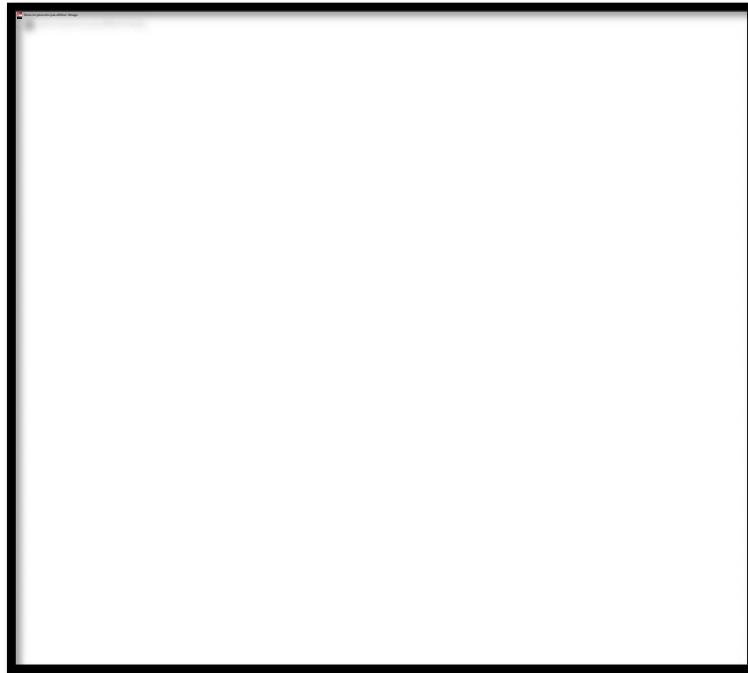


Figure III.16: La presse utilisée.

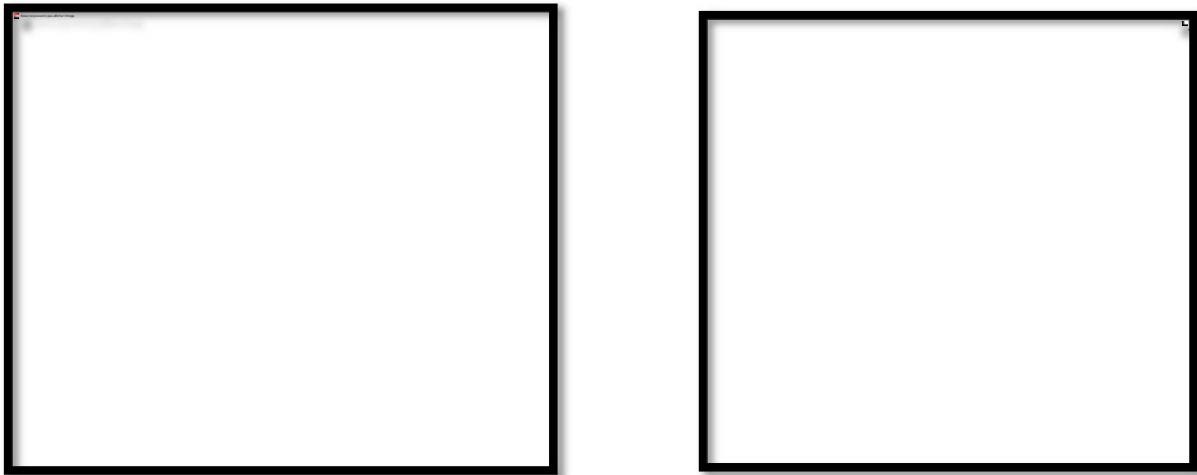


Figure III.17: Rupture de l'éprouvette.

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

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.5.2 Essai non destructif

La méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de déplacement d'une impulsion ultrasonique traversant le béton à tester. Le circuit du générateur d'impulsions comprend un circuit électronique pour générer une impulsion et un transducteur pour transformer ces impulsions électroniques en énergie mécanique ayant une fréquence de vibration de 54 KHz.

III.5.2.1 Préparation des éprouvettes

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ; à savoir le calibrage de l'appareil et la préparation des points de mesure. Cette dernière opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (on peut marquer ces points avec de la craie ou avec un crayon), en évitant d'appliquer les sondes sur des cavités, ainsi les enduire de matière plastique pour assurer le couplage acoustique (pour notre cas nous avons utilisé de la graisse).

III.5.2.2 Description de la procédure

-) Mettre les piles en place
-) Placer les câbles qui relient les transducteurs

-) Etalonner l'appareil : après avoir enduit les deux faces du barreau de calibrage d'un peu de paraffine, on vérifie si le temps de propagation correspond (indiqué sur le barreau), sinon on tourne la vis de calibration jusqu'à ce qu'il le soit.
-) Mettre du gel de paraffine pour
-) Placer les transducteurs au milieu
-) Lire le temps de passage sur l'écran

Le temps de déplacement de l'onde entre l'émetteur et le récepteur est mesuré électroniquement. La longueur du trajet entre les transducteurs divisé par le temps de déplacement donne la vitesse moyenne de propagation des ondes.

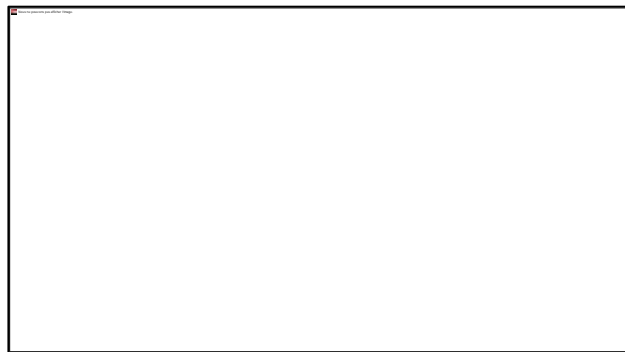


Figure III.18: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

III.6 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 et essai à l'ultra son afin de déterminer leurs résistances.

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET INTERPRETATION

IV. CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION**IV.1 INTRODUCTION**

La résistance à la compression du béton est le paramètre le plus fiable pour se renseigner sur la qualité de béton et cela est possible en effectuant soit un essai destructif qui est l'écrasement ou un essai non destructif par l'ultrason.

Ce chapitre sera consacré à présenter et interpréter les résultats expérimentaux relatifs aux bétons, en utilisant l'ultrason pour estimer la porosité et la connectivité des pores dans ces bétons. La méthode est basée sur l'analyse des vitesses des ondes ultrasoniques en fonction des porosités de ces bétons à différentes fractions de substitution. Ensuite, un essai de compression (éprouvettes cylindriques) a été effectué, permettant ainsi de traiter l'influence de la substitution des déchets de verre on les faisant varier à différents pourcentages.

Les résultats obtenus ont été comparé à ceux d'un béton témoin (sans ajouts) élaboré avec les mêmes constituants.

Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

-) Gravier concassé de classe : 3/8 et 8/16
-) Sable roulée de classe : 0/3
-) Ciment CPJ CEMII 42.5 R.

Les ajouts utilisés

- La poudre de verre
- Le sable de verre

Bétons élaborés

- Bétons ordinaire témoin(BO).
- Béton + 5% de poudre de verre + 0% de sable de verre(**B5P0S**)
- Béton + 5% de poudre de verre + 5% de sable de verre(**B5P5S**)
- Béton + 5% de poudre de verre + 10% de sable de verre(**B5P10S**)
- Béton + 5% de poudre de verre + 15% de sable de verre(**B5P15S**)

- Béton + 10% de poudre de verre + 0% de sable de verre(**B10P0S**)
- Béton + 10% de poudre de verre + 5% de sable de verre(**B10P5S**)
- Béton + 10% de poudre de verre + 10% de sable de verre(**B10P10S**)
- Béton + 10% de poudre de verre + 15% de sable de verre(**B10P15S**)

- Béton + 15% de poudre de verre + 0% de sable de verre(**B15P0S**)
- Béton + 15% de poudre de verre + 5% de sable de verre(**B15P5S**)
- Béton + 15% de poudre de verre +10% de sable de verre(**B15P10S**)
- Béton + 15% de poudre de verre + 15% de sable de verre(**B15P15S**)

Dans ce cadre, nous avons confectionné :

- 39 éprouvettes cylindriques (16x32) cm³, soit 3 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression simple à 28 jours.

IV.2 CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASON (ASTM C597–97; 1993)

L'essai de vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) comportent fondamentalement la mesure de la vitesse de l'onde électronique à travers le béton. Cet essai est utilisé pour diagnostiquer la qualité du béton dans la limite de l'uniformité, la détermination de la fissuration, la résistance, l'estimation et l'évaluation de la détérioration du béton.

Classements qualitatifs :

- 2500 m/s $V < 3200$ m/s béton de faible résistance,
- 3200 m/s $V < 3700$ m/s béton de moyenne résistance,
- 3700 m/s $V < 4200$ m/s béton à haute résistance,
- $V > 4200$ m/s béton à très haute résistance.

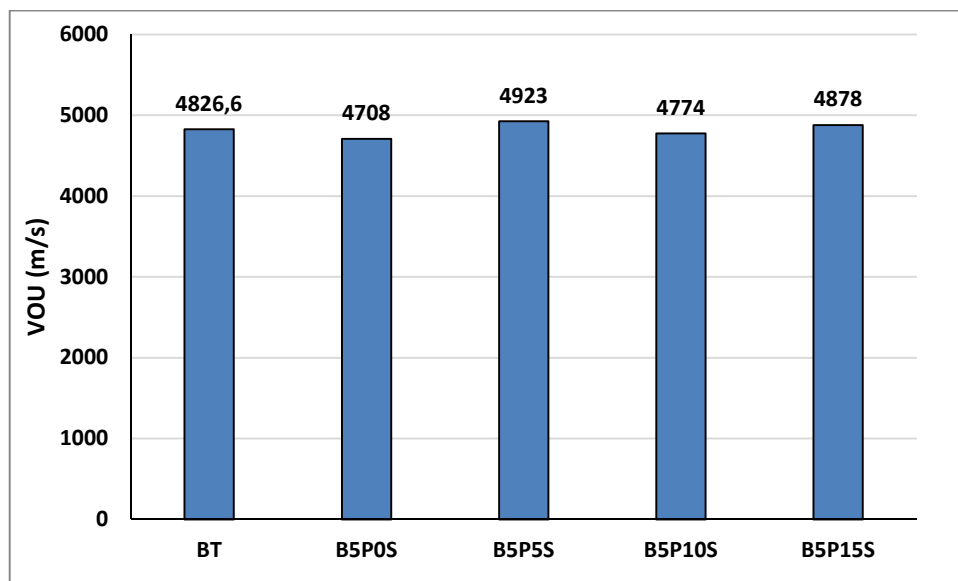


Figure IV.1: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 5% en poudre de verre.

- On remarque dans la (figure IV.1) que pour une substitution de 5P0S et 5P10S la V_{OU} diminue par rapport au béton témoin respectivement de 2.45% et 1.08%, et aussi par rapport au béton 5P5S et 5P15S, ces derniers ont une augmentation d'ordre de 2.4% et de 1% respectivement en comparaison à celle du béton témoin.

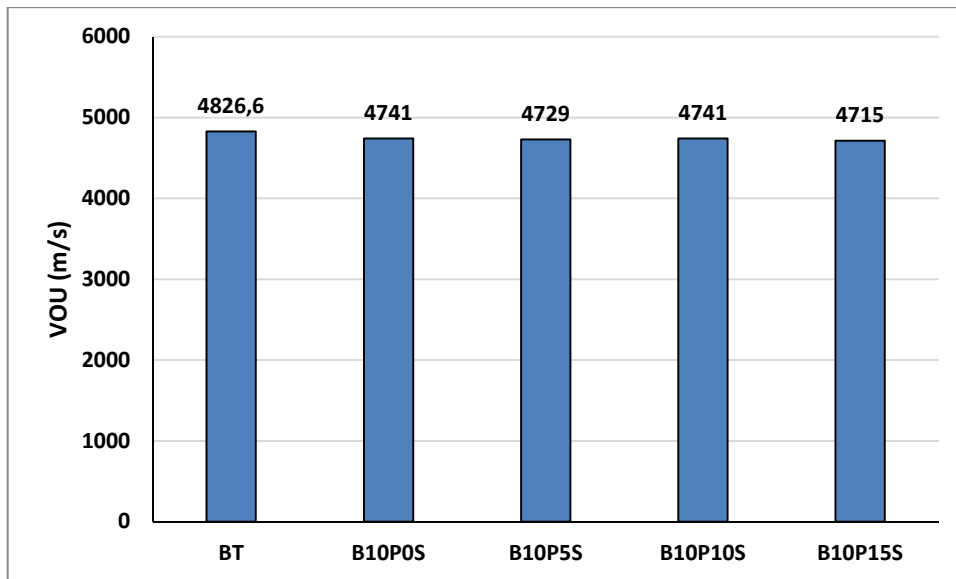


Figure IV.2: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 10% en poudre de verre.

) A cet effet, la Figure IV.2 montre clairement que la vitesse de propagation du son à l'intérieur du béton témoin a la valeur maximale de la V_{OU} (4826.6m/s) par rapport au béton substitué qui subissent une légère diminution d'ordre de 2.31%, et on remarque que tous les bétons avec poudre de verre et sable de verront pratiquement les mêmes valeurs de vitesse (V_{OU}).

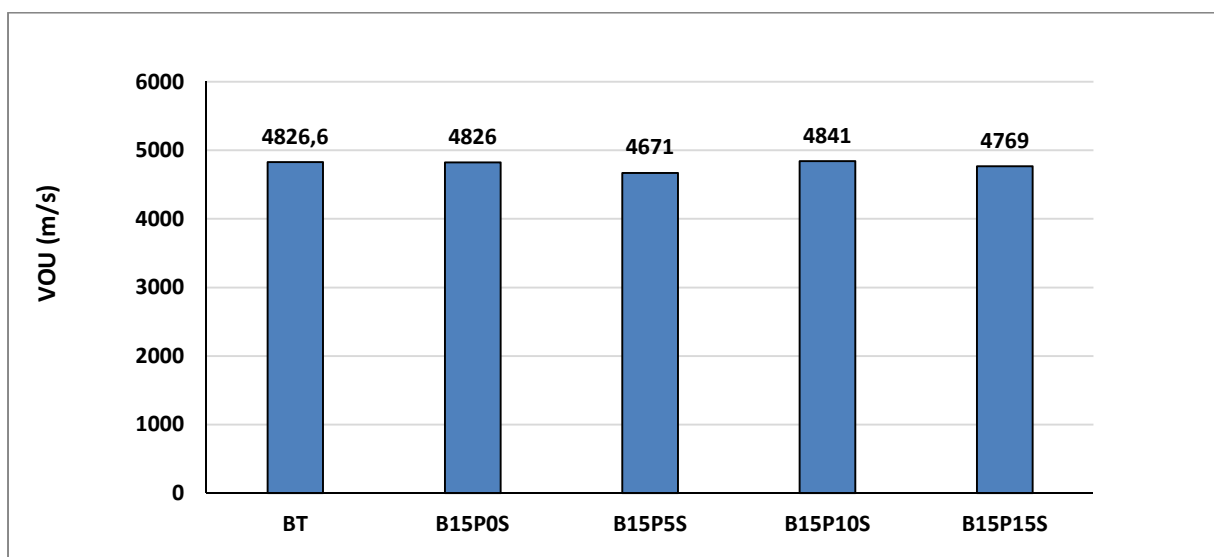


Figure IV.3: Vitesse des ondes ultrasoniques des bétons avec une substitution de 15% en poudre de verre.

-) la Figure montre clairement que la vitesse de propagation du son à l'intérieur du béton a légèrement diminuée pour les bétons(B15P5S) et (B15P15S) qui est de l'ordre de 3.22% et 1.19% par rapport à (B15P10S), ce dernier subit une légère augmentation d'ordre de 0.29% par rapport au béton témoin, et enfin, le béton (B15P0S)est quasi-similaire par rapport au béton témoin,
-) On constate de ces trois diagrammes en barres que la valeur maximale de vitesse des ondes ultrasoniques qui est supérieur au béton témoin est enregistrée pour le béton (B5P5S) qui est égale à 4923m/s et pour (B5P15S), elle est de 4878 m/s. On peut dire que ces bétons sont très compacts et présentent de bonnes caractéristiques mécaniques.
-) on conclue que les valeurs des vitesses des ondes ultrasoniques de tous les types de bétons sont des valeurs supérieures à 4200 m/s. donc on dira que c'est des bétons qui ont de bonnes résistances.

IV.3 RESISTANCE DES BETONS A 28 JOURS

La résistance mécanique à la compression est une caractéristique essentielle du matériau béton. Par conséquent, sa détermination a été suivie pour toutes les compositions de béton étudiées dans cette étude. Cette résistance mécanique a été calculée à l'âge de 28 jours sur des cylindriques (16x32) cm en utilisant la moyenne de trois échantillons.

Les résultats obtenus à 28j sont présentés dans le tableau (VI.1).

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

Béton	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)
BT	38,35
B5P0S	32,65
B5P5S	33,86
B5P10S	34,27
B5P15S	33,59
B10P0S	34,26
B10P5S	32,77
B10P10S	31,98
B10P15S	32,05
B15P0S	32,36
B15P5S	32,14
B15P10S	33,68
B15P15S	31,29

-) Notre premier constat porte sur la résistance à 28 jours du béton témoin. Nous avons pu formuler un béton témoin avec des matériaux locaux qui présente une bonne résistance mécanique à la compression à 28 jours (38,35 MPa) tout en sachant que nous avons utilisé un ciment CPJ CEM II/ 42 ,5R et un rapport $E/C = 0.5$.
-) En ce qui concerne les autres bétons testés, ils ont des valeurs de résistance à 28 jours supérieures à 30MPa.
-) Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents bétons, nous avons représenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques sous forme des diagrammes en barre.

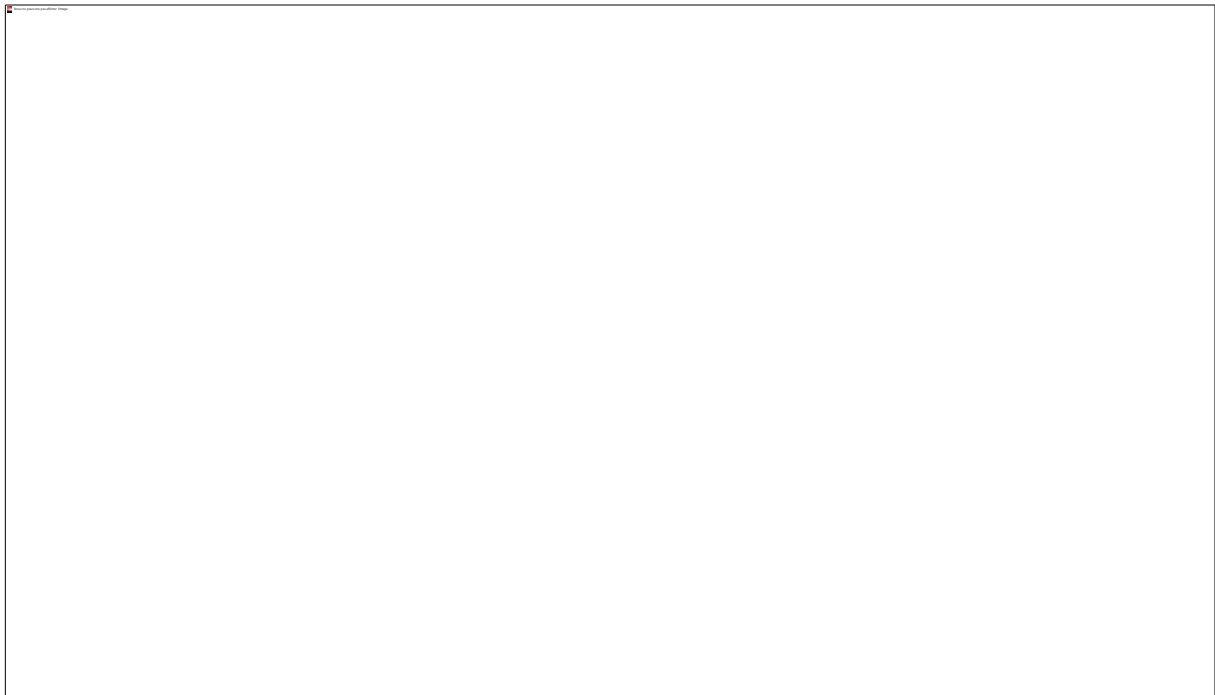


Figure IV.4: Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre.

-) On remarque que la résistance à la compression est inférieure à la résistance du béton témoin pour tous les mélanges élaborés. Ceci peut être expliqué par l'ajout des déchets de verre.
-) En comparant les résultats de résistance des bétons avec 5% de poudre de verre et avec différent pourcentage de sable de verre (0% ,5%, 10% et 15%), on constate que les résistances de ces bétons sont pratiquement du même ordre et sont inférieures à celle du béton témoin. La différence des résistances est de l'ordre de 1 à 2 MPa.

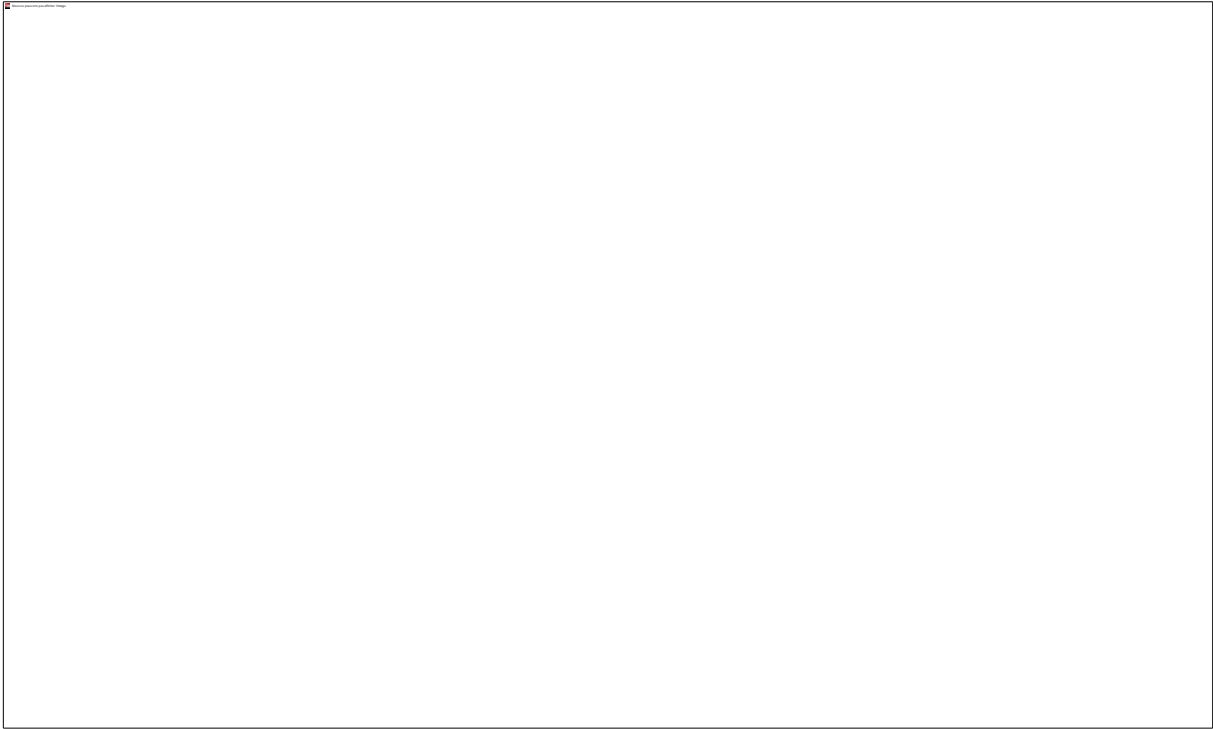


Figure IV.5: Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre.

- J Ces résultats montrent que la résistance à la compression des bétons avec déchets de verre diminue de 4 MPa pour le béton B10P0S, et de 5MPa pour les bétons B5P5S, et enfin de 6 MPa pour le béton B10P10S par rapport au béton témoin qui a une résistance de 38,35 MPa.
- J En comparant les résultats de résistance deux à deux, on constate que les bétons B10P5S et B10P15S ont quasiment les mêmes résistances, ces dernières sont inférieures à celle du béton B10P0S.



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

) D'après cette figure, on constate que l'évolution de la résistance à la compression varie en fonction des pourcentages de substitution des déchets de verre, elle diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable par le sable de verre alors que sa valeur maximale est enregistrée dans le cas du béton témoin non substitué (38.35MPa).

)En effet, En comparant les résistances des bétons à base de déchets de verre, on constate que les bétons B15P0S etB15P5S ont les mêmes résistances et pour le béton B15P15S, on remarque une légère diminution de la résistance. En comparant les résistances des bétons à base de déchets de verre par rapport au béton témoin, on constate une diminution de la résistance qui varie entre 12% et 18%.

Dans ce qui suit, nous avons représenté les résultats des essais de compression sous forme de courbes contrainte-déformation axiale. L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité E). La mise sous contrainte doit être effectuée sans choc et d'une manière continue.

Les figures suivantes présentent le comportement en compression simple des différents bétons étudiés :

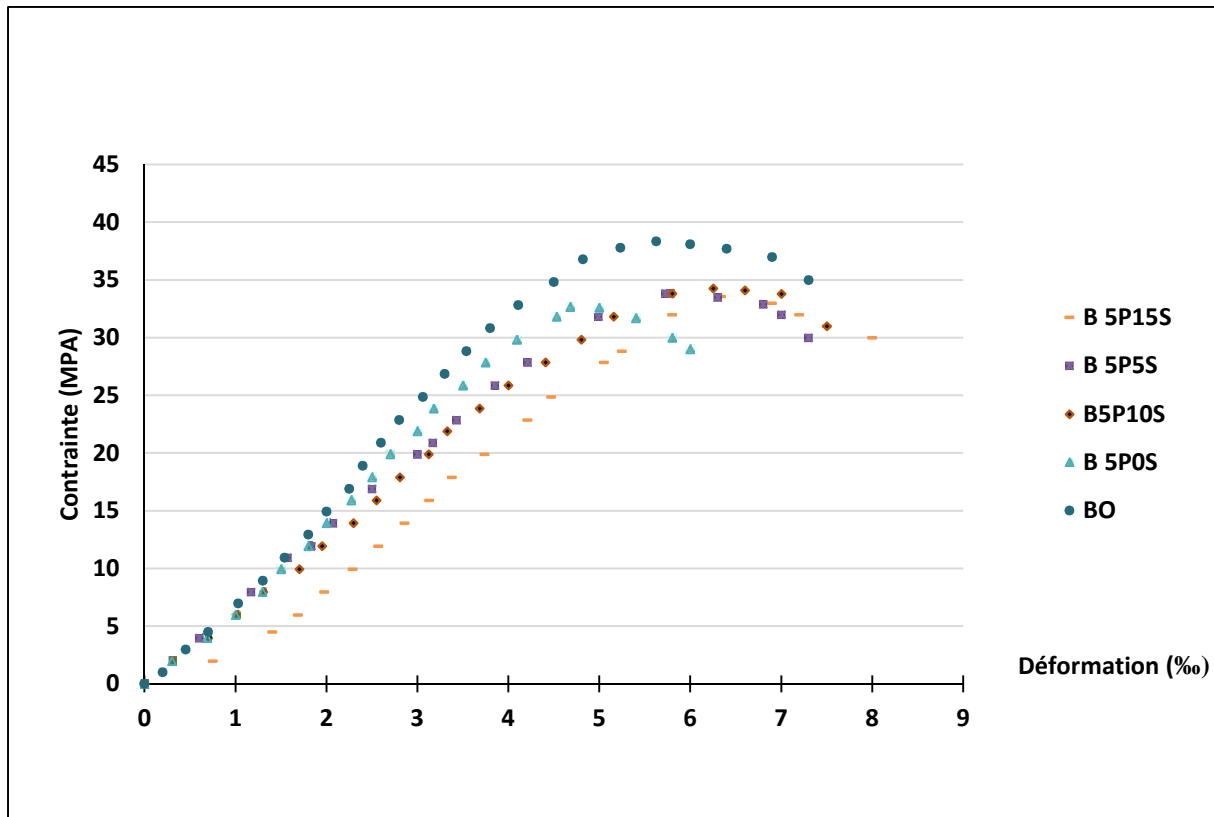


Figure IV.7: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 5% de poudre de verre.

La courbe contrainte-déformation présente une pente initiale qui suit celle du béton témoin jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de déformation plastique.

Sur cette courbe, on peut distinguer trois phases de comportement bien distinctes :

- Une première phase de comportement identique à celui d'un matériau homogène et élastique, celui-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte et la déformation ϵ .
- Une deuxième phase qui nous permet d'atteindre le maximum de la contrainte pour une certaine déformation, cette contrainte est plus significative pour le béton témoin qui est de l'ordre de 38.35Mpa par rapport aux bétons substitué de déchets de verre.
- Quant à la troisième phase celle-ci se traduit par une courbe décroissante avec une courbure plus étendue pour le béton témoin, cette phase se termine par la ruine des éprouvettes.

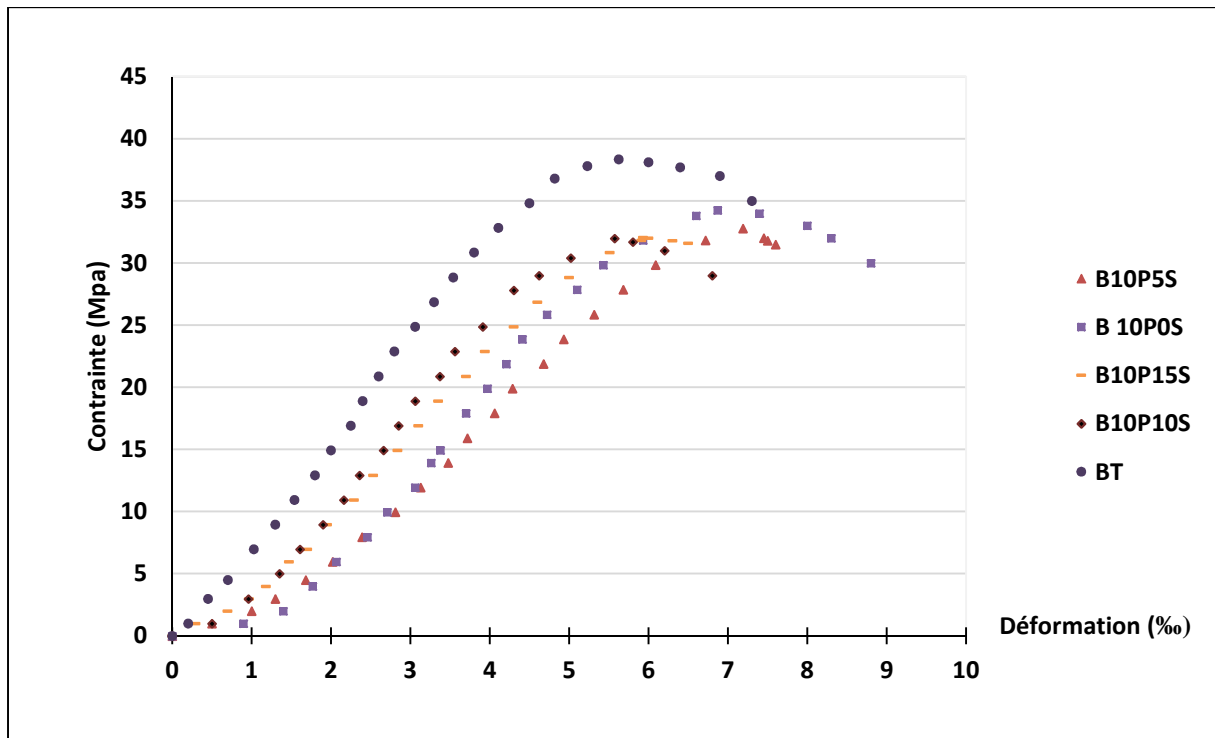


Figure IV.8: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 10% de poudre de verre.

-) La Figure nous présente l'évolution de la résistance des Cinq bétons BT, B10P0S, B10P5S, B10P10S et B10P15S à 28 jours. Le béton témoin (BT) présente une pente supérieure par rapport aux autres bétons.
-) Aussi on remarque que la valeur maximale de la contrainte est donnée par le béton témoin (BT). Une légère diminution de la résistance des bétons avec déchets de verre, cette diminution est remarquée dans le B10S10P qui est de l'ordre de 31.95 MPa par rapport au béton témoin.

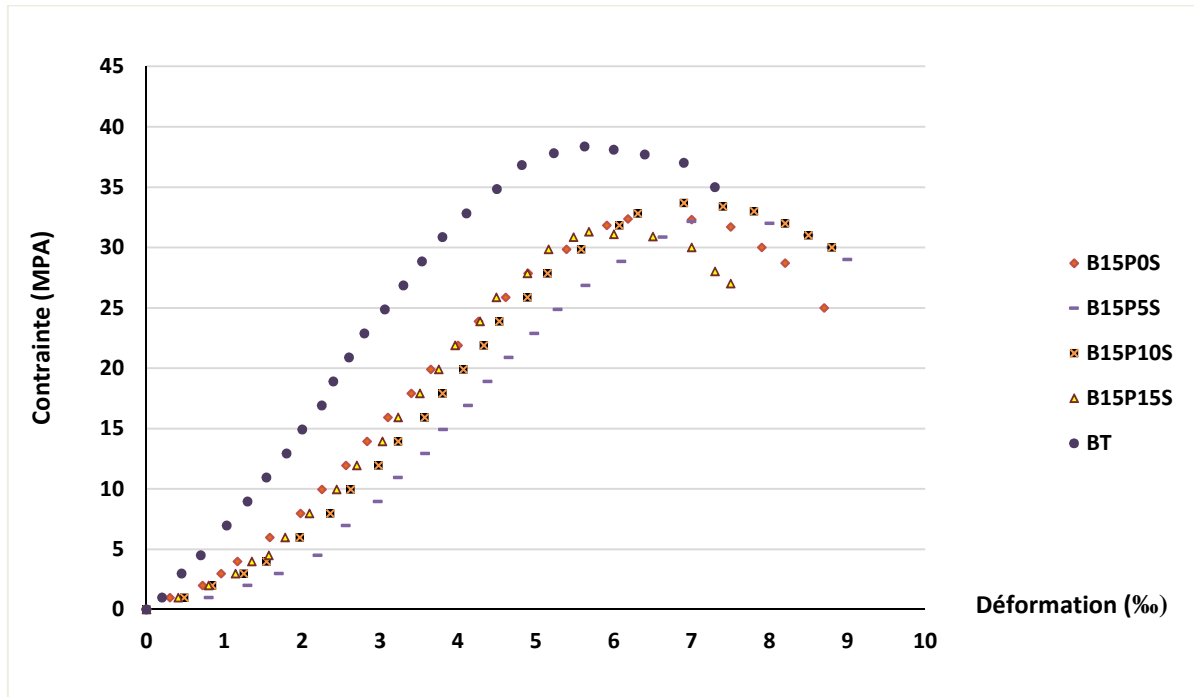


Figure IV.9: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 15% de poudre de verre.

-) La courbe contrainte-déformation présente une pente initiale qui suit celle du béton témoin jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de déformation plastique. On remarque que les bétons étudiés B15P0S, B15P5S, B15P10S, B15P15S ont les mêmes allures et des valeurs des contraintes à la rupture presque du même ordre. Aussi on constate que dans la deuxième phase qui nous permet d'atteindre le maximum de la contrainte pour une certaine déformation, cette contrainte est plus significative pour le béton témoin qui est de l'ordre de 38,35Mpa par rapport aux autres bétons. La déformation est plus importante pour les bétons avec les déchets de verre par rapport au béton témoin.

IV.4 Conclusion générale :

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction.

Néanmoins, il est nécessaire de gérer les deux principaux comportements que peut avoir ce verre lorsqu'il est mis en contact avec une matrice cimentaire, à savoir :

- un comportement néfaste associé à la réaction alcali-silice, si le verre est utilisé sous la forme de grosses particules ;
- un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique, si le verre est utilisé sous la forme de fines particules.

L'objectif de notre travail est la substitution partielle du ciment par poudre et sable de verre broyé pour la confection des bétons dans le but de les caractériser à l'état durci en utilisant deux essais : essai non destructif (ultrason) et un essai destructif (essai d'écrasement à la compression). Dans ce contexte, plusieurs formulations des bétons avec poudre et sable de verre et un béton témoin ont été mises au point.

Les résultats obtenus ont montré que :

-) D'après l'essai d'ultrason, les mesures de la V_{OU} sont très influencées par les déchets de verre, à savoir l'augmentation des vitesses qui prend des valeurs supérieures à 4200m/s ce qui nous permet de dire que ces bétons sont de très bonne résistance.
-) les essais d'écrasements ont montré qu'il y'a une légère diminution des résistances (à la compression)

Il sera intéressant d'approfondir cette étude en prenant en compte :

-) L'utilisation de plusieurs couleurs de verre.
-) L'utilisation de plusieurs dimensions de verre
-) L'utilisation de verre en association avec un autre déchet qui répond au profil d'un ajout cimentaire.

Références bibliographiques

[1] **Holcim Suisse** « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » Guide pratique du béton 6ème édition, 2015.

[2] **Kahina Haddad** « Caractéristiques des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages » Thèse de doctorat, Tizi ousou, Université Mouloud Mammeri, soutenue le 26/06/2018, p127

[3] **Stéphan ASSIÉ** « Durabilités des bétons auto-plaçant » Thèse de doctorat INSA Toulouse, L'institut Nationale Des Sciences Appliquées de Toulouse, Soutenue le 29 octobre 2004

[4] **Fatma KHELOUI** « Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibre » Thèse de doctorat, Tizi ousou, Université Mouloud Mammeri, soutenue le 24/10/2012, p182

[5] **Julie ROCHETTE**, « Construire avec les bétons » (technique de conception), paris : le moniteur, 2000.

[6]. Mahmoud, ISMAIL Thèse de doctorat ' **Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires)**' Toulouse avril 2006

[7] **Cherief.L,Haddadou.F** « Comparaison entre deux compositions de béton différentes en utilisant l'ultrason de la presse » mémoire master, Tizi Ouzou, Université mouloud Mammeri, 2012/2013.

[8] **Raoul FRANCOIS** « contribution à l'étude du comportement raidissant traction du béton armé après fissuration » Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Procédés (MEGeP), Toulouse, 24 mars 2011

[9] **Georges DREUX, Jean FESTA** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » huitième édition Eyrolles, paris, 1998.

[10] **Mourad BEHIM, Tahar ALI BOUCETTA** « Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants » Déchets Sciences et Techniques, N°65, Novembre, 2013.

[11] **Pierre ROSSI**, « Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An exemple of French research », ACI Materials journal, Vol.91, N° 3, 1994, pp.273-279,

[12] **Adam M. NEVILLE**, « Propriétés des bétons », Eyrolles, Paris, Septembre 2000.

[13] **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 2003, p119

[14] **Christian Desachy** , “Les déchets sensibilisation à une gestion écologique” 2eme édition paris 2001

[15] **Achili Kahina**, « Poudre de verre dans le béton » mémoire master genie civil structure, Université Mouloud Mammeri, 2016/2017

[16] **Pascale Maes** “Gestion des déchets de chantier” Guide méthodologique AFNOR2004

[17] **Brahim Djemaci**, “la gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d’efficacité” thèse de doctorat, université de Rouen 2012

[18] **Melhyas KPLE** “ETUDE DES VOIES DE VALORISATION DES DECHETS MENAGERS AU BENIN”, thèse de doctorat, Université de Lorraine, soutenue le 24 Novembre 2015, p238

[19] **Carter, G, J**” **Contrôles** environnementaux et biologiques de la minéralogie et de la microstructure des coquilles bivalves. Dans la croissance squelettique des organismes aquatiques. Enregistrements biologiques de la charge environnementale. (Ed. D.C Rhodes et R.A.Lutz) .plenum press, pp 69-115.

[20] **ZEGHAD MOHAMED**” Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons : bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP) ‘’, thèse de doctorat, Tizi ousou, Soutenue le : 21 / 04 / 2018

[21] **Emile Olivier** « Technologie des matériaux de construction » 5^{ème} édition 1976

[22] **Zhu, H, et Byars, EA**, Réaction alcali-silice du verre recyclé dans le béton, réaction alcali-granulaire dans le béton, Actes de la 12^{ème} Conférence internationale sur la réaction alcali-granulats dans le béton, (15-19 octobre, Canada), Québec 2004. p. 811–20.

[23] **Barton J, Guillemet C**, « le verre, science et technologie » l’éditeur EDP sciences, 2005

[24] **Bahia.A, Mehaddene.R, Bouchnab.Y** «Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances » Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, 15000 Tizi Ouzou, Algérie (Département de Génie Civil) N°75, Décembre 2017,p8.

[25] **Cercle National du Recyclage**” La collecte, le tri et le recyclage du verre des déchets ménagers et assimilés ‘novembre 2008

[26] **H. SCHOLZE**, « Le verre, nature, structure et propriétés » institut du verre, Paris 1980

[27] **Martin Cyr**, « Le verre de recyclage dans le génie civil : un matériau à haute valeur ajoutée » Ecole Doctorale "MEGeP" - Université Paul Sabatier-Toulouse France INSA, 8 novembre 2012, [<http://www-Imdc.insa-toulouse.fr/>].

[28] **Diamond. S**, « Alkali silicareactions – some paradoxes », *Cement&Concrete Composites* 19 [5/6], 391–401 (1997).

[29] **Idir, R.** "Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique". Thèse de doctorat. Université de Toulouse. Juillet 2009

Annexe

ANNEXE 1 Résultats des différents essais de caractérisation

1. Analyse granulométrique (résultats de caractérisation expérimentale des granulats) :

Dans cette annexe sont présentés les résultats de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

Matériau : sable 0/3					
Nature		Gravier concassé 0/3			
Provenance		Carrière Dedjel Sétif			
Caractérisation faite selon EN 933-1					
Analyse granulométrique					
Procédé utilisé : Lavage par tamisage					
Masse sèche totale				M_1	2000g
Masse sèche après lavage				M_2	1500g
Masse sèche des fines retirées après lavage				$M_1 - M_2$	5000g
Ouverture des tamis [mm]	Refus en [gr]	Refus cumulés en [gr]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]	
5	5,9	5,5	0,298	99,705	
2,5	2,2	8,1	0,175	99,505	
1,25	967	975,1	48,75	51,25	
0,63	406,5	1381,6	69,08	30,92	
0,315	215,8	1597,4	79,87	20,13	
0,16	174,2	1771,6	88,58	11,42	
0,08	136,5	1908,1	95,405	4,595	
Fond	87,7	1995,8	99,79	0,21	
C : cumulé					

ANNEXE 1 Résultats des différents essais de caractérisation

Matériau : Gravier 3/8				
Nature	Gravier concassé 3/8			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé : Lavage par tamisage				
Masse sèche totale		M_1	2000g	
Masse sèche après lavage		M_2	1500g	
Masse sèche des fines retirées après lavage		$M_1 - M_2$	5000g	
Ouverture des tamis [mm]	Refus en [gr]	Refus cumulés en [gr]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]
10	0	0	0	100
8	5	5	0,1	99,9
6,3	30	35	0,7	99,3
5	1675	1710	34,2	65,8
4	1145	2855	57,1	42,9
3,15	950	3805	76,1	23,9
2	540	4345	86,9	13,1
Fond	655	5000	100	0
C : cumulé				

ANNEXE 1 Résultats des différents essais de caractérisation

Matériau : Gravier 8/15				
Nature	Gravier concassé 8/15			
Provenance	Carrière de Tizi Ouzou			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé : Lavage par tamisage				
Masse sèche totale		M_1	2000g	
Masse sèche après lavage		M_2	1500g	
Masse sèche des fines retirées après lavage		$M_1 - M_2$	5000g	
Ouverture des tamis [mm]	Refus en [gr]	Refus cumulés en [gr]	Refus cumulés en [%]	Tamisât cumulés [%]
20	0	0	0	100
16	56	56	1,12	98,88
12,5	1401	1457	29,14	70,86
10	1936,7	3393,7	67,874	32,126
8	1138,4	4532,1	90,642	9,358
6,3	195,1	4727,2	94,544	5,456
fond	287,5	5000	100	0
C : cumulé				