

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Civil
Option : Structures
Présenté par : TOUATI
MOHAMED AMEZIANE

Sujet :

***Comportement mécanique d'un béton à base de
déchets de verre non colorés***

Devant le jury :

Mr IDDIR . K

PRESIDENT

M^{me} AKMOUSSI.O

EXAMINATRICE

M^{me} KHELOUL.F

ENCADREUR

RESUME

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 :

- les essais d'écrasements ont montré qu'il y une augmentation et 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:

- The crush tests showed that there was a increase and decrease in the compressive strength.

Key words: Addition, glass, concrete, waste.

Remerciement

Je tiens à remercier d'abord mon promotrice Mme KHELOUI et Mme AKMOUSSI qui m'a proposé ce sujet et qui m'a encadré et dirigé avec beaucoup d'attention et de disponibilité tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir avec leurs propositions et leurs remarques.

Je souhaiterais remercier tous mes collègues et à tous mes amis en particulier MR BENCHABENE pour leur encouragement et leur soutien.

Qu'il me soit enfin permis de remercier toute ma famille spécialement ma sœur MEKIOUASSA MON PERE, LA FEMME MON PERE mes FRERES et ma femme AMEL pour leur appui et attention sans faille et leur amour inconditionnel qui m'accompagnent depuis toujours ; qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures Liste
des tableaux

Principales notations

Liste des travaux

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

I. Le verre

I.1	Introduction	3
I.2	Historique	3
I.3	Définition du verre	5
I.4	Formation du verre	7
I.5	Composition du verre.....	9
I.6	Les différents types de verre.....	12
	I.6.1 La forme ou lieu de fabrication	12
	I.6.2 La composition chimique	12
	I.6.3 La technique de fabrication	17
I.7	Comportement du verre	17
	I.7.1 Corrosion du verre en milieu acide	18
	I.7.2 Corrosion du verre en milieu neutre	19
	I.7.3 Corrosion du verre en milieu basique	19
	Conclusion.....	20

II. Le béton

II.1	Historique.....	22
II.2	Définition.....	23
II.3	Composants.....	23
	II.3.1 Le ciment.....	23
	II.3.1.1 Constituants principaux.....	23
	II.3.1.2 Constituants secondaires.....	25

II 3.1.3	Additifs.....	26
II 3.1.4	Classification des ciments.....	26
II 3.1.5	Principales catégories des ciments.....	26
II.3.2	Les granulats.....	27
II.3.3	L'Eau.....	27
II.3.4	Les Adjuvants.....	28
II.4	Composition des bétons.....	29
II.4.1	Critères en fonction de la destination des bétons.....	29
II.4.1	Formulation du béton.....	31
II.5	Comportement instantané du béton.....	35
II.5.1	Compression.....	35
II.5.2	Traction.....	36
II.6	Comportement différé du béton.....	38
II.6.1	Retrait.....	38
II.6.2	Fluage.....	39
II.7	Corrosion des bétons.....	39
II.8	Les différents types de béton.....	40
II.8.1	Bétons à haute performance.....	40
II.8.2	Béton future.....	40
II.8.3	Béton de granulats légers.....	40
II.8.4	Béton cellulaire.....	41
II.8.5	Béton lourds.....	41
II.8.6	Béton à base de résines.....	41
II.8.7	Béton de fibres.....	42
II.9	Conclusion	43

III .ELABORATION DES MATERIAUX D'ETUDES

III.1 Introduction.....	44
III.2 Présentation des matériaux étudiés.....	45
III.2.1 Matériaux.....	45
III.2.1.1 Ciment.....	45
III.2.1.2 Léau de gâchage.....	45
III.2.1.3 Les granulats	45
III.2.1.4 Ajouts minéral.....	46
III.3 Analyse Granulométrique (En 933-1 Et En 933-2).....	48
III.4 Module de finesse.....	50
III.5 Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555).....	51
III.6 Équivalent de sable (NFP18-598).....	51
III.7 Formulation de notre béton de référence (Témoin)	52
III.8 Fabrication du béton.....	59
III.9 Chargement et acquisition des valeurs.....	60
CONCLUSION.....	62

IV . RESULTATS ET INTERPRETATION

IV.1. INTRODUCTION	63
IV.2. RESISTANCE DES BETONS A 28 JOURS.....	64
Conclusion générale.....	70

Liste des figures

I.1	«Fer de lance» tsimshian en obsidienne,du Yukon et de l'Alaska le long de la Côte du Pacifique (1937).....	4
I.2	Amphore opaque bleue. Egypte, 1400-1300 av.J,-C.....	4
I.3	a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen.....	5
I.4	(a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique.....	6
I.5	Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na ₂ O.....	7
I.6	variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux.....	9
I.7	a) verre débarrassé des ses impuretés,b) impuretés du verre (papiers, plastiques, métaux).....	10
I.8	Composition chimique du ciment.....	11
I.9	Composition chimique de la poudre du verre.....	11
I.10	La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment.....	11
I.11	L'obsidienne, exemple de verre volcanique.....	14
I.12	Échantillon de pierre ponce hautement poreuse du volcan de Teide à Tenerife, Îles Canaries.....	14
I.13	Feldspath plagioclase.....	14
I.14	Kaolin.....	14
I.15	Ensemble de fibres de verre.....	15
I.16	Laine de verre utilisée comme isolant.....	15
I.17	Des fulgurites.....	16
I.18	Un bécher en pyrex.....	16
I.19	Vase en verre craquelé.....	17
I.20	Détail.....	17
I.21	Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (<i>leaching</i>).....	18
I.22	Schéma du mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (<i>etching</i>).....	20
II.1	Le diagramme σ - ϵ d'un béton en compression.....	35
II.2	Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	37

III.1: Sable passé au tamis.	45
III.2: Les différents granulats utilisés.	46
III.3: La poudre de verre utilisée	46
III.4: Déchet de verre ramassé.....	47
III.5: Nettoyage des déchets de verre	47
III.6: Séchage et broyage.....	47
III.7: le sable de verre.....	47
III.8 : Tamiseuse.....	48
III.9: Courbes granulométriques.....	50
III.10: Essai de la masse volumique.....	51
III.11: L’essai d’équivalent du sable.....	52
III.12: Abaque permettant d’évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l’ouvrabilité désirée.....	54
III.13: Courbe granulométrique et la courbe de référence OAB.....	56
III.14: Confection, moulage et démoulage des éprouvettes.	60
III.15: Conservation des éprouvettes pour 28 j avant écrasement.....	60
III.16: La presse utilisée.....	61
IV.1: Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre.....	65
IV.2: Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre.....	65
IV.3: Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre.....	66
IV.4: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 5% de poudre de verre.....	67
IV.5: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 10% de poudre de verre.....	68
IV.6: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 15% de poudre de verre.....	69

Liste des tableaux

I.1	Composition chimique des matériaux de cimentation.....	10
II.1	Ordre de grandeur en proportions.....	23
II.2	Classification des ciments selon leurs résistances.....	26
II.3	Dimension admissible D pour les plus gros granulats.....	30
II.4	Enrobage minimal «C» des armatures.....	30
II.5	Consistance du béton.....	31
III.1:	Mélanges des bétons préparés avec poudre et sable de verre	47
III.2:	Mélanges des bétons préparés avec sable de verre.....	48
III.3:	Analyse granulométrique du sable (0/3).....	49
III.4	Analyse granulométrique du gravier (3/8).....	49
III.5 :	Analyse granulométrique du gravier (8/15).....	49
III.6:	Module de finesse du sable.....	51
III.7:	Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	51
III.8 :	valeur de l'équivalent de sable.....	52
III.9 :	Valeurs approximatives du coefficient granulaire.....	53
III.10 :	Formulation des bétons avec les granulats de verre.....	58.
III.11 :	Composition volumique et pondérale du béton témoin pour 1m ³ de béton.....	58
IV.1:	Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.....	64 ..

Principales notations

C : Ciment

E : Eau

E/C : Rapport massique eau sur ciment

P : Poudre de verre broyé

S : Sable de verre broyé

Introduction Générale

Longtemps considéré comme un matériau incapable d'évoluer, le béton est amélioré de manière spectaculaire ces dernières années comme le prouve l'arrivée des bétons à hautes performances, ce matériau est connu surtout pour sa durabilité, le peu d'entretien nécessaire, ainsi que la disponibilité et la proximité de la ressource et de la main d'œuvre, sont autant d'avantages intéressants du béton, mais son principal bémol est sur le plan environnemental, est que la fabrication du ciment portland qu'il contient est si énergivore qu'elle est responsable d'environ 5 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) c'est autant qu'en émet l'industrie aéronautique; donc améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa production devient alors un enjeu important.[3]

Cet impact environnemental encourage la recherche de nouveaux liants minéraux à faible coût de production qui devrait minimiser au maximum la consommation de l'énergie. Parmi ces alternatives nous pouvons citer la poudre du verre, obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré, qu'on utilisera dans la composition du béton. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation de verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent. [4]

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé (mixte et coloré) dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [3][4]

- Son incorporation dans les bétons auto-plaçant (BAP) offre une fluidité considérable [5].
- Utilisée dans le béton pour couler des murs porteurs du bâtiment ainsi que les dalles de plancher des bureaux.

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

But du travail

L'objectif principal de notre travail est de comprendre le comportement de la poudre du verre, issue des déchets de verre entreposés, dans le béton, à quelle proportion peut-on remplacer le ciment par cette poudre du verre, quel sera son impact sur le comportement mécanique du béton et quelles seront ses répercussions économiques et environnementales?

Les objectifs principaux visés dans cette étude sont:

- D'éliminer les déchets précités par recyclage d'où protection de l'environnement.
- Réduire la production du ciment donc diminuer et éliminer l'émission de dioxyde (CO₂) dans l'atmosphère.

Le présent mémoire est organisé sous la forme suivante :

Le chapitre I est réservé à la présentation du matériau verre et à la détermination de la composition chimique. Les différentes réactions des produits vitreux dans les milieux d'attaque (acide, neutre, basique) sont aussi présentées brièvement.

Au cours du chapitre II, on procède à la présentation des constituants du béton hydraulique (ciment, eau, granulats et éventuellement des adjuvants) ainsi que quelques méthodes pour sa formulation puis nous allons voir le comportement instantané et différé du béton. On termine le chapitre par la présentation des différents types de ce dernier.

Le chapitre III concerne la partie investigation expérimentale. Dans ce chapitre les différents constituants, utilisés pour la confection des éprouvettes selon les différentes variantes d'étude, sont fidèlement rapportés. Les essais de caractérisation et modes opératoires sont aussi présentés dans ce chapitre tel que l'analyse granulométrique, l'équivalent du sable et masse volumique,...La méthode de formulation de notre béton, nécessaire pour la confection de notre béton est détaillée étape par étape.

Suivi par chapitre IV, qui ce dernier, présente les différents résultats expérimentaux (essai d'écrasement en compression à 28 jours de murissement des éprouvettes). Ces résultats expérimentaux concernent les bétons à base de déchet de poudre et de sable de verre, utilisés dans notre béton comme substituant pour le ciment et pour le sable. On termine le chapitre par la comparaison des résultats par rapport au béton témoin (Béton de référence) et entre les différents bétons avec déchets de verre (sable et poudre de verre).

On termine par une conclusion où les différents résultats sont commentés et analysés.

Chapitre I

Le verre

I.1 Introduction

Les sous-produits de l'industrie tel que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes trouvent une large utilisation comme ajouts cimentaires dans les bétons. Leur utilisation permet d'améliorer pour le mieux les caractéristiques des bétons jusqu'à leur fournir les qualités d'un béton de hautes performances. A cet effet, en utilisant ces ultrafines comme ajouts cimentaires, le béton à hautes performances ouvre le champ à une nouvelle vision de voir le recyclage des déchets industriels.

Retenus essentiellement pour leur pouvoir pouzzolanique dus à leur teneur en agents réactifs tel que la silice ou l'alumine, les ajouts cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de la portlandite (Ca(OH)_2) créant ainsi de nouveaux C-S-H, produits essentiels de l'hydratation du ciment et éléments responsables de la résistance du béton à jeune et à long terme[1].

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99,99% de silice, le verre se place comme un matériau digne de terme « pouzzolanique ». Le verre a été un matériau indispensable à l'homme pour plusieurs propriétés comme la possibilité à prendre des différentes formes facilement, la clarté de la surface, la résistance à l'abrasion, sécurité et durabilité.

Plusieurs alternatives de réutilisation de verre existent. D'après certaines études existantes, toutes ces débouchés, qui nécessitent un pré-conditionnement (y compris un broyage), ont un développement limité et ne parviennent pas à absorber les quantités de verre récupérées. Afin d'apporter une solution durable à la problématique de verre entreposé, une autre piste potentielle et encourageante consiste à le valoriser dans les bétons [2].

I.2 Historique

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux. L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six mille ans, des potiers Égyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporter par la terre cuite.



Figure I.1 : «Fer de lance» tsimshian en obsidienne, du Yukon et de l'Alaska le long de la Côte du Pacifique (1937).

Un texte Latin de Pline raconte que le verre devrait sa naissance à un concours de circonstances. Selon la légende, des marins de Syrie, n'ayant pas trouvé de pierre sur une plage, utilisèrent des blocs de nitre (carbonate de soude) issus de leur cargaison pour leur feu de camp. L'intensité des flammes permit de fusionner le sable et le nitre en un liquide inconnu auparavant et transparent: le verre. Mais ceci n'est qu'une légende car l'élaboration du verre nécessite une température d'environ 1300°C. Il semblerait donc que le verre ait plus de 5000 ans. En effet, lors de nombreuses fouilles effectuées en Égypte, les archéologues ont retrouvé divers petits objets en verre : petits flacons de parfum, coupes, perles, etc. [6]. Ces objets antiques étaient opaques et colorés en vert ou en bleu.



Figure I.2 : Amphore opaque bleue. Égypte, 1400-1300 av.J,-C

Les premiers verriers s'aperçurent qu'ils pouvaient faire fondre le sable plus facilement en ajoutant de la soude au contenu de leurs fours. La soude ou la potasse sous forme de cendres de bois abaissait le point de fusion du sable à tel point que les fours ordinaires permettaient d'atteindre les températures nécessaires.

Mais la seule addition de la soude n'était pas suffisante pour faire du verre de bonne qualité :

celui-ci avait une vie courte et même l'eau l'attaquait. Suite à quoi, on découvrit qu'en ajoutant la chaux, sous forme de calcaire broyé, le verre obtenu n'était plus attaqué par l'eau. C'est là une formule de base connue maintenant sous le nom de verre à la chaux sodique [6].

I.3 Définition du verre

Par verre, on désigne «un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse» [7]. Cette définition est plus générale que celle du langage courant où l'on comprend par verre un matériau fragile et transparent à la lumière visible. Elle englobe les matériaux amorphes, c'est à dire les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise. En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande échelle.

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux en sont une bonne illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés: verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins.

Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin. Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial. On obtient un verre : silice vitreuse.

L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées. Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (Figure I.3).

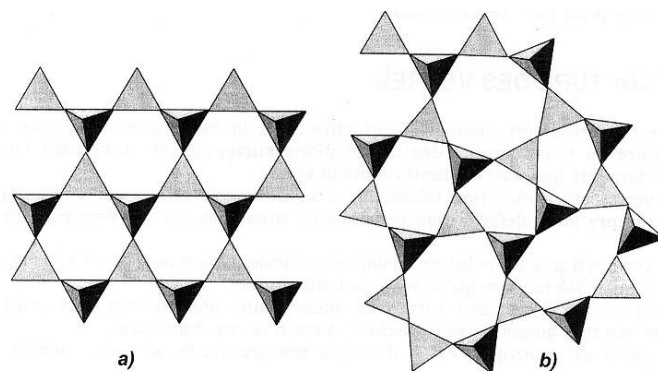


Figure I.3 : a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par Zachariasen [7].

En 1921, LEBEDV avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines

désordonnés. La théorie de Zachariasen [7] décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages SiO_4 de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite.

Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. Zachariasen [7] a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes:

La coordinance du cation doit être petite ;

- un ion d'oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations ;
- les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces ;
- trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure I.4), proche de celui d'un liquide qui tend à cristalliser. La cinétique de cristallisation est, en général, suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.

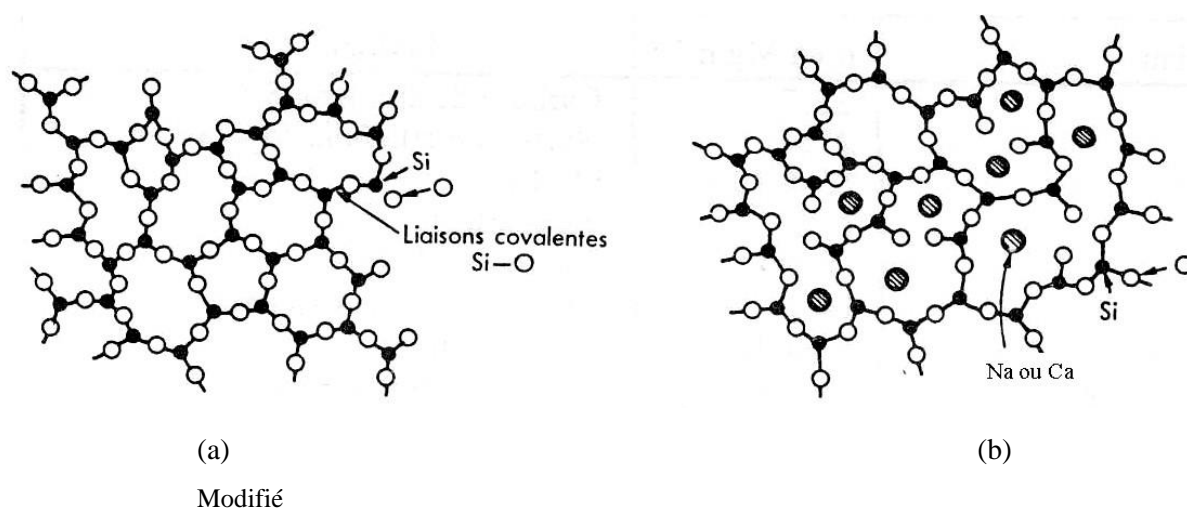


Figure I.4: (a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na_2O et CaO [8].

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent: un tel atome est appelé oxygène pontant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule M_2O , comme Na_2O et K_2O ou des alcalino-terreux de formule MO , comme CaO et BaO . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de $1730^\circ C$ à $1400^\circ C$ (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées. Avec Na_2O nous avons (Figure I.5):

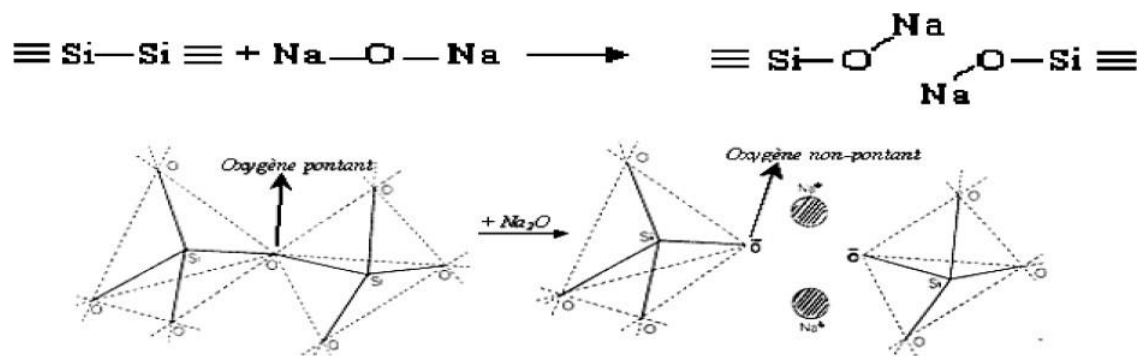
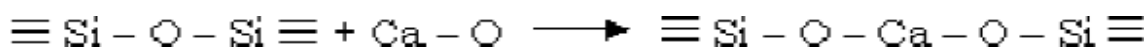


Figure I.5 : Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na_2O [9].

La présence de Na_2O provoque l'interruption des liaisons du réseau continu non cristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entraîne un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts Si—O—Si.



L'introduction de CaO entraîne l'existence d'ions O^{2-} liés au silicium d'un seul côté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison $Ca-O$ est considérablement plus forte que la liaison $Na-O$, à cause de la bivalence de l'ion Ca^{+2} , de sorte que les deux oxygènes se trouvent en quelque sorte liés à travers l'ion Ca^{+2} [10].

I.4 Formation du verre

Les procédés de fabrication peuvent être classés en trois catégories: le figeage du désordre d'une phase liquide, l'utilisation du caractère désordonné de la matière et la désorganisation d'une phase cristalline [7]. Le plus souvent, le verre est produit par figeage de la phase liquide. Il est refroidi progressivement jusqu'à sa solidification. En étudiant le processus de formation du verre, deux températures sont à définir: T_f la température de fusion du verre et T_g sa température de transition vitreuse.

Pour définir plus clairement ces températures, analysons l'évolution du volume spécifique V du verre avec la température (figure I.6). A partir d'un état A , dont la température est supérieure à la température de fusion T_f , la viscosité augmente pendant que la température diminue. Quand la température atteint T_f en B , deux phénomènes peuvent se produire, soit le liquide se cristallise si la vitesse de refroidissement du verre est faible, ce qui se caractérise par une discontinuité (cas C), soit le liquide passe à l'état surfondu si la cristallisation n'a pas le temps d'avoir lieu (cas E). En E , la température est la température de transition vitreuse T_g , c'est à partir de cette température que l'on parle de verre.

Autrement dit, à T_f , on observe alors une variation de volume: il s'agit d'une modification d'une grandeur thermodynamique du premier ordre qui correspond à un changement d'état. Sous la T_f on observe aussi un changement de pente de V (cette pente est beaucoup plus faible pour un solide que pour un liquide). Mais si, lors du refroidissement du liquide, la viscosité est trop importante ou le refroidissement très rapide, la cristallisation n'a pas le temps de se produire et un liquide surfondu est alors obtenu. Aucune discontinuité de V n'est alors observée à T_f et sa pente reste inchangée. En poursuivant le refroidissement, la viscosité du liquide augmente de façon exponentielle et le liquide surfondu devient quasiment solide. Lorsqu'elle atteint 10¹³ poises, la rigidité empêche les mouvements microscopiques locaux et on observe un changement de pente : il n'y a pas de variation de grandeur thermodynamique du premier ordre, mais un changement de grandeur thermodynamique du second ordre comme le coefficient de dilatation, ou la capacité calorifique (qui s'observe par dilatomètre et calorimétrie différentielle à balayage respectivement). La température à laquelle se produit ce changement s'appelle température de transition vitreuse, T_g . La transition vitreuse est donc appelée "transition thermodynamique du second ordre" (par opposition à la fusion qui est une transition du premier ordre). La transition vitreuse résulte d'une perte de mobilités atomiques au fur et à mesure du refroidissement. Elle n'est pas intrinsèque et dépend donc de la vitesse de refroidissement: elle augmente si la vitesse de trempe augmente. Pour une température inférieure à T_g , le matériau est un solide avec le désordre structural d'un liquide : c'est un verre. Le désordre, et donc l'entropie, sont plus élevés dans un verre que dans un cristal. Sous la T_g , l'entropie (le volume) varie de la même façon pour le verre et pour le cristal. Mais, en théorie, si le verre est refroidi suffisamment lentement, la T_g s'abaissant, par extrapolation de la variation d'entropie du liquide surfondu, on pourrait obtenir un verre d'entropie plus faible que le cristal équivalent: c'est ce qu'on appelle le paradoxe de Kauzmann.

Le passage continu de l'état liquide à l'état vitreux se fait dans une plage de température délimitée par la température de fusion (T_f) et la température de transition vitreuse (T_g). La zone de transition vitreuse encadre T_g . En dessous de T_g , le verre devient "hors équilibre":

il s'éloigne de son équilibre thermodynamique, puisque les mobilités atomiques ne sont plus suffisantes (la viscosité augmentant) pour que l'équilibre soit atteint (il s'éloigne donc d'autant plus de l'équilibre que la vitesse de refroidissement est élevée).

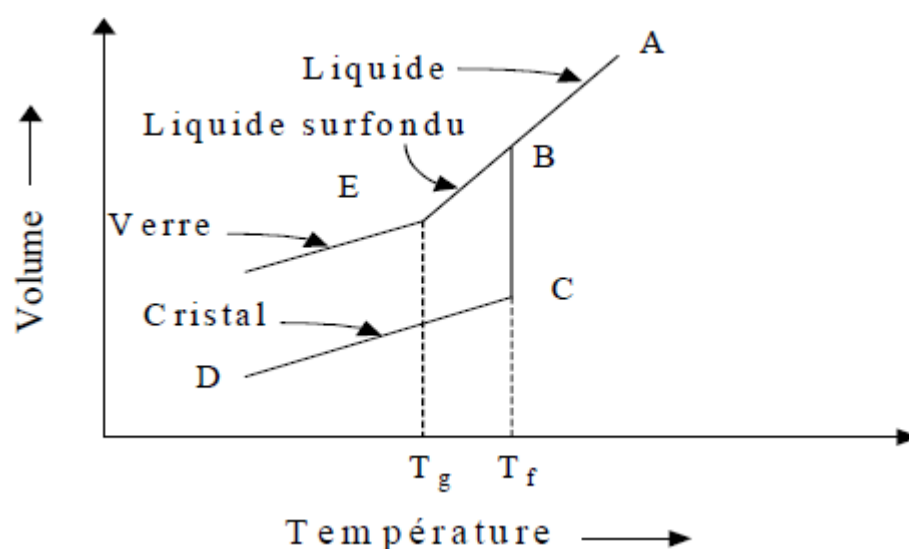


Figure I.6 : variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux [11].

I.5 Composition du verre

D'après les recherches et travaux menés par **M. Arezki TAGNIT-HAMOU** [12] et autres sur le verre mixte, récupéré, débarrassé de toutes impuretés ; métal, plastique, papier, matières organiques (alcool et colle) et autre... (Figure I.7). La composition chimique (Tableau I.2) a montré que ce verre est principalement composé de SiO_2 (près de 73%). Les teneurs en CaO et Na_2O confirment bien la nature sodocalcique du verre.

Le rapport molaire $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ne dépasse pas 1. Selon VARGIN (1961) [13], cela signifie que l'ion Al^{3+} est une consolidation de plus pour la structure du verre. C'est-à-dire qu'il jouerait donc le rôle de formateur de réseau. À côté des éléments dominants tels les oxydes formateurs (SiO_2 et Al_2O_3) et les fondants et stabilisants (K_2O , Na_2O , CaO , MgO), d'autres éléments composent ce verre. Leur présence peut s'expliquer par le fait que notre matériau est un verre mixte comportant plusieurs couleurs.

En effet, différents oxydes métalliques peuvent être ajoutés combinés à différents pourcentages lors du processus de fabrication du verre pour le colorier. Ainsi, dans le cas de notre verre, le chrome et le fer sont attribués au vert et au vert-brun [14].



Figure I.7 : a) verre débarrassé des impuretés; b) impuretés du verre (papiers, plastiques, métaux).

Tableau I.1: Composition chimique des matériaux de cimentation [12].

Composition (% en masse)	Ciment	poudre de verre
silice (SiO ₂)	20.2	72.5
alumine (Al ₂ O ₃)	4.7	0.4
L'oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	3.0	0.2
L'oxyde de calcium (CaO)	61.9	9.7
L'oxyde de magnésium (MgO)	2.6	3.3
L'oxyde de sodium (Na ₂ O)	0.19	13.7
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0.82	0.1
Le trioxyde de soufre (SO ₃)	3.9	-
Perte au feu	1.9	0.36
Finesse% passant (taille tamis)	97.4 (45 µm)	80 (45 µm)
Poids unitaire, kg / m ³	3150	2579
Densité	3.15	2.58

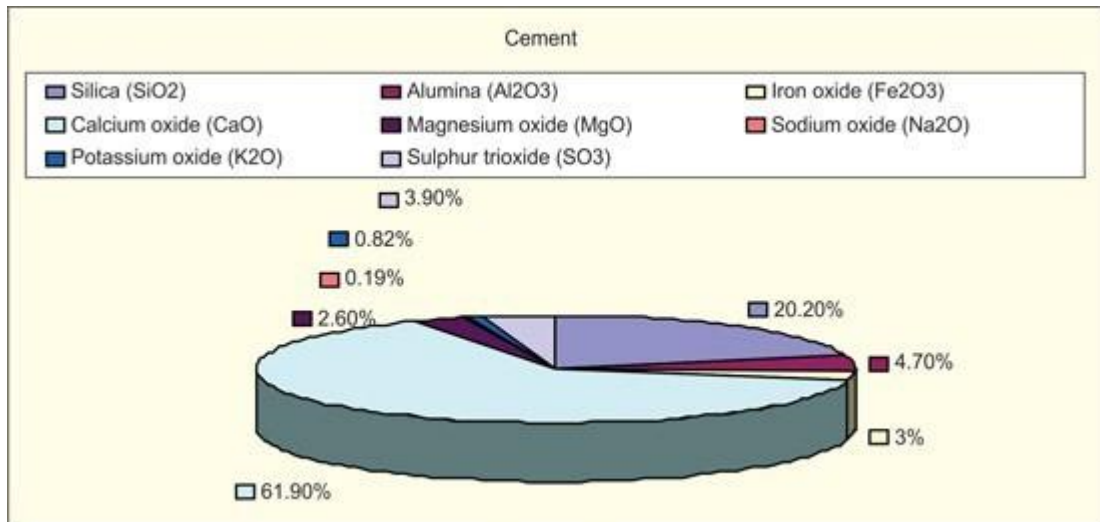


Figure I.8: Composition chimique du ciment [40]

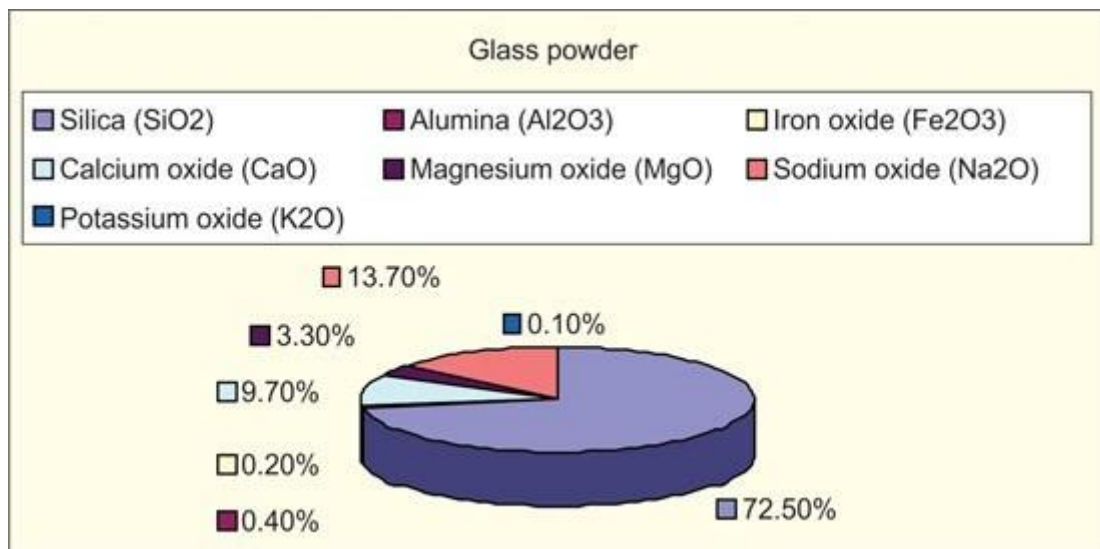


Figure I.9: Composition chimique de la poudre du verre [40].

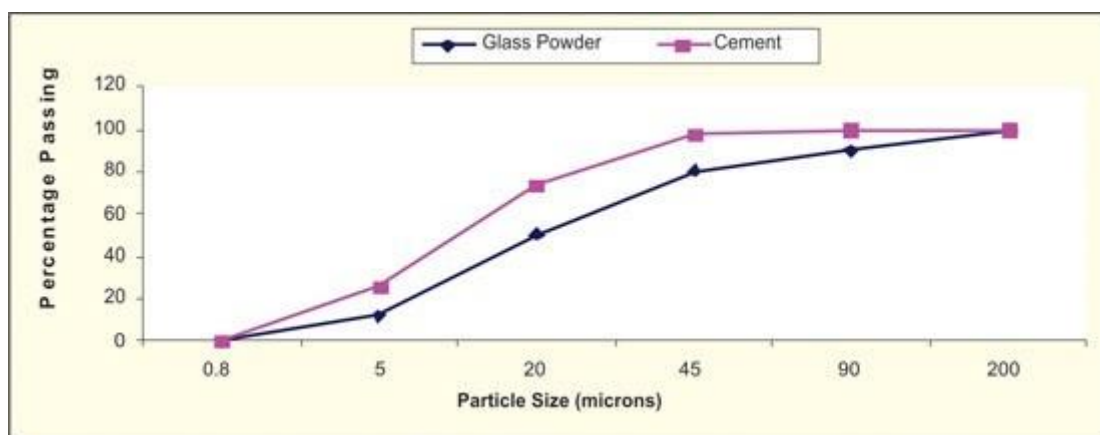


Figure I.10: La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment [40].

I.6 Les différents types de verre

On distingue plusieurs sortes de verre selon :

I.6.1 La forme ou lieu de fabrication [14]

- Verre plat ou à boudine - Pièce de verre ronde de 36 à 40 pouces de diamètre, ayant un nœud ou boudine au milieu - La qualité de ce verre est plus commune, et on n'en fait presque plus usage.
- Verre en manchon ou en feuille - Verre qui se souffle de toutes les mesures que l'on désire, et qui se vend en feuilles.
- Verre d'Alsace - Verre commun et qui se vend en feuille - On en distingue de trois sortes; le verre ordinaire, le verre teinté blanche ou demi-blanc, et le verre double.
- Verre en table ou verre de Bohême (république chèque) - Verre le plus blanc comme le plus épais de tous - Il se fabrique dans diverses parties de la France, et on en connaît de trois qualités en raison de sa plus forte ou de sa moindre épaisseur.
- Verre de couleur - Qualité de verre semblable à celui dit de Bohême pour l'épaisseur, et que l'on colore en rouge, jaune, bleu, etc.
- Verre double - Verre de Bohême qui est plus épais que le verre de Bohême ordinaire.
- Verre à estampe - Verre de Bohême le plus mince.
- Verre en paquet-la manière de livrer le verre blanc qui lui fait donner ce nom chaque paquet est du même prix et contient plus ou moins de feuilles.
- Verre layé - Verre qui est calciné et privé en partie de sa transparence; ce défaut n'existe que dans le verre blanc - On le nomme aussi verre gras.
- Verre à vitre - Verre commun dit verre d'Alsace.
- Verre dépoli - Verre dont on a détruit le vernis en frottant sa surface avec du sable ou de l'émeri et une molette de grès.

I.6.2 La composition chimique [14]

- Le verre sodocalcique, (« Soda-lime glass » pour les anglophones) regroupe des verres à base de silice SiO_2 , de calcium et de sodium introduits en général à la fabrication sous forme de CaO et Na_2O .
- Le verre de quartz (parfois nommé *verre quartz* ou *quartz verre*) est un verre obtenu par fusion de quartz ou de sable à très haute teneur en silice, sans addition de

fondant.

- Afin d'obtenir une grande pureté, il peut également être produit à partir de quartz ou de silice synthétiques, on le qualifie alors de verre de silice (ou encore *silice vitreuse*).
- Le verre potassique, élaboré à partir de potasse K_2O ;
- Le verre liquide ; L'orthosilicate de sodium (souvent dénommé « silicate de soude » ou de potassium, respectivement Na_4SiO_4 ou K_4SiO_4 sont solubles dans l'eau ; ces solutions sont connues sous le nom de verre liquide.
- Le cristal : est un type de verre riche en plomb (jusqu'à 40 % de la masse et plus et au moins 24 % d'oxyde de plomb PbO doit avoir été ajouté au verre). Le plomb abaisse fortement le point de fusion, tout en stabilisant la composition du « verre ». Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une très légère teinte jaunâtre. De plus, le verre est alors plus agréable à couper et à travailler, mais avec plus de risques environnementaux et sanitaires (le plomb est un métal très toxique). Le terme est trompeur, car il s'agit d'un matériau amorphe ; ce n'est donc pas un cristal au sens physique du mot.
- Le verre volcanique est un matériau amorphe issu du refroidissement rapide d'un magma.

Les minéraux n'ayant pas eu le temps ou la possibilité de cristalliser, il apparaît au microscope comme une pâte amorphe. Les roches volcaniques contiennent souvent du verre volcanique entourant des cristaux qui eux ont eu le temps de se former, mais certaines sont essentiellement constituées de verre, comme la ponce, l'obsidienne ou les différents types d'hyaloclastites. Les roches contenant essentiellement du verre volcanique ont une structure dite hyaline. La couleur de ce verre au microscope polarisé, en lumière non analysée, peut varier du jaune au noir.



Figure I.11: L'obsidienne (verre volcanique) poreuse du volcan.



Figure I.12 : Pierre ponce hautement poreuse du volcan.

- L'émail : est une substance vitreuse composée, notamment, de silice, de feldspath, de kaolin et d'oxydes métalliques [14]. Ce mélange, proche d'une terre ou d'une pâte, se vitrifie sous



l'action de la température, lors de la cuisson.

Figure I.13: Feldspath plagioclase [14]



Figure I.14: Kaolin [14]

- La fibre de verre: est un filament de verre. Par extension, les matériaux composites renforcés de cette fibre sont aussi appelés *fibre de verre*. Elle trouve des applications en renforcement, isolation et optique. La première application est de loin la plus importante : la fibre de verre est alors utilisée pour renforcer les bétons ou les polymères en vue de fabriquer des matériaux composites. Ceux-ci sont alors capables de se substituer à l'acier ou au carton. Le matériau composite résultant, connu sous le nom de *glass-reinforced plastic* (GRP) souvent appelé « fibre de verre connu en langage courant ».

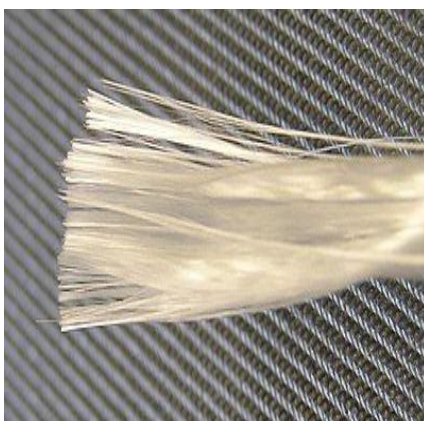


Figure I.15 : Ensemble de fibres de verre [14].

- La laine de verre : est un matériau isolant de consistance laineuse obtenu par fusion à partir de roche, de verre ou de laitier. Elle a été inventée en 1938, par Russell Games Slayter d'Owens-Corning, depuis elle est utilisée abondamment pour l'isolation thermique, l'isolation phonique et la protection incendie de tous types de bâtis.



Figure I.16 : Laine de verre utilisée comme isolant [14].

- Le strass (appelé pierre du Rhin au Québec) : est un verre imitant une gemme. Il est utilisé pour la confection de bijoux de fantaisie. Devenu un véritable accessoire de mode, le strass est utilisé partout : sur les vêtements, bijoux, objets de décoration, maquillage de fêtes, ornements de coiffures, tatouages temporaires, etc..
- Les fulgurites (du latin *fulgur* signifiant foudre) ou "pierres de foudre" : sont des morceaux de verre naturel amorphe (nommé le chatelierite (en) par Alfred Lacroix) très fragiles, généralement en forme de tube quasi cylindrique, produits par les impacts de foudre sur une roche. Les premières fulgurites découvertes datent du XVII^e siècle. Les plus connues proviennent de rencontres entre un éclair orageux et un sol sableux. Ce sont les plus impressionnantes et les moins rares, elles ont été trouvées en abondance dans le désert Libyque.



Figure I.17: Des fulgurites [14]

- Le pyrex est un verre borosilicate présentant un faible coefficient de dilatation. Il est résistant à la chaleur car son coefficient de dilatation thermique est très faible. Il est principalement utilisé pour les optiques non transmissives comme les miroirs, car son homogénéité est faible et sa porosité élevée. Il se prête au travail au chalumeau. Il est aussi utilisé pour :
 - ✓ la vaisselle supportant les chocs thermiques.
 - ✓ la verrerie de laboratoire pouvant aller sur la flamme.
 - ✓ les vitres des poêles, inserts et autres foyers domestiques et industriels.
 - ✓ les appareils industriels, ballons et capacités jusqu'à 500 litres, tuyauteries et colonnes jusqu'à 1 000 mm de diamètre.
 - ✓ la construction de réflecteurs de télescopes.
 - ✓ les tubes à couder pour la réalisation d'enseignes au néon.
 - ✓ les petits sujets en verre coloré faits entre autres à Murano.
 - ✓ la consommation de certaines drogues comme le crack et la méthamphétamine.



Figure I.18 : Un bécher en pyrex [14]

I.6.3 La technique de fabrication

- Le verre craquelé : est un type de verre présentant des craquelures dans la masse et utilisé à usage décoratif. La technique aurait été découverte à Murano. Il a principalement été utilisé pour réaliser des vases ou des pichets.



Figure I.19: Vase en verre craquelé



Figure I.20 : Détail [14]

- Un verre dépoli : est un objet de verre comportant d'infimes aspérités le privant de la transparence naturelle du verre. Il est utilisé quand une transparence complète présente des inconvénients ainsi que pour des motifs esthétiques.
- Quand les aspérités sont de taille plus importante, une rugosité apparaît en donnant une apparence différente, *granitée*.

I.7 Comportement du verre

Le verre usagé peut être traité soit par réemploi direct (système de consigne où les bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées) soit comme matière première (verre concassé ou « calcin » et fondu) pour la fabrication de nouveaux verres. Ce dernier constitue l'essentiel du recyclage du verre dans le monde. Le verre a été longtemps considéré comme un matériau inerte. Plusieurs types de verre présentent une bonne résistance à la corrosion comparée à d'autres matériaux. Mais aujourd'hui, il faut considérer que tous les produits vitreux sont chimiquement réactifs en solution. Selon les milieux d'attaque, différentes réactions ont lieu. Plusieurs auteurs, ont étudié la réaction du verre en milieu acide [16,17,18,19,20], en milieu neutre [20,21,22] et enfin en milieu basique [15,17,20,23,24] qui vont être présentés par la suite.

I.7.1 Corrosion du verre en milieu acide

Le mécanisme de dégradation du verre par une solution acide se traduit par l'échange d'ions entre la solution aqueuse et la surface du verre, c'est la *désalcalinisation* de la surface ou *leaching* [16]. La Figure I-21 illustre ce mécanisme dans le cas de l'attaque du verre par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) [17]. Lorsque les ions Na^+ et OH^- passent en solution, le proton du groupe silanol SiOH échange son site de surface avec celui d'un ion alcalin de l'intérieur : il diffuse dans le verre. La cinétique est donc contrôlée pas l'inter diffusion entre le cation alcalin du verre et le proton. Il semble qu'à basse température, le cation qui diffuse dans le verre est l'ion hydronium. Les profils de diffusion des éléments hydrogène et sodium dans les couches superficielles du verre sodocalcique hydraté ont été déterminés [20]. Les études montrent qu'un atome de sodium est remplacé par trois atomes d'hydrogène et que la cinétique dépend de la racine carrée du temps [16] ($t_{1/2}$). De plus, quelle que soit la valeur du pH la vitesse d'attaque et la solubilité du verre restent constantes [17].

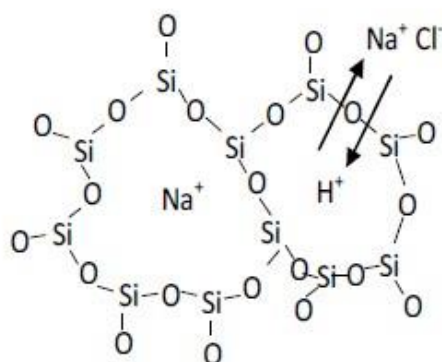


Figure II-21 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide [17].

Les éléments modificateurs du réseau du verre sont préférentiellement éliminés en solution en modifiant peu la structure de la silice. Ainsi, l'extraction des ions Na^+ par des solutions à faibles valeurs de pH peut être classée selon l'ordre suivant [19] : $\text{H}_2\text{O} >$ acide citrique $>$ acide acétique $>$ HCl $>$ acide oxalique. Mais une partie également de l'élément silicium passe en solution et sa concentration finale correspond à la solubilité de la silice (SiO_2) à la température et à la valeur de pH considérées [18][19].

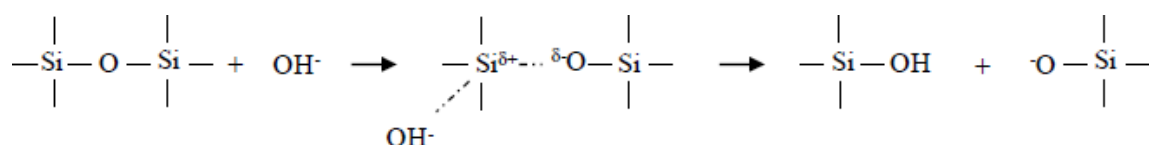
I.7.2 Corrosion du verre en milieu neutre

La diffusion des espèces chimiques est le mécanisme régissant la corrosion du verre en solution neutre [21][22]. Sous l'effet de la diffusion de l'eau à l'intérieur du verre, les atomes d'oxygène non-pontant se transforment en groupe silanol ($\equiv\text{SiOH}$). Ceci permet à l'ion Na^+ libéré de diffuser à la surface du verre avec l'ion OH^- . Par conséquent, les verres de silicates peuvent être considérés comme des sels d'un acide faible et de base forte [20] qui subiront une réaction d'hydrolyse selon l'équation suivante:



I.7.3 Corrosion du verre en milieu basique

Dans ce cas, le mécanisme qui régit est la dégradation du réseau silicique (ou leaching). Le verre est alors hydraté puis totalement dissout par rupture des ponts Si-O-Si à la surface du verre. Ce mécanisme est prédominant pour des valeurs de pH supérieures à 10. Il est donc caractéristique des attaques du verre par des solutions alcalines. Le mécanisme réactionnel



peut être décrit par l'équation ci-dessous [24]. L'équation précédente montre que l'étape essentielle dans le processus de dépolymérisation est la rupture de la liaison siloxane Si-O-Si (liaison polarisée : $\text{Si}^{\delta+} \cdots \delta\text{O}$) qui subit une attaque nucléophile. Les ions hydroxydes (OH^-) contenus dans la solution entraînent la rupture des liaisons Si-O-Si pour donner lieu à la formation de nouvelles liaisons Si-O- et Si-OH [15][20].

Les espèces sont ainsi détruites les unes après les autres. En supposant qu'aucune couche de protection ne se forme à la surface du verre, et que la solution ne change pas, la réaction serait linéaire en fonction du temps. Les ions sodium apportés dans la solution par l'échange ionique sont très importants dans la rupture du réseau. Ils peuvent se combiner aux espèces siliceuses pour former du silicate de sodium en solution appelé « water glass » [25]. A titre d'exemple, la Figure I-22 illustre ce mécanisme dans le cas où le verre est attaqué par une solution de NaOH.

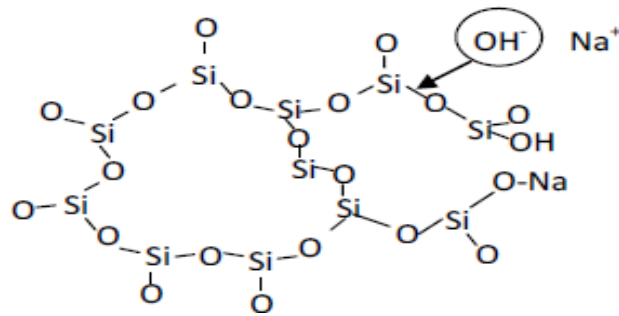


Figure I-22 : Mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (*etching*)

[17].

Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à la présentation du matériau verre qui a été, qui est jusqu'à présent, un matériau indispensable et très prisé dans la vie quotidienne, de l'homme. Ce matériau est connu pour plusieurs propriétés comme la possibilité à prendre des différentes formes facilement, la clarté de la surface, la résistance à l'abrasion, sécurité et durabilité. Nous avons présenté sa composition, les différents types de verre, et sa composition chimique, dans le but de nous familiariser avec ce matériau.

Chapitre II

Le béton

II.1 Historique

L'histoire du béton revient avant même l'invention de l'écriture, appelé le béton de terre qui est un matériau à base de terre crue argileuse. Il est souvent présent à même le sol et peut être facilement mis en œuvre par moulage dans des techniques de brique de terre crue ou de banchage. On voit par la suite la chaux associée à d'autres matériaux. La première utilisation du ciment remonte au temps des égyptiens. En effet, un des mortiers les plus anciens, composé de chaux, d'argile, de sable et d'eau, fut utilisé dans la conception de la pyramide d'Abou Rawash, érigée aux alentours de - 2600 avant J-C, sous la IV^{ème} dynastie, mais également pour d'autres ouvrages. Vers le 1^{er} siècle après J-C, la Rome antique reprend cette technique en l'améliorant avec l'incorporation de sable volcanique de Pouzzoles ou de tuiles broyées. La pouzzolane comme on l'appelle est associée à la chaux et mélangée à des matériaux tout venant et forme un béton extrêmement résistant puisque beaucoup de vestiges construits dans ce matériau sont encore bien debout.

En 1818 Louis Vicat, ingénieur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, crée le ciment tel qu'on le connaît aujourd'hui, avec la première fabrication de manière artificielle et contrôlée des chaux hydrauliques. Et c'est en octobre 1824 que le brevet du ciment est déposé par Joseph Aspdin, suivi par la création de la marque « ciment de Portland ».

Concernant l'histoire des utilisations du béton, c'est dans les années 1830 que l'on voit apparaître les premiers développements de ce matériau avec notamment la construction d'une maison de trois étages en béton à Montauban, par l'architecte François- Martin Lebrun, qui fut le tout premier à utiliser le béton comme matériau principal d'un bâtiment. C'est ensuite en 1852 que fut construit le premier immeuble en béton coulé avec fers profilés enrobés, par l'industriel français François Coignet. Sans être totalement du béton armé, c'est la première fois que l'association béton – acier fut utilisée, ce qui constitue le point de départ d'une grande avancée dans l'industrie du béton. En 1929, c'est Eugène Freyssinet, ingénieur français, qui va révolutionner le monde de la construction en inventant le béton précontraint.

À la fin des années 1980, on voit apparaître les bétons à hautes performances et par la suite, de nouvelles grandes innovations vont voir le jour avec notamment les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).

Le béton de ciment est, à l'heure actuelle, le matériau de construction le plus utilisé au monde [27].

II.2 Définition

Le béton est l'union de matériaux hétérogène constitué de granulats, sable et de pate (ciment, eau) .La pate de ciment représente 25% à 40%(voir le tableau II.1) du volume total du béton[28].chaque constituant joue un rôle bien défini :liant hydraulique pour la pate de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) est la source de la résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pâte pure (ciment, eau),
- D'un mélange granulaire,
- De produits additions (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier :(liant+sable+eau),
- De squelette solide ou granulaire : mélange de granulats.

IV **Tableau II.1:** Ordre de grandeur en proportions [28].

	Eau %	Air %	Ciment %	Granulats %
Volume	14-22	1-6	7-14	60-75
poids	5-9	/	9-18	63-85

II.3 Composants

II.3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pate faisant prise et durcissement progressivement dans le temps. Ce dernier est du à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [28].

II.3.1.1 Constituants principaux

Le ciment courant a 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 fumés de silice, dans le but de modifier de leur certaines propriété et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certain ouvrages, soit en raison des conditions environnementales soit pour des raison de performances mécaniques.

✓ **Clinker portland**

Obtenu par la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et autres de correction, est un matériau hydraulique se présentant se formes de petit nodules très dures composées essentiellement des quartes phases cristallines suivantes:

-silicate tricalcique : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C_3S) qui libère une quantité de chaleur donnant au ciment une résistance rapide et élevée (résistance aux premiers âges).

-silicate bicalcique : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C_2S) permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.

-aluminat tricalcique : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistance initiale élevée

-alumino-ferrite tétracalcique : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), qui forme une solution solide de C_2A et C_2F (son rôle est mineur dans la réaction de durcissement du ciment).

En dehors de ces quartes principales phases, le clinker comporte également:

-la chaux libre dont le pourcentage $\leq 2\%$ pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

-de l'oxyde de magnésium MgO qui peut être à l'origine d'une réaction avec l'eau.

✓ **Laitier de haut fourneau**

Sous produit de fabrication de fonte brusquement refroidi avec aspiration d'eau, est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium (40 à 50%), la silice (25 à 35%), l'alumine (12 à 30%) et la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation.

✓ **Cendres volantes**

Sont des produits pulvérulents de grande finesse qui proviennent de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être :

-siliceuses, constituées de silice réactive (40 à 55%) et d'aluminium (20 à 30%).

-calciques avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5%.

✓ Pouzzolanes naturelles

Sont des produits d'origine des roches volcaniques ou sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions $> 25\%$), d'alumine et d'oxyde de fer.

✓ Schistes calcinés

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800°C , présente, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydraulique lorsque qu'ils sont finement broyés.

✓ Fumée de silice

Constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de $1/10$ de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie du ciment. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

II.3.1.2 Constituants secondaires

Ils peuvent être:

- Soit des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$ (exception faite du clinker).
- Soit des fillers, leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques.

Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

✓ Sulfate de calcium

Peut être de gypse, de l'anhydrite ou l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité $3\text{à}5\%$ maximum. Son rôle est de réguler la prise du ciment.

II.3.1.3 Additifs

Ne doivent pas présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

- Agent de mouture, fréquemment employés, ce sont des sels organiques solubles à des doses extrêmement faibles. Ils agissent comme déflaquant empêchant le réagglomération des grains en cour de broyage.
- De sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, béton ou coulis qui, agissent sur une caractéristique bien précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée pour éviter d'éventuelle incompatibilité avec d'autres produits.

II.3.1.4 Classification des ciments

Les ciments sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression à 28 jours .la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes:

Tableau II .2 : Classification des ciments selon leurs résistances [28].

Classement des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Resistance maximale à 28 jours
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Les classes «R», rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leurs intérêts particulièrement dans certaines circonstances telles que le bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...

II.3.1. 5 Principales catégories des ciments

La norme P 15.301 [29] distingue 4 catégories, à savoir :

- le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97% de clinker, le reste est du filler.

- le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65% de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des constituants définis précédemment.
- le ciment d'haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 et 75% de laitier le reste des constituants est du clinker ou du filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants.
- le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80% de laitier, le reste est du clinker ou du filler dans la limite de 3% également.

II.3.2 Les granulats (sables et gravillons)

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sables, gravillons, cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats extraits de ballastières naturelles ou des rivières, et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières ; les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [30]. Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70%) de volume de plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures. Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton de plusieurs manières :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte du ciment ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal des granulats ..;

II.3.3 L'eau

Est un constituant nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. La quantité d'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, est normalisée par la norme NF P 18-303. Les eaux ne doivent pas contenir de produits risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension (2 ou 5g/l) dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales. Il convient donc d'y apporter une grande attention lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage.

II.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton en faible quantité, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leurs efficacités sont liées à l'homogénéité de leur répartition dans le béton [31], [32]. Les principaux adjuvants sont:

✓

e fluidifiants (ou réducteur d'eau) : Ces produits jouent un double rôle. ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C constant (ils doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110% minimum [28]) ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C (réduction de dosage en eau de 5%) pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [33]. Dans le premier cas l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, très plastique jusqu'au béton auto-plaçant ; dans le cas des bétons auto-plaçant on utilise des super plastifiants qui sont des fluidifiants très puissants .

✓

Les retardateurs de prise de ciment : Dans le cas de bétonnage en temps chaud ou d'éléments massifs il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur dans le béton , de manière que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas . Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.

✓

Les accélérateurs de prise du ciment : Pour le bétonnage en temps froid, on utilise les accélérateurs de prise pour provoquer l'hydratation et accélérer le durcissement freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours et à des âges avancés.

✓

Les entraîneurs d'air : Ils permettent d'entraîner à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion de béton dans le béton durci. Ces micro-bulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action de gel et améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

✓

Les additions minérales :

Il existe deux catégories de fines minérales :

-les fines actives à caractère pouzzolanique : ce sont des particules de faible diamètre qui, ajoutées en quantité de l'ordre de 10% du poids du ciment, améliorent notablement les performances de résistance et de la durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de la silice, laitier...) [34], [35].

-les fines inertes comme les fillers calcaires : l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons auto plaçant qui nécessite une forte teneur pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

II.4 Composition des bétons

L'étude d'une composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soit celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [36]. Il existe de nombreuses méthodes dont on retiendra 2 types :

- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « continue ».
- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « discontinue ».

II.4.1 Critères en fonction de la destination des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destinations que dans leurs dimensions et toutes études de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Quatre critères principaux doivent être retenus [36] :

- La dimension maximale des granulats ;
- Les résistances ;
- L'ouvrabilité ;
- L'agressivité du milieu ambiant ;

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans la méthode de Dreux- Gorisse.

✓ Dimension maximale D des granulats

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrage, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces,...), mais elle dépend également des dispositifs de ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage). Une valeur de D est préconisée par George Dreux [36].

✓ **Résistance souhaitée**

D'après les notes de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé. Cette résistance caractéristique se calcule d'après le résultat sur éprouvettes de contrôle (soumises à la compression) en déduisant de la moyenne K fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour K la valeur de 0,85 à 1,2 en général et selon les cas, il convient de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20% supérieure à la résistance caractéristique exigée. Ce critère de résistance conduira au choix de ciment (nature, classe) et son dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvant. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (gravier/sable).

✓ **Ouvrabilité**

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en place pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage de coffrage et son ségrégation. Ce critère peut, en générale se définir à partir de la plasticité par mesure de l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau II.5. L'ouvrabilité pour le béton est une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de compression d'un béton.

Tableau II.5 : Consistance du béton [28].

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
fluide	> 16	Léger piquage

✓ **Agressivité du milieu ambiant**

Le milieu ambiant dans le quel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton ; la présence d'eau agressive (eau de mer, gypseuse, très purs, ...) et condition thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrage à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'adjuvant.

II.4.2 Formulation du béton

Les méthodes proposées sont nombreuses ; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence pondéraux. Le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac, on citera [28] :

-Méthode de BOLOMY ;

- Méthode D'ABRAMS ;

- Méthode de FAURY ;

-Méthode de VALETTE ;

- Méthode de BARON-LESAGE ;

- Méthode de DREUX et GORISSE ;

▪ Méthode de BOLOMY :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et en s'efforce de réaliser, avec des granulats qu'on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence

theorique.la formule de base est la suivante : $P = A + (100 - A) \frac{d}{D}$

Avec :

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d, D : diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins, à une granulométrie continue.

▪ Méthode d'ABRAMS

Cette règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour un mélange de granulats à partir de la connaissance de la finesse des granulats à employer. Cette règle de mélange d'ABRAMS permet de calculer le pourcentage relatif des granulats de module de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange.

- **Méthode de FAURY**

FAURY a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace donc pour l'ensemble de mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qu'est composée de deux droites. L'abscisse du point de rencontre des deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante

:

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

Le paramètre A est choisi dans un tableau et D est exprimé en dimension passoire. B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou. R est le rayon du moule.

- **Méthode de VALLETTE**

Dans le cas le plus courant on partira, en général, de deux granulats : un sable 0/5 mm et un gravier présente une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple. On calcule le dosage de sable qui s'obtient on mesurant les vides de sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment .On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier . On obtient alors un béton plein avec un minimum de sable et le moins dosé.

- **Méthode de BARON -LESAGE**

Elle a pour objet d'obtenir sur le chantier un béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peu être faite soit à partir de mesures de compacité, soit à partir de mesures de temps d'écoulement. Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton et ce quelles que soient les conditions de la mise en œuvre et la teneur en eau. La méthode consiste à déterminer le constituant, les proportions des constituants pour que la fonction soit maximale.

- **Méthode de DREUX et GORISSE**

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduisent à déterminer le dosage en ciment et en eau. une courbe de référence granulaire et ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité de serrage, module de finesse du sable, etc. Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose. En fin la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré .il s'agit ensuite quelques essais sur se béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

II.5 Comportement instantané du béton

II.5.1 Compression

Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment utilisé est le cylindre de $\varnothing=16$ cm dont la section est de 200 cm^2 . la normalisation Européenne indique comme dimension des cylindres $\varnothing=16$ cm de $H=32$ cm [28].

Les résultats sont donnés sous forme d'une courbe contraintes-déformations :

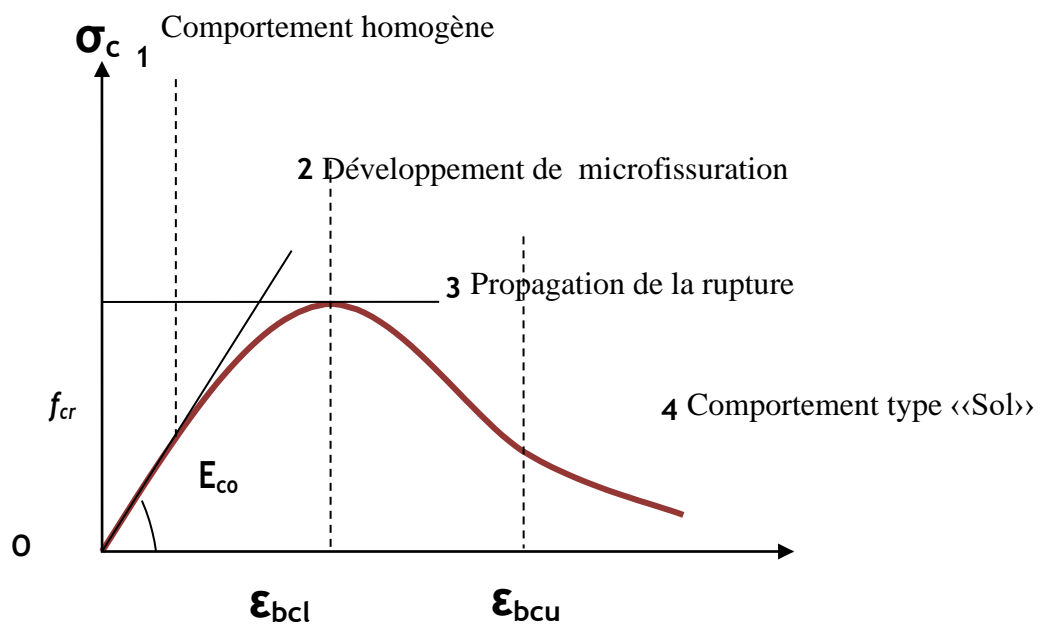


Figure II.1 : Le diagramme σ - ε d'un béton en compression [37].

Phase 1 : ($\sigma < 0.4 f_{cr}$) environ : comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique.

Dans cette phase le béton suit sensiblement la loi de Hook ; la pente à l'origine de la courbe est le module de déformation longitudinal tangent à l'origine E_{co} .

Phase 2 : développement de la microfissuration d'où incurvation progressive de la courbe jusqu'à la résistance à la compression f_{cr} (contrainte maximale) atteinte pour une certaine valeur ε_{bc1} , de la déformation.

Phase 3 : la pente de cette branche renseigne sur le caractère fragile plus ou moins accentué du béton étudié (si elle est presque horizontale, le béton est très ductile, si elle est quasi verticale, le béton est très fragile).

Phase 4 : cette phase est sans intérêt pratique ; le béton désagrégé se comporte comme un sol «tout- venant».

Il existe une déformation limite $\epsilon_{c,lim}$ qui , conventionnellement , correspond à la frontière entre les phase 3 et 4 mais qui , pratiquement correspond au point à partir duquel on n'est plus en mesure de maîtriser la déformation et donc d'enregistrer la courbe.

II.5.2 Traction

Plusieurs essais sont réalisés pour avoir le comportement du béton à la traction :

a) En traction-flexion : c'est l'essai plus couramment utilisé.il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de coté **a** et de longueur **4a** (voir la figure III.2). pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points de Pa

l'application de la charge est : $M=Pa/2$

La section pour module d'inertie $I/v=a^2/6$ et la contrainte de traction

Correspondante sur la fibre inférieure est : $f_{ij}=Mv/I=6M/a^3$

Toutefois , la comparaison des résistances obtenues en traction flexion avec celles mesurées en traction directe ou par fendage montre que ces dernières sont en général et en moyenne inférieures de 40% par rapport aux premières ;ceci peut s'expliquer par la plastification du béton dans la phase pré rupture ; ne sont alors

contraintes et des déformations).On affecte donc d'un coefficient 0,6 les valeurs plus valables, les lois d'élasticité qui donnent $\sigma =6M/a^3$ (proportionnalité des contraintes et des déformations).On affecte donc d'un coefficient 0,6 les valeurs trouvées en traction flexion et le calcul dans ce cas se fait par la formule : $3,6M/a^3$

b) En traction par fendage : l'essai consiste à écraser un cylindre du béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse ; cet essai est souvent appelé «Essai Brésilien». la rupture se produit par apparition des fissures suivant le plan diamétral correspondant (voir la figure II.2).

c) En traction directe, la mesure se fait par la mise en traction de cylindres identiques aux précédents (voir la figure II.2). la rupture survient par formation d'une fissure perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.

P est la charge maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction

du plan diamétral vertical, la résistance en traction sera : $f_{tj} = \frac{2P}{\pi DL}$

Avec : j=âge du béton (en jour) au moment de l'essai ; D et L = diamètre et longueur du cylindre

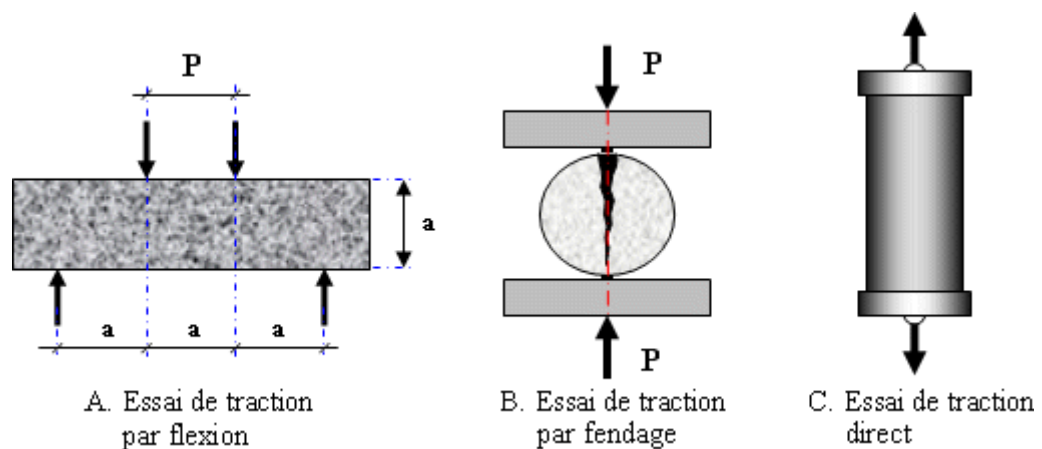


Figure II.2 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction [38].

II.6 Comportement différé du béton

Tous les matériaux, et entre autres le béton, sont, à des degrés divers, viscoélastique. Le facteur temps intervient donc dans leur comportement et dans la formulation de leurs déformations. Il faut donc distinguer les déformations instantanées des déformations différées qui se produisent au cours du temps. Cela est d'autant plus vrai pour le béton dont la résistance s'accroît asymptotiquement avec le temps à mesure que se complète l'hydratation du ciment.

II.6.1 Retrait

Le béton est l'objet de retrait, c'est-à-dire d'une réduction dimensionnelle, en l'absence de chargement, due essentiellement à l'évaporation de l'eau excédentaire interne [41]. On distingue :

Le retrait plastique : créé par la dessiccation de pâte de ciment au début de phénomène d'hydratation ; la cure de béton a pour but de prévenir les effets de ce retrait qui, non contrôlé, peut être à l'origine de fissurations importantes.

Le retrait thermique : due aux effets des gradients de température qui se manifestent dans le béton lors de la dissipation de la chaleur d'hydratation.

Le retrait à long terme du béton durci : ou retrait proprement dit, due à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton et, à moindre échelle, à la poursuite de l'hydratation du liant, toutes causes qui ont pour effet de réduire l'hygrométrie des pores du béton.

II.6.2 Fluage

Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est fonction notamment des caractéristiques de béton, de l'âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais mal compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice.

II.7 Corrosion des bétons

✓ **Gonflement dû au sulfate**

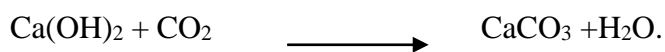
Les eaux souterraines contiennent parfois des sulfates en solution (les eaux séléniteuses contiennent du sulfate de calcium) ; un gonflement peut être occasionné, si la teneur en sulfate atteint une certaine concentration ; l'aluminate tricalcique et le sulfate de calcium se combinent pour donner un trisulfate «étringite» hydraté qui constitue un sel gonflant par suite de fixation d'un grand nombre de molécules d'eau [36].

✓ **Réaction alcali-granulats**

Dans les granulats, certains constituants amorphes et mal cristallisés de la silice (SiO₂) sont sensibles aux alcalis et peuvent en présence d'humidité réagir avec un hydroxyde alcalin provenant du ciment (NaOH, Ca(OH)²) ; il se forme des silicates alcalins hydratés plus volumineux entraînant la désagrégation du béton en présence d'humidité qui se traduit par des fissurations, du faïençage à mailles plus au moins serrées, des gonflements provoquant des déformations éventuelles parfois très importantes de la structure, des écaillages, des exsudations des cratères superficiels. Ces désordres qui certes n'apparaissent pas tous, peuvent dans certains cas entraîner plus au moins longue échéance la ruine totale de l'ouvrage.

✓ **Carbonatation**

La carbonatation du béton est dû à l'action de l'acide carbonique CO₂ (dioxyde de carbone) qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0,5%) sur la chaux libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO₃ [36].



Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le pH (13 dans le béton non carbonaté) à 11,5 ou 9, neutralisant ainsi progressivement l'alcalinité du béton et son rôle «passivant» sur les armatures qui ne sont plus protégées, se corrodent.

II.8 Différentes types de béton

II.8.1 Béton à haute performance BHP

Ils présentent une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) supérieur à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0,40. Leurs principales propriétés sont:

- Sur le béton frais, une maniabilité accrue.
- Sur le béton durci:
 - une augmentation mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant aux jeunes âges qu'à terme ;
 - une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée ;
 - une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité ;
 - une plus grande résistance à l'abrasion ;
 - une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.

II.8.2 Béton du futur

Ils appellent bétons à très hautes performance «BHTP», ou à très hautes résistance, leur résistance caractéristique à la compression dépasse 200MPa. Outre que cette dernière, les autres caractéristique sont améliorées, comme le coefficient d'élasticité, la résistance à l'attraction ou la compacité. Ayant une très faible porosité, leur teneur aux principales agressivités de l'environnement telles que carbonatation, pénétration aux ions chlore, cycle gel/dégel, tenue à l'abrasion, est excellente.

II.8.3 Béton de granulats légers

Dans la construction d'un certain nombre d'ouvrages, une réduction de poids est de nature à entrainer des économies générales. L'emploi de granulats légers permet de réaliser des bétons pour lesquels la densité peut varié de 0,5 à 2,0 mais dont la résistance en compression est d'autant plus faible que la densité est moins élevée. Elle n'est que de 2 à 5MPa pour des bétons de vermiculite de densité 0,5 en moyenne, mais elle peut atteindre 40MPa pour des bétons d'argile ou schiste expansé de densité 1,7 à 1,9 réalisés avec des granulats légers de bonne qualité. Plusieurs ouvrages importants tels que les ponts en béton armé et en béton précontraint, des immeubles, des couvertures en voile mince ont été réalisés avec des bétons légers. Cependant après une période de grande vogue, l'utilisation des bétons légers est assez ralentie surtout limité à des éléments préfabriqués.

II.8.4 Béton cellulaire

Il ne s'agit pas de bétons à proprement parler mais plutôt de mortiers. On rajoute à se dernier :

- Soit une matière génératrice de gaz en présence du ciment (le plus souvent de l'hydrogène), comme par exemple de la poudre d'aluminium, ce qui donne un béton-gaz, la réaction chimique étant :



Ils sont destinés aux produits préfabriqués. A cette sujétion s'ajoute le fait qu'ils sont habituellement traités par étuvage ou autoclavage, ce qui présente l'avantage, en plus de la possibilité d'atteindre rapidement leur résistance, de diminuer dans de grandes proportions les inconvénients dus au retrait.

- soit un produit moussant à base de savons ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de petites bulles, ce qui donne un béton mousse. Leur utilisation allant du comblement de grands volumes du type comblement de carrière, de puits...

S

II.8.5 Béton lourds

La fabrication de béton lourds a déjà été, depuis longtemps, envisagée mais l'emploi de ces bétons était très limité (contreponds de certains ponts basculants). Les bétons lourds ne diffèrent essentiellement des bétons classiques sauf par les granulats employés (sable 0/3mm, gravillon 3/7mm, gravier 7/15 et 15/30).

II.8.6 Béton à base de résines

Ces résines sont des produits synthétiques qui présentent, entre autres propriétés, une remarquable adhésivité, en présence d'un catalyseur, elles durcissent plus au moins rapidement par polymérisation (association de molécule identiques engendrant des molécules plus grosses). Ils sont employés comme liants pour confectionner certains bétons. Parmi les résines mieux adaptées, on distingue :

- Les résines polyester : prévenant de l'industrie charbonnière.
- Les résines époxydes : issue de la chimie de pétrole.

Les bétons à base des résines peuvent présenter des résistances élevées en particulier en traction et elles sont atteintes en quelques jours, leur emploi est limité, restent dans le domaine de laboratoire (petits élément). Ils présentent aussi un module d'élasticité deux fois plus faible à ceux des bétons de ciment et un fluage du même ordre lorsque la température ne dépasse pas 20°C (huit fois plus important que le béton de ciment).

II.8.7 Béton de fibres

Il y a longtemps que l'on cherché à améliorer la résistance à la traction des béton de ciment (ou de mortier) en y incorporant des fibres résistantes : les plaques de «fibro- ciment» sont un exemple bien connu de mortier de ciment comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction . Actuellement plusieurs natures de fibres sont utilisées, elles doivent présenter des qualités suivantes :

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pate de ciment ;
- Avoir une bonne résistance à la traction ;
- Ne risquer d'être attaquer par les milieux basique du ciment ;
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres ;
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipule ;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le cout du

béton. Quelques fibres incorporées dans le béton :

- En acier, copeaux d'acier ;
- En fente ductile, leur intérêt, outre une bonne adhérence, de ne pas corrodables ;
- En fibres de Carbonne (cout élevé);
- En verre dont la composition chimique est étudié pour ne pas être attaqués par

les alcalins du ciment.

Conclusion

Une synthèse de notre recherche bibliographique sur le matériau béton est présentée dans le chapitre 2. On a présenté d'abord un bref historique sur le béton et ses principaux composants (eau, ciment, granulats et éventuellement des adjuvants) , un rappel du comportement du béton et les différents processus de sa dégradation qui peuvent être d'ordre chimiques, physiques et mécaniques (modes d'endommagements) sont aussi présentés.

Chapitre III

*Élaboration des Matériaux
d'études.*

III.1 Introduction

Ce chapitre concerne la partie expérimentation où tous les détails et les étapes sont fidèlement reportés. Cette étude expérimentale est réalisée au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Les constituants de base de notre Béton Témoin (de référence) sont le ciment, l'eau et le sable. Les autres bétons sont confectionnés par ajouts de poudre et de sable de verre à différentes proportions. Différentes formules de bétons à base du verre recyclés ont été comparées au béton formulé sans déchets. Le déchet de verre en poudre ou en sable a été utilisé comme remplacement partiel au ciment et au sable avec les pourcentages suivants : 0, 5 ; 10 et 15 % .

Une fois les proportions des constituants du béton calculée, construit le coffrage et le bétonnage, assuré le mûrissement des éprouvettes ainsi que tous les réglages concernant les essais de caractérisation (machine, paramètres et configuration) et les moyens de mesure sont correctement établies, une exploitation des différents résultats sera présentée en détail dans le chapitre suivant. Les résultats obtenus, pour chaque variante, nous permettra de fournir des informations nécessaires à la compréhension du comportement mécanique des éléments étudiés, puisque l'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction est évidemment la résistance mécanique.

Après la présentation des matériaux utilisés, la première étape consiste en la définition des différents constituants par une analyse granulométrique, Module de finesse, Masse volumique,... la seconde étape concerne la réalisation des éprouvettes avec les différentes configurations.

Remarque

*La caractérisation expérimentale de ces matériaux (sable, granulats, poudre et sable de verre non coloré) est présentée. A préciser que cette partie a été réalisée en étroite collaboration avec Melle SEDKI.Meriem (Mémoire sur **la caractérisation d'un béton à base de déchets de verre coloré**) étant donné qu'on a travaillé en groupe sous la direction de notre promotrice.*

III.2 Présentation des matériaux étudiés

III.2.1 Matériaux

III.2.1.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit grâce à des réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. On a utilisé un ciment de marque CIMATCEM II /A-L 42.5 R.

III.2.1.2 L'eau

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau potable (propre).

III.2.1.3 Les granulats

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures roulés pour le sable (0/3) et concassés pour les graviers (3/8 et 8/15). Les grains de sable sont composés de fragments de roche, de minéraux et peuvent également contenir des débris d'origine organique ou synthétique. En général, les gros granulats sont constitués de fragments de roches tandis que les sables fins sont principalement constitués de minéraux détachés de leur roche d'origine. Dans notre cas nous avons utilisé un sable et du gravier provenant d'une sablière, stocké à l'université, lavés, séchés à l'étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures et conservés à l'intérieur du laboratoire (sable et granulats secs et propres).



Figure III.1 : Sable passer au tamis.



Figure III.2 : Les différents granulats utilisés.

III.2.1.4 Ajouts minérales

- **Poudre de verre**

La poudre de verre provient des déchets de verre de bouteilles non 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 Boumerdès. 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. La poudre de déchet de verre a été utilisée en substitution du ciment pour voir son influence sur le comportement du béton .

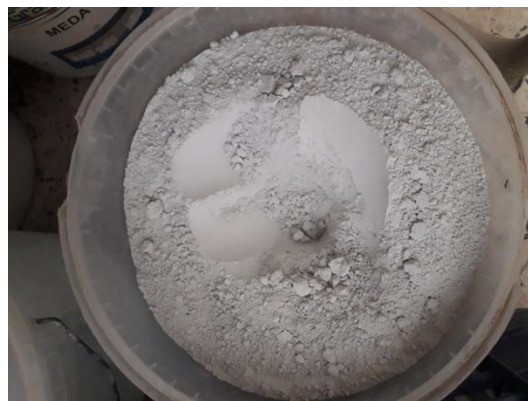


Figure III.3 : La poudre de verre utilisée.

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

Mélanges	ciment	Poudre de verre
1 ^{er} mélange	95%	5%
2 ^{ème} mélange	90%	10%
3 ^{ème} mélange	85%	15%

- **Sable de verre**

Le sable de verre provient aussi des déchets de verre de bouteilles ramassées dans la région de Tizi-Ouzou. 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 broyeur. La classe granululaire de déchet de verre recyclé est comme celle du sable (0/3).

**Figure III.4** : Déchet de verre ramassé**Figure III.5** : Nettoyage des déchets de verre.**Figure III.6** : Séchage des déchets de verre .**Figure III.7** : le sable de verre.

Tableau III.2 : Mélanges des bétons préparés avec sable de verre.

Mélanges	Sable	Sable de verre
1 ^{er} mélange	100%	0%
2 ^{ème} mélange	95%	5%
3 ^{ème} mélange	90%	10%
4 ^{ème} mélange	85%	15%

III.3 Analyse Granulométrique (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].

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, dans la partie inférieure, on dispose d'un fond étanche pour récupérer les fillers.. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de diamètre 0/3, 3/8 et 8/15. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

**Figure III.8 :** Tamiseuse.

Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (III.3), (III.4) et(III.5) :

Tableau III.3 : Analyse granulométrique du sable (0/3).

Ouverture des tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	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

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du gravier (3/8).

Ouverture des tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	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

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du gravier (8/15).

Ouverture des tamis [mm]	Refus en [g]	Refus cumulés en [g]	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

Les valeurs des différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, voir la figure (III.9):

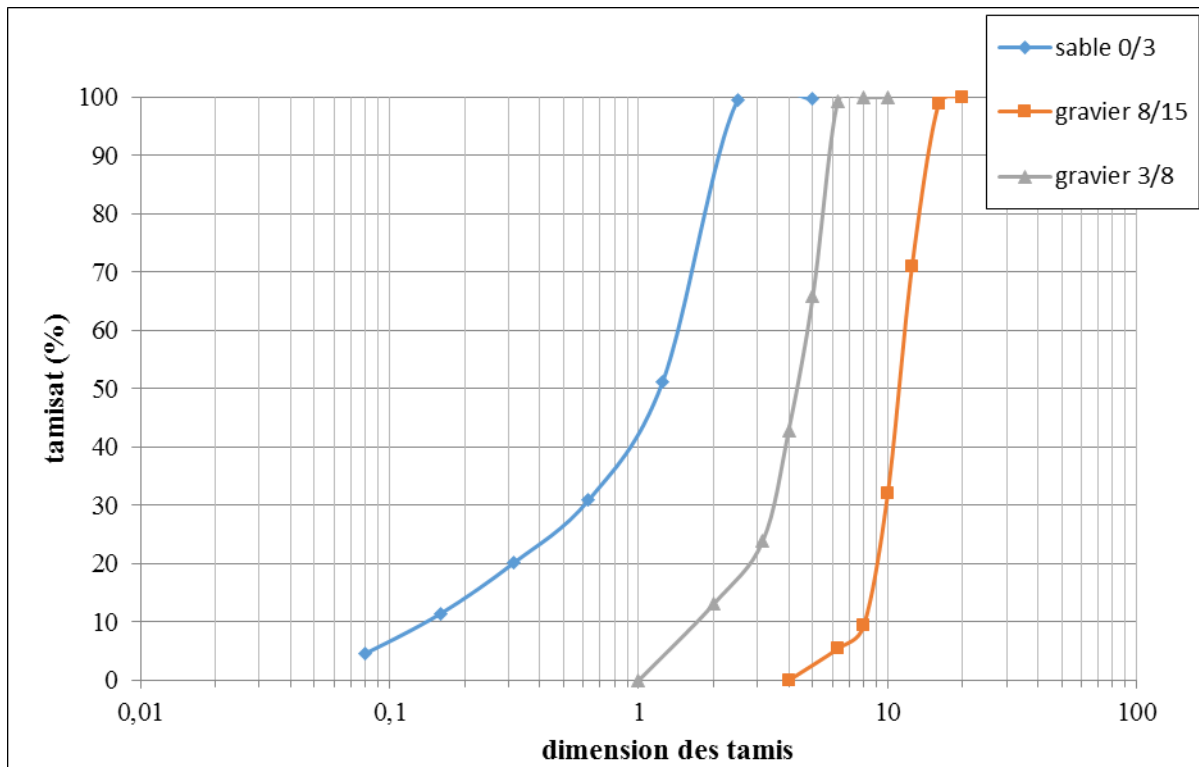


Figure III.9 : Courbes granulométriques.

III.4 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne doivent exister ni en excès, ni en trop faible proportion s'il y'a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié 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.6:

Tableau III.6 : Module de finesse du sable.

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

		1,8 < MF < 2,2 Sable fin
--	--	--------------------------

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

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

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps, le volume absolu 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.7):

Tableau III .7 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.

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

III.6 Équivalent 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.8):

Tableau III. 8 : valeur de l'équivalent de sable.

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

En conclusion, on dira que le sable est propre.

III.7 Formulation de notre béton de référence (Témoin)

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.

$$\sigma'_{28j} = 1,15 \sigma_{28j}$$

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

$$\sigma_{28j} = 25 \text{ MPa}$$

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

$$\sigma'_{28j} = 1,15 \times 25 = 28,75 \text{ MPa}$$

- **Dosage en ciment et en eau**

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

$$R'_{28} = G\sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

D'où :

$$\frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{G\sigma'_c} + 0,5$$

R'_{28} : 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).

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisi dans le tableau III.9 ci-après établi par *DREUX*.

Tableau III.9 : 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 : $\frac{C}{E} = \frac{28,75}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2,00$

- **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

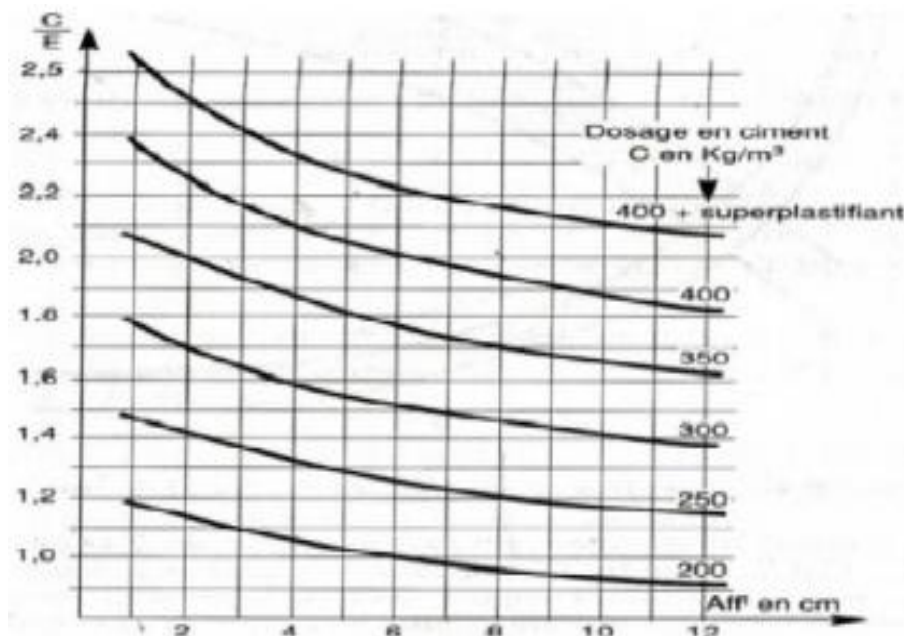


Figure III.12: Abaque pour évaluer le dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée.

- **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 tamisats 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:

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

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

Avec : $K = K_s + K_p + k$

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 $k=0$ (Tableau 10-12 de *DREUX* [1981]).

Avec :

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

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

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

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 $K_p = 0$.

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

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%

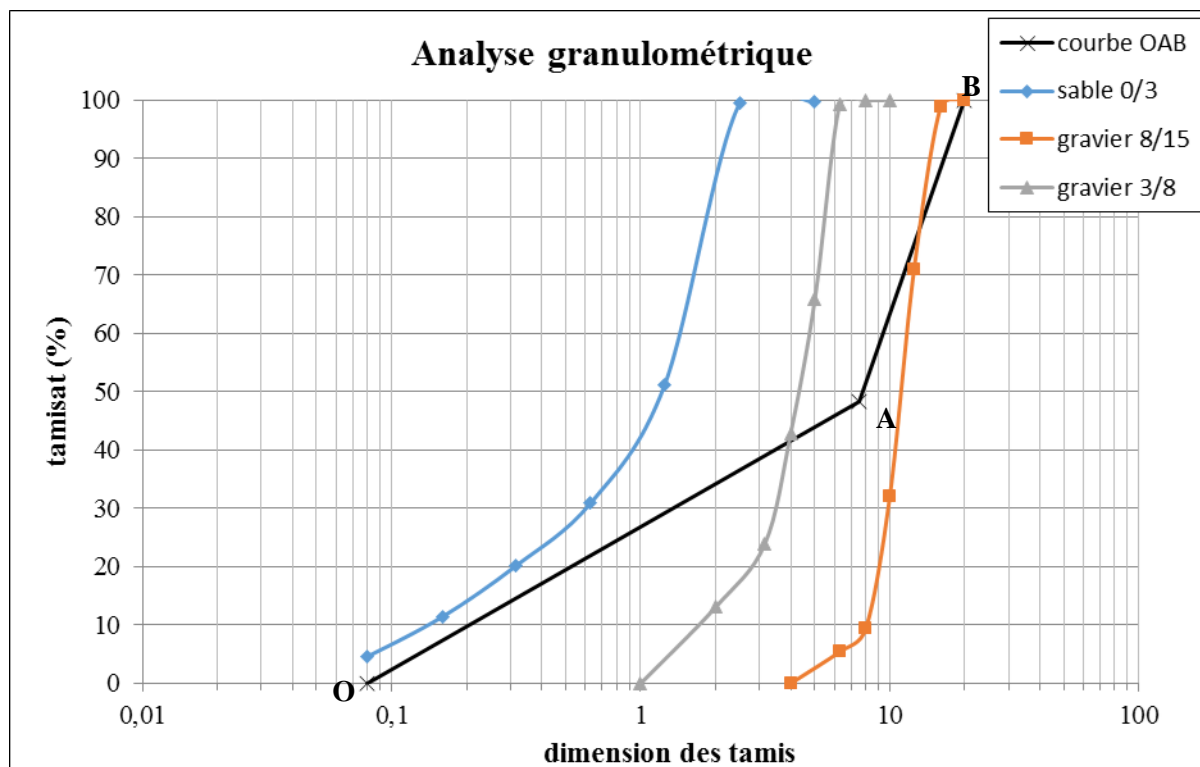


Figure III.13 : Courbe granulométrique et la courbe de référence OAB.

- **Coefficient de compacité α**

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 .

$$\alpha = V_M / 1000$$

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

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:

Le volume absolu du ciment $V_c = \frac{m_c}{\gamma_c} = \frac{400}{3,1} = 129,03 \text{ L}$

Avec :

m_c : Dosage (en masse) de ciment.

γ_c : Masse volumique du ciment.

Le volume absolu des granulats (l'ensemble)

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

Le volume absolu du sable

$$V_s = \frac{V_g \times 32}{100} = 0,32 V_g = 222,72 \text{ L}$$

Le volume absolu du gravier (3/8)

$$V_{G3/8} = 0,15 \times V_g = 0,15 \times 695,97 = 104,39 \text{ L}$$

Le volume absolu du gravier (8/15)

$$V_{G8/15} = 0,53 \times V_g = 0,53 \times 695,97 = 368,86 \text{ L}$$

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

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

$$\text{Masse du gravier (3/8) : } M_{G3/8} = V_{G3/8} \times \gamma_{G3/8} = 272,32 \text{ Kg}$$

$$\text{Masse du gravier (8/15) : } M_{G8/15} = V_{G8/15} \times \gamma_{G8/15} = 1003,37 \text{ Kg}$$

La composition finale du notre béton de référence est résumée dans le tableau(III.10) :

Tableau III.10 : Formulation des bétons avec les granulats de verre.

	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau	Ciment	E/C
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.11) :

Tableau III.11 : Composition volumique et pondérale du béton témoin pour 1m³ de béton.

Composants	Ciment	Poudre de verre	Sable de verre	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau
Béton témoin	8,896	/	/	13,02	6,056	22,31	4,448
Béton1 5%PV ET 0%SV	8,4512	0,448	/	13,02	6,056	22,31	4,448
Béton1 5%PV ET 5%SV	8,4512	0,448	0,6513	12,375	6,056	22,31	4,448
Béton1 5%PV ET 10%SV	8,4512	0,448	1,3027	11,724	6,056	22,31	4,448
Béton1 5%PV ET 15%SV	8,4512	0,448	1,95405	11,07296	6,056	22,31	4,448
Béton1 10%PV ET	8,0064	0,8896	/	13,02	6,056	22,31	4,448

0%SV							
Béton1 10%PV ET 5%SV	8,0064	0,8896	0,6513	12,3756	6,056	22,31	4,448
Béton1 10%PV ET 10%SV	8,0064	0,8896	1,3027	11,7243	6,056	22,31	4,448
Béton1 10%PV ET 15%SV	8,0064	0,8896	1,95405	11,07296	6,056	22,31	4,448
Béton1 15%PV ET 0%SV	7,5616	1,3344	/	13,02	6,056	22,31	4,448
Béton1 15%PV ET 5%SV	7,5616	1,3344	0,6513	12,3756	6,056	22,31	4,448
Béton1 15%PV ET 10%SV	7,5616	1,3344	1,3027	11,7243	6,056	22,31	4,448
Béton1 15%PV ET 15%SV	7,5616	1,3344	1,95405	11,07296	6,056	22,31	4,448

III.8 Fabrication du béton

Pour notre étude nous avons confectionné plusieurs formules de Béton soient 0%, 5% 10% et 15% de poudre et de sable de verre en substitution dans le ciment et dans la sable, comme indiqué dans le tableau III.11 ci-dessous pour voir la meilleure variante lors des essais de compression. Une étude comparative est alors effectuée entre les résultats obtenus pour le béton de référence et ceux des bétons à base de poudre et de sable de verre.

Par définition 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 sous charge doit être effectuée sans choc et d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On rappellera que les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont de formes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm (NF EN 12390-3).

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 une cure de 28 jours. Après la période de durcissement requise, les échantillons ont été retirés du bac d'eau et ont été essuyés.



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



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

III.9 Chargement et acquisition des valeurs

Essai de résistance à la compression (NF EN 12390-3)

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson ν) ainsi que la loi de comportement du béton. La charge de rupture F est la force maximale enregistrée au cours de l'essai. Si « S » est la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance à la compression σ_c est donnée par la relation : $\sigma_c = F/S$. La figure suivante représente le dispositif d'essais.

Tous les cylindres sont soumis à un chargement uni-axial en compression jusqu'à la rupture de ces derniers. La vitesse de chargement était constante de l'ordre de 0.5 MPa/s pendant toute la durée du chargement.

Le raccourcissement axial et l'expansion latérale des échantillons sont mesurés par un montage équipé de deux comparateurs de déplacements installés respectivement dans le sens vertical et radial avec lecture visuelle des données. Cette acquisition manuelle des données, a été relativement délicate au moment de la lecture à une vitesse suscitée du chargement, ainsi les déformations transversales calculées à partir de mesures effectuées à mi hauteur des spécimens, sont une indication de l'expansion latérale des différentes éprouvettes due à la charge de compression axiale (effet de Poisson).

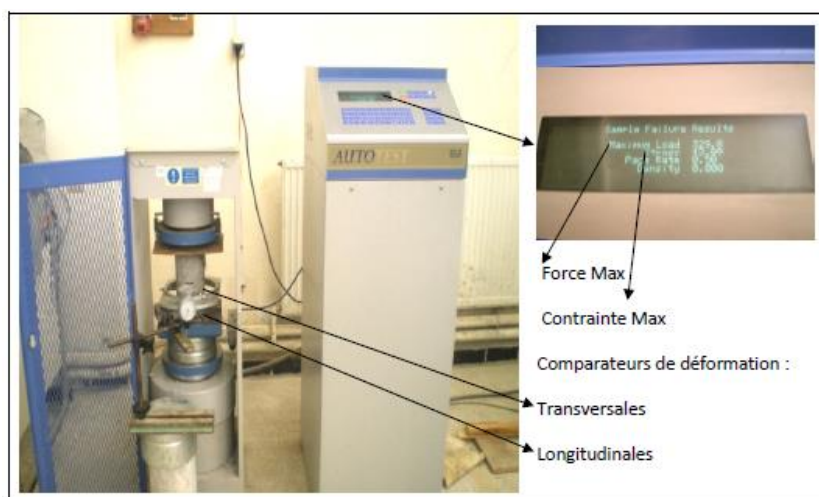


Figure III.16 : Dispositif d'essai.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes nécessaires pour la détermination des proportions des différents constituants du béton en utilisant la méthode de *DREUX GORISSE*. Plusieurs pourcentages de déchets de verre sous forme de poudre et de sable (0%, 5%, 10%, et 15%) ont été utilisés dans les formulations de nos bétons. Ces derniers ont été soumis à des essais de compression simple afin de déterminer leurs résistances et comportement mécanique.

Chapitre IV

Présentation et Interprétation des résultats

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 la présentation et interprétation des résultats expérimentaux relatifs aux différentes variantes de composition des bétons. Les résultats des essais de compression de laboratoire sont représentés sous forme de courbes contraintes-déformations, sur ces courbes, les contraintes sont représentées en fonction des déformations. Chaque courbe représente la courbe moyenne de trois spécimens écrasés. Les résultats obtenus ont été par la suite comparé à ceux d'un béton témoin (sans ajouts) élaboré avec les mêmes constituants et dans les mêmes conditions de laboratoires.

Les différentes variantes utilisées pour la confection des bétons

- 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**)

Pour les besoins des essais de compression nous avons confectionné :

- 39 éprouvettes cylindriques (16x32) cm², soit 3 éprouvettes de béton pour chaque variante d'étude.

IV.2 Résistance en compression des bétons à 28 jours

Les essais de compression, sur ces éprouvettes cylindriques, ont été réalisés à 28 jours d'âge après leur construction et mûrissement. Ils ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance en compression du béton. Les courbes contrainte-déformation des spécimens testés présentent une allure bilinéaire qui se divise en deux catégories : des diagrammes de type ascendant et des diagrammes de type descendant (voir Figures ci-dessus).

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

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

Béton	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)
BT	30.24
B5P0S	29.21
B5P5S	29.61
B5P10S	28.98
B5P15S	32.41
B10P0S	31.08
B10P5S	26.7
B10P10S	30.7
B10P15S	29.77
B15P0S	27.86
B15P5S	28.86
B15P10S	27.38
B15P15S	30.3

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

- Le béton à 5% de poudre de verre

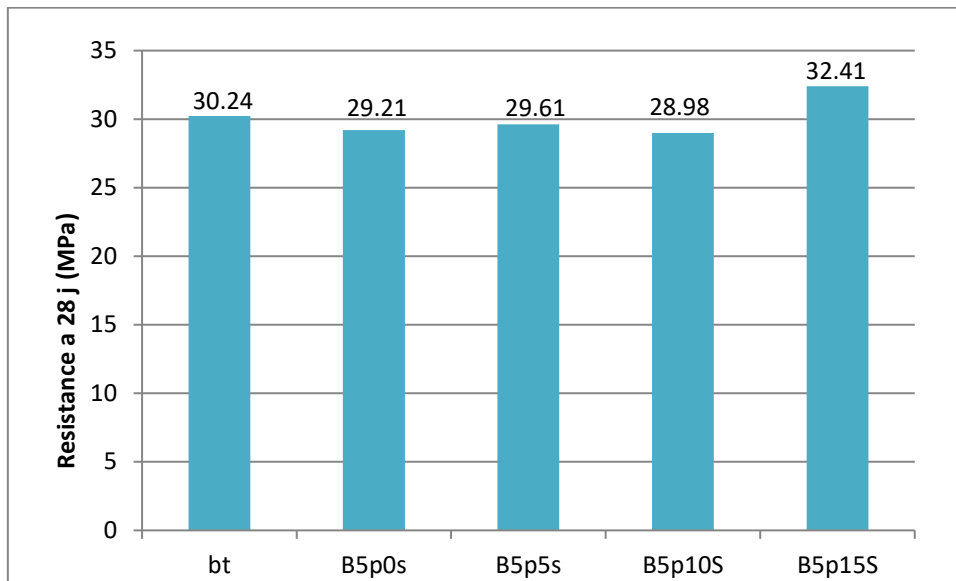


Figure IV.1 : Résistance à la compression des bétons avec 5% de poudre de verre.

Sur cet histogramme, on constate que contrairement aux autres types de bétons avec ajout, la variante B5P15S présente une contrainte de compression au pic supérieur à celle du béton témoin. Les résistances des bétons avec 5% de poudre de verre avec différents pourcentages de sable de verre (0% ,5%, 10% et 15%) sont légèrement inférieures pour ne pas dire presque les même et du même ordre. La différence des résistances est de l'ordre de 1.5 MPa.

- Le béton à 10% de poudre de verre

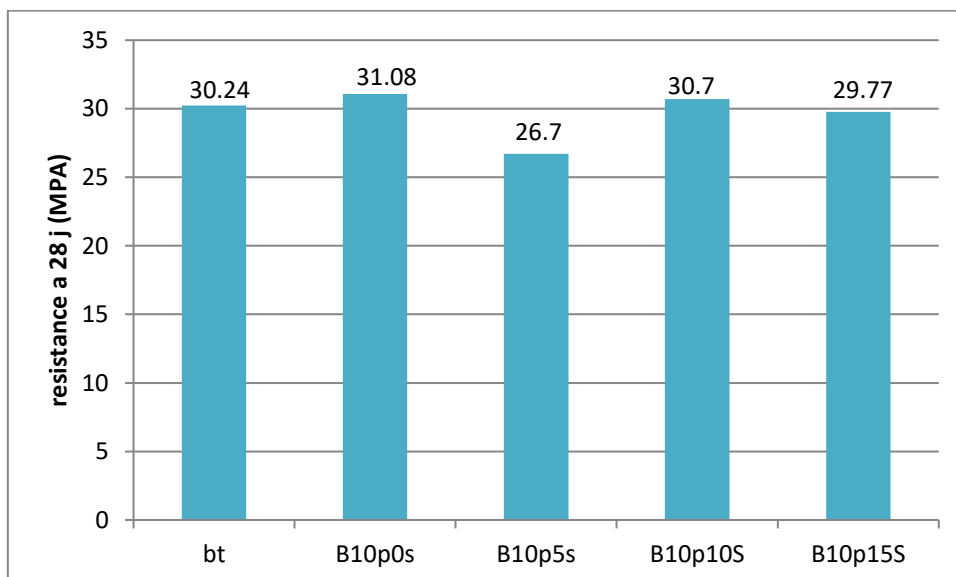


Figure IV.2 : Résistance à la compression des bétons avec 10% de poudre de verre.

Dans ce cas de figure de prime abord on remarque que la résistance à la compression des bétons B10P0S et B10P10S est légèrement supérieure à celle du béton de référence. Par contre cette dernière d'une valeur de 30,24MPa, elle est légèrement supérieure à la résistance à la compression des bétons avec déchets de verre, soit environ 3.54MPa pour le béton B10P5S, et 0.47 MPa pour le béton B10P15S.

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

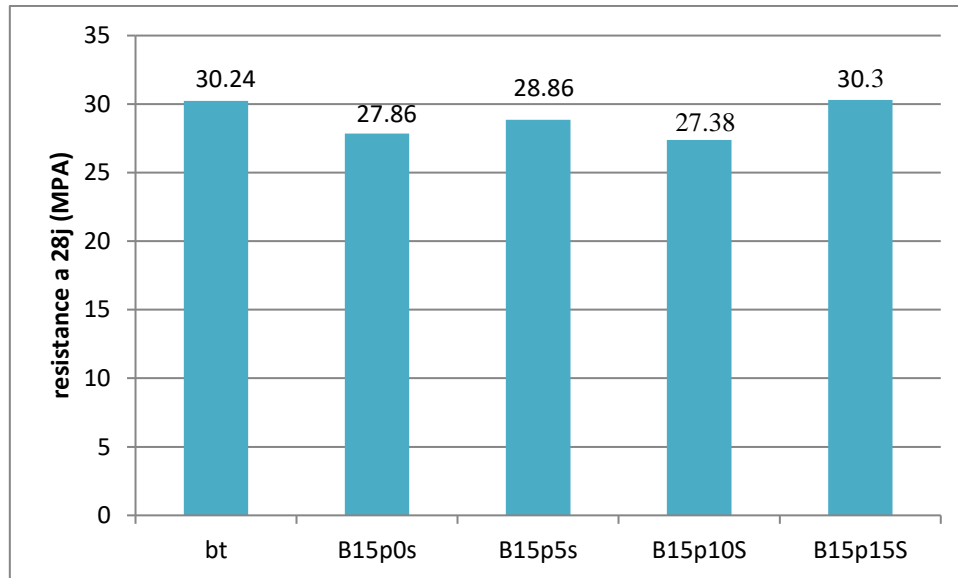


Figure IV.3 : Résistance à la compression des bétons avec 15% de poudre de verre.

Dans ce cas où la quantité de poudre de verre et sable de verre devient plus importante toutes les résistances de compression au pic subissent une légère chute. Cette chute de résistance atteint une valeur de l'ordre de 2.86 MPa pour le béton B15P10S qui présente une résistance de 27.38 MPa. A noter que c'est la petite valeur de résistance enregistrée.

Nous avons par la suite, présenté les différentes courbes d'évolutions des contraintes en fonction des déformations pour chaque cas de variante. L'objectif est d'évaluer le comportement en compression simple.

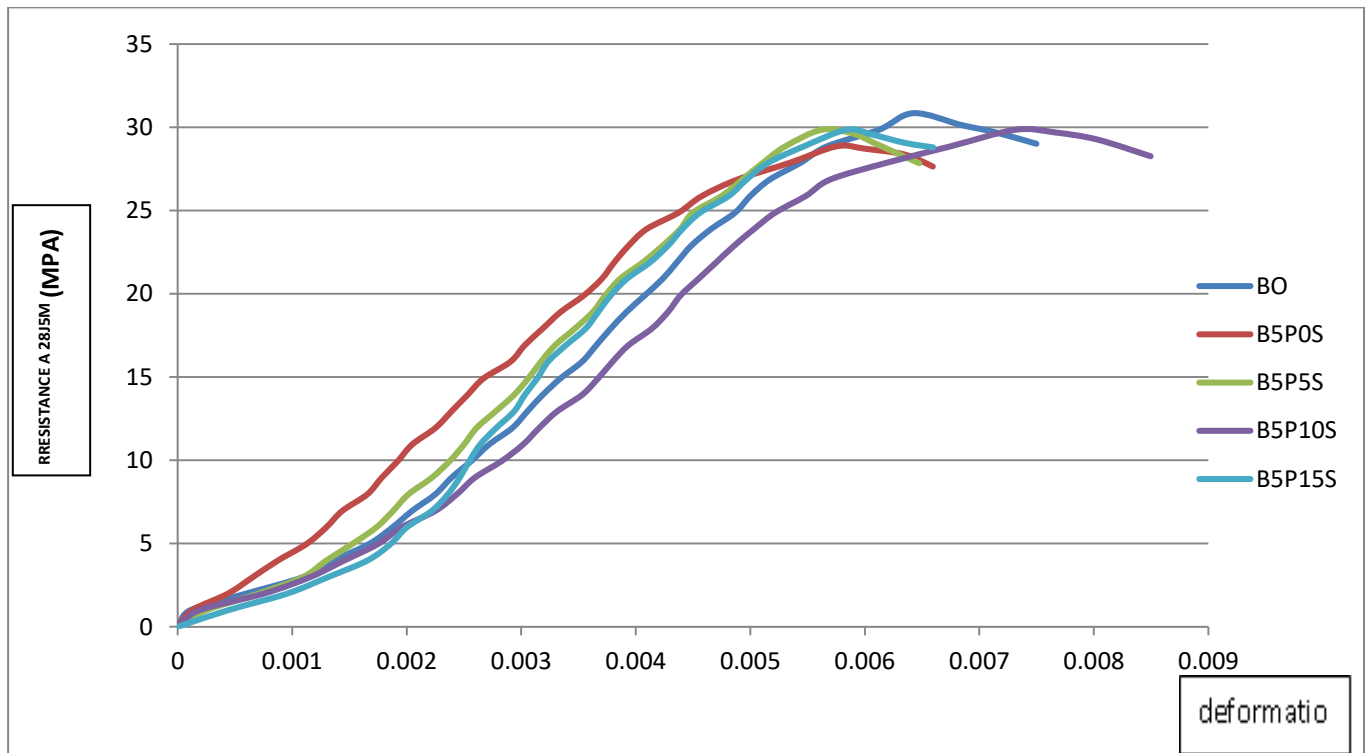


Figure IV.4: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 5% de poudre de verre.

Typiquement, toutes les courbes contraintes-déformations, représentées sur la figure ci-dessus, présentent une pente initiale qui suit celle du béton témoin (de référence) jusqu'à un point d'inflexion. Suivie d'une zone de déformation élasto-plastique plus importante selon les différentes variantes d'études.

On distingue ainsi sur chaque courbe trois phases de comportements bien distincts:

- Une première phase de comportement identique à celui d'un matériau homogène et élastique, celle-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte σ 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 et la variante B15P15S, elle est de l'ordre de 30.24Mpa pour le béton témoin et de l'ordre de 30.3Mpa pour le B15P15S contre des contraintes moindres pour les autres substitutions.
- Quant- à la troisième phase celle-ci se traduit par une courbe légèrement décroissante avec une petite courbure. Cette phase se termine par la « ruine » des spécimens.

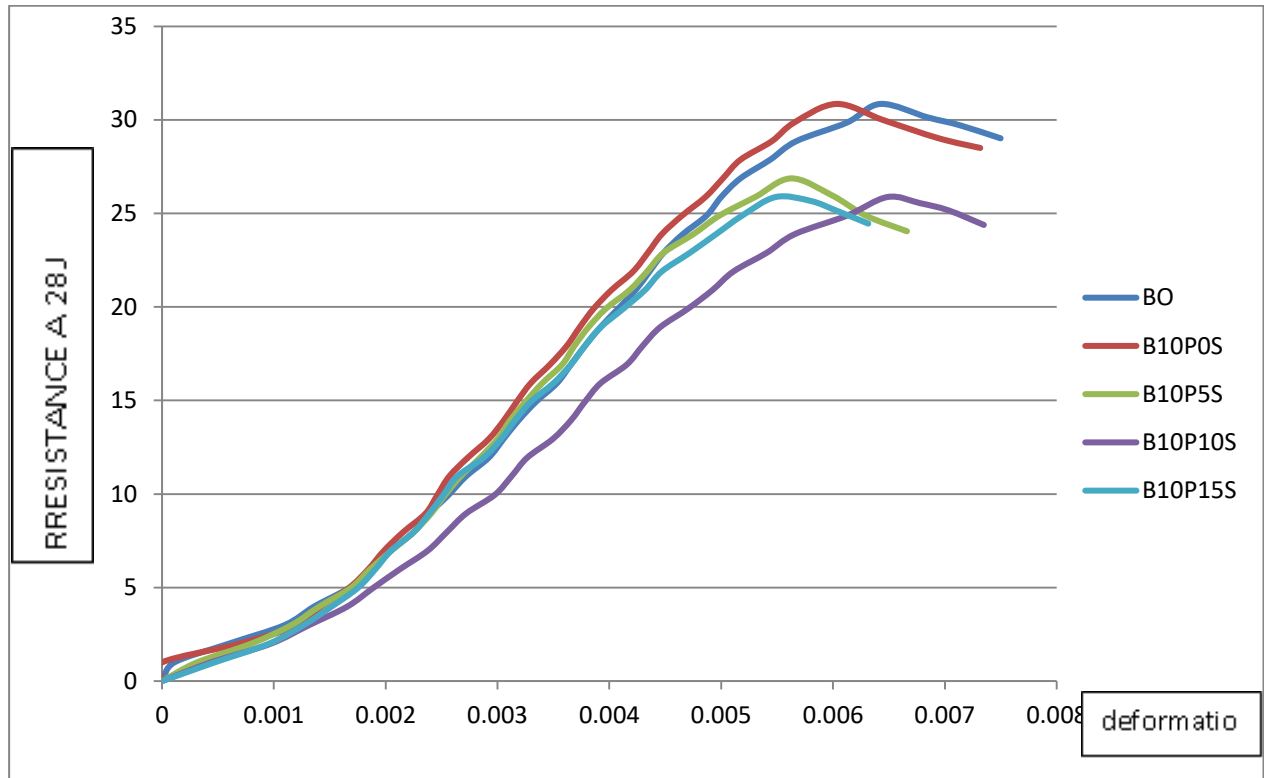


Figure IV.5: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 10% de poudre de verre.

La Figure IV.5 présente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation des bétons dosés à 10% de poudre de verre et 0%, 5%, 10% et 15% de sable de verre ainsi que la courbe du béton témoin. Une même allure est constatée que pour les bétons dosés à 5% de poudre de verre. Une pente plus inclinée que celle vu précédemment qui traduit un comportement élastique, on constate aussi le pic des résistances est plus important pour le béton témoin et la variante B10POS contrairement aux variantes ou l'on constate une chute de résistance B10P5S, B10P10S et B10P15S. A noter aussi dans ce cas de figure que le B10POS présente une résistance de 31.08 MPa contre une résistance moindre pour le béton témoin qui est de l'ordre de 30.24 MPa ce qui est satisfaisant.

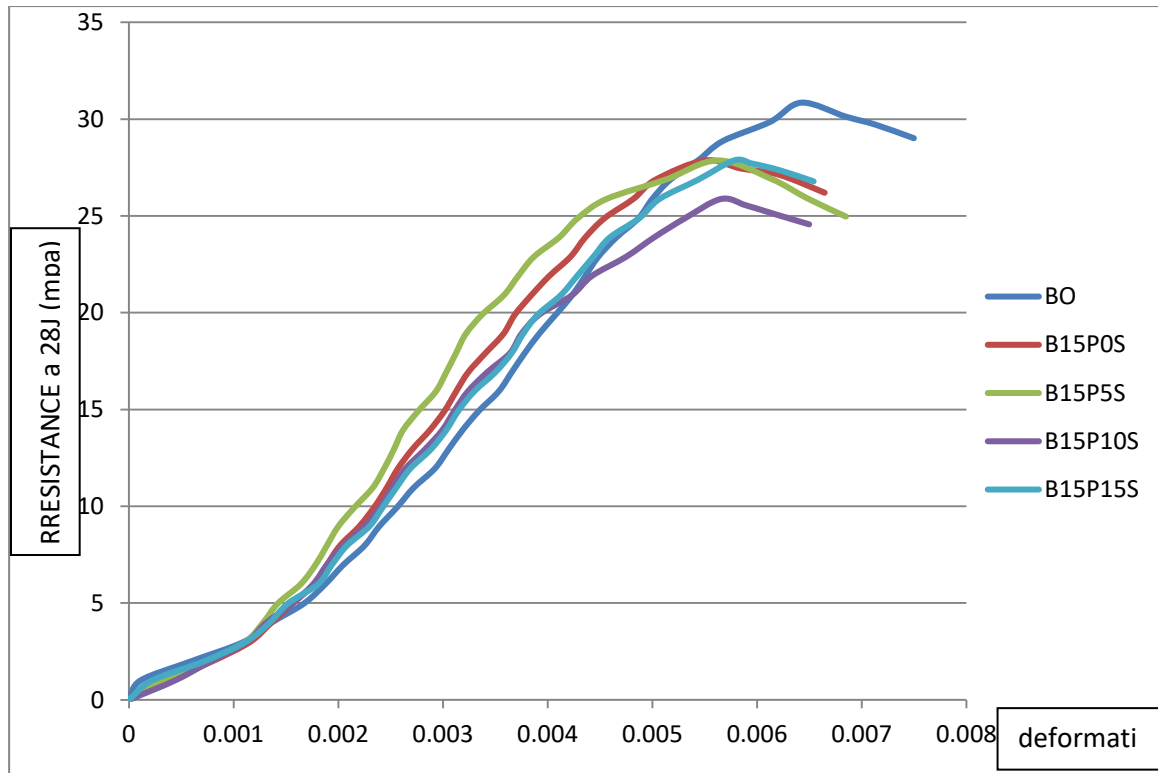


Figure IV.6: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec 15% de poudre de verre.

La courbe contrainte-déformation présente un comportement élastique linéaire qui se traduit par une pente initiale qui suit celle du béton témoin jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de comportement élasto-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 mise à part celle du béton témoin et celle du béton B15P15S qui lui présente une contrainte plus grande de l'ordre de 30.3MPa et béton témoin de l'ordre de 30.24 MPa.

Conclusion générale

Dans le cadre de l'étude du comportement d'un béton à base de déchet de verres recyclés, nous avons réalisés plusieurs essais expérimentaux. Ces essais d'écrasement sous chargement statique de compression ont pour objectif d'analyser l'effet de ce déchet sur le comportement mécanique du béton. Ce déchet de verre a été incorporé, dans la matrice béton, sous forme de poudre et de sable de verre avec différents pourcentage pour voir l'influence du dosage (quantité) sur la résistance à 28 jours.

En faisant varier les quantités des ajouts de verre (poudre de verre et le sable de verre) en substituant des pourcentages de ciment et de sable, nous avons comparés les résultats des essais de compression à 28 jours de ces éprouvettes à celle d'un béton témoin (ordinaire). En général, les résultats, obtenus sur les spécimens d'étude, montrent une résistance légèrement inférieure sinon la même que celle du béton témoin (de référence). Un accroissement de résistance à la compression, pour la variante « ajout de 5% de poudre de verre et de 15% de sable de verre » cette amélioration est estimée à de 2.17 MPa par apport à la résistance du béton témoin

La résistance du béton avec la poudre de verre augmente progressivement jusqu'à égaler ou même dépasser celle de son témoin équivalent. La valeur de la résistance en compression à jeune âge des bétons avec les déchets de verre est, comme pour les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de la réaction pouzzolanique.

Le béton avec les déchets de verre présentent un bon comportement à la compression. Néanmoins des études plus poussées sont recommandés. À noter que des éprouvettes sont confectionnées le même jour que celles ayant subi des écrasements de compression à 28 jours. Ces éprouvettes sont à jour au laboratoire pour être soumises dans quelques temps au même chargement pour quantifier l'effet de la présence de ce verre dans la matrice béton (Durabilité).

Bibliographie

- [1]. **ZAROUB HAMID** ; valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable "Approche expérimentale" 15-02-2012, université M'hamed Bouguera, Boumerdes.
- [2]. **RACHIDA IDIR, Martin CYR Arezki TAGNIT-HAMOU Formulation**, Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons?. Etude des propriétés des bétons de verre. vol.16 n°5/6 • Décembre 2010.
- [3]. **SEKA SIMPLICE KOUASSI** ; "Etude de la dissolution d'un réseau silicaté en présence d'une solution alcaline", Thèse N° 102 – 2010, UNIVERSITE DE COCODY-ABIDJAN, Le 20 janvier 2011.
- [4]. **PIKE, R.G., HUBBARD, D. et NEWMAN, E.S.** Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin, n°275, 1960.
- [5]. **M BEHIM ET T ALI BOUCETTA**, Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre, October 12-14, 2009.
- [6]. **ARAME NIANG, NATHALIE ROY, AREZKI TAGNIT-HAMOU et KARIM BENGOUGAM**, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, comportement en compression de poteaux en béton armé incorporant de la poudre de verre.
- [6]. **Dr. GHOMARI Fouad** ; Université Aboubekr Belkaid ; Faculté Des Sciences de L'ingénieur Département de Génie Civil ; Science des Matériaux de Construction.
- [7]. **ZACHARIASEN, W. H.**, Journal of Am. Chem. Soc., 54, 3841 (1932).
- [8]. **ASHBY, M.F. et JONES, M.F.** (1996). Matériaux- propriétés et applications, Paris, 2e édition, Dunod, p.47.
- [9]. **ZARZYCKI, J.** (1962). A direct electron microscope study of the structure of glass, Physics and chemistry of Glasses, vol.3, p.163-166
- [10]. **SCHOLZE, H.** (1980). Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.

- [11]. **R.K. Iler**, in: The Chemistry of Silica, edited by John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [12]. **Rachida IDIR** ; "Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique", UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p.58-59. Le 10 juillet 2009.
- [13]. **VARGIN, V.V et YAKOVLEVA, K.A.** (1961). Effects of water and acid on vitreous sodium alumino-silicates, Journal of applied chemistry, vol. 34, p. 446-447
- [14]. **WIKIPEDIA**, Verre, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre>.
- [15]. **A. Paul**, "Chemistry of Glasses". Ed. Chapman and Hall, New York, (1982).
- [16]. **J. Zarzycki**, "Les verres et l'état vitreux", edition masson, 1982.
- [17]. **G.W MacLellan, E.B. Shand**, Glass engineering handbook, Mc Graw-Hill, New york, 1984.
- [18]. **C. Cailleteau**, On the effect of glass composition in the dissolution of glasses by water, Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 2008, p. 117-123.
- [19]. **A.A. Ahmed et I.M. Yousof**, attack on soda-lime-silica glass bottles by acetic, citric and oxalic acids, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol., 70, 1997, p. 76-85.
- [20]. **J. Barton et C. Guillemet**, LE VERRE, science et technologie, EDP sciences, juin 2005.
- [21]. **K. G. Nickel et S. Merkel**, Mechanisms and kinetics of silica-rich binary Na₂O-SiO₂ glass corrosion in 100°C water at pH=7, Key Engineering Materials, 336-338, 2007, p 1823-1826.
- [22]. **B. M. J. Smets**, On the mechanism of the corrosion of glass by water, Philips Tech. Rev., 42, 1985, p. 59-64.
- [23]. **Y. Niibori, M. Kunita**, Dissolution rate of amorphous silica in high alkaline solution, Journal of Nuclear Science and Technology, 37, 2000, p. 349-357.
- [24]. **H. Mori**, « Extraction of silicon dioxide from waste colored glasses by alkali fusion using sodium hydroxyde » J. Cer. Soc. Jap., 111, 2003, p.376-381.
- [25]. **A. Satoh**, Water glass bonding, Sensors and Actuators A, 72, 1999, p.160-168.
- [26]. **WIKIPEDIA**, béton, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/béton>.

- [27]. **Gunning.J.G**, ''concret technology :level 4'' Longman technician série ; const & civil, england, p 293,1983.
- [28]. **George Dreux et Jean Festa**, ''Nouveau guide du béton et de ses constituant'' ; édition Eyrolle 2002.
- [29]. **Emile Olivier**, ''technologie des materiaux de construction'' ; techniciens de la construction (tome 1) ; entreprise moderne d'edition, 1978.
- [30]. **M.Rissel Khelifa**, ''effet de l'attaque sulfacique externe sur la durabilité des béton auto- plaçans'',these de doctorat,2009.
- [31]. **P.C.Aitcin**, ''l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les béton à ultr haut performance'' , presse de l'ENPC.
- [32]. **A .M.Paillerie**, ''les adjuvants'' , le béton hydraulique presse de ENPC 1982.
- [33]. **D.L.Contro**, ''influence des superes plastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pate de ciment-un slump test miniature'' ,cement and concrete aggregate,vol.2,pp 95-102,1980.
- [34]. **A.R . Kara**, ''influence des addition minirales sur le besoin en eau et les resistances mécaniques des milanges cimentaires '' ,ThD,U Cergy Ponitaise ,décembre 2002.
- [35]. **A.M.Nevile**, ''Propriétés des bétons, Edition Eyrolle 2000''.
- [36]. **George dreux**, ''composition des béton''techniques de l'ingeneur : 10 Mai 1982.
- [37]. **Jean Perchate**, ''Traité béton de béton armé selon l'Eurocode 2'' :2° édition, juillet 2013.
- [38]. **Agence Universitaire De La Francophonie** ; Cours en ligne: Matériaux de Construction : Chapitre 6: Le béton.
- [39]. **Agence Universitaire De La Francophonie** ; Cours en ligne: Matériaux de Construction : Chapitre 6: Le béton.
- [40]. **M. N. Bajad**, Research Scholar, S.V.N.I.T, Surat, **C. D. Modhera**, Professor, S.V.N.I.T, Surat and **A. K. Desai**, Associate Professor, S.V.N.I.T, Surat.'' Resistance of Concrete Containing Waste Glass Powder Against M_gSO_4 Attack.

[41]. **EncyclopediaUniversalis**; <http://brindescience.pagesperso-orange.fr/beton.htm>: le
béton le 15/4/2015