

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure et matériaux.



Valorisation des déchets de verre

dans les bétons

Etude expérimentale

Proposé et dirigé par :

M^{me} AKMOUSSI Ourdia

et

Mr BOUKAIS SAID

Présenté par :

M^{lle} AMARNI-AKILA

Année 2014/2015

Remerciements

Je rends grâce à Dieu le tout puissant, pour m'avoir accordé la santé le courage la patience et la volonté jusqu'à l'aboutissement de mes études, et l'accomplissement de ce modeste travail.

Je remercie chaleureusement tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail, en commençant par :

Mme. AKMOUSSI O. qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté d'encadrer ce travail, et pour ses précieux conseils.

Aux membres de jury, pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Mr. ATLAOUI D, Mr BOUKAIS S, et Mr NEKMOUCHE A, pour m'avoir aidé, et pour toutes leurs explications.

Mes remerciements vont également aux responsables personnels du laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures, Université Mouloud MAMMERRI, en Génie civil de TIZI OUZOU, en particulier à Mme BENAHMED éps MEDJBER et BOUHERRAOUA R et M.MAMOU, pour leur aide précieuse dans la réalisation de la partie expérimentale et leur encouragement.



Dédicaces

A mes très chers parents pour leurs affection et leurs précieux conseils, qui veillent toujours à ma réussite voyez à travers ce travail mon amour sincère et ma gratitude profonde

A mes sœurs: LILA, NADIA, SARAH

À mes frères: MOUHEND, AHMED, AMAR

A ma grands mère DOUDJA

À la mémoire de : ma chère grands mère TASSADIT, que le Bon DIEU L'accorde la vie éternelle dans son vaste paradis. Amin !

A tous mes autres proches et à mes amis qui sont très chers chacun le sait sans citer les noms

Et spécialement à vous qui vous êtes en train de lire ce modeste travail en ce moment



RESUME

Les travaux présentés dans ce document portent sur l'incorporation d'un déchet: du verre concassé. Elle a été réalisée en deux phases.

Dans la première, ce déchet à été incorporés à du béton pour remplacer 10%, 20%, 30%, des graviers (substitution partielle) et remplacer par des granulats de verre (3/8). Dans la seconde, une substitution (massique) partielle de sable a été réalisée dans les proportions suivantes 10%, 20%, 30% est remplacer par des granulats de verre (0/3), Telle que la composition du béton reste identique. Après une maturation de 28 jours leurs résistances en compression et en flexion ont été déterminées.

Ces résultats montrent que les bétons de recyclât ont une résistance inférieure à celui des bétons de granulat naturelle. Toute fois, la résistance mécanique baisse avec l'augmentation de la substitution par contre la déformabilité augmente.

Mots clés : Béton, résistance, verre, granulats recyclés, gravier, bétons de recyclât, substitution partielle, compression, flexion, déformabilité.

ABSTRACT

The works presented in this document relate the incorporation of a waste: crushed glass. It was created in two phases.

In the first, the waste was incorporated into the concrete to replace 10%, 20%, 30%, gravel (partial replacement) with glass aggregate (3/8). In the second, partial substitution (by mass) sand was carried out in the following proportions 10%, 20%,30%, such as concrete composition is the same. After maturing for 28 days their compressive strength and flexural strength were determined.

These results show that the recycle concrete has a resistance lower than that of the gravel crushed concrete with a higher deformability. However, the mechanical strength decreases with increasing substitution against the deformation increases.

Keywords: Concrete, resistance, glass, recycled aggregates, gravel, concrete recycle, partial, replacement, compression, and deformability.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE 1	4
Etude bibliographique	4
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON	6
INTRODUCTION	6
I.1 DEFINITION	6
I.2 LES COMPOSANTS DU BÉTON	6
I.2.1 Ciment	6
I.2.1.1 Propriétés des ciments	7
I.2.1.2 Les principaux constituants des ciments	7
a) Clinker Portland	7
b) Laitier granulé de haut fourneau	9
c) Cendres volantes	10
d) Filler calcaire	10
e) Sulfate de calcium	10
f) Additifs	10
I.2.1.3 Composition et désignation du type de ciment	11
I.2.2 Granulats	14
I.2.2.1 Types de granulats	14
I.2.2.2 Forme des granulats	14
I.2.2.3 Classe granulaire	15
I.2.2.3 Courbe granulométrique	16
I.2.3 Sable	17
I.2.4 Eau de gâchage	18
I.2.5 Adjuvants	19
I.3 PRÉPARATION DU BETON	19
I.3.1 Formulation des bétons	19
I.3.2 Malaxage	20
I.3.3 Coulage	20
I.3.4 Vibration	20
I.3.5 Durcissement	20

I.3.6 Décoffrage	21
Conclusion	21
CHAPITRE II : LE VERRE DANS LES BETONS	23
INTRODUCTION	23
II.1.1 Définition	23
II.2 COMPOSITION CHIMIQUE DU VERRE	24
II.3 PROPRIÉTÉS DU VERRE	25
II.3.1 Résistance chimique.....	25
II.3.2 Fatigue statique	25
II.3.3 Durabilité du verre dans une matrice cimentaire	26
a) Mécanisme de corrosion de verre en milieu acide.....	26
b) Mécanisme de corrosion de verre en milieu neutre	27
c) Mécanisme de corrosion de verre en milieu basique	27
II.3.3.1 Facteurs influençant la durabilité chimique d'un verre.....	28
a) Effet de la composition du verre	29
b) Effet de la valeur de PH.....	29
c) Effet de la température.....	30
II.4 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DU VERRE	30
II.5 COMPORTEMENT DU VERRE DANS UN MILIEU CIMENTAIRE	32
2.5.1 Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique.....	32
II.5.1.1 La réaction alcali-silice	32
II.5.1.2 La réaction pouzzolanique	36
II.6 L'EFFET DE VERRE DANS LES BETONS	37
II.6.1 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction alcali-silice.....	38
II.6.2 Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice.....	39
II.6.3 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction pouzzolanique.....	40
II.6.4 Influence de la teneur en verre des mélanges sur la réaction pouzzolanique	41
CONCLUSION.....	42
CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON	45
INTRODUCTION	45
III.1 COMPORTEMENT EN COMPRESSION	45
III.1.1 Compression uniaxiale	45

III.1.2 Quelques modèles de comportement du béton en compression	47
III.1.3 Les modèles réglementaires.....	48
III. 1.4Les modèles non linéaires.....	51
III.1.5 Résultats des essais de compression des bétons avec le verre.....	54
III.2 COMPORTEMENT DU BETON A LA TRACTION.....	56
Conclusion :	58
PARTIE 2	59
CHAPITRE IV : COMPOSITION ET FORMULATION DU BETON	61
INTRODUCTION	61
IV.1 MATÉRIAUX UTILISÉS	61
IV.1.1 Ciment	61
IV.1.2 Granulats	62
IV.1.3 Granulat de verre	62
IV.1.4 L'eau de gâchage.....	63
IV.2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	63
IV.2.1 Essai sur granulats	63
IV.2.2 Essais sur le ciment	67
IV.3 ÉLABORATION DES BÉTONS	68
IV.3.1 Formulation du béton ordinaire.....	68
CHAPITRE V : RESULTAS ET INTERPRETATIONS	76
INTRODUCTION	76
V.1 CONFECTION DES BÉTONS	77
V.1.1 Préparation de la gâchée	77
V.1.2 Conservation des éprouvettes	77
V.2 ESSAIS SUR BÉTONS FRAIS	79
V.2.1 Essais au Cône d'Abrams	79
V.2.2 La masse volumique	80
V.3 ESSAIS À L'ÉTAT DURCI	81
V.3.1 Essai de compression (NF P 18-406).....	81
V.3.2 Essai de flexion trois points.....	88
Conclusion	94
CONCLUSION GENERALE	96

Liste des figures

Figure I.1: Différents types de granulats [DEGEIMBRE (2003)]	14
Figure I.2: Différentes formes de granulats [DEGEIMBRE (2003)]	15
Figure I.3 : classe granulaire (d/D) [DEGEIMBRE (2003)]	16
Figure I.4: Courbe granulométrique [DEGEIMBRE (2003)]	17
Figure I.5: Types de sable [DEGEIMBRE (2003)]	17
Figure I.6: Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen [DEGEIMBRE (2003)]	18
Figure II.1: Représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) [Philip Gibbs (1996)]	24
Figure II.2: représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse [Philip Gibbs (1996)]	24
Figure II.3 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (laeching) [BARTON (2005)].	27
Figure II.4: Mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (et ching) [BARTON (2005)]	28
Figure II.5: Évolution de la masse de SiO ₂ dissoute par gramme de verre en fonction du rapport S/V [A. Paul(1982)]	29
Figure II.6 : Valorisation de la quantité de silice (a) et d'oxyde de sodium (b) en fonction du PH d'un verre de composition initiale Na ₂ O-3SiO ₂ à 35°C [A. Paul(1982)].	30
Figure II.7: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [Sprung et Sylla, (1998)]	34
Figure II.8: Réaction alcali silice du verre [Rachida (2010)]	35
Figure II.9: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différentes [Rachida 2009]	39
Figure II.10: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre [Mey et al.1997]	39
Figure II.11: Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre [Jin et al.,2000]	40
Figure II.12: Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [Rachida (2009)].	41
Figure III.1: comportement du béton en compression [chen (1982)]	46
Figure III.2:Comportement cyclique du béton en compression simple, [Karsan et al (1969)].	47
Figure III.3 : Loi parabole-Rectangle du béton en compression [BAEL (1999)]	48
Figure III.4: Diagramme parabole-rectangle du béton en compression EUROCODE2 2009 .	49
Figure III.5 : Diagramme non linéaire du béton en compression EUROCODE2.....	51
Figure III.6 : Comportement du béton en compression selon Sargin(1971)	52

Figure III.7 : Effet de la finesse du verre et du pourcentage de substitution du ciment par le verre sur les résistances a la compression des mortiers conservés à 20°C [Rachida 2009]	55
Figure III.8: Réponse du modèle à la traction simple [KOTRONI (2000)].	57
Figure III.9 : Poutre en béton non armé.	58
Figure IV.1: Les différents types de granulats utilisés	62
Figure IV.2: Granulat de verre à partir des déchets.	63
Figure IV.3: Courbes granulaires des trois granulats.	64
Figure IV.4: courbe granulaire des granulats de verre	65
Figure IV.5: Superposition des courbes granulaires.	65
Figure IV.6: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.	70
Figure IV.7: Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage	71
Figure V.1: Dispositif expérimental	78
Figure V.2: L'affaissement en fonction de la teneur en sable de verre (0/3).....	79
Figure V.3: L'affaissement en fonction de la teneur en gravier de verre (3/8).....	79
Figure V.4: Variation de la masse volumique.....	80
Figure V.5: Presse hydraulique utilisé pour les essais de compression.....	82
Figure V.6: Éprouvettes après écrasement.	82
Figure V.7 : Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec granulats du verre (0/3)	84
Figure V.8: Superposition des courbes contrainte-déformation en compression.....	85
Figure V.9: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec granulats du verre (3/8).....	86
Figure V.10: Superpositions des courbe contrainte-déformation de granulat de verre (3/8) ..	87
Figure V.11: Variation de la résistance en fonction de la teneur en granulats de verres	87
Figure V.12: Presse IBER teste utilisé pour les essais de flexion	89
Figure V.13: Éprouvettes avant et après écrasement.	89
Figure V.14: Courbes force - flèche des bétons avec granulats de verre (0/3).	90
Figure V.15 : Superposition des courbes force-flèche en flexion des bétons de granulat de verre (0/3).....	90
Figure V.16: force - flèche des déferant béton avec les granulats du verre (3/8).	91
Figure V.17: Superpositions des courbes force-flèche de granulat de verre (3/8)..	91
Figure V.18: Courbes force-flèche du béton avec granulats du verre.....	92
Figure V.19: courbe flèche -pourcentage de granulat de verre (0/3 et 3/8).	93

Liste des tableaux

Tableau I.1: Dénomination et composition des ciments normalisés (pourcentages en masse) [DEGEIMBRE (2003)].....	11
Tableau I.2: Exigences mécaniques et physiques [DEGEIMBRE (2003)].....	12
Tableau I.3: Exigences chimiques [DEGEIMBRE (2003)].....	13
Tableau II.1: Diamètre critique selon différents auteurs [Mamery (2014)].....	31
Tableau III.1: La différente classe granulaire et leur fraction granulaire [Rachida .I(2009)]...	56
Tableau IV.1 : Composition chimique et caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	61
Tableau IV.2: Les différents pourcentages en granulats utilisés.....	63
Tableau IV.3: Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	66
Tableau IV.4: Module de finesse du sable [DREUX (1981)].....	66
Tableau IV.5: Valeur de l'équivalent de sable.....	67
Tableau IV.6: Le début et la fin prise du ciment.....	67
Tableau IV.7: Valeurs approximatives du coefficient granulaire [DREUX .1981].....	69
Tableau IV.8: Composition volumique et pondéral du béton témoin pour 1m^3 de béton.....	73
Tableau IV.9: composition des différents bétons avec sable de verre (0/3) pour 1m^3	74
Tableau IV.10: composition des différents bétons avec gravier de verre (3/8) pour 1m^3	74
Tableau V.1: Diminution de la masse volumique (en pourcentage) à faire et à mesure de variation de pourcentage de verre des différents diamètres.....	81
Tableau V.2: Résistants d'essai de compression sur les bétons étudiés.....	83
Tableau V.3: variation de la résistance en fonction de la teneur en granulats de verre.....	88
Tableau V.4: variation des différents paramètres en fonction de diamètre de verre et de la teneur en verre.....	93

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'accroissement de la population sur la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants entraînent une augmentation de la production des biens de consommation, engendrant parallèlement un flux de déchets de plus en plus important.

L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à notre société de consommation car ces derniers polluent l'environnement et occasionnellement créent des dégâts dans les milieux vivants. Par ailleurs, cette activité débordante de production, consomme des ressources naturelles et de l'énergie et met donc en danger l'économie de certains pays. En effet, la réduction des réserves exploitables de granulats naturels et la prévision d'une diminution de la production de ces granulats ont pour conséquence la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton.

Depuis des années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de verre.

Comme la demande et l'utilisation du verre s'accroît, les déchets de verre aussi. Par ailleurs, contrairement à d'autres déchets, le verre est impérissable est donc préjudiciable pour l'environnement.

Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.



La présente étude a pour objectif, de formuler des bétons à base des granulats de verre recyclé, puis de comparer leurs performances à un béton formulé uniquement avec des granulats naturels.

- Le premier paramètre est la comparaison de la résistance mécanique à la compression à 28 jours.
- Le deuxième paramètre est la comparaison de la déformabilité à la rupture de flexion par trois points.
- Le troisième paramètre est la comparaison de la masse volumique.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante : Après l'introduction générale, ce document est composé de trois grandes parties et une conclusion générale.

La première partie étude bibliographique : est composé de trois chapitres:

- **Chapitre I:** nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons et les méthodes de formulation des bétons.
- **Chapitre II:** dans ce chapitre sont récapitulés certains aspects de durabilité du verre dans le béton et son comportement aux réactions chimique (alcali-silice et pouzzolanique) est l'influence de la taille des grains de verre sur cette dernière.
- **Chapitre III :** Dans ce chapitre nous avons fait un petit rappel des différents comportements de béton (compression, traction, flexion).

La deuxième partie : est composée de deux chapitres :

➤ **Chapitre IV** : nous avons :

- Présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos bétons
- Illustré la méthode de formulation des bétons utilisés.

➤ **Chapitre V** : dans ce chapitre sont décrits les modes opératoires pour les essais réalisés sur les différents types de béton.

Deux programmes d'essais sont alors menés.

- Dans le premier programme nous avons confectionné une série de 3×7 éprouvette de bétons pour la caractérisation de la masse volumique de béton, et la résistance à 28 jours (la compression)

Dans le deuxième programme nous avons confectionné 3×7 éprouvettes de bétons pour la caractérisation de la résistance et la déformabilité en flexion à 28 jours.

- Nous avons, par la suite, présenté les résultats et l'exploitation de ces résultats.
- En dernier, nous avons récapitulés nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives

PARTIE 1 :

Etude

bibliographique

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE BETON

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

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers.....

I.1 DEFINITION

Le béton est un matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics. C'est aussi un matériau durable lorsqu'il est bien formulé et correctement mis en œuvre. Toutefois, même durci de longue durée, c'est loin d'être un matériau inerte. Il travaille et subit l'épreuve du temps dans le milieu plus ou moins agressif qui l'entoure.

I.2 LES COMPOSANTS DU BÉTON

Le dosage des différents constituants du béton dépend du type de matériau recherché, déterminé par ses utilisations. En effet, ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de sa composition et de facteurs extérieurs, tels que la température [**DREUX (1981)**]

I.2.1 Ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (Vers 1450°C) et broyage d'un mélange minéral (calcaire+argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables forment avec l'eau une pâte capable par «hydratation » de faire prise et de durcir progressivement, d'où le nom de liants hydrauliques .Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

La teneur en ciment dépend de la résistance souhaitée. Pour les bétons de remplissage, peu sollicités, le dosage est de 150 kg/m^3 . Pour toutes les pièces constituant la structure des bâtiments, en béton armé ou précontraint, le béton contient généralement 350 kg/m^3 de ciment. Pour les mortiers, mélanges de sable, de ciment et d'eau, la teneur atteint en moyenne 450 kg/m^3 . Enfin, les coulis, utilisés en injection dans des forages, ne comprennent que du ciment et de l'eau. Ils servent à boucher les microfissures et les fractures d'un terrain, par exemple autour d'un barrage avant son édification [DREUX (1981)].

I.2.1.1 Propriétés des ciments

Les ciments ne sont pas des matériaux purs mais sont constitués de plusieurs constituants dont la nature et les propriétés permettent de composer les divers types de ciments qui ont des propriétés différentes. On peut citer [DREUX (1981)]:

- **Les propriétés hydrauliques**, qu'ils forment par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau, présentant une forte adhérence entre eux et les granulats, et créant ainsi progressivement une cohésion croissante des pâtes, des mortiers et des bétons. Parfois, pour se déclencher, ces propriétés hydrauliques nécessitent l'intervention d'un catalyseur constitué par une base forte.
- **Les propriétés pouzzolanique**, qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec de la chaux, des composés hydratés, stables, analogues à ceux formés par les constituants hydrauliques au cours de leurs hydratation.
- **Les propriétés physiques**, qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité...). Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus ou moins développé.

I.2.1.2 Les principaux constituants des ciments

a) Clinker Portland

Le ciment Portland est un liant hydraulique qui durcit tant sous l'eau qu'à l'air. Il est obtenu en broyant très finement un mélange de calcaire et d'argile, qui assure la

prédominance dans le clinker de silicates de calcium. Le mélange forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm et s'appelle clinker; la qualité de celui-ci détermine les principales propriétés d'un ciment, résistance, durée, stabilité dans les différentes conditions d'exploitation.

Pour régler le temps de prise du ciment, on ajoute au clinker pendant le broyage du gypse en quantité équivalente de 1.5 à 3.5% de la masse de ciment. Le ciment Portland peut être mis sur le marché sans apport supplémentaire ou avec des adjuvants minéraux actifs dont la masse peut atteindre 15% de la masse totale du ciment. La qualité d'un clinker dépend de sa composition chimique et minéralogique. Pour la production du clinker à ciment Portland on utilise le calcaire et l'argile. Le calcaire est composé principalement de deux oxydes: CaO et CO₂, et l'argile des diverses matières contenant surtout trois oxydes : SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. Au cours de la cuisson du mélange d'origine CO₂ se trouve éliminé ; alors que les 4 oxydes restants, à savoir CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃, forment les minéraux du clinker [DEGEIMBRE (2003)].

Les 4 principaux constituants du clinker sont :

- .Le silicate tricalcique : SiO₂ ,3CaO ou (C₃S)
- .Le silicate bi-calcique : SiO₂ ,2CaO ou (C₂S)
- .L'aluminate tricalcique: Al₂O₃ ,3CaO ou (C₃A)
- .L'alumino-ferrite tétracalcique : 4CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ ou (C₄AF)

- **Traitement thermique de formation du clinker**

100-200° : évaporation de l'eau

600-700° : préchauffage du mélange

900-1000° : décarbonatation et calcination : $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$

1000-1200° : formation de silicate bi-calcique C₂S et volatilisation des alcalins

1200-1300° : formation de C₃A et de C₄AF qui passe en phase liquide à plus ou moins 1260°

1260-1450° : formation de C₃S avec disparition de la chaux libre.

Jusqu'à un certain point, la formation de C₃S est favorisée par l'accroissement de la température de cuisson. Mais la réaction $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightleftharpoons \text{C}_3\text{S}$ a la particularité de s'inverser à haute température en formant la chaux libre qui se recombina d'autant facilement lors du refroidissement que celui-ci est plus rapide et que les cristaux de CaO sont de plus grande taille.

- **Influence du refroidissement**

Rapide: fort pourcentage en verre (20%) correspondant à la vitrification du liquide interstitiel; d'où grande résistance au broyage; les grains de MgO cristallin sont dissous dans la phase inter vitreuse et ne donneront lieu qu'à une faible expansion au cours de l'hydratation; C₂S se trouve essentiellement sous sa forme bêta ; l'effuse-ment indésirable étant empêché par la gangue de verre qui emprisonne les grains de silice.

Lente : après une cuisson modérée, le clinker manifeste une meilleure aptitude au broyage.

- **Rôle du broyage**

Le clinker qui se présente à la sortie du four sous la forme de grains arrondis de 0.5 à 3 cm de diamètre est ensuite broyé en présence d'une certaine quantité(2.5%) de gypse (CaSO₄.2H₂O) régularisateur de prise.

La finesse de mouture obtenue influe considérablement sur les caractéristiques d'hydratation du ciment; les quotients petits étant aussi les plus actifs. La distribution granulométrique de chaque constituant du ciment après le broyage sera conditionnée par sa dureté ; ainsi les matériaux les plus tendres (gypse, CaO) sont en plus forte proportion dans la classe la plus fine et le C₃S est plus apte au broyage que le C₂S tandis que la répartition des aluminates est assez uniforme.

b) Laitier granulé de haut fourneau

C'est un résidu minéral issu de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minéral et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C. Figé par refroidissement brusque, il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui. Il contient de la chaux, de la silice, de l'alumine et de la magnésie, des oxydes divers et du manganèse.

Le laitier est un véritable ciment manifestant par lui-même des propriétés hydrauliques, grandement activées d'ailleurs par la présence du clinker. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistance mécanique est moins rapide que celle du Portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation).

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation [DEGEIMBRE (2003)].

Les compositions élémentaires globales sont :

CaO :35 à 45%

SiO₂ : 30 à 40%

Al₂O₃ : 10 à 20%

MgO : 05 à 25%

Composition des produits formés dans le haut-fourneau :

CS, C₂S, C₂AS, C₂MS, C₂MS₂ (2CaO.MgO.2SiO₂)

c) Cendres volantes

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes du courant de gaz de chaudière alimentée au charbon pulvérisé. Les cendres volantes de nature silico-alumineuse (cendres volantes siliceuses) dont la perte au feu est inférieure à 7% [2] forment une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolanique [DEGEIMBRE (2003)].

d) Filler calcaire

Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques.

Les fillers calcaires peuvent être introduits jusqu'à plus de 5% de la composition d'un ciment sans pour autant que la teneur en calcaire soit 75% en masse et qu'il y ait une teneur en argile et en matières organiques compatibles avec les exigences des normes [DEGEIMBRE (2003)].

e) Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de régler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium di-hydrate CaSO₄.2H₂O, de l'hémihydrate (plâtre) CaSO₄.1/2H₂O, de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO₄) ou tout mélange de ceux-ci [DEGEIMBRE (2003)].

f) Additifs

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans les points cités précédemment et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment.

I.2.1.3 Composition et désignation du type de ciment

Le Comité Européen de Normalisation (CEN) a publié une série de normes sur les ciments. La composition des ciments doit être conforme au **tableau (I.1) [DEGEIMBRE (2003)]**.

On y retrouve 4 types principaux de ciment. Le **tableau (I-1)** précise également les dénominations normalisées au niveau européen : CEM I, CEM II, CEM III, CEM V. Certaines sont encore précisées davantage par des lettres : CEM IIA, CEM IIB,...

A cet ensemble désignant le type de ciment, viennent encore s'ajouter des indications précisant la classe de résistance ou le comportement particulier afin de mieux répondre à des exigences mécaniques, physiques ou chimiques [DEGEIMBRE (2003)].

	Désignation	Notation abrégée	Constituants principaux				Constituants Secondaires
			Clinker K	Laitier de Haut fourneau S	Cendres volantes Siliceuses V	Calcaire L	
I	Ciment portland	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
II	Ciment portland composé	CEM II/A-M	80-94	6-20			
		CEM II/B-M	65-79	21-35			
III	Ciment de haut fourneau 36/65	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	0-5
	Ciment de haut fourneau 66/80	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	0-5
	Ciment de haut fourneau 81/95	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	0-5
V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	-	0-5

Tableau I.1: Dénomination et composition des ciments normalisés (pourcentages en masse)

[DEGEIMBRE (2003)].

- **exigences mécaniques**

On définit les exigences mécaniques normalisées. On peut ajouter des exigences supplémentaires concernant des résistances mécaniques au jeune âge. Les exigences mécaniques sont définies par des résistances en compression selon la norme **EN 196-1** de mortier normalisé utilisant ce ciment comme liant [**DEGEIMBRE (2003)**].

- **exigences physiques**

Les ciments mis sur le marché doivent avoir des temps de prise conformes aux valeurs données au **tableau (I.2)**, lorsque cette propriété est mesurée selon la norme **EN 196-3**.

	Résistance à la compression (N/mm ²)				Temps de début de prise (mn)	Expansion (mm)
	Résistance au jeune âge		Résistance normale			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32.5	/	16	32.5	52.5	60	10
32.5 R	10	/				
42.5	10	/	42.5	62.5		
42.5 R	10	/				
52.5	10	/		/	45	
52.5 R	10	/	52.5			

Tableau I.2: Exigences mécaniques et physiques [**DEGEIMBRE (2003)**].

- **exigences chimiques**

La qualité des ciments doit aussi être vérifiée par des essais chimiques qui vont attester de leur conformité à la norme. Le tableau 1.3 définit les analyses physico-chimiques à réaliser ainsi que les exigences à atteindre [**DEGEIMBRE (2003)**].

1	2	3	4	5
Propriétés	Essai de référence	Type de ciment	Classe de résistance	Exigence
Perte au feu	EN 196-2	CEM I et III	Toutes classes	5.0%
Résidu insoluble	EN 196-2	CEM I et III	Toutes classes	5.0%
Sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I, II et V	32.5 32.5 R 42.5	3.5%
			42.5 R 52.5 52.5 R	4.0%
			CEM III	Toutes classes
Chlorures	EN 196-2	Tous types	Toutes classes	0.10%

Tableau I.3: Exigences chimiques [DEGEIMBRE (2003)].

- **exigences complémentaires**

Outre les exigences classiques, un responsable de la fabrication d'un élément en béton peut exiger des propriétés complémentaires, par exemple :

- ✓ pour se prémunir de l'attaque des bétons par les sulfates, il demandera un ciment à haute résistance chimique aux sulfates (ciment HSR) (Hight Sulfate Résistances);
- ✓ pour se prémunir de la dégradation des bétons via une attaque de certains granulats siliceux par des alcalis (Na, K), il existe un ciment à basse teneur en alcalin (ciment LA) (Low Alkali) ;
- ✓ pour se prémunir d'un dégagement thermique trop important lors de l'hydratation, il exigera un ciment LH (LowHeat);
- ✓ pour des aspects esthétiques, il pourra exiger un ciment blanc (composé de matière de base peu colorée).

I.2.2 Granulats

On appelle granulats les matériaux inertes, sable, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons. Ils constituent le squelette du béton, qui doit être le plus compact et le plus durable possible [DEGEIMBRE (2003)].

I.2.2.1 Types de granulats

Les granulats utilisés sont des graviers issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières (**Figure I.1**). La taille des granulats varie en fonction de celle du coffrage, de la densité d'acier pour les éléments en béton armé, et du type de béton recherché.

La taille des granulats est indiquée par deux chiffres, la plus grande dimension des éléments les plus petits et celle des éléments les plus grands. Par exemple, un gravier 5/15 est composé de particules dont le diamètre varie entre 5 et 15 mm. Pour les bétons employés en bâtiment, les granulats les plus courants sont des graviers 5/15 et 15/25. Pour des travaux de génie civil, où les pièces sont plus massives, les graviers sont plus gros, jusqu'à 150 mm de diamètre dans le cas des barrages. Il s'agit alors de béton cyclopéen.

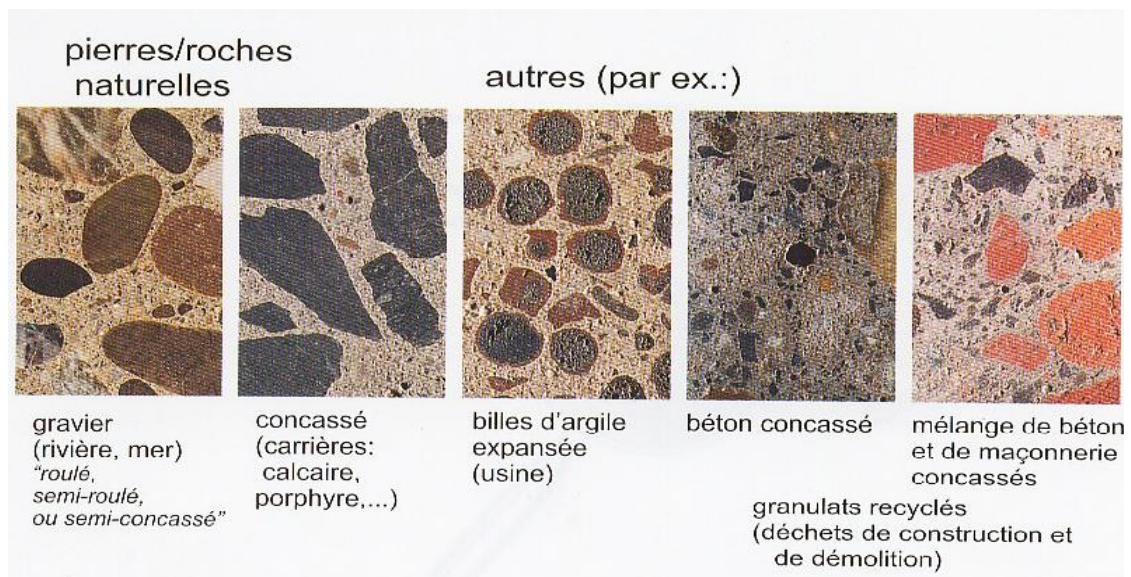


Figure I.1: Différents types de granulats [DEGEIMBRE (2003)].

I.2.2.2 Forme des granulats

Les granulats ont généralement différentes formes comme l'indique la **figure (I.2)**. La forme des granulats a une influence importante sur la stabilité du mélange, ainsi que sur la quantité nécessaire de mortier donc de ciment.

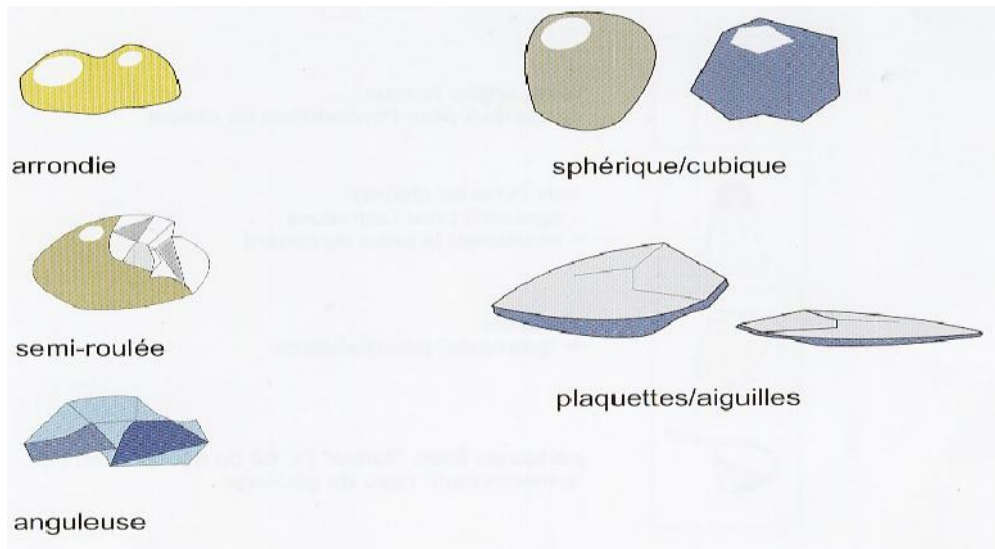


Figure I.2: Différentes formes de granulats [DEGEIMBRE (2003)].

I.2.2.3 Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. On appelle tamisât la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et refus la partie qui est restée sur le tamis. La classe granulaire d/D représente les dimensions des plus petits et des plus gros grains. Une bonne granulométrie garantit simultanément un minimum de vides entre grains et un maximum de gros grains (**Figure I.3**).

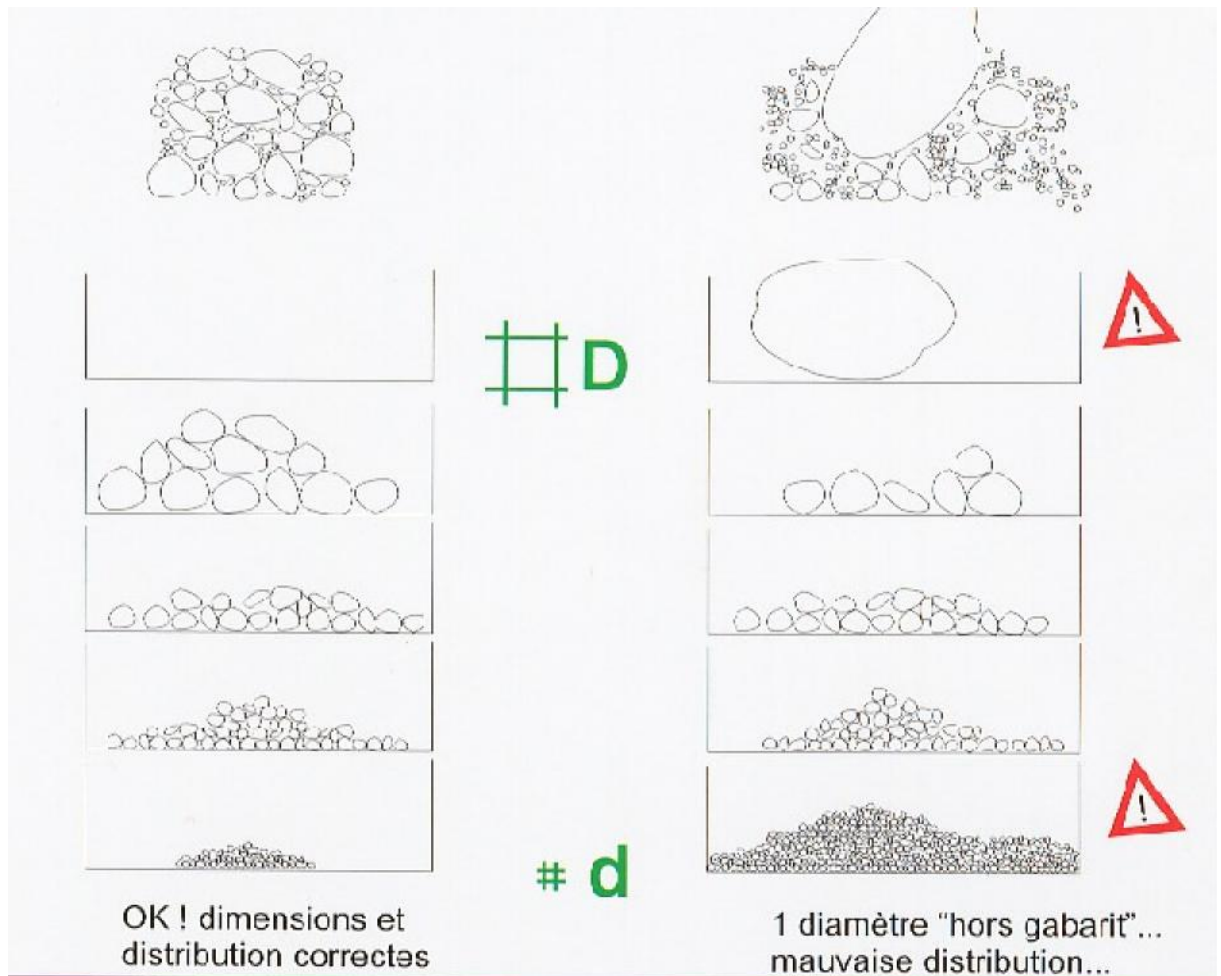


Figure I.3 : classe granulaire (d/D) [DEGEIMBRE (2003)].

I.2.2.3 Courbe granulométrique

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats sédimentaires composants un granulat donné d/D ; dans la mesure où l'on peut admettre que la masse spécifique des grains constituant le granulat analysé reste la même quelle que soit la grosseur des grains, la distribution volumétrique est la même que la distribution pondérale.

La granularité est exprimée par un graphique (**Figure I.4**): la courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs. Pour les classes granulaires les plus fréquentes, les normes définissent des « fuseaux » à l'intérieur desquels les courbes granulométriques doivent être situées [DEGEIMBRE (2003)].

Exemple : Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen (**Figure I.6**).

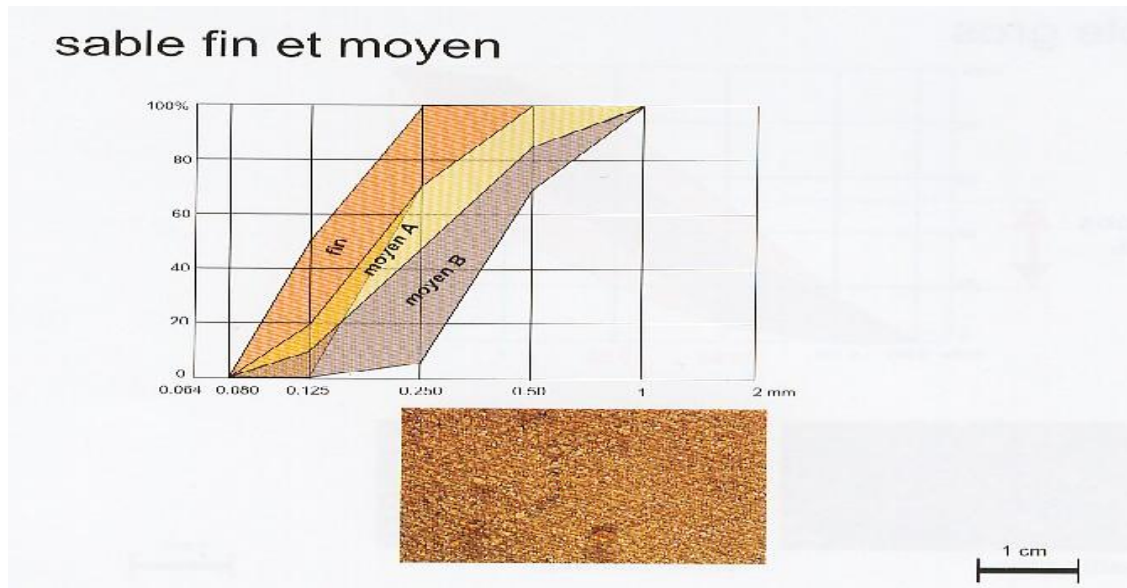


Figure I.6: Fuseaux granulométriques pour les sables fin et moyen [DEGEIMBRE (2003)].

I.2.4 Eau de gâchage

L'eau de ville convient parfaitement au malaxage du béton. Si l'eau de gâchage provient d'autres sources, il y a lieu de procéder à une analyse chimique. En effet, ni la couleur, ni l'odeur, ni le goût ne peuvent attester de sa convenance. Lors du dosage de l'eau de gâchage, la totalité de l'eau intervenant dans le mélange doit être considérée, y compris celle introduite par les granulats, surtout les sables humides. L'eau doit être propre; c'est généralement de l'eau potable.

Si l'eau contient des chlorures, une réaction chimique a lieu et modifie la prise du ciment. Le béton perd alors ses qualités de résistance. La consistance du béton, et donc sa facilité de mise en œuvre dans les coffrages, dépendent de la quantité d'eau. Plus un béton est liquide, plus il est facile à travailler. Mais un tel matériau présente une plus faible résistance une fois sec. Il est donc nécessaire de définir la teneur en eau selon l'usage du béton, et d'obtenir le juste équilibre pour que le matériau soit résistant et néanmoins maniable. En général, le béton mis en œuvre est plutôt sec, mais il est vibré au coulage pour lui permettre de remplir correctement le coffrage, et pour expulser l'air emprisonné lors du malaxage [HADDADOU (2006)].

I.2.5 Adjuvants

On entend par adjuvant un produit qui, ajouté au béton en faible quantité, permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci. Lors du malaxage, on ajoute parfois des adjuvants au béton ce qui permet de modifier les propriétés du matériau. Il est ainsi possible de rendre des bétons étanches, pour construire des ouvrages souterrains ou des piscines ; on peut retarder ou accélérer le temps de prise du ciment dans le béton.

Des adjuvants sont également utilisés à des fins architecturales. Par exemple, au cours du malaxage, on peut ajouter des pigments aux bétons ou aux mortiers pour colorer les ouvrages. Des durcisseurs de surfaces, des particules de quartz sont incorporés pour obtenir des dalles en béton supportant des charges roulantes importantes, en usine par exemple.

Le béton peut être rendu poreux et fortement perméable, pour des applications en lit filtrant, ou sous les chaussées de route, pour empêcher l'eau de pluie de stagner sur les voies de circulation. Pour obtenir des massifs de béton lourd, utilisés comme, on peut incorporer des particules d'acier. Le béton obtenu peut avoir une densité allant jusqu'à 4t/m^3 , alors que la masse volumique d'un béton courant non armé est de $2,2\text{ t/m}^3$, selon la nature des composants. Le béton comprenant des particules de plomb contribue à stopper les rayonnements; on l'emploie en milieu nucléaire. Le béton lourd possède également de très bonnes propriétés d'isolation phonique [HADDADOU (2006)].

I.3 PRÉPARATION DU BETON**I.3.1 Formulation des bétons**

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 :

- méthode de BOLOMEY ;
- méthode d'ABRAMS ;
- méthode de FAURY ;
- méthode de VALETTE ;
- méthode de BARON-LESSAGE ;
- méthode de DREUX et GORISSE.....

I.3.2 Malaxage

On mélange les composants manuellement, à la pelle, ou au moyen d'engins mécaniques, tels qu'une bétonnière. Pour des grands travaux, le béton est fabriqué dans une centrale qui mélange automatiquement les constituants selon une composition programmée à l'avance. La production peut atteindre plus de 300 m³/h. L'objectif est de mélanger suffisamment les composants pour obtenir une pâte homogène, au sein de laquelle les éléments les plus fins, sable et ciment, comblent les vides laissés par l'agglomération des granulats; on doit également envelopper complètement les graviers pour obtenir, une fois sec, un matériau constitutif d'une roche [HADDADOU (2006)].

I.3.3 Coulage

Le béton peut être transporté jusqu'au chantier par des toupies, bétonnières montées sur camion. Une pompe à béton achemine le matériau en hauteur ou sur des sites difficilement accessibles aux camions. Sur les gros chantiers, le pompage du béton permet des cadences beaucoup plus importantes que si l'on emploie des bennes amenées par grue sur le lieu du coulage. Le béton peut également être projeté au moyen de compresseurs pneumatiques. Ce matériau, qui ne nécessite pas de coffrage, est utilisé lors de la construction de piscines, ou pour conforter des talus de terre instables risquant de s'écrouler [HADDADOU(2006)].

I.3.4 Vibration

Une fois coulé dans un coffrage, le béton est vibré à l'aide d'aiguilles ou par des vibreurs électriques montés directement sur le coffrage. L'air expulsé durant cette phase provient des cavités entre les graviers, qui se remplissent de la pâte fine de ciment et de sable. La vibration permet un mélange efficace et améliore le durcissement [HADDADOU(2006)].

I.3.5 Durcissement

La température ambiante a une grande influence sur le durcissement ou prise du béton. Par temps de gel, il peut être nécessaire de chauffer l'eau, parfois même les granulats, avant de malaxer et de couvrir le matériau pour retenir la chaleur dégagée par les réactions exothermiques lors de la prise du ciment. Par temps très chaud, au contraire, on doit arroser le béton et le garder à l'ombre, afin que l'eau nécessaire à la prise ne s'évapore pas et provoque un retrait, c'est-à-dire une diminution de volume de la pièce. Ce phénomène engendre des

fissures dans le béton. Plus le béton est maintenu humide sur une longue période, plus sa résistance sera importante. La prise a lieu en quelques heures [HADDADOU(2006)].

I.3.6 Décoffrage

Pour les pièces préfabriquées et les éléments non porteurs, il est possible de décoffrer quelques heures seulement après le coulage. En général, par temps doux, on coule le béton le soir pour le décoffrer le lendemain matin. Les éléments porteurs, comme les poutres ou les planchers, doivent rester plusieurs jours dans leur coffrage : le béton doit durcir suffisamment pour supporter leur propre poids, ainsi que les charges qui y seront appliquées.

1 m³ de béton ordinaire contient approximativement 350kg (420l) de ciment, ou 590kg (820l) de sable 0/5, ou 1180kg de gravier 5/15 et 15/25, et de 210l d'eau, y compris celle contenue dans les granulats s'ils sont humide [HADDADOU(2006)].

Conclusion

Notre but dans ce chapitre est de déterminer les différents constituants du béton et leurs propriétés, ainsi que les étapes de préparation du béton.

CHAPITRE II

LE VERRE DANS LES BETONS

CHAPITRE II : LE VERRE DANS LES BETONS

INTRODUCTION

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

Ainsi, nous allons aborder la caractérisation des verres, les inconvénients de l'utilisation de ces verres (deux réactions : mécanismes et facteurs affectant ces deux réactions) et dresser l'état des connaissances sur le verre dans les bétons.

II.1 RECYCLAGE DES VERRES

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

II.1.1 Définition

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable). Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe, c'est à dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance. Il peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal **figure (II.1)**, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est

conservé. Comparons, par exemple, la structure de la silice (SiO_2) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse **figure (II.2)** :

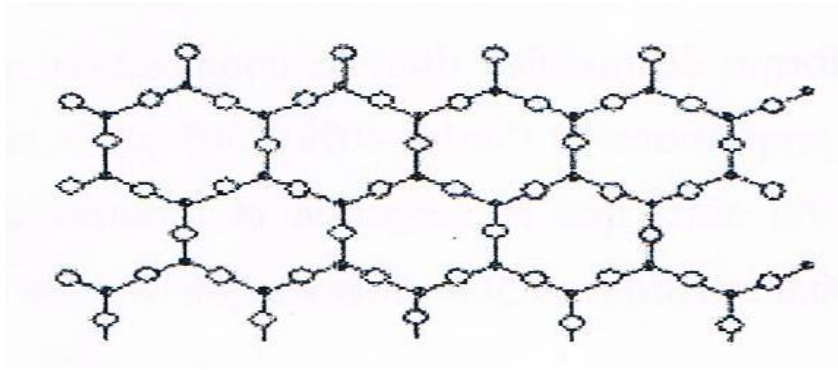


Figure II.1: Représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) [Philip Gibbs (1996)].

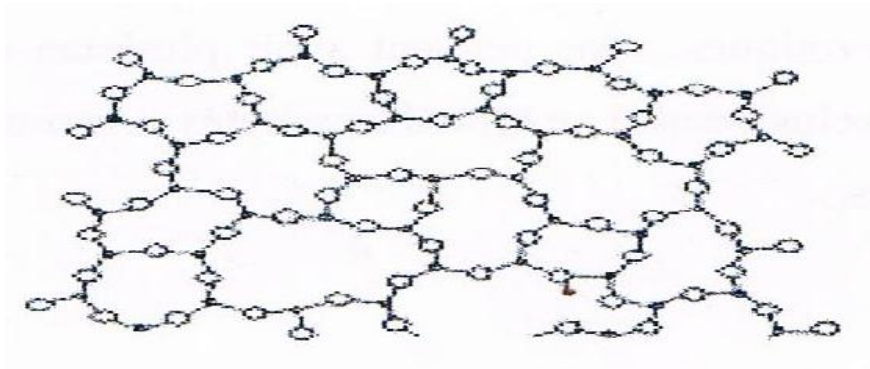


Figure II.2: représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse [Philip Gibbs (1996)].

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres SiO_4 ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques SiO_4 , la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques SiO_4 .

II.2 COMPOSITION CHIMIQUE DU VERRE

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

Les cinq oxydes essentiels qui rentrent dans la fabrication du verre sont les mêmes et sont : CaO, MgO, Al₂O₃, B₂O₃, SiO₂. D'autres produits (généralement des oxydes) peuvent être ajoutés aux verres en fonction de l'application recherchée afin de modifier ses propriétés chimique, physiques ou mécaniques telle que la viscosité et la durabilité chimique.

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

II.3 PROPRIÉTÉS DU VERRE

Vue les multiples compositions chimiques, de traitement thermique, le verre présente plusieurs propriétés : chimiques ou mécaniques.

II.3.1 Résistance chimique

Les verres constitués d'éléments sous leurs forme oxydée, sont peu réactifs chimiquement, contrairement aux métaux qui ont tendance à s'oxyder. Cette inertie chimique leur permet d'être employés comme emballages alimentaires et pharmaceutiques. Toutefois, les verres réagissent avec les solutions aqueuses courantes, mais avec une vitesse faible, et leur composition est ajustée de telle sorte qu'ils puissent être employés sans risque, dans des conditions données.

II.3.2 Fatigue statique

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux suite à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture. Ainsi d'une manière générale toute fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes relativement faibles, souvent inférieures à la limite d'élasticité, lorsque leur application est répétées à un grand nombre de fois.

La résistance à la fatigue des éléments en béton est conditionnée par de nombreux facteurs :

- En particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques qui peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une structure.

- Une distinction est généralement faite entre une fatigue avec un cycle à basse fréquence, mais un niveau de contrainte élevé et une fatigue à haute fréquence mais un niveau de

contrainte faible. Ceci correspond à deux types d'étude, par exemple d'une part le séisme et d'autre part l'action du vent et des vagues [Malou (2008)].

Par ailleurs dans le verre, cette propriété dépend aussi du temps de stockage, de telle sorte que la résistance décroît lorsque la durée de stockage augmente, ce qui est appelé fatigue. Généralement la résistance à la fracture mesurée dépend du temps de l'application de la charge, ainsi que la vitesse avec laquelle la charge est appliquée.

Ce phénomène de fatigue peut être décrit par les fonctions de type [Malou (2008)]:

$$\text{Log } t = A/\sigma + B \quad \text{ou} \quad \log t = a + b \log \sigma$$

Avec :

σ : contrainte de rupture.

t : durée de vie.

A, B, a et b : sont des constantes déterminées expérimentalement.

Il en résulte que, si le verre peut supporter une certaine contrainte pendant un court instant, il cédera sous une contrainte plus faible, appliquée pendant un temps suffisamment long.

II.3.3 Durabilité du verre dans une matrice cimentaire

Le verre a été longtemps considéré comme un matériau inerte. 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 autres, ont étudiés la réaction du verre en milieu acide, en milieu neutre et en milieu basique :

a) Mécanisme de corrosion de verre en milieu acide

Le mécanisme de dégradation du verre par une solution acide est la désalcalinisation de la surface ou le leaching qui se traduit par un échange d'ions entre la solution aqueuse et la surface du verre [BARTON (2005)].

La figure (II.3) illustre ce mécanisme dans le cas de l'attaque du verre par une solution d'acide de chlorhydrique (HCl). Ce mécanisme peut être décrit par l'attaque de verre par des ions H^+ et un échange ionique rapide libérant des ions Na^+ en laissant une couche résiduelle de silice hydratée qui est ensuite totalement dissoute.

Les études montrent qu'un atome de sodium est remplacé par trois atomes d'hydrogène selon l'équation suivante.

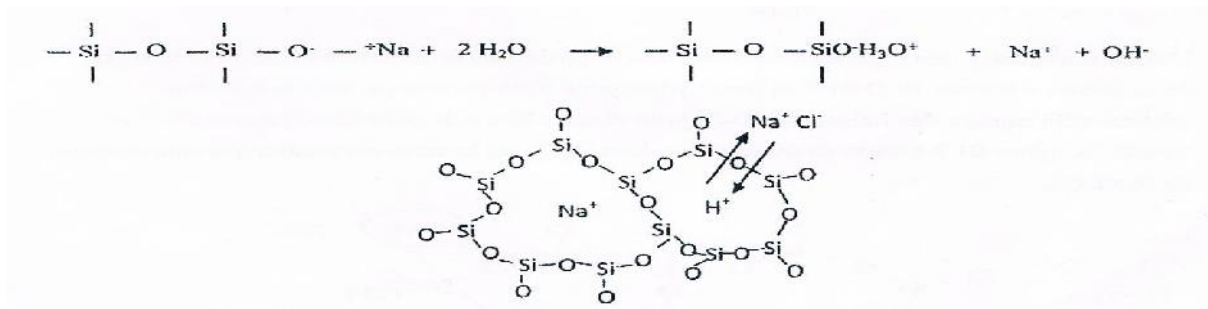


Figure II.3 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (laeching) [BARTON (2005)].

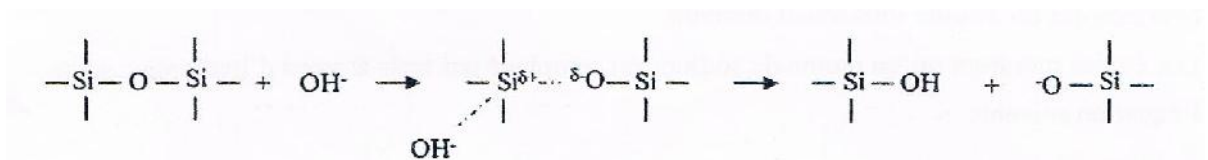
b) Mécanisme de corrosion de verre en milieu neutre

La diffusion des espèces chimiques est le mécanisme régissant la corrosion du verre en solution neutre. Les atomes d'oxygène non-portant se transforment en groupe silanol (SiOH). Ceci permet à l'ion Na⁺ libéré de diffuser à la surface du verre avec l'ion OH⁻. Par conséquent, les verres peuvent être considérés comme des sels d'un acide faible et de base forte qui subiront une réaction d'hydrolyse selon l'équation suivant [Nickel(2007)].



c) Mécanisme de corrosion de verre en milieu basique

Dans ce cas, le mécanisme qui régit est la dégradation du réseau silicique (etching) le verre est alors hydraté puis totalement dissout par rupture des ponts Si-O-Si à la surface du verre. Ce mécanisme est prépondérant pour des valeurs de PH supérieures à 10. Le mécanisme réactionnel peut être décrit par l'équation suivante [BARTON (2005)].



L'équation montre que l'étape essentielle dans le processus de dépolymérisation et la rupture de la liaison siloxane Si-O-Si. Si pour donner lieu à de nouvelles liaisons Si-O⁻ et Si-OH, la

Figure II.4 illustre ce mécanisme dans le cas où le verre est attaqué par une solution de NaOH.

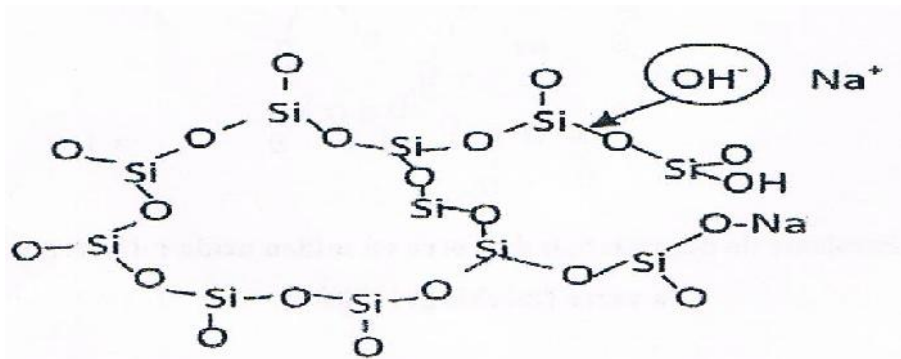


Figure II.4: Mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (etching)
[BARTON (2005)].

II.3.3.1 Facteurs influençant la durabilité chimique d'un verre

Rapport de surface spécifique du verre/volume de la solution aqueuse (S/V). Les études menées sur l'attaque d'un verre en milieu aqueux avec une valeur de pH ajustée à 6 et à une température de 40° ont montré que la quantité de SiO₂ dissoute augmente avec le rapport S/V en fonction du temps **Figure (II.5)**[A. Paul(1982)].

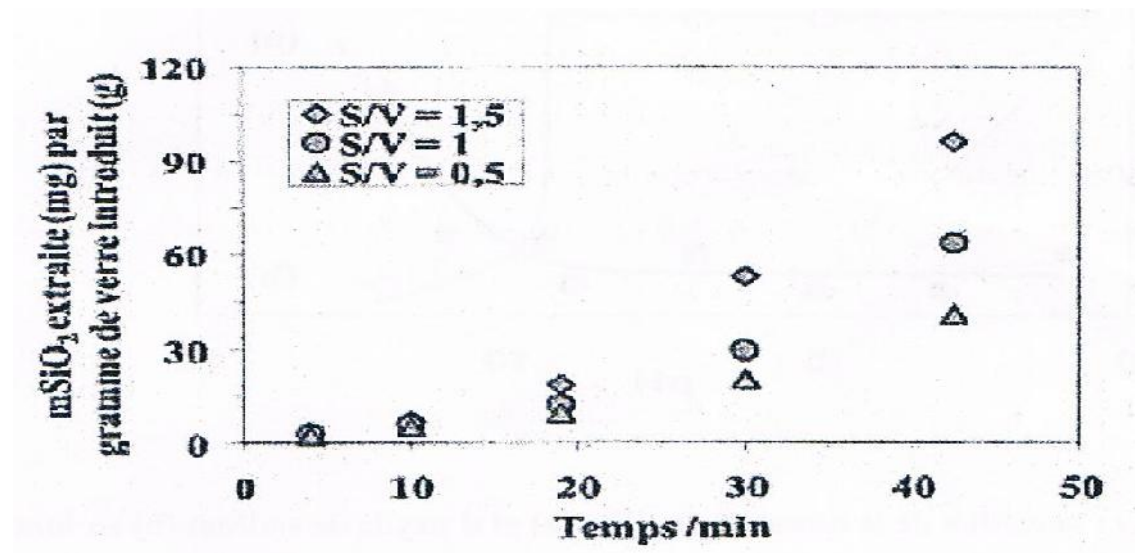


Figure II.5: Évolution de la masse de SiO₂ dissoute par gramme de verre en fonction du rapport S/V [A. Paul(1982)].

a) Effet de la composition du verre

La durabilité chimique du verre dépend fortement de sa composition. Pour un verre ne contenant pas de modificateurs, si la valeur du pH de la solution ne dépasse pas 7, l'attaque du réseau ne se produit pas. La présence d'alcalins dans la composition du verre fait chuter rapidement sa durabilité chimique, à cause de la présence d'oxygène non portant qui crée un réseau plus favorable à la diffusion des cations [A. Paul(1982)].

b) Effet de la valeur de PH

Comme décrit précédemment, la durabilité chimique des verres dépend fortement du PH et de la nature de la solution attaquant. En effet, les verres de silicates deviennent particulièrement sensibles à la décomposition de la solution de la silice et de la soude en fonction de PH à 35°C d'un verre de composition initiale Na₂O-3SiO₂ à 35°C.

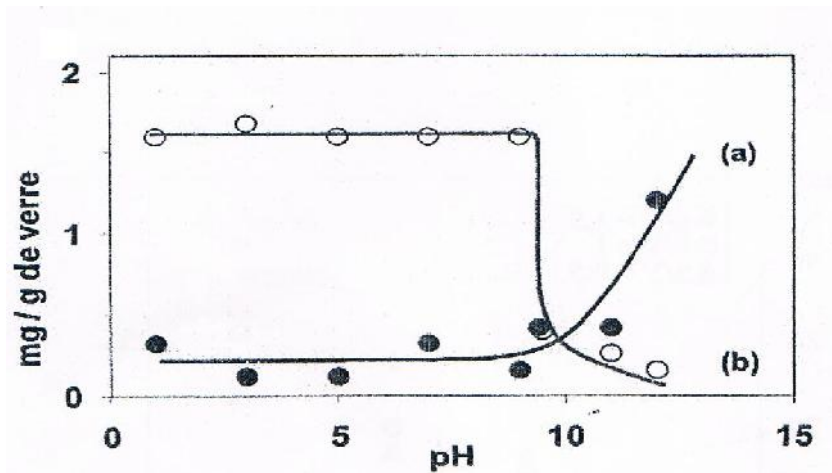


Figure II.6 : Valorisation de la quantité de silice (a) et d'oxyde de sodium (b) en fonction du PH d'un verre de composition initiale $\text{Na}_2\text{O}-3\text{SiO}_2$ à 35°C [A. Paul(1982)].

c) Effet de la température

La quantité des espèces dissoutes du verre en solution pour un temps donné augmente avec la température d'un facteur de deux tous les 10°C selon Maclellan et entre 8°C et 15°C et en fonction de la composition du verre et du type d'ions alcalins selon Paul [A. Paul(1982)].

II.4 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DU VERRE

La résistance du béton contenant le verre est particulièrement faible lorsqu'un ciment à teneur alcaline élevée est utilisé [Saadani, (2006)]. Une dilatation élevée est produite lorsque le verre est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation d'un béton contenant du gravier est de 0,018 %, alors que celle d'un béton contenant du verre est d'environ 0,3 % [Saadani, (2006)]. Aussi, le verre dans le béton peut conduire, en fonction de la taille des particules, à deux types de comportement aux conséquences complètement antagonistes : la réaction alcali-silice (RAS) entraînant des gonflements du béton, et la réaction pouzzolanique, améliorant les caractéristiques mécaniques et la durabilité du matériau. Ainsi, l'utilisation de granulats siliceux dans le béton entraîne une réaction alcali silicate (RAS). Un gel expansif se forme à l'interface granulats mortier et entraîne par création de microfissures une fragilisation du matériau.

Le verre étant principalement composé de silice, le recyclage du verre dans le béton soulève ce problème. Si le verre est réduit en poudre il peut réagir avec la portlandite et former de nouveaux CSH ce qui est positif. Différents auteurs ont cherché la taille critique de granulats de verre au-delà de laquelle la réaction Alkali silicate se produisait (RAS). Le **tableau (II.1)** donne les diamètres critiques pour différents auteurs. Ce diamètre situe le matériau entraînant peu de RAS dans les sables et les fines.

Diamètre en mm	Auteur
De 0,9 et 1mm	Rachida et al, 2010
De 0,6 à 1,18mm	Jin et al, 2000
De 0,15 à 0,30 mm	Yamada et al, 2005
0,038 mm	Meyer et al, 1996
0,6 mm	Lee et al, 2011

Tableau II.1: Diamètre critique selon différents auteurs [Mamery (2014)].

La couleur du verre est un indicateur du taux de silice. (Topçuet al., 2008) analyse la composition du verre en fonction de la couleur (vert, marron et blanc par ordre de contenu en oxyde de silice croissant), et montre que le mortier à base de verre vert induit le moins de RAS. La résistance observée diminue avec le taux de remplacement. En effet, (Topçuet al., 2004; 2008) montre que la résistance en compression en fonction du taux de remplacement décroît linéairement (pour les pourcentages de remplacement testés), l'expansion étant croissante en fonction l'âge et du taux de remplacement (quel que soit l'âge du béton pour un taux donné). L'adhésion incomplète du verre à la pâte de ciment est aussi une cause de cette décroissance de la résistance.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 525 kg/m^3 par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C . Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours (Ramachandran, 1981).

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme

de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulat pour béton.

II.5 COMPORTEMENT DU VERRE DANS UN MILIEU CIMENTAIRE

L'utilisation des verres dans une matrice cimentaire entraîne la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique.

2.5.1 Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés : silices, alcalin, calcium et hydroxydes et produisent toutes deux des gels amorphes.

D'une part, les granulats contenant de la silice amorphe peuvent réagir avec les alcalins du ciment dans la solution interstitielle des pores du béton, quand celui-ci est exposé à des conditions d'humidité (**Stanton, 1940**). Le produit de réaction est un gel silico-alcalin qui peut entraîner des expansions et des fissures dans le béton (la réaction alcali-silice).

D'autre part, dans les mêmes conditions, les mêmes matériaux finement broyés peuvent réagir avec la chaux libre du ciment, formant ainsi des hydrates ayant des propriétés liantes (réaction pouzzolanique) (**Massazza, 1976 ; Sersale, 1980**).

La réaction pouzzolanique permet d'améliorer les propriétés du béton, notamment le durcissement et la durabilité. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle représente l'un des meilleurs moyens de réduire les expansions du béton contenant des granulats alcali-réactifs. Pour les deux réactions, les matériaux sont plus réactifs quand leur cristallinité est faible (**Massazza et al., 1980; Fookes et al., 1981**).

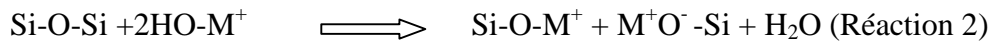
II.5.1.1 La réaction alcali-silice

➤ Mécanisme de la réaction alcali-silice

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



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



Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, selon (**Poo, 1992**) l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit **figure (II.7)** :

- 1- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- 2- Migration des ions OH^- , Na^+ et K^+ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.
- 3- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- 4- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- 5- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydraté alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- 6- Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- 7- Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.
- 8- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie.

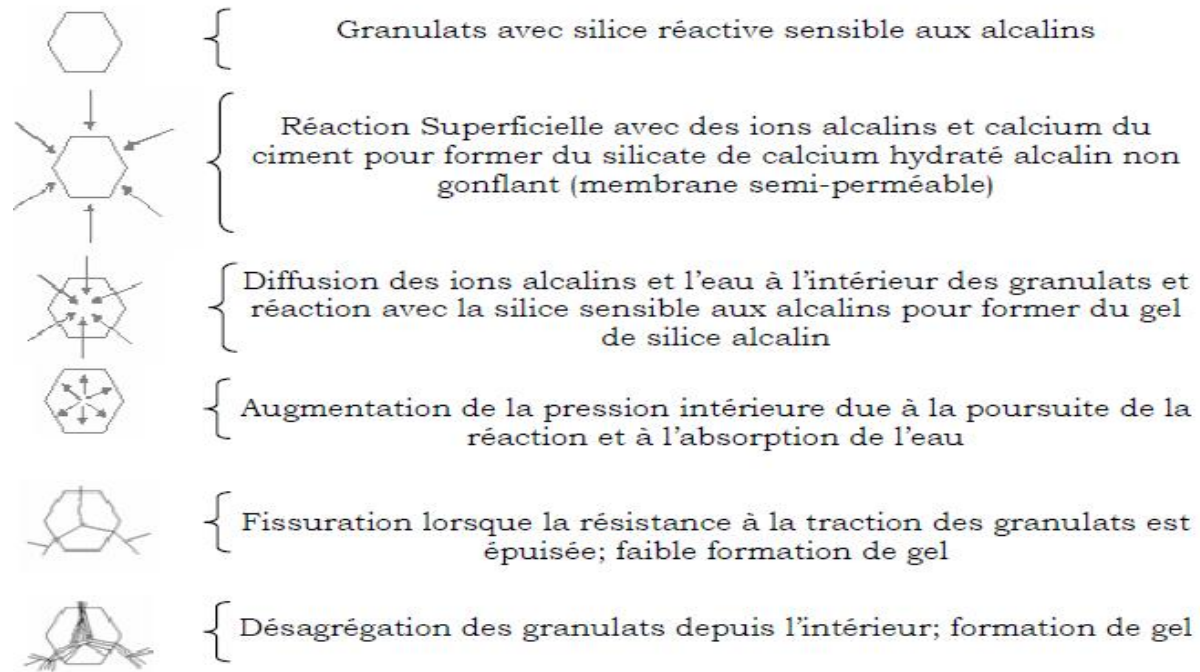


Figure II.7: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [Sprung et Sylla, (1998)]

Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements. La présence de gels d'alcali-réaction étant associée, dans le béton, à l'existence d'une fissuration anarchique et évolutive, on leur accorde volontiers des propriétés gonflantes. Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements.

➤ Théorie de la pression osmotique

Cette théorie est défendue par **DIAMOND [1989]**, qui suggère que les gels fixent de l'eau et que cette capacité est en relation avec le rapport silice/alcalin (d'autant plus grande que ce rapport est faible). D'autres auteurs abondent dans le même sens et pensent que les gels silico-alcalins, avec ou sans chaux, peuvent absorber 50 % de leur poids en eau à 80 % d'humidité relative, et que, pour des atmosphères à humidité relative supérieure à 95 %, ils peuvent absorber jusqu'à 3 fois leur poids. A cette fixation d'eau serait associée une expansion qui trouverait ainsi son origine dans un mécanisme osmotique [**GLASSER et coll., 1981**].

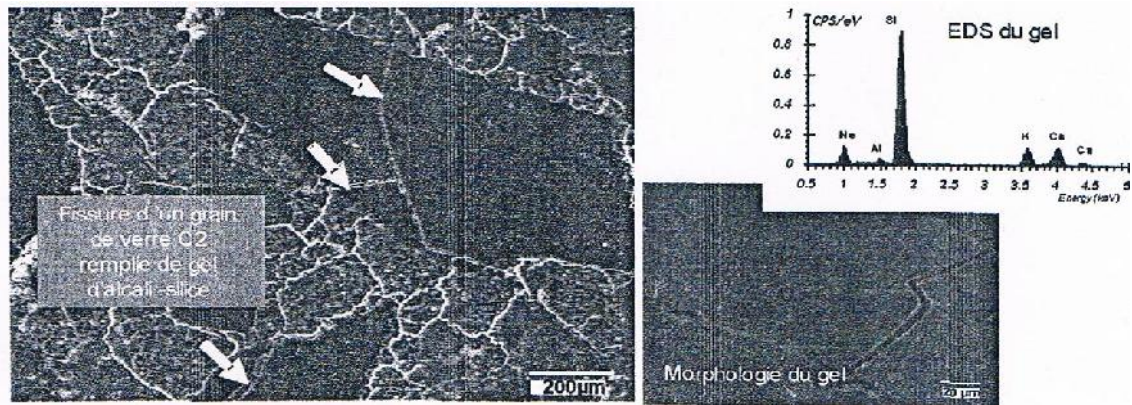


Figure II.8: Réaction alcali silice du verre [Rachida (2010)].

➤ Facteurs affectant la réaction alcali-silice

Des travaux antérieurs ont permis de montrer que différents paramètres affectent la réaction alcali-silice :

- La taille des granulats réactifs a un impact important sur les gonflements entraînés par la réaction alcali-silice (Vivian, 1951; Dia et al., 1974). Cependant la taille des granulats qui provoquerait des gonflements réactifs semble dépendre de la nature des granulats réactifs. Pour certains types de granulats comme les siliceux du nord de l'Allemagne (silex), l'expansion va de pair avec la taille (Sprung, 1975). Pour d'autres granulats, comme le verre de quartz, les gonflements les plus importants sont obtenus avec les granulats d'opale (Diamond et al., 1974).

- Beaucoup d'études ont montré qu'il existe une teneur "pessimum" des granulats réactifs dans le béton qui causerait une expansion maximale. Selon (Woolf, 1952), c'est le pessimum du rapport "granulats réactifs/alcalins" dans le béton qui est d'une importance critique. Plus tard, Glasser et Kataoka (1981) ont montré que c'est principalement un certain rapport molaire "SiO₂/alcalins" qui est le facteur essentiel dans l'expansion du béton.

- Comme toute autre réaction, la réaction alcali-silice est sensible à la température [Guomundsson et Ageirsson, 1975; Broetal., 1978]. Cependant l'effet de cette dernière est purement cinétique et peut être traduit par une loi d'Arrhenius [Larive, (1998)].

- L'eau est un ingrédient important pour la réaction alcali-silice car elle est à la fois le milieu de transport des espèces ioniques et fait partie des produits de la réaction. Sa disponibilité est donc un paramètre essentiel pour la réaction. Il est conclu que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative > 80 % est nécessaire (Olafsson, 1986; Kurihara et al., 1989), un rapport eau/ciment de 0,4 provoquerait aussi des expansions selon (Vivian, 1950; Hobbs, 1980).

- La teneur en alcalins équivalents est une donnée importante vis-à-vis des gonflements plus la teneur initiale en alcalins est forte plus important est le gonflement obtenu (**Sibbick et al., 1992; Guedon et al., 2000**). L'utilisation d'un ciment à basse teneur en alcalins ($< 0,6\%$ Na₂O_{eq}) est recommandé pour éviter ou réduire l'expansion. Cependant, bien que cela soit rare, on observe des expansions importantes des bétons faits à base de ciments à très basse teneurs en alcalins (**Davis, 1951 ; Woolf, 1952**). (**Hobbs, 1984**) recommande de limiter la quantité d'alcalins dans la composition des bétons à 3 kg/m^3 .

Des inhibiteurs chimiques comme les sels lithium (**Maccoy et al., 1951**) sont également utilisés pour contrer cette réaction, probablement en arrêtant la dissolution de la silice (**Iler, 1979**). Le nitrate de lithium présente le plus d'avantages (**Stokes et al., 1997; Malvar et al., 2002**), Notamment car il ne possède pas l'inconvénient, en cas de sous dosage, d'augmenter l'expansion ce qui est par contre le cas de LiOH et Li₂CO₃.

Selon (**Vivian, 1950**), l'utilisation de quantités appropriées de base, comme le NaOH, peut également réduire l'expansion. Le gel d'alcali-silice produit dans ce cas-ci serait trop liquide pour provoquer des pressions internes. Notons toutefois que l'utilisation de quantités inappropriées de NaOH peut également augmenter l'expansion (**Longuet et al., 1973**).

D'après certains auteurs (**Maccoy et al., 1951 ; Jensen et al., 1984**), les agents entraîneurs d'air sont également indiqués pour réduire l'expansion du béton en créant des espaces libres pour les gels.

Cependant la méthode la plus commune pour réduire (ou pour éviter) l'expansion est d'incorporer des matériaux pouzzolanique (15-30 % du poids de ciment) ou l'utilisation des ciments de laitiers. Toutefois, des quantités inadéquates peuvent avoir l'effet contraire et entraîner des expansions [**Stanton, 1948**]. De plus, rajouter du ciment n'est pas l'objectif recherché si l'on est préoccupé d'économie d'énergie.

II.5.1.2 La réaction pouzzolanique

➤ Facteur affectant la réaction pouzzolanique

Pour les mélanges ciments (ou chaux) et pouzzolane, les plus importantes résistances mécaniques peuvent être obtenues quand le matériau pouzzolanique employé est plus actif et plus fin, et quand le mélange est mis au contact d'humidité (**Massazza, 1976**). L'addition de petites quantités de bases tel NaOH (**Metso et al., 1979**) ou une température élevée (**Massazza et al., 1980**) s'avèrent de bons accélérateurs de la réaction pouzzolanique. La teneur en chaux, le rapport eau/ciment du mélange et le pH de la solution interstitielle sont également considérés comme facteurs influençant la réaction pouzzolanique (**Fournier et al., 1978**).

Plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [MEYER et coll., 1997; JIN et coll., 2000; SHAYAN et coll., 2004].

➤ **Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes**

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante: en effet, dans le cas du verre, celui-ci apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, SHAO et coll., [2000] ont montré qu'avec 30% de remplacement les bétons ont affiché une meilleur résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante. Les travaux de SHI et coll., [2005], viennent confirmer également cette tendance. Ces auteurs ont montré qu'à 3 jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

II.6 L'EFFET DE VERRE DANS LES BETONS

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciable de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement partiel du ciment Portland dans les bétons (Rachida, 2009). Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré. (Pike et al., 1960; Schmidt et al., 1963; Pattengil et al., 1973). Depuis, l'idée a été en partie abandonné.

Le sujet est redevenu d'actualité depuis un certain nombre d'année. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables décideurs et ceux-ci ont encouragé de nouvelles études (Shaoet al., 2000; Kojima et al., 2000; Bazan et al., 2000; Dyer et al., 2001; Meyer et al., 1999; Byars et al., 2004; Park, 2004; Karamberi et al., 2004; Shi et al., 2004, 2005; Shayan et al., 2002-2004-2006; Schwarz et al., 2008...).

II.6.1 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction alcali-silice

La taille des particules des granulats de verre a une influence sur l'expansion due à la réaction alcali-silice (RAS). Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granulats réactifs. En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la RAS. Nous pouvons citer les travaux de **(Shao et al., 2000)**, **(Shi et al., 2005)** et **(Shayan et al., 2002-2006)**. Cependant, dans la plupart de ces travaux les auteurs ont travaillé en terme de finesse non pas en terme de taille des grains. Pour certains auteurs 150 μ m est la limite supérieure pour laquelle les bétons ne risquent pas d'être atteints de la RAS **(Meyer et al., 1999)**. **(Byars et al., 2004)** ont travaillé sur différentes classes granulaires de verre de 35 à 12 mm et ils ont conclu que l'expansion était proportionnelle à la taille des grains de verre. Comme nous l'ont montré les paragraphes précédents, l'expansion associée à la réaction alcali-silice serait relative à la taille des granulats. Cependant, pour certains auteurs il existerait une taille de granulat pour laquelle l'expansion produite est maximale, cette taille est appelée "pessimum". La bibliographie concernant cet effet pessimum n'est pas abondante.

Nous pouvons notamment citer les travaux de **(Jin et al., 2000)** et les travaux de **(Xie et al., 2003)** qui ont mis en évidence l'effet pessimum sur des familles de granulats de taille comprise entre 0,150 et 4,75 mm. D'après ces auteurs ce pessimum se situerait entre 1,18 et 2,36 mm. Quant à **(Yamada et al., 2005)**, ce pessimum serait de 0,6 mm ou même de 0,25 mm. Cependant, ce pessimum ne dépend pas uniquement de la taille des granulats mais aussi de la couleur et du type de verre utilisé. **(Jin et al., 2000)**, **(Bazant et al., 2000)** et **(Yamada et al., 2005)** ont travaillé sur trois différentes couleurs de verre et ont montré que celles-ci gouvernent la taille du pessimum. En effet, il passe de 600 pour le verre brun et blanc à 1,18 mm pour le verre vert (Figure 3). Pareillement, la taille du pessimum est modifiée par l'hydratation avancée des bétons. En effet, **(Meyer et al., 1997)** ont mis en évidence cet effet où la taille du pessimum passait de 300 à 75 entre 4 et 14 jours [**Figure (II.9) et (II.10)**].

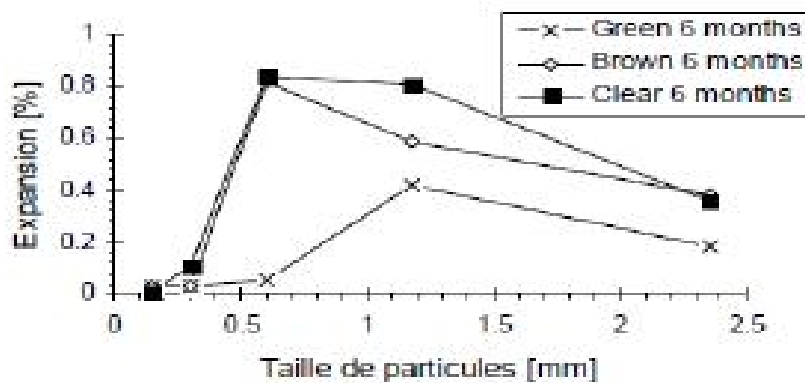


Figure II.9: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différentes [Rachida 2009].

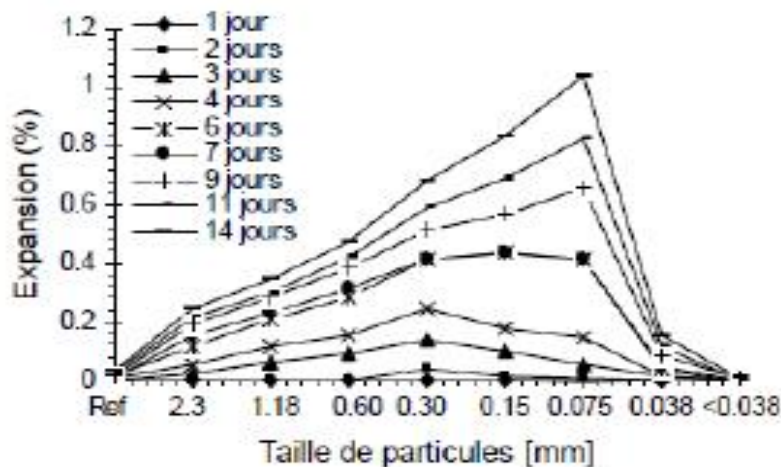


Figure II.10: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre [Mey et al.1997].

II.6.2 Influence de la teneur en verre sur la réaction alcali-silice

Différentes études ont traité également ce point: nous pouvons citer les travaux de (Dyer et al., 2001); (Polley et al., 1998); (Park et al., 2004); (Lker et al., 2004); (Kojima et al., 2000); (Jin et al., 1999-2000); (Shi et al., 2004), et de (Shayan et al., 2004); (Özkan et al., 2008).

Les travaux de l'ensemble de ces auteurs mesurent les variations des expansions des bétons en fonction de la teneur en verre. Cependant, cette tendance varie selon les auteurs, et nous pouvons les cataloguer en trois groupes. Le premier qui affirme que l'expansion des bétons augmenterait avec leur teneur en verre, le second avance l'inverse, et enfin le dernier

que les gonflements des bétons ne changerait pas en fonction de leur teneur en verre. Ces oppositions s'expliquent vraisemblablement dans les conditions de déroulement des travaux.

En effet, (Dyer et al., 2001) ont travaillé avec trois différents pourcentages de remplacement de ciment par trois différentes couleurs de verre. Ces auteurs ont conclu que quel que soit la couleur du verre utilisé, les gonflements des bétons sont réduits avec la croissance de la teneur du verre dans les bétons **figure (II.11)**. Même tendance pour les travaux de (Polley et al., 1998) et ceux de (Özkan et al., 2008). Les auteurs expliquent ce phénomène par le verre qui devait réagir avec la chaux pour former des silicates de calcium hydratés avec de faibles rapport C/S qui retiennent les alcalins.

Les travaux de (Park et al., 2004) ainsi que (Jin et al., 2000) et (Shayan et al., 2004), ont montré que plus il y'avait de verre dans les mélanges, plus importante était l'expansion, donc pas de pessimum. De leurs coté, [Iker et al., 2004] ont pu remarquer les variations dimensionnelles des mortiers étaient indépendantes du taux de présence du verre. Comme déjà mentionné, la divergence dans les conclusions vient fort probablement des conditions expérimentales. En effet, le premier groupe a utilisé du verre comme remplacement du ciment en présence de granulats inertes ou réactif, quant au second groupe, il a utilisé le verre comme granulats.

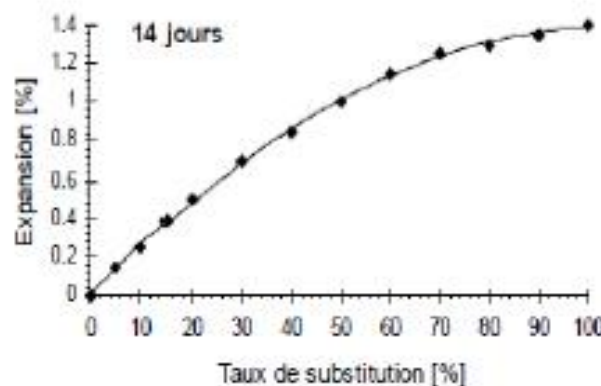


Figure II.11: Expansion de barres de mortiers confectionnées en substituant de sable par des granulats de verre [Jin et al.,2000].

II.6.3 Influence de la taille des grains de verre sur la réaction pouzzolanique

Selon (Shao et al., 2000), avec une taille des grains de verre de $38 \mu m$, les indices d'activité des bétons confectionnés avec 30 % de remplacement de ciment par ce verre dépassaient les 90 % à jeune âge et les 108 % à 90 jours. Pour (Chen et al., 2006) une taille de $75 \mu m$ serait suffisante pour atteindre un bon indice d'activité pouzzolanique. D'autres auteurs

avancent l'importance de la finesse, ainsi, pour (Shi et al., 2005), une finesse au moins égale à celle du ciment serait nécessaire et suffisante pour avoir de bonnes résistances mécaniques. Quand à (Shayan et al., 2002) il a travaillé avec une finesse de 800 m²/kg pour avoir un bon indice d'activité pouzzolanique à 90 jours. Néanmoins, avec 20 % de remplacement de ciment par cette finesse de verre, au-delà d'une année de cure, la résistance de ces bétons a pu égaler celle des mélanges confectionnés avec 10 % de fumée de silice **figure (II.12)**. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : Plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
- La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que la teneur en verre augmente.
- L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leur couleur, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre blanc est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre blanc possède une activité pouzzolanique considérable.

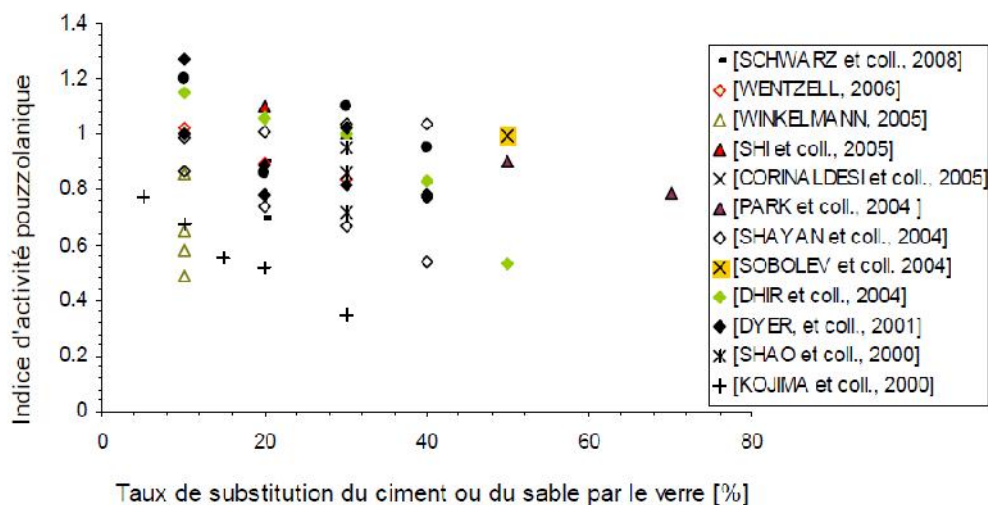


Figure II.12: Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [Rachida (2009)].

II.6.4 Influence de la teneur en verre des mélanges sur la réaction pouzzolanique

Excepté (Batayneh et al., 2007) et (Nishikawa et al., 1995) dont les études ont montré que la résistance augmenterait avec la teneur des mélanges en verre, la plupart des travaux, malgré la variation des conditions de travail, s'accordent à dire que la résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente (Kojima et al., 2000; Park et al., 2004; Shao et al., 2000; Shayan et al., 2002 et 2004; Dyer et al., 2001; Correia

et al.,2009;Schwarz et al., 2008; Sobolev et al., 2007). La divergence entre les conclusions des deux groupes doit fort probablement venir du fait que dans le cas du premier groupe, le premier auteur (**Batayneh et al., 2007**) a travaillé sur des pâtes et le second (**Nishikawa et al., 1995**) a fait une substitution de sable au lieu de ciment.

CONCLUSION

Cette étude bibliographique à montrer que les bétons de verre ont été étudié et a confirmé que l'utilisation du verre dans les bétons est bien possible. Nous avons vu aussi que la taille des grains influence l'effet qu'apporte le verre au béton :

- L'incorporation du verre sous forme de fine améliore les résistances en compression des bétons.
- L'utilisation du verre sous forme de granulats entraîne des gonflements liés à la réaction alcali-silice.

En revanche, les avis diffèrent quant à la taille où se manifeste l'effet négatif du verre. Cette taille dépend de plusieurs paramètres :

- type du verre (composition chimique du verre),
- teneur du mélange en verre,
- utilisation du verre en remplacement de ciment ou de sable,
- utilisation d'autres fines minérales,
- nature des fines minérales utilisées,
- utilisation d'adjuvants...

L'effet de la taille des grains de verre a été beaucoup évoqué dans beaucoup de travaux. Cependant, les mécanismes des réactions se déroulant en fonction de la taille des grains ont été négligés. Nous avons vu qu'en général, les pouzzolanes sont utilisées pour former des C-S-H capables de fixer des alcalins ce qui réduirait la réaction alcali-silice.

CHAPITRE III

COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON

CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON**INTRODUCTION**

Les bétons couramment utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil, peuvent être soumis à des charges extérieures importantes (charges de compression, traction, flexion et cisaillement).

Afin d'apprécier le comportement du béton vis-à-vis de ces charges, de nouvelles machines performantes permettent de déterminer des courbes contraintes-déformations (-) dans le domaine linéaire jusqu'à atteinte du maximum et même au-delà du pic de contrainte. Ce qui permet de mettre en évidence le comportement post-pic et la ductilité relative du matériau, jusqu'à rupture totale. Ainsi, on se propose de caractériser dans ce qui suit le comportement en flexion et en compression des bétons tel que c'est rapporté dans la littérature.

III.1 COMPORTEMENT EN COMPRESSION

La résistance du béton à la compression est le facteur primordial qui donne une image globale sur la qualité du béton. Elle est la propriété fondamentale et l'élément clé souvent employé lors de la conception des structures en béton.

Ainsi, le béton est défini par sa résistance à la compression. Cette résistance se mesure par des essais de compression simple, uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques normalisées dites «16-32 »(diamètre égale à 16cm, la hauteur est égale à 32 cm)

Remarque : on a fait notre expériences avec des éprouvette normalisées « 10-20 » (diamètre égale à 10cm, la hauteur est égale à 20 cm)

III.1.1 Compression uniaxiale

En raison de sa facilité de réalisation, l'essai de résistance en compression uniaxiale sur des éprouvettes de béton normalisées est l'expérience la plus répandue pour estimer les caractéristiques générales de résistance du béton.

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation, contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité reliée à la

microfissuration du matériau. En effet, lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 30% de sa résistance en compression, la microfissuration s'initie et tend à se propager parallèlement au chargement lors de son augmentation [McGregor, (1997)]. La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70% à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. La **figure (III.1)** illustre la relation contrainte-déformation (-) du béton en compression.

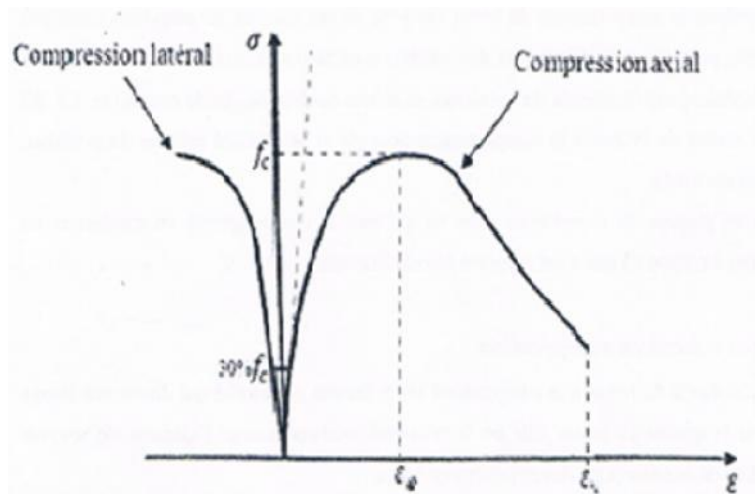


Figure III.1: comportement du béton en compression [chen (1982)]

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du matériau, généralement admise à 0.0035. Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime.

Les essais de compression du béton sous charge cyclique ont montré la présence de boucles d'hystérésis assez importantes durant le processus de chargement – déchargement **figure (III.2)**. L'amplitude de ces hystérésis influence considérablement le comportement à la rupture du béton. Cette dissipation d'énergie peut être expliquée par l'importante friction existant entre les fissures lors de leurs ouvertures – fermetures. Cette friction produit des effets viscoplastiques.

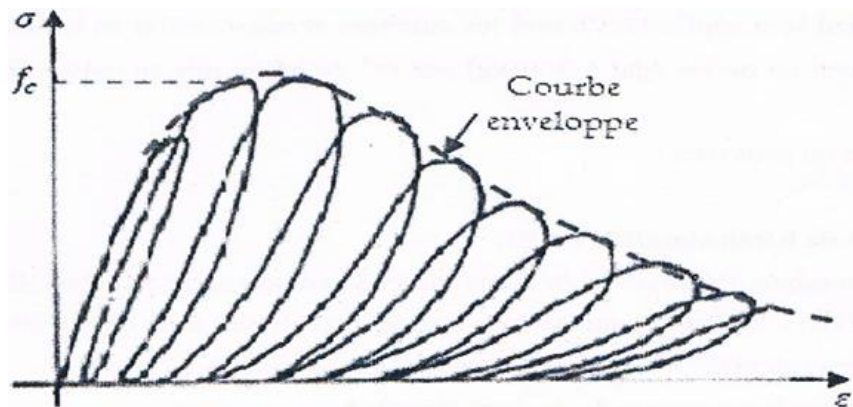


Figure III.2:Comportement cyclique du béton en compression simple, [Karsan et al (1969)]

III.1.2 Quelques modèles de comportement du béton en compression

Le béton présente des caractéristiques variables de déformation sous diverses conditions et niveaux de chargement. Une grande part de la connaissance des mécanismes de son comportement résulte d'observations expérimentales réalisées sur des essais. L'accumulation des connaissances empiriques et l'expérience acquise sont des éléments très importants à prendre en considération lors de la modélisation analytique du comportement du béton.

En général le comportement mécanique du béton décrit dans la littérature présente ce matériau comme élastique, fragile et endommageable [Mazars j, Millard.A (2004)]. La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire [Exadaktylos G.E (2001)] selon les besoins auxquels doivent répondre ces modèles. Le comportement élastique en compression est non linéaire et la diversité de formulation des bétons conduit à un large éventail de matériaux ayant des caractéristiques mécanique très variées. Nous avons représenté un nombre restreint de propositions de ces lois qui sont classées selon deux grandes familles.

III.1.3 Les modèles réglementaires

Les modèles réglementaires servent de base aux calculs simplifiés aux états limites, Ces règlements de calcul sont applicables à tous les ouvrages et construction en béton armé, avec un dosage en ciment au moins égal à 300[Kg] par m³ de béton mis en œuvre (BAEL[1999], EURCODE [2009]).

Parmi ces modèles on peut citer:

◆ Le modèles de béton simplifié BAEL

Le diagramme contrainte-déformation du béton reprend le diagramme de calcul dit : parabole Rectangle **figure (III.3)**. Il peut être utilisé dans tous les calculs aux états limites ultimes dans le but de simplifier ces calculs.

La loi parabole rectangle est composée de deux branches :

- Une branche de parabole de second degré d'axe parallèle à l'axe des contraintes de compression σ_{bc} , qui s'étend de l'origine jusqu'à son sommet.
- Une branche d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations ε_{bc} , et tangent à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2‰ à 3.5‰ de la déformation ε_{bc} ,

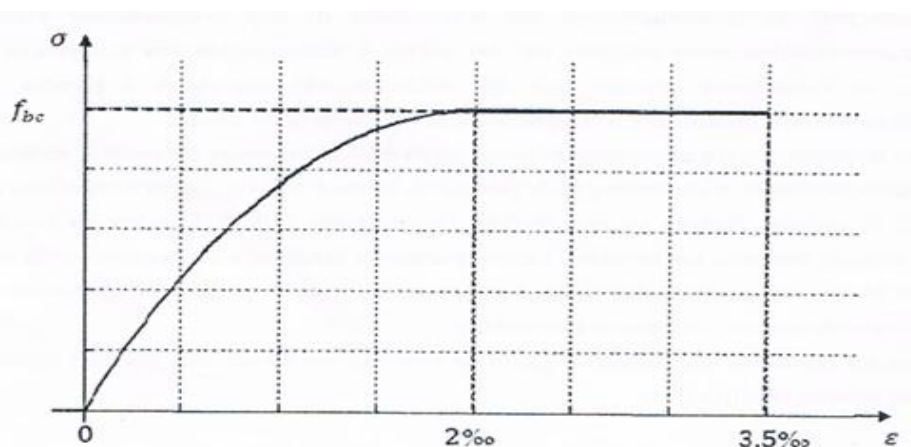


Figure III.3 : Loi parabole-Rectangle du béton en compression [BAEL (1999)].

Les relations entre les contraintes et les déformations sont les suivantes

$\sigma'_{bc} = 0,25 f_{bc} 10^3 \cdot \varepsilon_{bc} (4 - 10^3 \cdot \varepsilon_{bc})$	$0 \leq \varepsilon_{bc} \leq 2\text{‰}$
$\sigma'_{bc} = f_{bc}$	$2\text{‰} \leq \varepsilon_{bc} \leq 3,5\text{‰}$

Avec :

$$f_{bc} = \frac{0.85 \cdot f_{cj}}{\gamma_b}$$

0.85: est un coefficient de réduction de la résistance du béton dans le temps, il tient en compte l'effet du fluage.

γ_b : vaut 1.5 pour les combinaisons fondamentales et 1.15 pour les combinaisons accidentelles.

◆ Le modèle de béton simplifié Eurocode 2

Les **Eurocode** structuraux constituent des normes européennes transposables en norme nationales dans de nombreux pays de l'Europe, ces normes nationales sont amenées à se substituer aux textes réglementaires correspondants en vigueur dans ces pays. Ainsi, en France l'Eurocode 2 remplacera définitivement les règles **BAEL 91** pour le béton armé et **BPEL 91** pour le béton précontraint en mars **2010**.

Pour le calcul des sections, on utilise le diagramme idéalisé dit « parabole-rectangle », constitué par un arc de parabole du second degré prolongé par un segment de droite **figure(III.4)**.

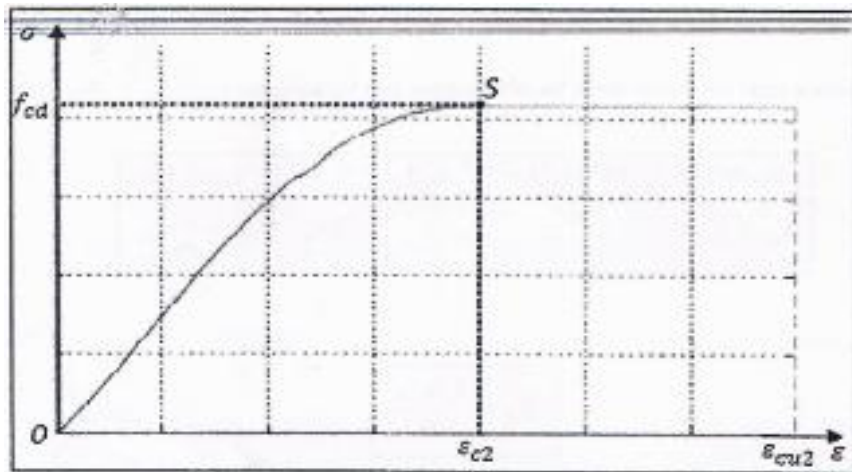


Figure III.4: Diagramme parabolique-rectangle du béton en compression [EUROCODE2 (2009)].

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}$$

Avec :

f_{cd} : Contrainte de compression du béton correspondant à la partie rectiligne du diagramme.

ε_{c2} : Déformation de pic correspondant à f_{cd} .

n : exposant.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Avec :

$$\alpha_{cc} = \begin{cases} 1,2 & \text{pour les situations accidentelles .} \\ 1,5 & \text{dans les autres cas.} \end{cases}$$

f_{ck} : Résistance caractéristique du béton à 28 jours.

- Pour les bâtiments : $\alpha_{cc}=1$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

- Pour les ponts : $\alpha_{cc}=0,85$ valeur recommandée. L'Annexe nationale française préconise $\alpha_{cc}=1$.

Le coefficient $0,85 \leq \alpha_{cc} \leq 1$ tient en compte l'effet défavorable de la durée de l'application des charges, vis-à-vis de l'essai de courte durée utilisé pour définir f_{ck} . Pour l'analyse non linéaire telle que pour le calcul des effets de second ordre et pour des charges de courte durée d'application, on utilise le diagramme de calcul défini de la manière suivante :

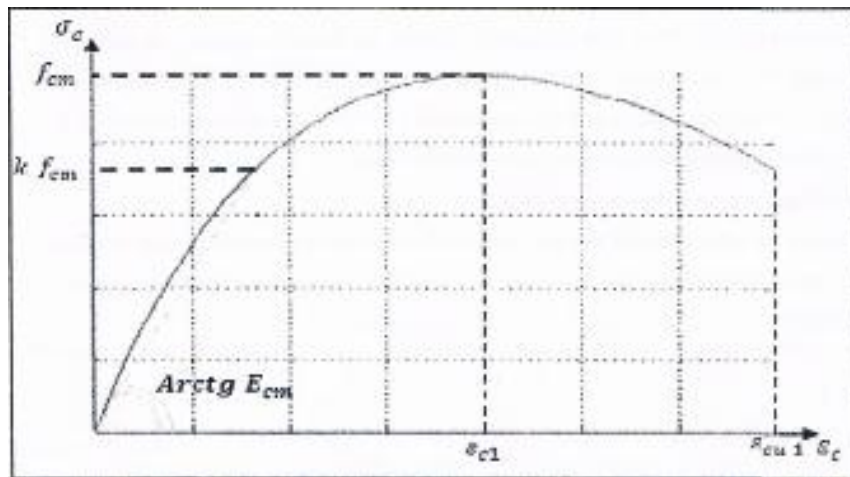


Figure III.5 : Diagramme non linéaire du béton en compression **EUROCODE2**.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + k - 2n}$$

Avec :

$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$$

Où ϵ_c et ϵ_{c1} sont pris en valeur absolue.

$\epsilon_{c1} = 0.7 \cdot f_{cm}^{0.31}$: Déformation correspondant au pic de la courbe (-)

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} / \epsilon_{c1}}{f_{cm}}$$

f_{cm} : Résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours,

E_{cm} : Module de déformation instantanée du béton.

III. 1.4 Les modèles non linéaires

L'utilisation des modèles de comportement non linéaire pour le béton est encore relativement difficile. C'est qu'il faut pouvoir disposer des modèles adéquats, des paramètres qui caractérisent ce matériau considéré tel que l'élasticité, plasticité et l'endommagement..., dans des codes de calculs des structures pour mieux l'appliquer aux ouvrages de génie civil. On se limitera au modèle de comportement de Sargin.

- **Lois du comportement de Sargin [1971]**

Ce modèle est essentiellement employé dans le calcul des structures en béton armé. Il présente l'avantage de faciliter la détermination des paramètres du modèle à partir des essais en laboratoire.

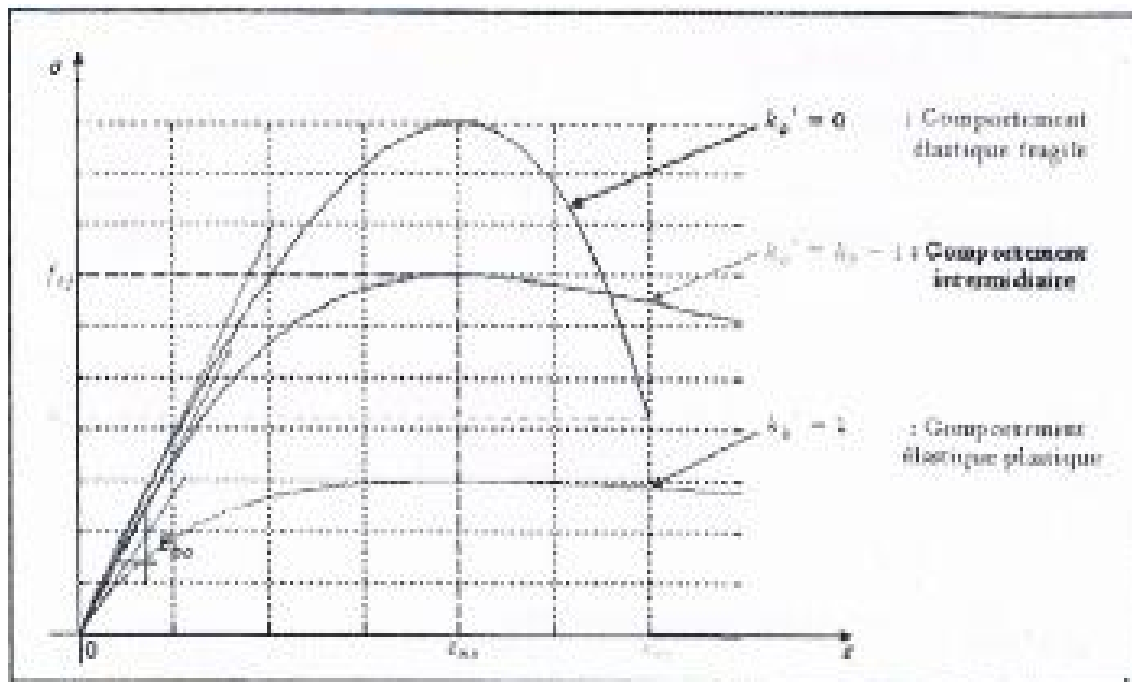


Figure III.6 : Comportement du béton en compression selon Sargin(1971)

- **Caractéristiques de la courbe :**

Ce modèle présente deux branches :

- Branche ascendante, à concavité vers le bas admettant un module tangent initial, et un maximum de contrainte qui correspond à la compression f_{cj}

- Branche descendante, commençant par le maximum de la branche ascendante et se terminant par le point définissant la déformation ultime correspondante à la contrainte ultime du béton.

Pour décrire le comportement non linéaire du béton en compression, SARGIN a proposé la relation suivante :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \epsilon + (k_b - 1) \epsilon^2}{1 + k_b \epsilon - 2 \epsilon^2 + K_b \epsilon^3}$$

Tel que :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_b}$$

$$k_b = \frac{E_b}{f_{cj}}$$

$$E_{b0} = 11000^3 \sqrt{f_{c0}}$$

Avec

E_{b0} : module d'élasticité longitudinal du béton.

ε_{b0} : déformation du pic correspondant à f_{cj} .

f_{cj} : résistance à la compression du béton à l'âge j.

K_b , K_b' : sont des paramètres adimensionnels, ajustent la branche ascendante et descendante, respectivement, de la loi de Sargin.

Le paramètre k_b' influe essentiellement sur l'allure de la branche descendante.

$K_b' = 0$: correspond à un béton ayant un comportement élastique fragile, avec une branche qui descend brutalement.

$K_b' = 1$: Correspond à un béton ayant un comportement élastique ductile, plastique, avec une branche descendante assez plat.

Pour un béton normal, on prend généralement : $K_b' = K_b - 1$.

Le BPEL propose de prendre :

$K_b' = K_b - 1$	pour	$f_{cj} \leq 30$ [MPa]
$K_b' = 0$	Pour	$f_{cj} \geq 55$ [MPa]
$K_b' = (K_b - 1) \left(\frac{55 - f_{cj}}{25} \right)$	pour	$30 \leq f_{cj} \leq 55$ [MPa]

La déformation ϵ_0 correspondant au pic de contrainte peut être estimée par la formule donnée par le BPEL :

$$\epsilon_0 = 0,62 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{f_{cj}}$$

et le module à l'origine par :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

Le béton non armé possède une capacité de déformation à la rupture ϵ_{cu} très limitée, de l'ordre de $3,5 \cdot 10^{-3}$. Cette valeur est de l'ordre de 2 fois le raccourcissement maximum élastique ϵ_{b0} .

III.1.5 Résultats des essais de compression des bétons avec le verre

La **figure (III.7)** présente les courbes brutes d'évolution des résistances à la compression des mortiers conservés à 20°C, pour les fines C1, C2, C4, C6 et C8, utilisées en remplacement de 10, 20, 30 et 40 % de ciment. Un premier examen de ces courbes laisse apparaître trois types de comportements :

(i) Classe C4 :

- Les courbes sont affinées à celle du témoin sans verre et elles atteignent un palier après 90 jours.

(ii) Classes C1 et C2 :

- On observe un abaissement final des résistances, d'autant plus marqué que le pourcentage de verre est élevé.

(iii) Classes C6 et C8 :

- Les résistances croissent de façon régulière suivant une loi de type $R_c = a + b \cdot \log t$. Aucun palier n'est atteint, même après 210 jours d'hydratation.

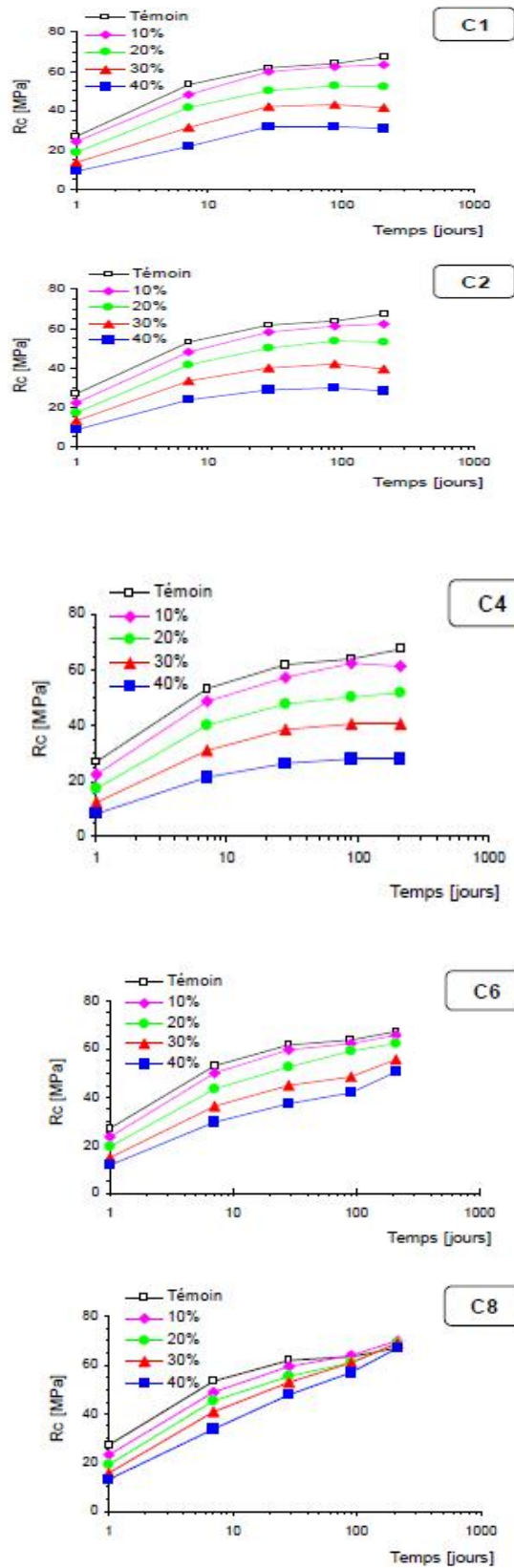


Figure III.7 : Effet de la finesse du verre et du pourcentage de substitution du ciment par le verre sur les résistances a la compression des mortiers conservés à 20°C [Rachida .I(2009)]

On conclut donc de cette figure que :

- (i) Sauf pour les classes les plus fines, le remplacement du ciment par le verre mène systématiquement à une baisse des résistances par rapport au témoin.
- (ii) Il en est de même pour l'augmentation de la quantité de verre.
- (iii) Pour les classes les plus grossières (C1 à C4), Il y a pas ou très peu d'augmentation des résistances après 90 jours. Certaines diminutions sont même observées pour les classes les plus grossières utilisées à forts taux.

(iv) Comportement différent des classes les plus fines (C6 et C8), puisque les résistances continuent à augmenter de façon significative ; les écarts avec les témoins se resserrent, jusqu'à devenir nuls pour la classe C8 (pour tous les taux de substitution). Etant donné que la résistance du mortier témoin plafonne aussi après 28 jours nous pouvons déduire que seules les classes C6 et C8 manifestent une réactivité chimique probablement.

Classes Granulaires	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Fractions granulaires [µm]	2500-5000	1250-2500	630-1250	315-630	160-315	80-160	<80	<46	<41

Tableau III.1:La différente classe granulaire et leur fraction granulaire[Rachida .I(2009)]

III.2 COMPORTEMENT DU BETON A LA TRACTION

Les essais effectués par différents chercheurs pour déterminer la résistance à la traction du béton, ont montré une certaine dispersion des résultats. Ceci est dû au comportement relatif fragile du matériau béton et aux modes d'essais.

Afin d'apprécier, lors d'un essai, le comportement d'un élément soumis à une traction directe, il est nécessaire de réaliser l'essai avec asservissement (en déformations contrôlées).

Avec l'évolution de la technologie (nouvelles machines plus performantes), on ne se contente plus de mesure simple de résistance puisque ces appareils nous permettent de déterminer les courbes contraintes-déformations (-) dans le domaine linéaire jusqu'à atteinte du maximum et même au-delà du pic de contrainte. Ce qui permet de mettre en évidence le comportement post-pic et la ductilité relative du matériau, jusqu'à rupture totale.

On distingue deux types du béton :

-béton non armé.

-béton armé [Nait Belaid (2014)].

En traction uni axiale la réponse contrainte-déformation suit une relation linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte de rupture, (σ_0), soit atteinte. La contrainte de rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le matériau béton.

Au-delà de la contrainte de rupture de la formation de microfissures est représenté macroscopiquement avec une réponse de ramollissement de contrainte-déformation, qui induit la localisation des déformations dans la structure de béton **figure (III.8)**.

Figure III.3 : Loi parabole-Rectangle du béton en compression [BAEL (1999)].

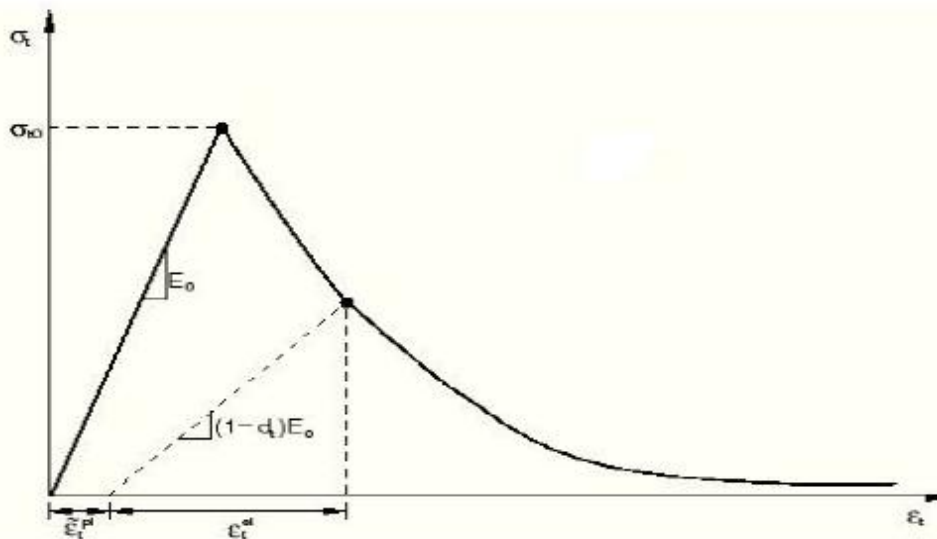


Figure III.8: Réponse du modèle à la traction simple [KOTRONI (2000)].

III.3 COMPORTEMENT DU BETON A LA FLEXION

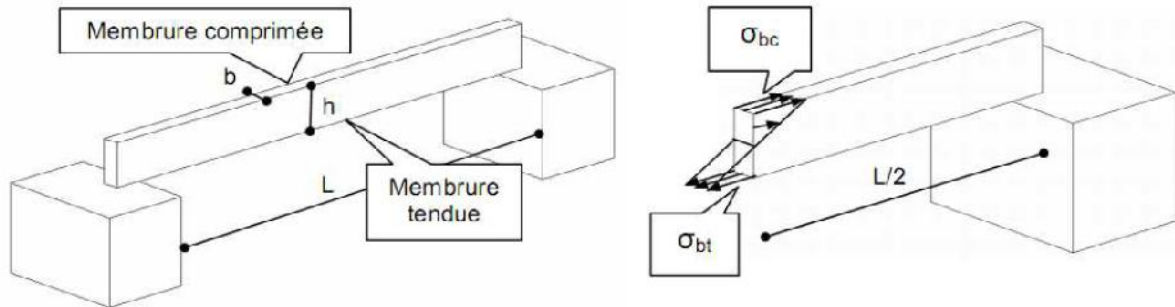


Figure III.9 : Poutre en béton non armé.

Soit une poutre en béton non armé, de section droite rectangulaire $b \times h$, franchissant une portée L . La poutre est sollicitée par son seul "poids propre", g , charge uniformément répartie, exprimée en kN par "mètre linéaire" de poutre. Elle "travaille" en flexion "simple". A mi portée, le moment de flexion est maximum, il a pour intensité :

$$M_{\max} = g \cdot L^2 / 8$$

Si on admet une distribution plane des contraintes normales agissant sur le béton de la section droite à mi- portée, les contraintes maximales valent :

$$\sigma_{bc} = - \sigma_{bt} = 6 \cdot M_{\max} / (bh^2)$$

Le béton ayant une résistance en traction de l'ordre du 1/10ème de sa résistance en compression, si l'intensité de σ_{bt} reste inférieure à la résistance à la traction du béton, notée f_{tj} , il n'y a pas risque de rupture [Boeraeve(2007)].

Conclusion :

L'étude présentée dans ce chapitre, nous a permis de revoir le comportement général du béton en compression, en traction et en flexion.

PARTIE 2

Etude expérimentale

CHAPITRE IV

COMPOSITION ET FORMULATION DU BETON

CHAPITRE IV : COMPOSITION ET FORMULATION DU BETON

INTRODUCTION

La formulation d'un béton requiert une étude précise dans le choix des constituants, et de la quantité d'eau. L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton. Les matériaux utilisés sont locaux et naturels. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux.

IV.1 MATÉRIAUX UTILISÉS

IV.1.1 Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ CEMII/42,5R provenant de LAFARGE d'Alger. Les différentes caractéristiques physico-chimiques sont représentées sur le **tableau (IV.1)**.

Constituants	Pourcentage (%)
SiO ₂	18,13
Al ₂ O ₃	4,42
Fe ₂ O ₃	3,03
CaO	60,78
MgO	1,84
SO ₃	2,34
K ₂ O	0,64
Na ₂ O	0,13
P ₂ O ₅	0,10
TiO ₂	0,23
Perte au feu	8,36
<hr/>	
Début de prise	150 – 180 min
Fin de prise	3h 30 – 4h 30
Masse spécifique	3,1 g/cm ³
SSB	3555 cm ² /g
Chaleur d'hydratation	456,60 j/g

Tableau IV.1 : Composition chimique et caractéristiques physico-mécaniques du ciment.

IV.1.2 Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont des granulats concassés provenant d'une carrière et le sable de rivière. Ils sont de trois classes granulaires : sable 0/3, Gravier 3/8 et Gravier 8/16.



Figure IV.1: Les différents types de granulats utilisés.

IV.1.3 Granulat de verre

Les granulats de verre proviennent essentiellement des déchets de verre de bouteilles. Après lavage et séchage de ces dernières, le verre est concassé d'une manière traditionnelle manuellement avec le mortier. En utilisant les tamis de diamètre 3 et 8 (mm) on obtient les deux classes granulaires suivantes (0/3) et (3/8). Le verre utilisé a une masse volumique de $2,5 \text{ g/cm}^3$ et une couleur verte.

Les différentes classes granulaires des déchets de verre recyclé se forment de sable (0/3) et de gravier (3/8) **figure (IV.2)**.



Figure IV.2: Granulat de verre à partir des déchets.

IV.1.4 L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du robinet.

IV.2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

La caractérisation des matériaux de construction telle que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

IV.2.1 Essai sur granulats

Sept mélanges de bétons sont préparés. La seule variable étant le pourcentage de substitution en granulat de verre selon les diamètres suivant (0/3 et 3/8) donné dans le **tableau (IV.2)**.

Mélanges	Sable	Sable de verre (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier de verre (3/8)
1 ^{er} mélange	100%	0%	100%	0%
2 ^{er} mélange	90%	10%	90%	10%
3 ^{er} mélange	80%	20%	80%	20%
4 ^{er} mélange	70%	30%	70%	30%

Tableau IV.2: Les différents pourcentages en granulats utilisés.

◆ Échantillonnage (NF P 18-553)

Son but est de prélever une quantité représentative de la nature, de l'état et, le cas échéant, des conditions d'utilisations des granulats par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur pour les essais prévus.

◆ Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

Elle consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant l'échantillon en utilisant la distribution dimensionnelle des grains constituant l'échantillon. L'analyse granulométrique se fait en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis (**voir annexe 1**).

La courbe granulaire est importante car elle apporte les renseignements sur les limites des granulats, la proportion d'éléments fins ainsi que la continuité de la granularité. Plus une courbe est régulière plus le squelette granulaire formé est compacte (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton. Les résultats de l'essai pour les différents granulats utilisés sont donnés en annexe 2. Les courbes granulaires sont représentées sur les **figures (IV.3), (IV.4) et (IV.5)**.

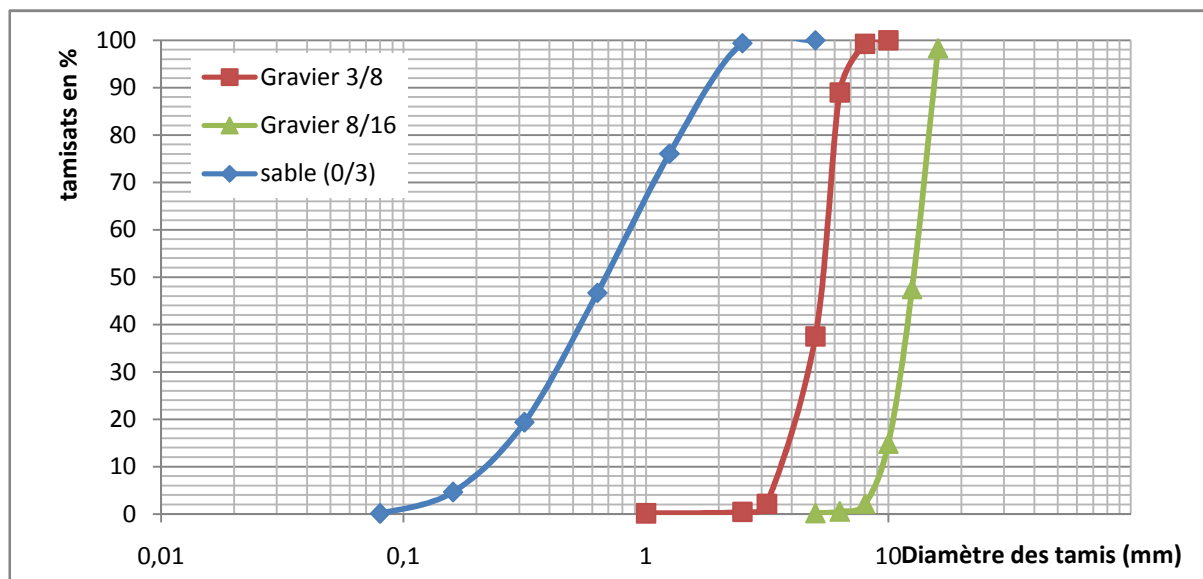


Figure IV.3: Courbes granulaires des trois granulats.

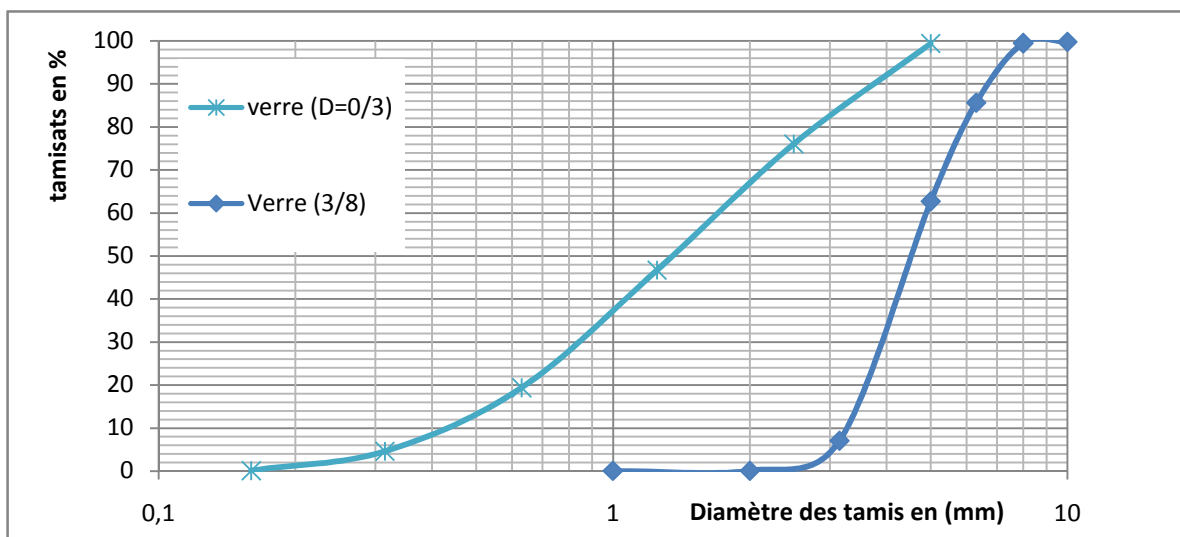


Figure IV.4: courbe granulairre des granulats de verre.

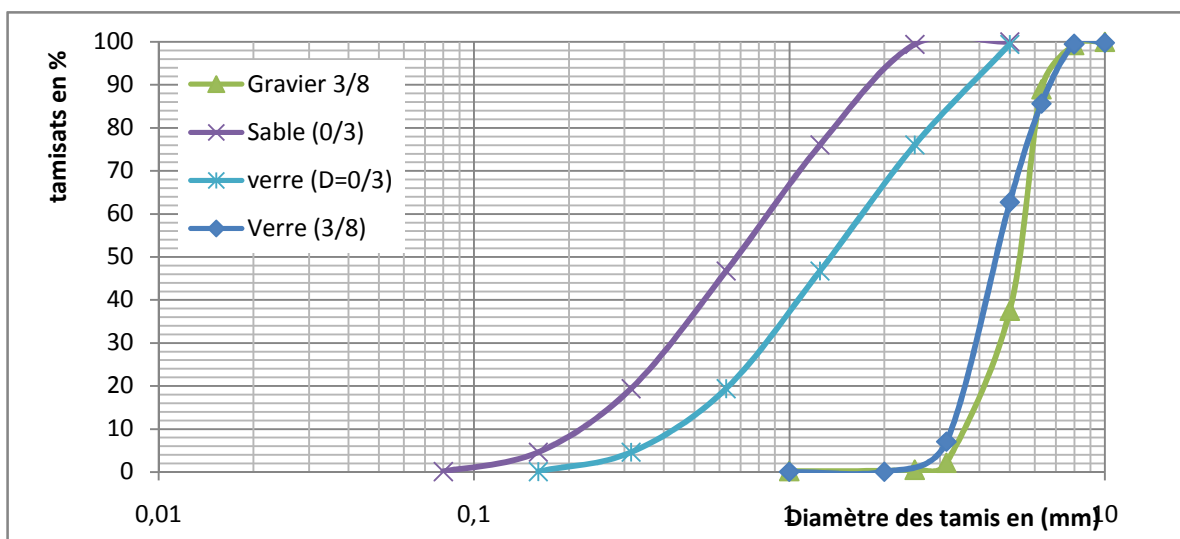


Figure IV.5: Superposition des courbes granulairres.

On remarque une différence de taille des grains ce qui engendre une divergence des deux courbes granulométrique sable et granulats de verre (0/3)

Par contre on remarque une convergence des deux courbes granulométrique de graviers (3/8) et granulats de verre (3/8) donc la taille des grains est presque la même.

◆ **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-granulaires. Les résultats sont indiqués dans le **tableau (IV.3)**.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2.6	2.6	2.6
Masse volumique Apparente (g/cm ³)	1.47	1.45	1.43

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

◆ **Module de finesse du sable (NF P 18-304)**

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient 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, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables des bétons. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Les résultats sont indiqués dans le **tableau (IV.4)**.

Granulats	Module de finesse (MF)	Spécification
Sable (0/3)	2,53	2,8 < MF < 3,2 sable grossier 2,2 < MF < 2,8 Sable moyen 1,8 < MF < 2,2 Sable fin
Verre (0/3)	2,46	

Tableau IV.4: Module de finesse du sable [DREUX (1981)].

En conclusion, On dira que le sable utilisé est un sable moyen.

Le module de finesse de verre (0/3) est pratiquement la même à celle du sable (0/3)

◆ **Équivalent de sable (NF P18-598)**

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'ES exprimé 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, ce qui augmente le rapport

E/C, par conséquent la résistance diminue. L'essai a donné les résultats présentés sur le **tableau (IV.5)**.

Granulats	Sable (0/3)	Spécification
Équivalent de sable visuel (ESV) (%)	94,175	Voire Annexe 1
Équivalent de sable sous le poids d'un piston(ES) (%)	88,35	

Tableau IV.5: Valeur de l'équivalent de sable.

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

IV.2.2 Essais sur le ciment

◆ Essais de consistance EN (196-3)

La consistance de la pâte caractérise sa plus au moins grande fluidité. Cet essai est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3.

La distance qui caractérise la consistance de la pâte à ciment est $d=7\text{mm}$. Donc la consistance de la pâte est normalisée.

◆ Temps de prise à 20°C

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat conformément à la norme EN 196-3. Qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise. Les résultats sont donnés dans le tableau (4.6).

Début de prise	Fin de prise
130 mn	235 mn

Tableau IV.6: Le début et la fin prise du ciment.

IV.3 ÉLABORATION DES BÉTONS

IV.3.1 Formulation du béton ordinaire

Une méthode pratique et simplifiée a été utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire, celle de « DREUX GORISSE ». Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Le mode opératoire est le suivant :

◆ 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:

$$\sigma_{28j} = 26 \text{ MPa}$$

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

$$\sigma_{28j} = 1,15 \times 26 = 29,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{28j} \approx 30 \text{ MPa}$$

◆ Dosage en ciment et en eau

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

$$R_{28} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

D'où:

$$\frac{C}{E} = \frac{R_{28}}{G \cdot \sigma_c} + 0,5$$

Avec :

R_{28} : Résistance visée à 28 jours.

σ_c : Classe vraie du ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (kg/m^3).

E : Dosage en eau (kg/m^3).

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	$D \leq 16\text{mm}$	$25 \leq D \leq 40\text{mm}$	$D \geq 63\text{mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau IV.7: Valeurs approximatives du coefficient granulaire [DREUX .1981].

Les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 16mm, ce qui donne un coefficient Granulaire $G=0,45$ avec une bonne qualité.

Le ciment retenu est un CPJ CEM II/42,5 R.

Donc le rapport C/E vaut:

$$\frac{C}{E} = \frac{30}{0,45 + 42,5} + 0,5 = 2,069 \quad (E/C = 0,483)$$

◆ Dosage en ciment par 1m^3 de béton

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, Grâce à l'abaque de la **figure (IV.6)**, le dosage en ciment correspondant :

$$C/E = 2,069$$

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

L'abaque **figure (IV.6)** donne la valeur du dosage en ciment. 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).

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

$$E/C \approx 0,483$$

On déduit la valeur de E qui est:

$$E = 193,33 \text{ kg}$$

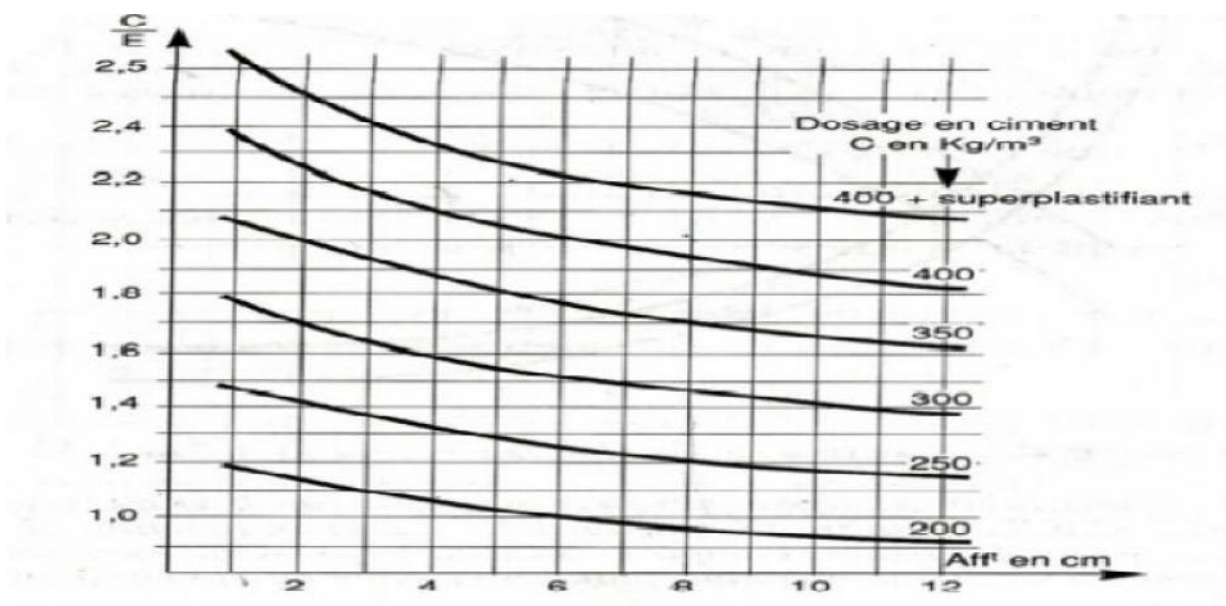


Figure IV.6: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

◆ Tracé de la courbe granulaire de référence

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable+graviers, mais ciment non compris).

Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis), déjà obtenu (voir figure 4.7), on trace une courbe 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], (D : le diamètre du plus gros Granulat).

Le point de brisure A correspond aux coordonnées suivantes :

En abscisse :

Si $D < 20$ mm, l'abscisse est à $D/2$.

Si $D > 20$ mm, l'abscisse est située au milieu, limité par le module 38 (5mm) et celui correspondant à D.

Le plus gros diamètre $D=16$, donc le point de brisure a pour abscisse:

$D/2 = 8$ mm.

En ordonnée :

$$Y = 50 - D + K + K_s + K_p$$

Avec :

K : coefficient qui dépend du dosage en ciment, de l'intensité de vibration et 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])**).

K_s : coefficient tenant compte du module de finesse du sable MF. Le module de finesse du sable vaut 2,53, la valeur de K_s est calculée par la formule suivante :

$$K_s = 6MF - 15 = 0.24$$

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 $K_p = 0$.

$$D'où Y = 50 - 16 + 0.24 + 0 + 0 = 46.24$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont : [8 ; 46,24].

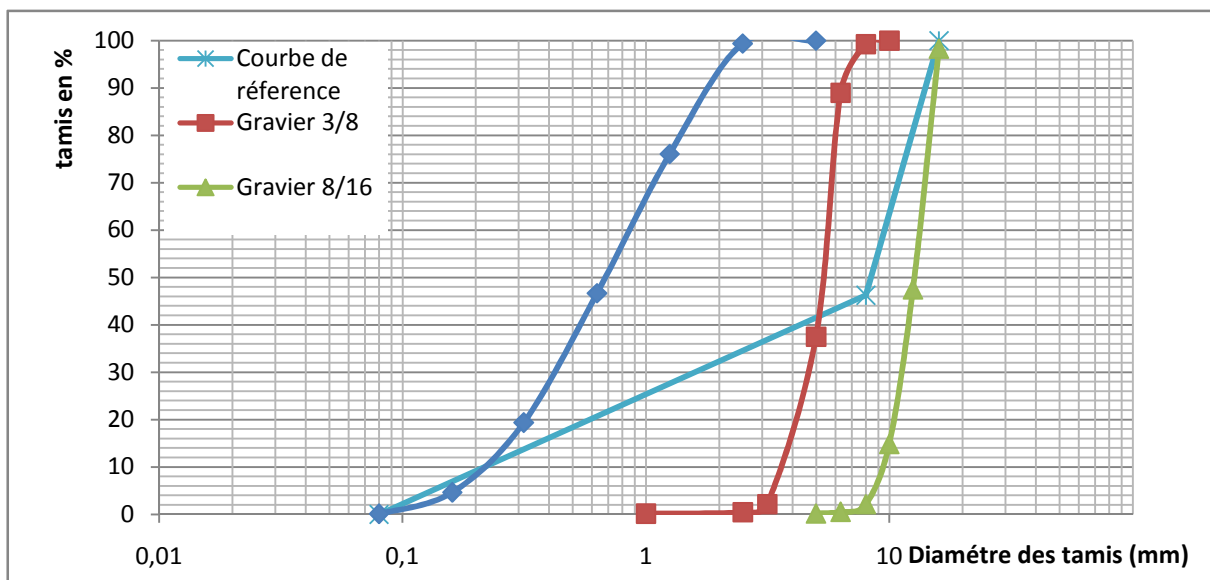


Figure IV.7: Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage.

Les lignes de partage

La droite de partage relie le point 95% (tamisât) d'un granulats au point 5% du granulats suivant. Les points d'intersection des lignes de partage avec la courbe brisé 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)= 35.9%

Gravier (3/8) 45.9% - 35.9% = 10%

Gravier (8/15)= 54.1%

Coefficient de compacité

C'est le rapport des volumes absolus en litres des matières solides : $V_M = V_g + V_c$ au volume total du béton frais soit un mètre cube.

$$\delta = \frac{V_M}{1000}$$

En utilisant le tableau des valeurs du coefficient de compacité (**Tableau 10-13 [DREUX (1981)]**), et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 16 mm, on trouve une valeur de :

$$\delta = 0,81$$

D'où

$$V_M = V_g + V_c = 0,81 * 1000 = \mathbf{810 \text{ l.}}$$

Avec

V_g : Volume absolu des granulats.

V_c : Volume absolu du ciment.

◆ Dosage des Granulats

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

Volume absolu du ciment :

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{400}{3,1} = 129,03 \text{ l.}$$

Avec :

m_c : Dosage (en masse) de ciment.

ρ_c : Masse volumique du ciment.

Volume absolu des granulats (l'ensemble):

$$V_g = 1000 \delta - V_C = 1000 \times 0,81 - 129,03 = 680,9 \text{ litre}$$

Volume absolu du sable :

$$V_S = \frac{V_g \times 35,9}{100} = \frac{680,97 \times 35,9}{100} = 244,46 \text{ l/m}^3$$

Volume absolu du gravier (3/8)

$$V_{G_{3/8}} = \frac{V_G \times 10}{100} = \frac{680,97 \times 10}{100} = 68,097 \text{ l/m}^3$$

Volume du gravier (8/16) :

$$V_{G_{8/16}} = \frac{V_G \times 54,1}{100} = \frac{680,97 \times 54,1}{100} = 368,41 \text{ l/m}^3$$

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

Masse du sable : $M_S = V_S \times \gamma_S = 657,6 \text{ Kg}$

Masse du gravier(3/8) : $M_{G_{(3/8)}} = V_{G_{3/8}} \times \gamma_{G_{3/8}} = 183,181 \text{ Kg}$

Masse du gravier (8/16) : $M_{G_{(8/16)}} = V_{G_{8/16}} \times \gamma_{G_{8/16}} = 991,03 \text{ Kg}$

La composition finale du notre béton (béton de référence) est résumée dans le **tableau (IV.8)**.

	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Eau	Ciment	E/C
Volume (l/m ³)	244,46	68,097	368,41	193,33	129,03	1,498
Poids (kg/m ³)	657,6	183,18	991,03	193,33	400	0,483

Tableau IV.8: Composition volumique et pondéral du béton témoin pour 1m³ de béton

IV.3.2 Formulation des bétons avec les granulats de verre

La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée car elle ne prend 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 sable (0/3) et du gravies (3/8) allant de 10% à 30% avec un pas de 10% 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 **tableaux (IV.9) et (IV.10)**.

Composants (kg/m ³)	Béton avec 10% de granulats de verre (0/3)	Béton avec 20% de granulats de verre (0/3)	Béton avec 30% de granulats de verre (0/3)
Ciment	400	400	400
Granulats de verre (0/3)	65,76	131,52	197,28
Sable (0/3)	591,84	526,08	460,32
Gravier (3/8)	183,18	183,18	183,18
Gravier (8/16)	991,03	991,03	991,03
Eau	193, 33	193, 33	193, 33
E/C	0,483	0,483	0,483

Tableau IV.9: composition des différents bétons avec granulats de verre (0/3) pour 1m³.

Composants (kg/m ³)	Béton avec 10% de granulats de verre (3/8)	Béton avec 20% de granulats de verre (3/8)	Béton avec 30% de granulats de verre (3/8)
Ciment	400	400	400
Granulats de verre (3/8)	18,31	36,63	54,95
Sable (0/3)	657,6	657,6	657,6
Gravier (3/8)	164,87	146,56	128,25
Gravier (8/16)	991,03	991,03	991,03
Eau	193, 33	193, 33	193, 33
E/C	0,483	0,483	0,483

Tableau IV.10: composition des différents bétons avec granulats de verre (3/8) pour 1m³.

CONCLUSION :

L'étude présente dans ce chapitre, les différentes étapes suivies pour la détermination des quantités des différents constituant du béton on a utilisé la méthode de DREUX (masse volumique absolue)

CHAPITRE V
RESULTATS ET INTERPRITATION

CHAPITRE V : RESULTAS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION

Cette étude expérimentale à dans un premier temps, pour but de développer les étapes de formulation et de confection des différents bétons. Ensuite, de s'intéresser aux essais sur béton, permettant ainsi de traiter l'influence de la substitution partielle du sable suivie de la substitution de gravier 3/8 par les granulats de verre concassés. Pour cela on a fixé le rapport $E/C = 0,483$ et on a varié le paramètre granulats de verre (0/3 et 3/8) de 10% 20% 30% une fois par rapport au sable (0/3) une autre fois par rapport au graviers (3/8).

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton ordinaire élaboré avec les mêmes constituants.

Les bétons ont été comparés avec les mêmes granulats :

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

• Les ajouts utilisés

Les granulats de verre se forment de sable (0/3) et graviers (3/8).

• Bétons élaborés

On a le rapport $E/C = 0,483$ constant pour tous les essais.

- Bétons ordinaire témoin(BO).
 - Béton + 10% de granulats verre (0/3)
 - Béton + 20% de granulats verre (0/3)
 - Béton + 30% de granulats verre (0/3)
- } substitutions de sable (0/3)
- Béton + 10% de granulats verre (3/8)
 - Béton + 20% de granulats verre (3/8)
 - Béton + 30% de granulats verre (3/8)
- } substitutions de gravier (3/8)

Dans ce cadre, ont été confectionnées :

- 21 éprouvettes cylindriques (10x20) cm³, soit 3 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression simple à 28 jours.

- 21 éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³, soit 3 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la flexion en trois points à 28 jours.

V.1 CONFECTION DES BÉTONS

V.1.1 Préparation de la gâchée

Les gâchées sont préparées dans des bacs de capacité de 25L. La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparation des moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter le décoffrage.
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour le foisonnement (15% de l'eau de gâchage).
- Peser les matériaux secs.
- Introduire dans le bac les graviers, le sable et le verre en mélangeant les différents constituants pendant 1 à 2 mn.
- Ajouter au mélange le ciment et mélanger une autre fois pour homogénéiser les différents constituants.
- Introduire l'eau graduellement et mélanger au même temps pendant 3 à 5 mn jusqu'à obtention d'un béton homogène.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais (voir la description des essais en annexe 3).
- Mettre en place les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons témoins et les bétons à base de granulats de verre ont été mis en place par vibration à l'aide de la table vibrante.

V.1.2 Conservation des éprouvettes

Après le coulage, les éprouvettes sont couvertes par des sacs en plastique pour empêcher l'eau de s'évaporer et sont démoulées après 24 heures. Par la suite, elles sont immergées dans l'eau pendant 25 jours pour assurer l'hydratation du ciment. On les met à l'aire libre pendant 3 jours pour sécher avant l'écrasement à 28 jours.



Éprouvettes prismatiques



épreuve cylindriques



Malaxage de la Gachet



Vibration des éprouvettes



Conservation des éprouvettes



Décourage

Figure V.1: Dispositif expérimental

V.2 ESSAIS SUR BÉTONS FRAIS

V.2.1 Essais au Cône d'Abrams

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer son affaissement (**annexe 3**). Il faut rappeler qu'un béton est considéré comme plastique, un béton qui a un affaissement compris entre (6 à 9 cm).

L'affaissement est mesuré pour les sept mélanges de béton préparés, les résultats sont illustrés sur les **figures (5.1) et (5.2)**.

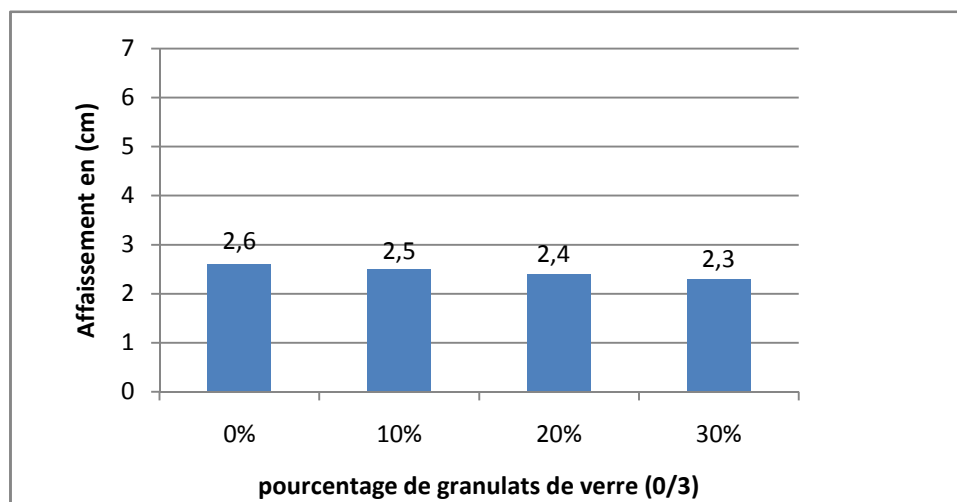


Figure V.2: L'affaissement en fonction de la teneur en granulats de verre (0/3).

D'après ces résultats on constate que notre béton est un béton ferme sachons que on a visé un béton plastique (voire l'annexe 1, Tableau 1,2 [ES> 80]).

On remarque que l'affaissement du béton avec les granulats de verre (0/3) est presque le même avec l'affaissement du béton témoin.

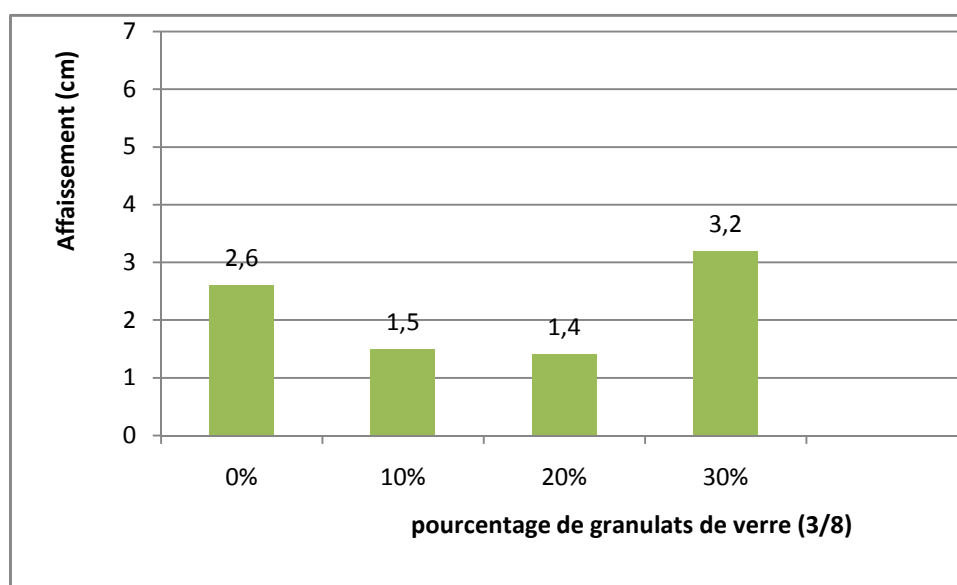


Figure V.3: L'affaissement en fonction de la teneur en granulats de verre (3/8).

Malgré que le verre est imperméable on remarque que le béton avec granulats de verre (3/8) pour (10% et 20%) à un affaissement plus faible par rapport au béton témoin.

On remarque que le béton avec granulas de verre (3/8) pour (30%) à un excès d'eau ce qui explique la valeur de l'affaissement qui est plus grande par rapport au béton témoin.

tous les bétons confectionné avec granulats de verre (0/3 et 3/8) sont plus maniable que le béton témoin cela est due à la nature du verre qui est imperméable.

V.2.2 La masse volumique

Le calcul de la masse volumique du béton permet la classification des bétons en bétons lourds et en bétons légers. Sur la figure (5.4) est présentée les masses volumiques des différents bétons préparés en fonction des ajouts en granulats de verre.

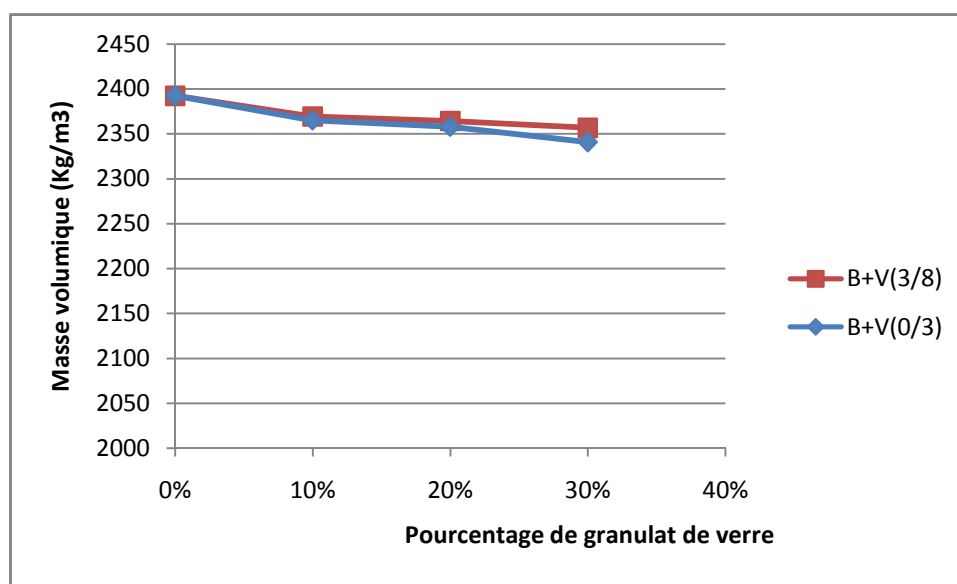


Figure V.4: Variation de la masse volumique.

L'augmentation de la teneur en granulats de verre dans le béton, influe sur la masse volumique. On note une réduction de la masse volumique.

Le **tableau (V.1)** résume les différents pourcentages de diminution de masse volumique des bétons avec les granulats de verre.

Granulat	Masse volumique Absolu	Masse pour 1m ³ de béton (kg/m ³)	Pourcentages de granulat de verre	Diminution de la masse volumique par rapport au béton ordinaire(%)
sable	2,6	657,6	10% = 65,76 (kg/m ³) 20% = 131,52 (kg/m ³) 30% = 197,28 (kg/m ³)	⇒1,143 ⇒1,435 ⇒2,16
gravier	2,6	183,18	10% = 18,318 (kg/m ³) 20% = 36,62 (kg/m ³) 30% = 54,938 (kg/m ³)	⇒0,956 ⇒1,17 ⇒1,49
verre	2,5	/	/	/

Tableau V.1: Diminution de la masse volumique (en pourcentage) à faire et à mesure de variation de pourcentage de verre des différents diamètres.

La diminution de la masse volumique de béton avec le verre de diamètre (0/3) est plus importante par rapport aux bétons avec le verre de diamètre (3/8) pour les mêmes pourcentages. A cause des différences en termes de quantité.

La réduction de la masse volumique d'un béton qui contient 30% de granulat de verre est de l'ordre de :

2,16 % ⇒ Béton en granulat de verre (0/3)

1,49% ⇒ Béton en granulat de verre (3/8)

Cette diminution est liée à la masse volumique absolue du verre (2,5 g/cm³) qui est inférieure à celle du sable et de gravier (2,6 g/cm³).

V.3 ESSAIS À L'ÉTAT DURCI

V.3.1 Essai de compression (NF P 18-406)

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (10x20) cm², en utilisant une presse hydraulique de capacité maximale 2000 kN (voire la figure 5.4). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NP P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa /s.



Figure V.5: Presse hydraulique utilisé pour les essais de compression.

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression uniaxiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette **figure (V.5)**. On note alors la charge maximale atteint F (kN) et la surface de chargement S (m²), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c(\text{MPa}) = F/S$$



Figure V.6: Éprouvettes après écrasement.

L'expérience montre également que lorsqu'on réalise l'essai avec des éprouvettes 11x22 les résultats sont plus élevés qu'avec des éprouvettes (16x32). L'adaptation nationale à l'EN 206-1 en tient compte de la manière suivant :

Soit R le résultat brut d'un essai exprimé en MPa.

L'expression de la résistance est donnée par :

-Éprouvettes 16x32 : $f_{c,cyl} = R$.

-Éprouvettes 11x22 : $f_{c,cyl} = 0,98R$ si $R > 50\text{MPa}$.

-Éprouvettes 11x22 : $f_{c,cyl} = R-1$ si $R < 50\text{MPa}$.

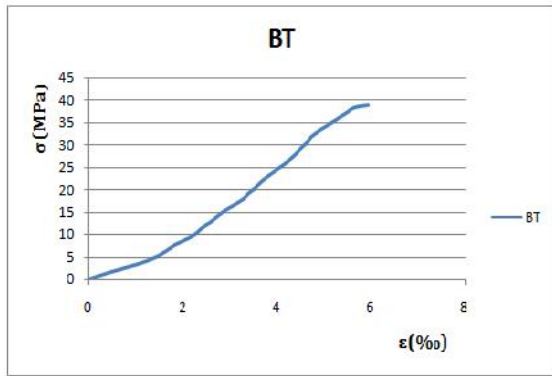
Puisque on a travaillé avec des éprouvettes 10x20 (11x22) et les résistances de notre essais sont inférieures à 50MPa donc $f_{c,cyl} = R-1$ [R. Dupain et Saint-Arroman (2009)]

Les résistances obtenues à l'âge de 28 jours sont représentés dans le **tableau (V.2)**.

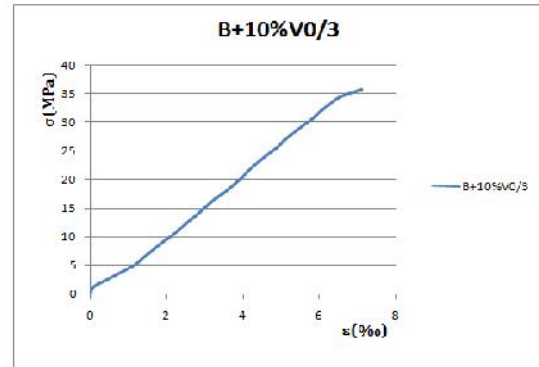
Béton	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	R-1 (MPa)
0%	39,72	38,72
10% V (0/3)	36,66	35,66
20% V (0/3)	31,31	30, 31
30% V (0/3)	30,715	29,715
10% V (3/8)	37,71	36,71
20% V (3/8)	37,21	36,21
30% V (3/8)	36,86	35,86

Tableau V.2: Résistants d'essai de compression sur les bétons étudiés

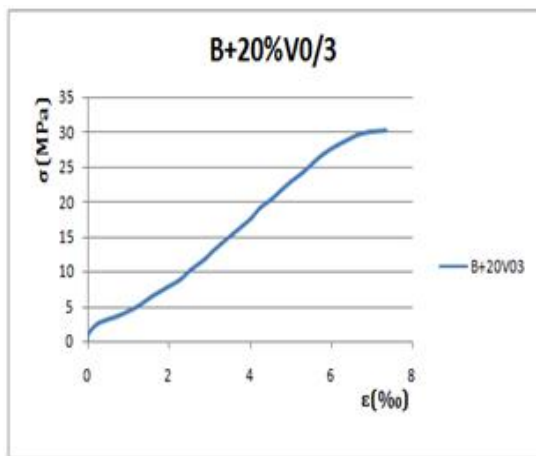
Les résultats des essais de laboratoire sont représentés sous forme de courbes contraintes-déformations donnés en figures (V.6) et (V.7).



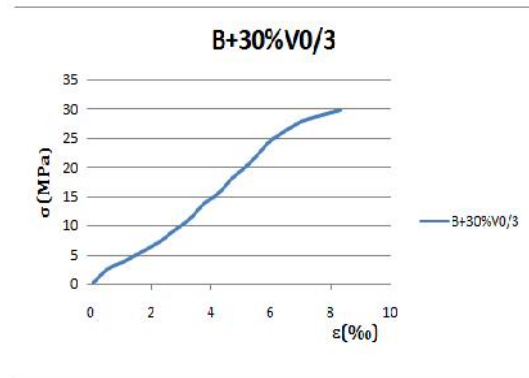
Béton témoin (ordinaire)



Béton avec 10% de granulat de verre (0/ 3)



Béton avec 20% de granulat de verre (0/ 3)



Béton avec 30% de granulat de verre (0/3)

Figure V.7: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec granulats du verre (0/3)

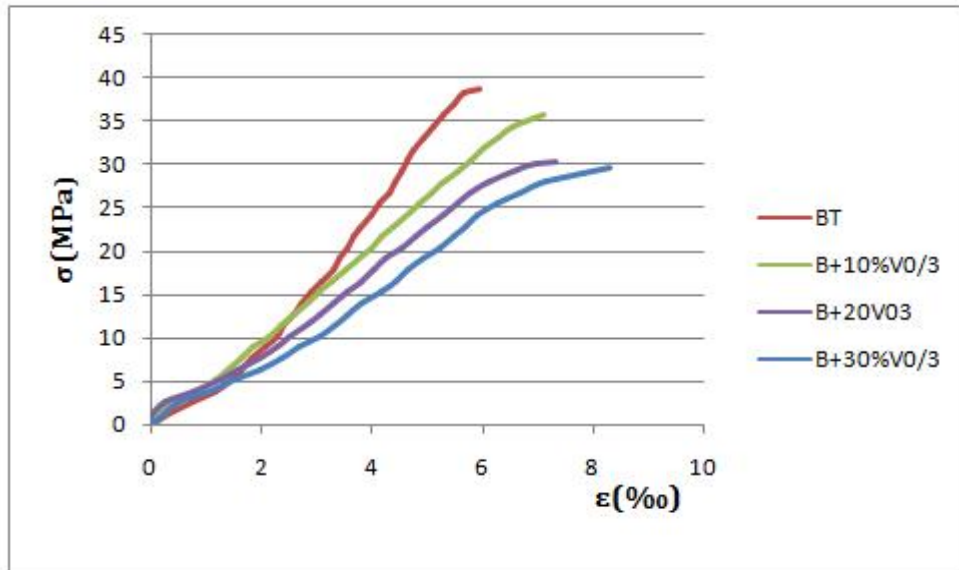
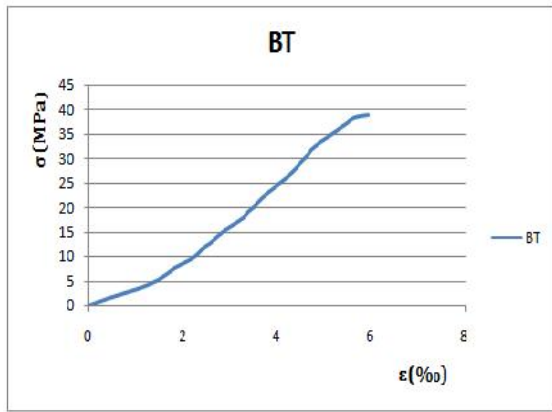
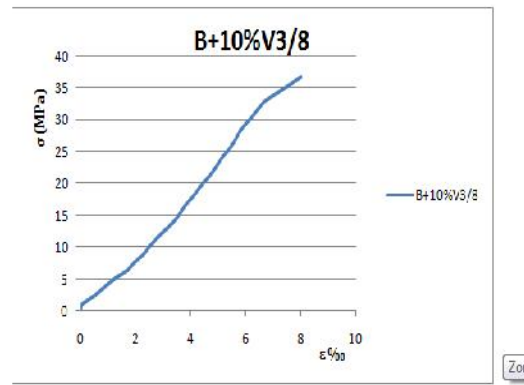


Figure V.8: Superposition des courbes contrainte-déformation en compression.

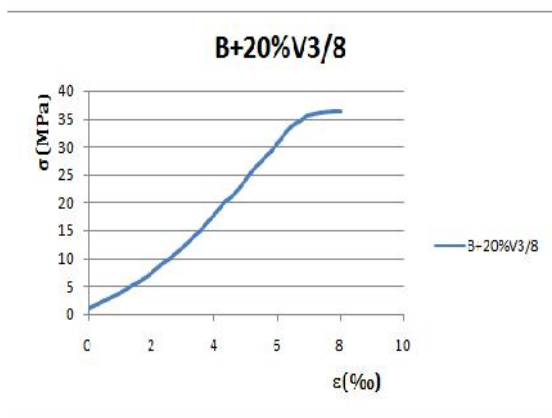
- On remarque une diminution de pente des courbes des bétons avec granulats de verre (0/3) par rapport au béton témoin. Quand le pourcentage de granulats de verre (0/3) augmente, la rigidité diminue.
- Une chute de résistance est observée pour les bétons avec les différents pourcentages de granulats de verre (0/3) par rapport au béton témoin (ordinaire).
- La déformation est plus importante pour les bétons avec les granulats de verre (0/3).



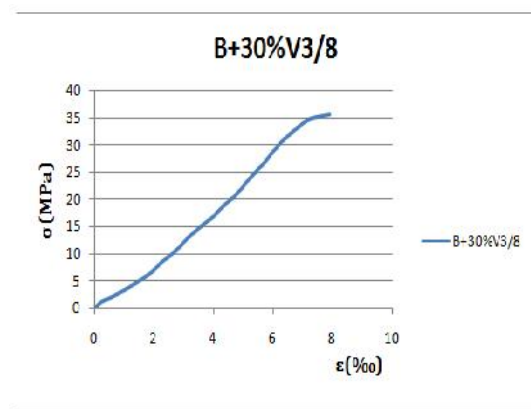
Béton témoin (ordinaire)



Béton avec 10% de granulat de verre (3/ 8)



Béton avec 20% de granulat de verre (3/ 8)



Béton avec 30% de granulat de verre (3/ 8)

Figure V.9: Courbes contrainte-déformation en compression des bétons avec granulats du verre (3/8).

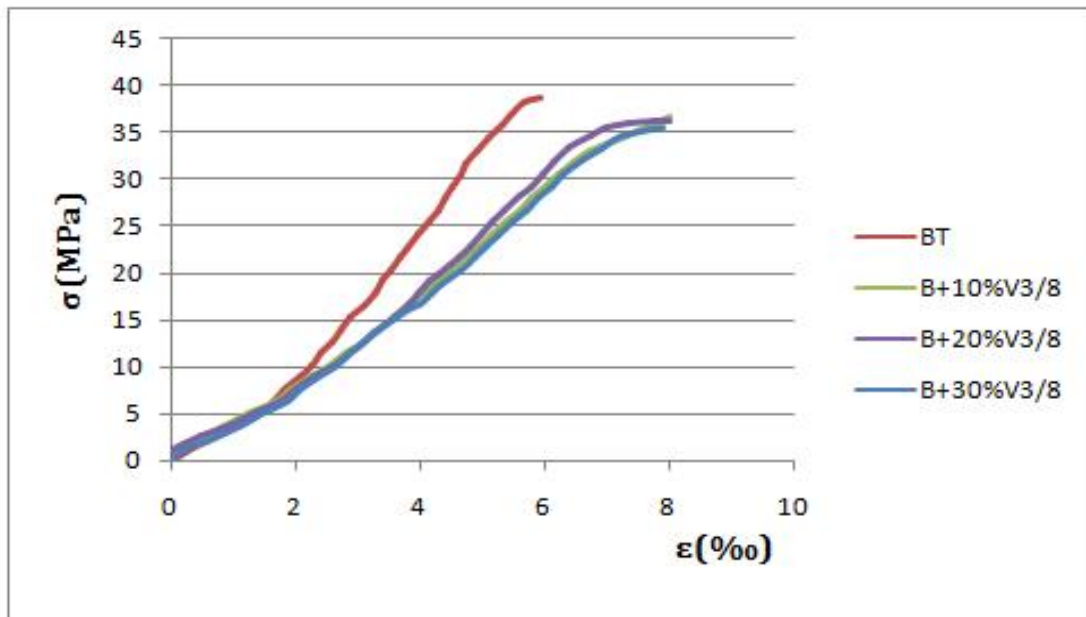
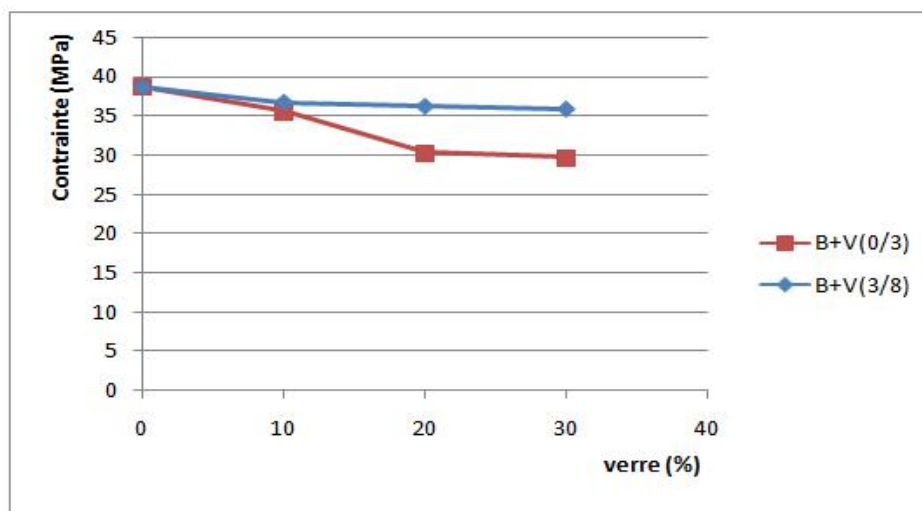


Figure V.10: Superpositions des courbe contrainte-déformation de granulat de verre (3/8)

- On remarque une diminution de pente des courbes des bétons avec granulats de verre (0/3) par rapport au béton témoin. Quand le pourcentage de granulat de verre (3/8) augmente, la rigidité diminue.
- Une légère chute de résistance est observée pour les bétons avec les différents pourcentages de granulats de verre (3/8) par rapport au béton témoin (ordinaire).
- La déformation est plus importante pour les bétons avec les granulats de verre (3/8).
- les bétons avec les granulats de verre (3/8) ont presque la même pente, résistance et déformation.



88

Figure V.11: Variation de la résistance en fonction de la teneur en granulats de verres.

-Le pourcentage de granulats de verre influe sur la résistance à la compression du béton, une légère chute de résistance est notée lorsque on a utilisé des granulats de verre types (3/8), cela est dû à la faible quantité utilisée initialement dans la composition du béton pour ce dernier.

-Les résistances donnée par les bétons avec granulats de verre (0/3) sont faibles par rapport au béton témoin, et celle donnée par les bétons avec granulats de verre (3/8).

- En terme de quantité utilisé (pourcentage), pour le granulats de type (3/8), il n'y a pas d'influence sur la résistance, par contre pour le type (0/3), la quantité ajoutée influe sur la résistance du béton. En augmentant cette dernière la résistance diminue. Pour plus de détail voir le **tableau (V.3)**.

Pourcentage de verre (%)	Diminution de résistance (MPa)	Diminution de résistance (%)
0%	0	0
10% de sable de verre	3,06	7,91
20% de sable de verre	8,414	21,7
30% de sable de verre	9,005	23,26
10% de granulats de verre (3/8)	1,97	5,1
20% de granulats de verre (3/8)	2,51	6,49
30% de granulats de verre (3/8)	2,86	7,4

Tableau V.3: variation de la résistance en fonction de la teneur en granulats de verre.

La diminution de la résistance de béton avec le verre de diamètre (0/3) est plus importante par rapport aux bétons avec le verre de diamètre (3/8) pour les mêmes pourcentages. A cause de différence en termes de quantité.

Cette diminution de résistance est due :

- à la réaction chimique de la silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment ce qui donne naissance à des produits gonflants entraînant l'endommagement des bétons.
- à la masse volumique du verre qui est inférieure à celle du gravier (0/3 et 3/8).

V.3.2 Essai de flexion trois points

L'essai de flexion consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par la flexion trois points. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (**Figure V.11**). On note alors la charge maximale atteinte F (KN) et la flèche sous chargement (déplacement) d (mm). Les essais de flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

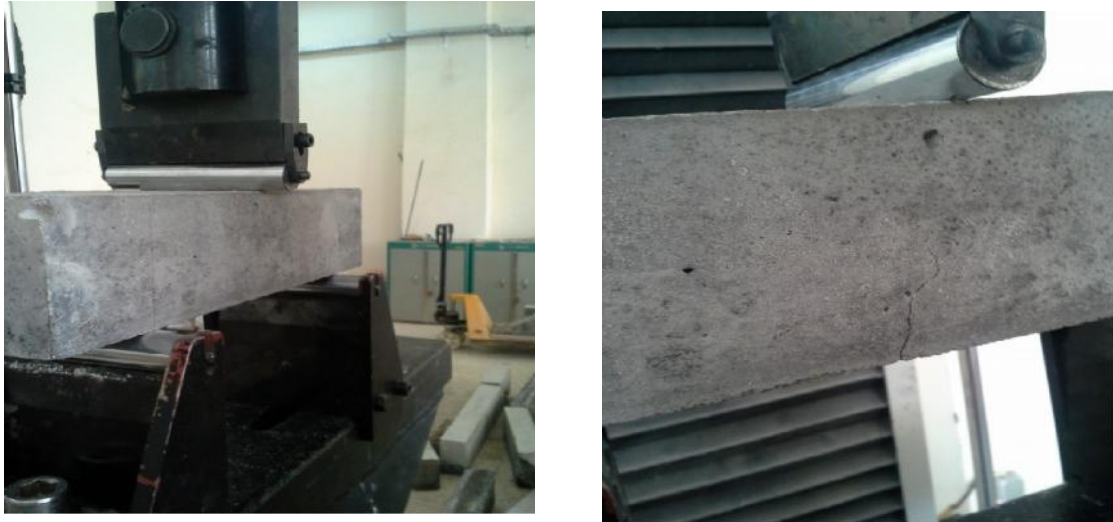


Figure V.12: Presse IBER teste utilisée pour les essais de flexion



Figure V.13: Éprouvettes avant et après écrasement.

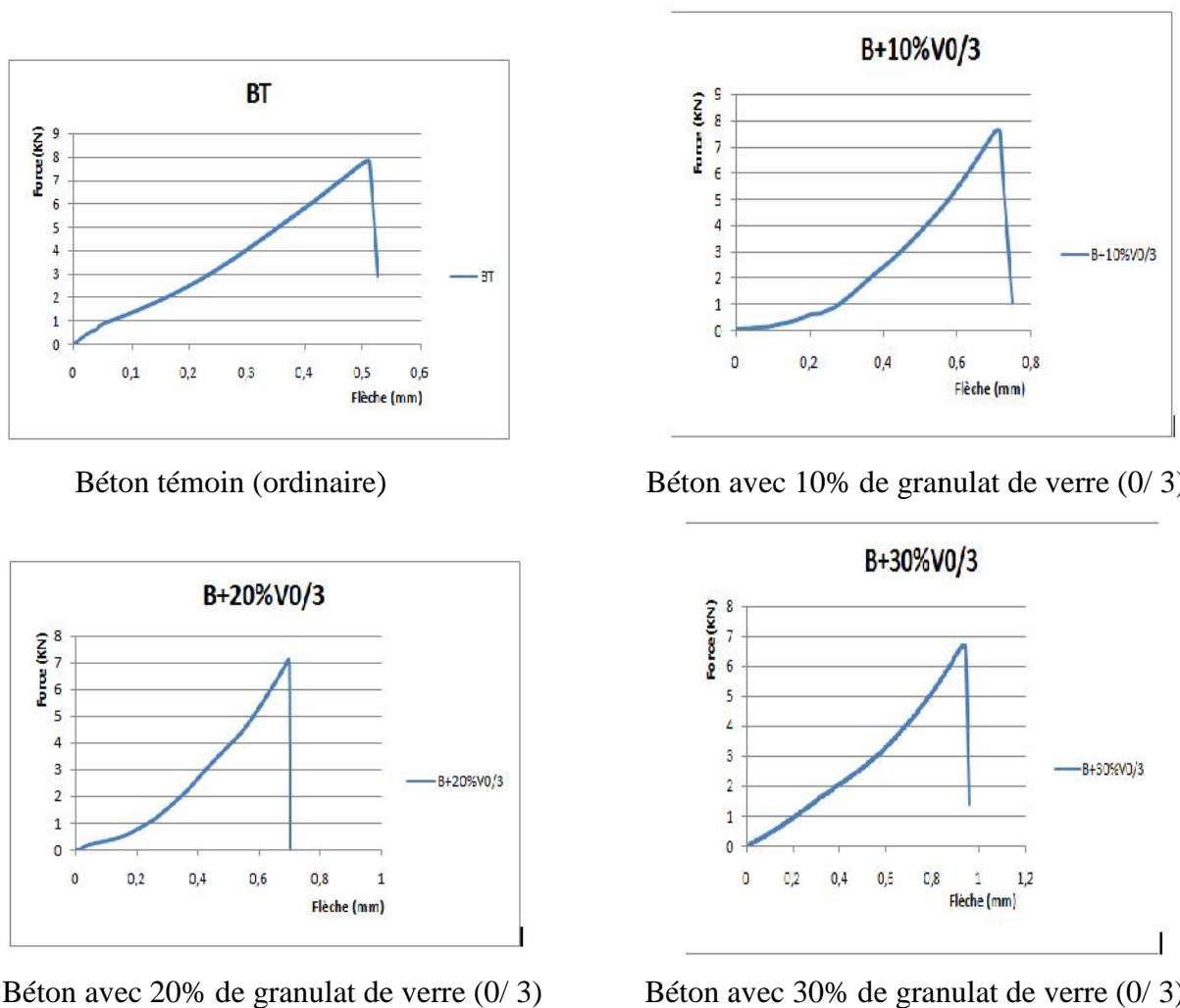


Figure V.14: Courbes force - flèche des bétons avec granulats de verre (0/3).

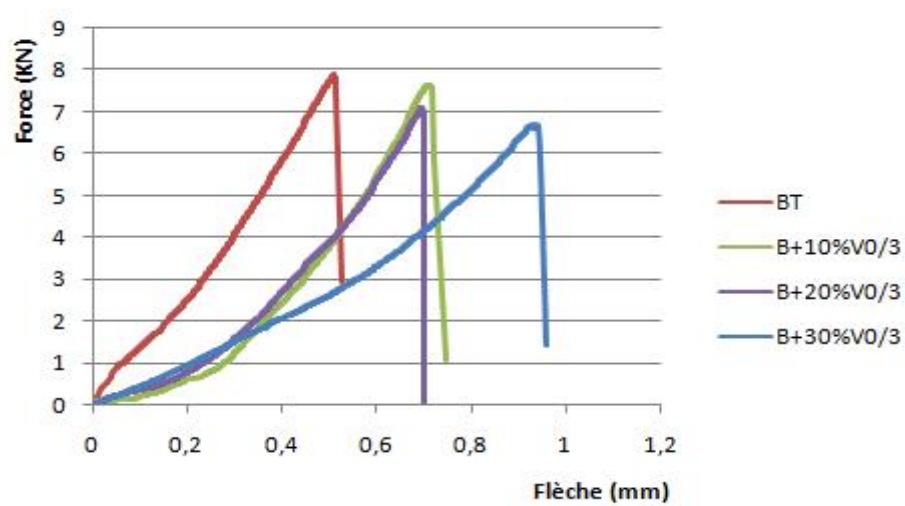


Figure V.15: Superposition des courbes force-flèche en flexion des bétons de granulats de verre (0/3).

-Les courbes illustrées sur cette figure montrent une différence en termes de rigidité (pente), le béton témoin (ordinaire) présente une rigidité en flexion plus élevée par rapport aux bétons avec granulats de verre. L'augmentation du pourcentage de ce dernier réduit la rigidité.

-Une légère diminution des résistances ultimes est observée en flexion, par contre une meilleure déformabilité est notée en augmentant le pourcentage de ces granulats. Cette dernière est contrôlée avec le déplacement à la rupture obtenue.

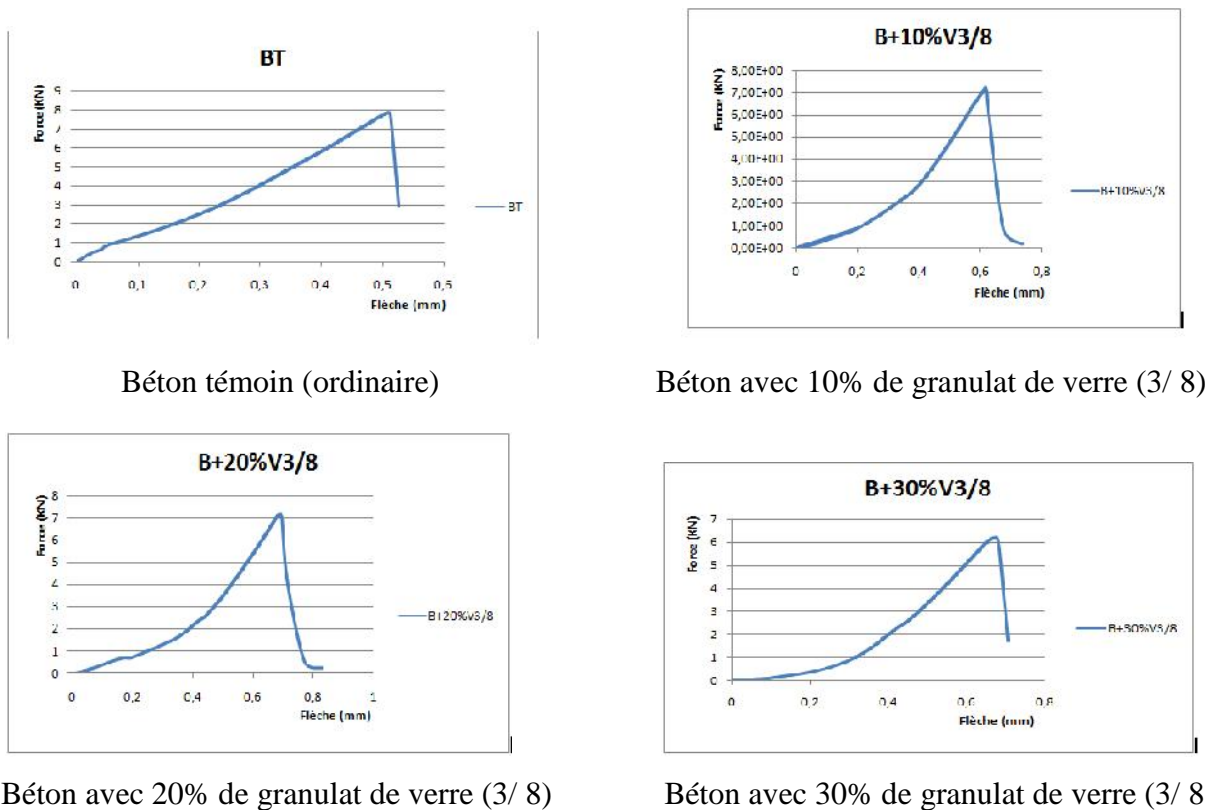


Figure V.16: force - flèche des déférant béton avec les granulats du verre (3/8).

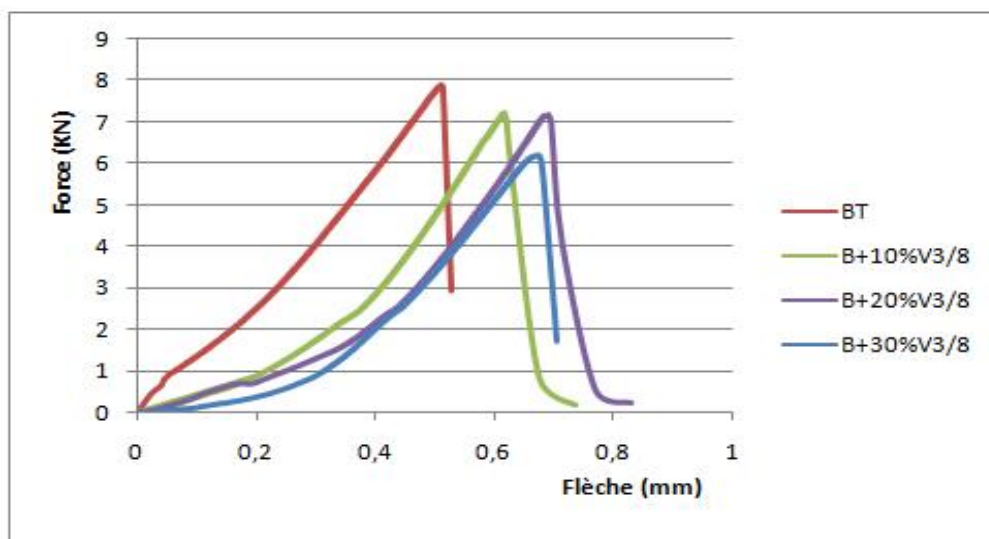


Figure V.17: Superpositions des courbes force-flèche de granulat de verre (3/8).

-Les courbes illustrées sur cette figure montrent une différence en termes de rigidité (pente), le béton témoin présente une rigidité en flexion plus élevée par rapport aux bétons avec granulats de verre (3/8). L'augmentation du pourcentage de ce dernier réduit la rigidité.

-Une légère diminution des résistances ultimes est observée en flexion, par contre une meilleure déformabilité est notée en augmentant le pourcentage de ces granulats. Cette dernière est contrôlée avec le déplacement à la rupture obtenue.

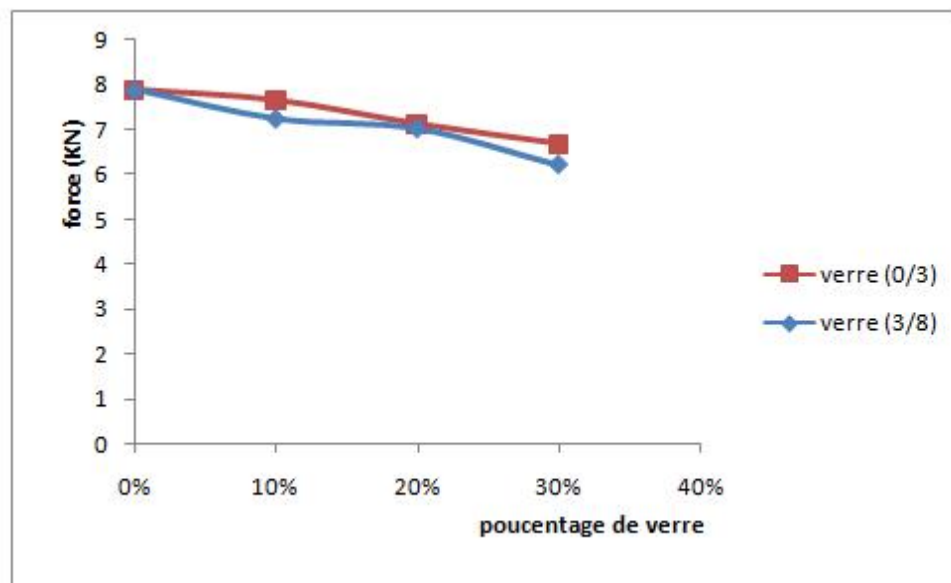


Figure V.18: Courbes force-pourcentage du béton avec granulats du verre.

On remarque une diminution de la force maximale supportée.

Les charges maximales supportées par le béton des différents pourcentages avec les granulats de verre (0/3) sont un peu élevées par rapport à celles des bétons avec les granulats de verre (3/8).

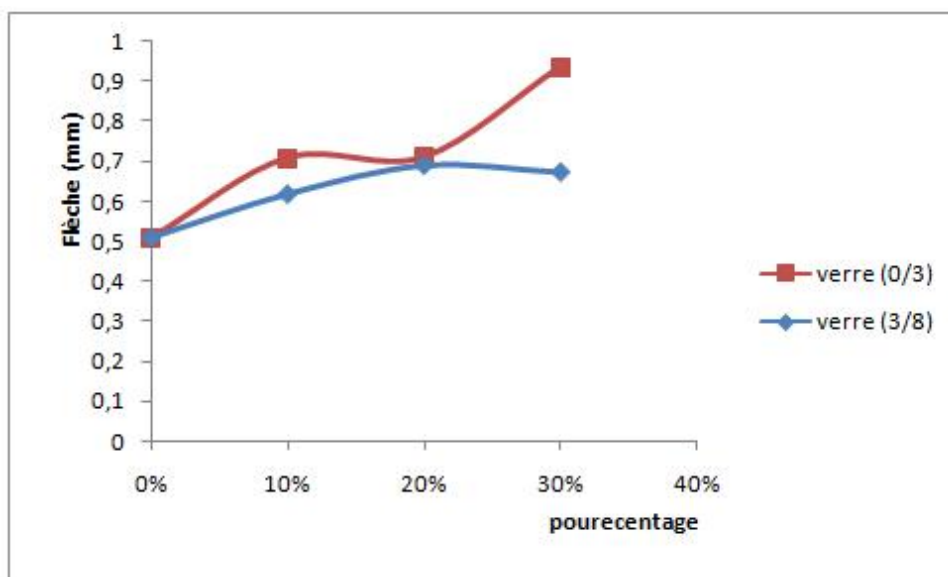


Figure V.19: courbe flèche -pourcentage de granulats de verre (0/3 et 3/8).

On remarque une amélioration de la flèche. La flèche à la rupture de béton avec les différents pourcentages de granulats de verre (0/3) est supérieure à celle des bétons avec les granulats de verre (3/8). On remarque que le béton avec 20% de granulats de verre (0/3) et (3/8) a le même comportement en termes de charge et en termes de flèche. Les détails sont donnés dans le tableau (5.4).

Béton	Force à la rupture (KN)	Pourcentage de diminution de force à la rupture (%)	flèche à la rupture (mm)	Pourcentage d'amélioration de la flèche à la rupture (%)
BT	7,69591	/	0,495776	/
B+10% V0/3	7,5913	1,359	0,7193	45,087
B+20% V0/3	7,07885	8,018	0,6959	40,3658
B+30% V0/3	6,66	13,461	0,9359	88,777
B+10% V3/8	7,09798	7,769	0,6042379	21,882
B+20% V3/8	6,93	9,952	0,683	37,765
B+30% V3/8	6,2924	18,237	0,6605	33,227

Tableau V.4: variation des différents paramètres en fonction de diamètre de verre et de la teneur en verre.

Conclusion

L'ajout des granulats de verre (0/3 et 3/8) diminue légèrement les propriétés du béton en termes de résistance et de rigidité. Cette diminution est attribuée à la masse volumique absolue du verre qui est de $2,5 \text{ g/cm}^3$. Cette dernière est inférieure à celle du sable et du gravier ($2,6 \text{ g/cm}^3$). Aussi cette diminution peut être due à l'effet chimique des granulats de verre qui déclenche une réaction alcali silice, ce qui provoque un gonflement au béton (des fissurations et endommagement) donc rend la structure fragile.

Par les résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- Avec les matériaux utilisés, la formulation du béton ordinaire (témoin) présente une très bonne résistance mécanique à la compression ($\approx 38\text{MPa}$) à 28 jours.

L'introduction des granulats de verre (0/3 et 3/8) a permis de :

- formuler des bétons plus légers que le béton ordinaire.
- la résistance en compression et en flexion est considérablement diminuée pour tous les pourcentages et pour tous les diamètres de granulats de verre, dues essentiellement à sa masse volumique faible et à la réaction d'alcali silice ;
- une amélioration de la flèche à la rupture en augmentant le pourcentage des granulats de verre (0/3 et 3/8).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail est de recycler le verre dans les bétons en substituant partiellement le sable (0/3) et le gravier (3/8) par les granulats de verre (0/3) et (3/8). Dans ce contexte, plusieurs formulations des bétons avec les granulats de verre (0/3 et 3/8) et béton témoin ont été mises au point, à partir de matériaux identiques pour évoluer dans la même plage de résistance mécanique.

Notre but était donc d'éclaircir trois questions majeures. Le premier point était la conception d'un béton. S'en est suivi l'évaluation de l'influence de l'ajout (granulat de verre (0/3 et 3/8).

Sur le comportement des bétons ordinaires à l'état frais. Enfin, les performances mécaniques des bétons avec granulats de verre, ont été comparées en termes de résistance mécanique et déformabilité par rapport à un béton ordinaire.

Les résultats obtenus ont montré que :

- la masse volumique des bétons avec granulats de verre, est légèrement réduite par rapport à celle du béton de référence, suite à la faible masse volumique absolue du verre.
- une addition de 10%, 20%, 30%, de granulat de verre (0/3 et 3/8) diminue la résistance mécanique à la compression et à la flexion, Cette diminution est estimée respectivement à (7,91%, 21,7%, 23, 26%) pour le béton avec granulat de verre (0/3) et (5,1%, 6,49%, 7,4%) pour le béton avec granulat de verre (3/8) **à la compression**
- une amélioration considérable en terme de déformabilité des béton avec granulats de verre (0/3 et 3/8) par rapport au béton de référence [pour les pourcentages (10%, 20%, 30%)] de verre ajouté on a obtenu une amélioration de (45,087%, 40,3658%, 88,77%) pour le béton avec granulat de verre (0/3) et (21,882%, 37,765%, 33,227%) pour le béton avec granulat de verre (3/8) **à la flexion**

Néanmoins, notre analyse s'est limitée à une variation du paramètre « granulats de verre »

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

- l'utilisation de granulats de verre en plusieurs couleurs de verre.
- l'utilisation de plusieurs dimensions de verre
- l'utilisation de verre en association avec un autre déchet qui répond au profil d'un ajout cimentaire.
- l'utilisation d'un ciment à très basses teneurs en alcalins en recommandant de limiter la quantité d'alcalins dans la composition des bétons à 3 Kg/m³.
- L'utilisation des inhibiteurs chimiques comme les sels lithium dans le but d'arrêter la réaction de dissolution de silice.

Annexes

Annexe 1

1. Analyse granulométrique (EN 933-et EN 933-2)

1.1 But de l'essai

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant l'échantillon.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la **granulométrie** qui s'intéresse à la détermination dimensionnelle des grains d'un granulat.

1.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis l'échantillon en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison 1.259 (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2[DREUX, G (1981)].

1.3 Préparation de l'échantillon

Il faut que l'échantillon analysé soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop importante pour éviter de saturer les tamis et de les faire déborder. Pour éviter ces inconvénients, la masse de l'échantillon M doit être dans la page :

$$0.2D < M < 0.6D$$

Où D représente la dimension du plus gros granulat en mm et M la masse de l'échantillon en kg.

1.4 conduit de l'essai

La vibration fait descendre les grains à travers des tamis jusqu'à ce qu'ils soient bloqués par le tamis de maille correspondante au diamètre du grain. Mais la vibration n'est pas suffisante pour faire descendre les fines. En effet, ces grains sont si fins qu'ils se collent aux grains d'un diamètre plus gros. Elles restent donc bloquées dans des tamis qui ne correspondent pas à leurs diamètres. Sous le seul effet de la vibration, l'analyse est donc faussée. Pour y remédier, la norme indique de laver l'échantillon dans le plus petit tamis nécessaire à l'analyse et donc d'entraîner les fines avec l'eau.

1.5 Le mode opératoire est le suivant :

- Préparation de l'échantillon
- Lavage de l'échantillon sur le plus petit tamis choisi (élimination des fines)
- Séchage étuve à 105°C
- Tamisage sur les tamis choisis (Pour des raisons de manque de certains tamis dans le laboratoire, la série de tamis a été adaptée de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme)
- Détermination des poids cumulés
- Détermination des pourcentages de refus cumulés

REFUS : granulats retenus par le tamis

- Détermination des pourcentages de tamisât cumulés

TAMISAT : granulats passant à traves le tamis

- Tracé de la courbe granulométrique.

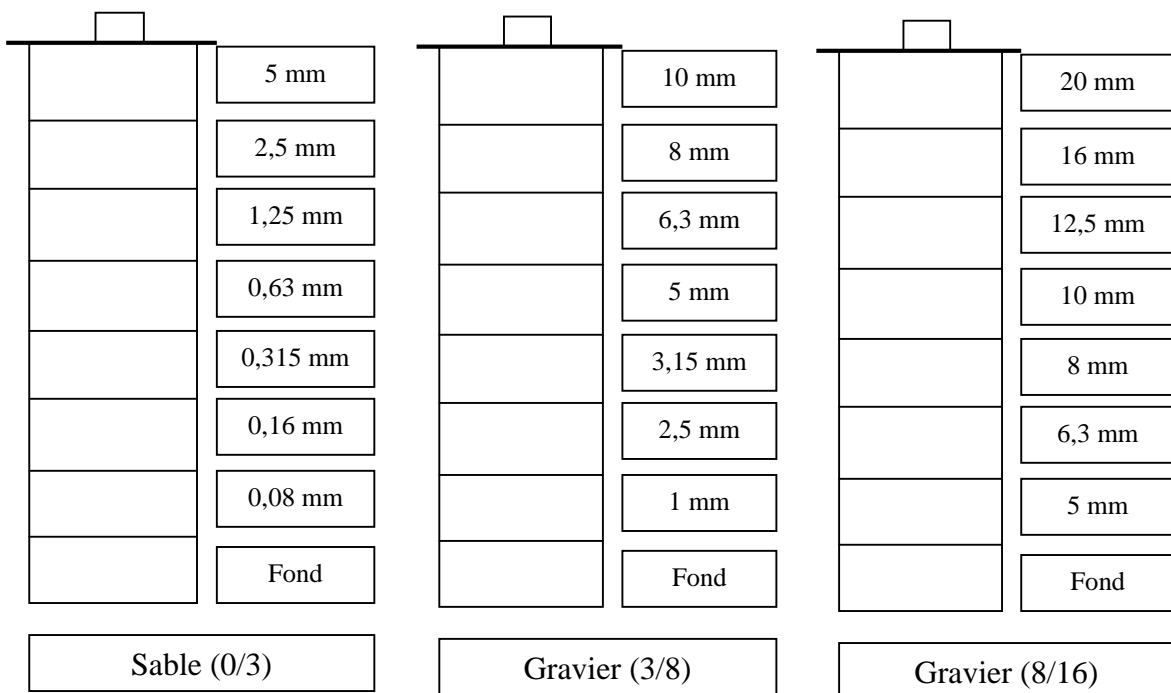


Figure 1.1: colonnes de tamis.

2. Essai d'Equivalent de sable

2.1 Le but de l'essai

Le but de cet essai est de déterminer la nature et la qualité du sable.

2.2 Appareillage

- Une éprouvette cylindrique de 43 cm de hauteur, avec deux traits repère normalisés l'un à 10 cm et l'autre à 38 cm de fond.
- Un bouchon à liège.
- Un piston taré.
- Un récipient de pesé en alliage léger.
- Une balance.
- Un chronomètre.
- Une règle graduée.
- Un échantillonneur (D 5mm).
- Une machine d'agitation.
- Un entonnoir.
- Un échantillon de sol.

2.3 Mode opératoire

- Peser un échantillon de sable sec, 120g.
- Verser dans une éprouvette de l'eau jusqu'au repère 1.
- Verser dans cette éprouvette de l'échantillon de sable.
- Agiter le tout durant 90 cycles en 30 secondes (utiliser l'agitateur manuel)
- Compléter par de l'eau l'éprouvette jusqu'au repère 2
- Laisser reposer pendant 20 min (placer l'éprouvette verticalement)
- Mesure de h'_1 et h'_2 .
- La mesure de h'_2 n'est pas toujours aisée. ESV qui en résulte, est donc entaché d'incertitude. Ce qui conduit à faire la mesure plus précise suivant.
- Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser au contact du sable. Mesurer h_2

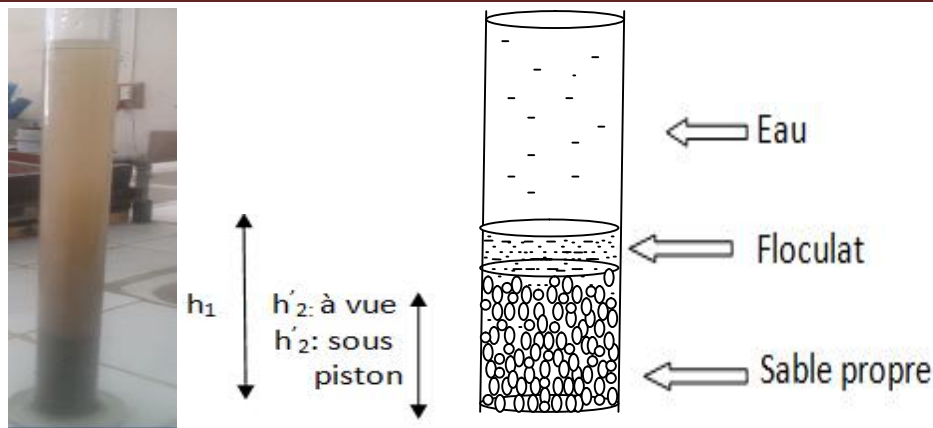


Figure 1.2 : Dispositif expérimental

L'équivalent de sable est :

$$ESV = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

ESV=94 ,175

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

ES=88,35

Donc notre sable est très propre. (Voire tableaux 1.2)

ES à vus	ES piston	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux :risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65≤ES<75	60≤ES<70	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES<85	70≤ES<80	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75 ; ES à vue = 80).
ES≥85	ES≥80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il foudre rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 1.2 : Classification de sable selon leur équivalent de sable [cours TMC]

Le C.P.C (**fascicule 65 A**) du Ministère de l'Équipement préconise les valeurs suivantes :

Qualité du béton	ES à vue minimum
Béton courant	70
Béton courant de résistance relativement élevés, béton de qualité	75
Béton de qualité à haute résistance, bétons exceptionnel	80

[Cour de TMC]

Annexe 2

1. Analyse granulométrique

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

Matériau : sable 0/3

Nature

Sable roulée 0/3

Provenance

Rivière de Tizi-Ouzou

Caractérisation faite selon EN 933-1

Analyse granulométrique

Procédé utilisé : lavage par tamisage

Masse sèche après lavage : M=1500 g

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
5	0	0	0	100
2,5	9	0.6	0.6	99,4
1,25	350	23.33	23.93	76,06
0,63	440.5	29.36	53.3	46,7
0,315	410	27.33	80.63	19,366
0,16	221	14.73	95.36	4,63
Fond du tamis	68	4.53	99.9	0,1

Matériau : Gravier 3/8

Nature

Gravier concassé 3/8

Provenance

Carrière de Tizi-Ouzou

Caractérisation faite selon EN 933-1

Analyse granulométrique

Procédé utilisé : lavage par tamisage

Masse sèche après lavage : M=2000 g

Dimension des Tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [%]	Refus Cumulés [%]	Tamisât [%]
10	0	0	0	0	100
8	15	0.75	15	0,75	99,25
6,3	205,5	10.275	220,5	11,025	88,97
5	1029,5	51.475	1250	62,5	37,5
3,15	706,5	35.325	1956,5	97,825	2,17
2,5	34	1.7	1990,5	99,52	0,47
1	6	0.3	1996,5	99,82	0,175
fond du tamis	3,5	0.175	2000	100	0

Matériau : Gravier 8/16

Nature

Gravier concassé 8/16

Provenance

Carrière de Tizi-Ouzou

Caractérisation faite selon EN 933-1

Analyse granulométrique

Procédé utilisé : lavage par tamisage

Masse sèche après lavage : M=2500 g

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus %	Refus cumulés	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
16	43	1.72	43	1,72	98,28
12,5	1269,5	50.78	1312,5	52,5	47,5
10	815,5	32.62	2128	85,12	14,88
8	318	12.72	2446	97,84	2,16
6,3	41	1.64	2487	99,48	0,52
5	7,5	0.3	2494,5	99,78	0,22
fond de tamis	5,5	0.22	2500	100	0

Matériau : Verre de diamètres 0/3

Nature

Verre concassé 0/3

Provenance

Déchets de verre

Analyse granulométrique

Masse sèche : M=1000 g

Dimension des Tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât [%]
5	0.4	0.04	0.4	0.04	99,96
2	324.8	32.48	325.2	32.52	67,48
1,25	279.3	27.93	604.5	60.45	39,55
0,63	167.2	16.72	771.7	77.17	22,83
0,315	124.7	12.47	896.4	89.64	10,36
0,16	46.2	4.62	942.6	94.26	5,74
Fond de tamis	57.5	5.75	1000	100	0

Matériau : Verre de diamètres 3/8

Nature

Verre concassé 3/8

Provenance

Déchets de verre

Analyse granulométrique

Masse sèche : M=1000 g

Dimension des tamis [mm]	Refus [g]	Refus [%]	Refus cumulés [g]	Tamisât [%]
10	0	0	0	99,78
8	3,5	3,5	0,35	99,43
6,3	138,1	141,6	14,16	85,62
5	229,2	370,8	37,08	62,7
3,15	556,4	927,2	92,72	7,06
2	69,7	996,9	99,69	0,09
1	0,3	997,2	99,72	0,06
Fond de tamis	0,6	997,8	99,78	0

Annexe 3

4.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams

4.1.1 Le but de l'essai

Le but de cet essai est de caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

4.1.2 Matériel nécessaire

- Plateau équipé d'une plaque métallique plan de forme carrée au moins 90 cm de coté.
- Moule tronconique en tôle de 20cm de diamètre à la base, de 10cm de diamètre en partie haute, de 30 cm de hauteur (Cône d'Abrams). Il dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- Tige de piquetage de 16 mm de diamètre.
- Mètre.

4.1.3 Mode opératoire

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal ;
- Humidifier la surface de la plaque ;
- Placer le cône au centre du plateau ;
- Prélever un échantillon représentatif du béton ;
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;
- Remplir le cône en déversant le béton en trois couches piquées avec la tige à raison de 25 coups par couche.
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide ;
- Soulever le cône verticalement sans secousses à l'aide des deux poignées et mesurer l'affaissement.

Consistance du béton	Affaissement (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

Tableau 4.1: Consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams [DREUX 1981].



Figure 3.1 : Dispositif expérimental