

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

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**

*Faculté de Génie de la construction*

*Département de Génie Civil*

## ***Mémoire de Magister***

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : modélisation et calcul non linéaire*

Présenté par :

***M<sup>elle</sup> NECHAF SAMIA (épouse : OUACHEM)***

### ***THEME***

***Influence de l'ajout de la poudre de verre sur les  
bétons ordinaires soumis à un chargement  
extérieur***

Devant le jury d'examen composé de :

DAHMANI Lahlou	<b>Professeur</b>	UMMTO	Président
MEHADDENE Rachid	<b>Professeur</b>	UMMTO	Rapporteur
KADRI Mohammed	<b>Professeur</b>	UMBB	Examineur
DERRADJ Mohamed	<b>Maitre de conférences A</b>	UMMTO	Examineur

Soutenu le : 13 /06 /2015

## **Remerciements**

*Je tiens d'abord à exprimer toute mon estime et ma reconnaissance envers Monsieur R. MEHADDENE, mon promoteur. Je le remercie pour son aide précieuse, sa grande disponibilité et sa gentillesse qui m'ont permis d'élaborer ce travail.*

*Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du Laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures, Université Mouloud MAMMERI, en Génie Civil de TIZI OUZOU, en particulier à Monsieur BOUHERRAOUA Rachid et KABRI Lyes, pour leur aide précieuse dans la réalisation de la partie expérimentale et leur encouragement.*

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

*Un grand merci aussi à mes chers amis et collègues de promotion, Fareh ; Tassadite ; Lylia ; Soria ; Sara et Jugurtha.*

## *Dédicaces*

*A celui qui s'est toujours dévoué et sacrifié pour moi ; celui qui m'a encouragé et soutenu à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi ; en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement cette thèse à **mon mari**.*

*A la mémoire de ma très chère **mère**.*

*A mon **père**.*

*A **mes très chères sœurs** Nora, Kahina , Katia et leurs enfants **Ahmed, Lyna Yousra ,Salim**, ainsi qu'à leurs maris.*

*A celle qui a su m'encourager et surtout être patiente avec moi ; **ma sœur Chaféa**; à qui je témoigne tendrement toute ma gratitude.*

***Mon très cher frère** Yacine à qui je souhaite un bon rétablissement.*

*A mon **oncle** et son **épouse** ainsi que leurs enfants **Anes et Akram**.*

*A ma **belle famille**, particulièrement à **ma belle-sœur célia**, qui m'a toujours soutenue.*

*A tous ceux que j'aime et qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce modeste travail...*

## **Résumé**

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en substitution partielle ou totale du ciment à travers le monde. Quelque soit leur provenance de sources naturelles (pouzzolane, calcaire ...) ou de sous produits industriels (laitier, cendres volantes...), leur valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques.

L'utilisation de la poudre de verre broyé au remplacement du clinker présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets.

Nous traitons à partir de cette étude l'influence de l'addition de la poudre de verre broyé sur le comportement physique et mécanique du béton ; en variant le pourcentage d'ajout de 10%, 15%, 20%,25% et 30%.

Les résultats obtenus montrent qu'une substitution partielle de 10% à 20% semble être favorable, au-delà de cette limite les propriétés mécaniques sont affectées.

*Mots clés : Ajout – verre – réaction pouzzolanique – béton.*

## **Abstract**

The mineral additions are widely used in partial or total substitution of cement in the world. They come from natural sources ( pozzolan , lime ...) or industrial by - products ( slag, fly ash ...). Their valorization has several advantages: economic, environmental and technological.

The use of crushed glass powder replacement of clinker has a promising way to enhance and recycle waste.

We treat in this study the influence of the addition of crushed glass powder on the physical and mechanical behavior of concrete, by varying the percentage of addition of 10%, 15%, 20%,25% and 30% .

The results show that partial substitution of 10% to 20% seems to be favorable. Beyond that limit the mechanical properties are affected.

*Keywords: Addition- glass - pozzolanic reaction - concrete.*

## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

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

1. Introduction.....	3
2. Définition .....	3
3. Composants d'un béton .....	4
3.1 Le ciment.....	4
3.2 Les granulats (sables, gravillons).....	6
3.3 L'eau .....	7
3.4 Les adjuvants.....	7
4. Les déchets.....	8
5. Composition des bétons.....	9
5.1 Critères en fonction de la destination des bétons .....	10
5.1.1 Dimension maximale D des granulats.....	10
5.1.2 Résistances souhaitées .....	11
5.1.3 Ouvrabilité.....	11
5.1.4 Agressivité du milieu ambiant .....	12
5.2 Formulation des bétons.....	12

### **CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON**

1. Introduction.....	15
2.comportement en compression .....	15
2.1 Compression uniaxiale .....	15
2.2 Quelques modèles de comportement du béton en compression.....	17
3. Comportement en traction .....	24
3.1 Comportement du béton en traction uni axiale.....	25
3.2 La résistance à la traction du béton .....	26

3.3 Les causes de la fissuration .....	26
3.4 Quelques modèles de comportement du béton et du béton armé en traction .....	27

## **CHAPITRE III :LES AJOUTS CIMENTAIRES**

1. Introduction.....	30
2.Rôle des ajouts cimentaires .....	30
3.Classification des ajouts minéraux .....	31
3.1Principaux ajouts minéraux inertes.....	31
• Les fillers calcaires.....	31
3.2Ajouts minéraux actifs.....	31
3.2.1 La pouzzolane .....	31
3.2.2 La fumée de silice.....	32
3.2.3 Le laitier du haut fourneau.....	32
3.2.4 Les cendres volantes.....	32
3.2.2 La poussière .....	33
3.2.2 Le verre .....	33
1. Définition.....	33
2. Composition chimique du verre.....	34
3. Modification de la structure d'un verre.....	34
4. Propriétés du verre.....	36
5. Durabilité d'un verre dans une matrice cimentaire.....	38
6. Facteurs influençant la durabilité chimique d'un verre .....	40
7. Comportement du verre dans un milieu cimentaire.....	42
8. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes .....	44
9. L'utilisation simultanée du verre et de la pouzzolane .....	44

## CHAPITRE IV :ETUDE EXPERIMENTALE

### IV.1 MATERIAUX ET FORMULATION

1.Introduction.....	45
2. Matériaux utilisés.....	45
2.1 Ciment.....	45
2.2 Granulats.....	46
2.3 L'eau de gâchage.....	46
2.4 Ajout minérale.....	47
3. Caractérisation des matériaux.....	48
3.1 Essais sur granulats.....	48
• Echantillonnage (NF P 18-553).....	48
• Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2).....	48
• Masse volumique apparente et absolue.....	49
• Module de finesse du sable (NF P18-304).....	50
• Equivalent de sable (NF P18-598).....	51
3.2 Essais sur le ciment.....	51
• Essai de consistance EN (196-3).....	51
• Temps de prise à 20 °C.....	52
4. Elaboration des bétons.....	52
4.1 Formulation de béton ordinaire.....	52
4.2 Formulation des bétons avec poudre de verre.....	58

## IV.2 ESSAIS SUR BETON

1. Introduction.....	60
2. Confection des bétons .....	61
2.1 Préparation de la gâchée .....	61
2.2 Conservation des éprouvettes .....	62
3. Essais sur bétons .....	63
3.1 Essais à l'état frais.....	63
• Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	63
• Essai de consistance .....	64
• Le délai de prise .....	64
• La masse volumique .....	65
3.2 Essais à l'état durci.....	65
• Essai de compression uniaxiale (NF P 18-406).....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>73</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>75</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>89</b>

## Liste des tableaux

Tableau I.1 Classification des ciments selon leurs résistances .....	6
Tableau I.2 Dimension admissible D pour les plus gros granulats .....	10
Tableau I.3 Enrobage minimal c des armatures .....	11
Tableau I.4 Consistance du béton .....	12
Tableau IV.1 : Composition chimique et caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	46
Tableau IV.2 : Composition chimique de la poudre de verre .....	47
Tableau IV.3 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre .....	47
Tableau IV.4 : Mélanges des bétons préparés.....	48
Tableau IV.5 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	50
Tableau IV.6: module de finesse du sable .....	50
Tableau IV.7: valeur de l'équivalent de sable.....	51
Tableau IV.8 : Le début et la fin de prise.....	52
Tableau IV.9 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G .....	53
Tableau IV.10 : Composition volumique et pondéral du béton témoin .....	58
Tableau IV.11 : Composition des différents bétons avec poudre de verre pour 1 $m^3$ .....	58
Tableau IV.12 : Composition des différents bétons pour 1 $m^3$ .....	59
Tableau IV.13 : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés .....	67

## Liste des figures

Figure I.1 Composition d'un béton.....	3
Figure II.1 : comportement du béton en compression simple Chen 1982.....	16
Figure II.2 : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al 1969.....	17
Figure II.3: Loi Parabole-Rectangle du béton en compression BAEL.....	18
Figure II.4: Diagramme parabole-rectangle du béton en compression EUROCODE .....	20
Figure II.5:Diagramme non linéaire du béton en compression EUROCODE2.....	21
Figure II.6 : Comportement du béton en compression selon Sargin.....	22
Figure II.7: Courbe contrainte-déformation du béton en traction.....	25
Figure II.8 : Comportement local du béton en traction selon MAZARS .....	27
Figure II.9 : Comportement de béton avant fissuration.....	28
Figure II.10 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat .....	29
Figure III.1 : Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice cristalline(cristobalite).....	33
Figure III.2 : Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice vitreuse	33
Figure III.3:Formation du verre par l'élément silicium Si.....	35
Figure III.4: Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificationNa <sub>2</sub> O.....	35
Figure III.5: (a)empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na <sub>2</sub> O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe.....	36

Figure III.6 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (laeching).....	38
Figure III.7 : Mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (etching) .	39
Figure III.8 : Evolution de la masse de SiO <sub>2</sub> dissoute par gramme de verre en fonction du rapport S/V.....	40
Figure III.9 : variation de la quantité de silice (a) et d'oxyde de sodium (b) en fonction du PH d'un verre de composition initiale Na <sub>2</sub> O-3SiO <sub>2</sub> à 35°C .....	41
Figure III.10 : indice d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes .....	43
Figure III.11 : Réaction alcali-silice du verre .....	43
Figure IV.1 : La poudre de verre utilisé.....	47
Figure IV.2 : Courbes granulaires des trois granulats .....	49
Figure IV.3: abaque permettant la détermination du dosage en ciment.....	48
Figure IV.4: Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage .....	56
Figure IV.5 : Foisonnement du mélange de la poudre de verre avec le sable .....	62
Figure IV.6 : Ajout des autres granulats et du ciment au mélange précédent .....	62
Figure IV.7: L'affaissement en fonction de la teneur en poudre de verre.....	63
Figure IV.8: La consistance en fonction du rapport E/C et la teneur en poudre de verre .....	64
Figure IV.9 : Le temps du début de prise en fonction de la teneur en poudre de verre .....	65
Figure IV.10 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en poudre de verre.....	65

Figure IV.11: Presse hydraulique utilisée pour les essais de compression .....	66
Figure IV.12 : Eprouvettes après écrasement.....	67
Figure IV.13 : Courbe contrainte-déformation du béton ordinaire .....	68
Figure IV.14 : Courbe contrainte-déformation du BPV 10 .....	68
Figure IV.15 : Courbe contrainte-déformation du BPV 15%.....	69
Figure IV.16 : Courbe contrainte-déformation du BPV 20%.....	69
Figure IV.17 : Courbe contrainte-déformation du BPV 25%.....	70
Figure IV.18 : Courbe contrainte-déformation du BPV 30%.....	70
Figure IV.19 : Résistance à la compression des différents bétons étudiés.....	71

# Introduction générale

## **Introduction générale**

Le béton occupe toujours une place dominante dans les domaines du génie civil et travaux publics. Ses multiples qualités à savoir : une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductibilité électrique, le rendent un produit indispensable.

Les ajouts cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) créant ainsi de nouveau C-S-H, produit essentiel de l'hydratation du ciment et élément responsable de la résistance du béton à jeune et à long terme.

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à silice, le verre se place comme un matériau digne du terme « pouzzolanique ».

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

De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales micronisées sur les propriétés des bétons à l'état frais [Nehdi & Rahman 2000] et à l'état durci [El Barak. 2005]. Cependant peu d'études ont été conduites sur les poudres de verre.

La problématique de ce travail est donc la valorisation des déchets de verre broyés comme addition dans les bétons ordinaires.

Le but de ce travail est de formuler un béton avec optimisation de l'addition de la poudre de verre permettant de communiquer au mélange au moins les caractéristiques et les résistances mécaniques d'un béton ordinaire. Pour cela, nous avons fixé le rapport  $E/C=0,5$  pour tous les bétons testés et nous avons mené une étude comparative entre un béton ordinaire (BO) de référence, sans aucune addition, et des bétons avec poudre de verre (BPV) en variant le pourcentage de l'ajout de 10%, 15%, 20%, 25% et 30% afin de traiter l'effet de la substitution partielle du ciment par les déchets de verre broyés sur les propriétés des bétons ordinaires.

Ce mémoire s'organise en deux grandes parties :

- Une partie théorique, qui est une synthèse bibliographique qui comporte un rappel des définitions fondamentales sur les bétons ordinaires et les bétons à base d'ajouts cimentaires.

- Une partie expérimentale, consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude. La méthode de formulation ainsi que les compositions retenues pour le béton ordinaire (BO) et les bétons avec poudre de verre (BPV) y sont mentionnées.

Puis, sont détaillés les essais sur bétons à l'état frais et à l'état durci.

Enfin, une comparaison des résultats par rapport au béton ordinaire (BO) et entre les différents bétons avec poudre de verre (BPV) est effectuée.

# Chapitre I

## Généralités sur le béton

## 1. 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...

## 2. Définition

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [1]. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- d'une pâte pure (ciment+eau),
- d'un mélange granulaire,
- de produits additionnels (adjuvants, additions minérales).

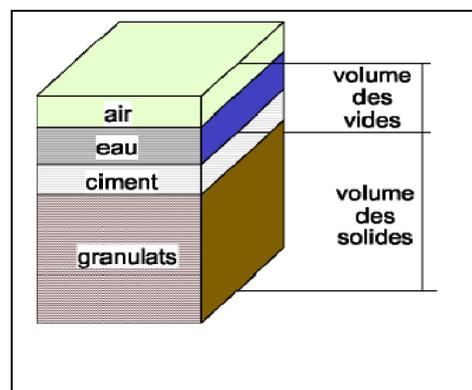


Figure I.1: Composition d'un béton

On désigne habituellement sous le nom :

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

### 3. Composants d'un béton

#### 3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

##### 3.1.1 Constituants principaux [2]

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type (du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle....) ; dans le but de modifier certaines de leur propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement.

- **Clinker portland (K) :**

C'est un produit obtenu par cuisson du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO<sub>2</sub>) et de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le mélange est en général constitué de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne, ...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de gypse jouant le rôle de régulateur, donne les ciments « Portland ». Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- *le silicate tricalcique : SiO<sub>2</sub>, 3CaO (ou C<sub>3</sub>S),*
- *le silicate bicalcique : SiO<sub>2</sub>, 2CaO (ou C<sub>2</sub>S),*
- *l'aluminate tricalcique : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO (ou C<sub>3</sub>A),*
- *l'aluminate-ferrite tétracalcique : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4CaO (ou C<sub>4</sub>AF).*

- **Laitier de haut fourneau (S) :**

Le laitier, sous produit de fabrication de la fonte (brusquement refroidi par aspersion d'eau), est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium dans des proportions allant de 40 à 50 %, la silice (25 à 35 %), l'alumine (12 à 30 %) et la magnésie ainsi que d'autres oxydes en très faibles quantités.

**• Cendres volantes (V et W) :**

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être :

- siliceuses (V), constituées de silice réactive (40 à 55 %) et d'alumine (20 à 30 %),
- ou calciques (W) avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

**• Pouzzolanes naturelles (Z) :**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer.

**3.1.2 Constituants secondaires**

Ils peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion  $\leq 5\%$ , (exception faite du clinker) ;

- Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment ; ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

**3.1.3 Classification des ciments**

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression ; exprimées en MPa à 28 jours.

La norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes (tableau I-1) :

Classe des ciments	Résistance à 2 jours(MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5	/	$\geq 32.5$	$\geq 52.5$
32.5R	$\geq 13.5$	$\geq 32.5$	$\geq 52.5$
42.5	$\geq 12.5$	$\geq 42.5$	$\geq 62.5$
42.5R	$\geq 20$	$\geq 42.5$	$\geq 62.5$
52.5	$\geq 20$	$\geq 52.5$	/
52.5R	$\geq 30$	$\geq 52.5$	/

**Tableau I.1: classification des ciments selon leurs résistances**

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

### 3.1.4 Principales catégories de ciments

La norme P 15. 301 [3] distingue 4 catégories ; à savoir :

- le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97 % de clinker, le reste est du filler ;
- le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65 % de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des autres constituants définis précédemment ;
- Le ciment de haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 et 75 % de laitier, le reste des constituants est du clinker ou un filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants ;
- Le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80 % de laitier, le reste est du clinker ou un filler dans la limite de 3% également.

## 3.2 Les granulats (sables, gravillons)

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [4].

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70 % de volume). De plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures. Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton selon :

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

### **3.3 L'eau**

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier (effet lubrifiant). La qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. Il convient donc d'y apporter une grande attention surtout lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage.

### **3.4 Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton. Les principaux adjuvants [5], [6] sont :

• **Les fluidifiants (ou réducteur d'eau) :** Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C (Eau/Ciment) constant (fixé pour une résistance souhaitée). Ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [7]. Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant.

• **Les retardateurs de prise du ciment** : dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne se fissure pas.

• **Les accélérateurs de prise du ciment**: pour le bétonnage en temps froid, il est conseillé d'utiliser les accélérateurs de prise pour, dans ce cas, provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement du béton freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés.

• **Les entraîneurs d'air** : ils permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies.

#### **4. Les déchets**

Un déchet est, selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code de l'environnement Français : *“tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon”*.

Selon les critères liés à : la nature, l'origine, le type de collecte, la composition, la consistance, l'hétérogénéité, etc..., on considère 3 grandes catégories de déchets :

• **Déchets dangereux** : ils sont potentiellement les plus polluants pour l'environnement et représentent le plus de dangers pour la santé humaine. Ces déchets nécessitent des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement.

• **Déchets non dangereux** : Ce sont les déchets industriels ordinaires qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères.

• **Déchets inertes** : Ils sont souvent solides (minéraux) ne subissant aucune transformation physique ou chimique importante : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, carrelage. Ils ne sont pas biodégradables et n'affectent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent des chantiers de construction, mais aussi des mines et des carrières.

Les principaux objectifs d'utilisation des déchets sont :

- Réduire la production des déchets ;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique.

## **5. Composition des bétons**

L'étude d'une composition de béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [8].

Les méthodes de composition se subdivisent en 2 types :

• La méthode à granularité « continue », si la courbe sur le graphique granulométrique s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment au plus gros grain de gravier. Toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

• La méthode à granularité « discontinue », lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires.

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ; par contre la granularité discontinue conduit à des bétons présentant en général des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité. Toutefois, la plupart des bétons utilisés actuellement sont à granularité continue.

## 5.1 Critères en fonction de la destination des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné. Quatre critères principaux doivent être retenus [8] :

- la dimension maximale des granulats ;
- la résistance ;
- l'ouvrabilité ;
- l'agressivité du milieu ambiant.

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans la méthode de Dreux et Gorisse [8].

### 5.1.1 Dimension maximale D des granulats

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc. ...), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage). Une valeur admissible de D est préconisée par Georges Dreux [8] (tableau I.2).

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de D
e espacement entre les armatures principales	e
r rayon moyen des mailles de ferrailage	0,8 r
R rayon moyen de moule	R
$h_m$ épaisseur minimale de la pièce	$h_m/5$

**Tableau I.2: Dimension admissible D pour les plus gros granulats**

Le rayon moyen r d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre. Le rayon moyen R du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton.

Pour l'épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage (c), des recommandations sont faites par le Comité euro-international du béton (CEB) [8] et le règlement BAEL [2] - article A.7.1 (tableau. I.3).

Milieu ambiant	c minimal (CEB)	D maximal (CEB)	c minimal (BAEL 99)
Locaux couverts et clos	1 cm	2 c	1cm
Exposition aux intempéries	2 cm	1,5 c	3cm
Milieu agressif	3 cm	C	3cm
Milieu très agressif	4 cm	c-5 mm	5cm
Nota : c doit, par ailleurs être supérieur ou égal au diamètre des armatures (ou à la largeur du paquet d'armatures).			

**Tableau I.3 : Enrobage minimal c des armatures**

### 5.1.2 Résistance souhaitée

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

D'après les règlements en vigueur, on prend pour k la valeur de 0,85 à 1,2 en général et selon les cas, il convient de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20 % supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier /sable).

### 5.1.3 Ouvrabilité

L'ouvrabilité peut se définir comme l'aptitude que peut avoir le béton frais à bien se mettre en place pour enrober convenablement les armatures et remplir le coffrage sans ségrégation. Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par mesure de l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau I.4.

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition d'un béton.

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

**Tableau I.4 : Consistance du béton**

### 5.1.4 Agressivité du milieu ambiant

Le milieu ambiant dans le quel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton. La présence d'eaux agressives (eaux de mer, gypseuse, acides, très purs, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtements de fours ou ouvrage à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant.

### 5.2 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 en vrac, on citera [2] :

- Méthode de BOLOMEY ;
- Méthode d'ABRAMS ;
- Méthode de FAURY ;
- Méthode de VALETTE ;
- Méthode de BARON-LESAGE ;
- Méthode de DREUX et GORISSE....

### 5.2.1 Méthode de BOLOMEY

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec :

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : diamètre du plus gros grain,

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

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

### 5.2.2 Méthode d'ABRAMS

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour un mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Cette règle de mélange d'ABRAMS permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse  $M_{f1}$  et  $M_{f2}$  pour obtenir un module  $M_f$  choisi pour le mélange.

### 5.2.3 Méthode de FAURY

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

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Le paramètre A est choisit dans un tableau et D est exprimée en dimension passoire.

B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R est le rayon moyen du moule.

### **5.2.4 Méthode de VALLETTE**

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

### **5.2.5 Méthode de BARON-LESAGE**

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

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que ladite fonction soit maximale.

### **5.2.6 Méthode DREUX et GORISSE**

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, etc.

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose. Enfin la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré. Il s'agit ensuite d'exécuter quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

# Chapitre II

## Comportement mécanique du béton

## **1. 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 ( $\sigma - \varepsilon$ ) 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 traction et en compression du béton tel que c'est rapporté dans la littérature.

## **2. 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 ».

### **2.1 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 liée 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 (MacGregor, 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 II.1 illustre la relation contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) du béton en compression.

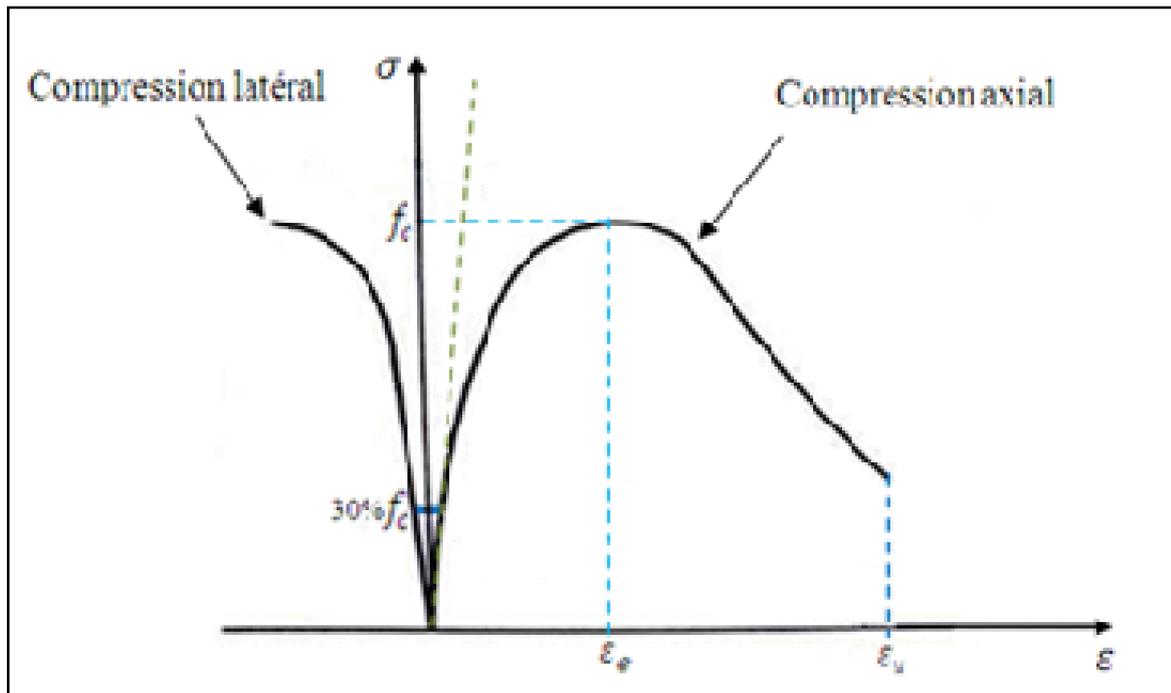


Figure II.1 : comportement du béton en compression simple Chen 1982 [9].

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par une 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 II.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.

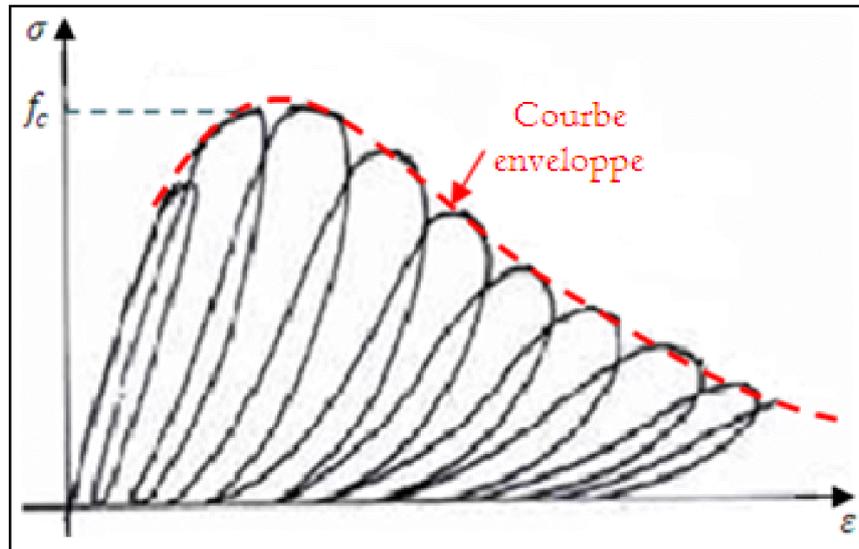


Figure II.2 : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al 1969[10].

## 2.2 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 [11]). La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire (Exadaktylos G.E [12]) 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 mécaniques très variées.

Ci-dessous est représenté un nombre restreint de propositions de ces lois qui sont classées selon deux grandes familles :

### 2.2.1 Les modèles réglementaires

Les modèles réglementaires servent de base aux calculs simplifiés aux Etats 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  $m^3$  de béton mis en œuvre (BAEL [13], EUR [14]).

Parmi ces modèles on peut citer :

- **Le modèle de béton simplifié BAEL**

Le diagramme contrainte-déformation du béton reprend le diagramme de calcul dit : Parabole Rectangle (Figure II.3). Il peut être utilisé dans tous les calculs aux états limite 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  $\sigma_{bc}$ , qui s'étend de l'origine jusqu'à son sommet.

- Une branche d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations  $\varepsilon_{bc}$ , et tangent à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2‰ à 3,5‰ de la déformation  $\varepsilon_{bc}$ .

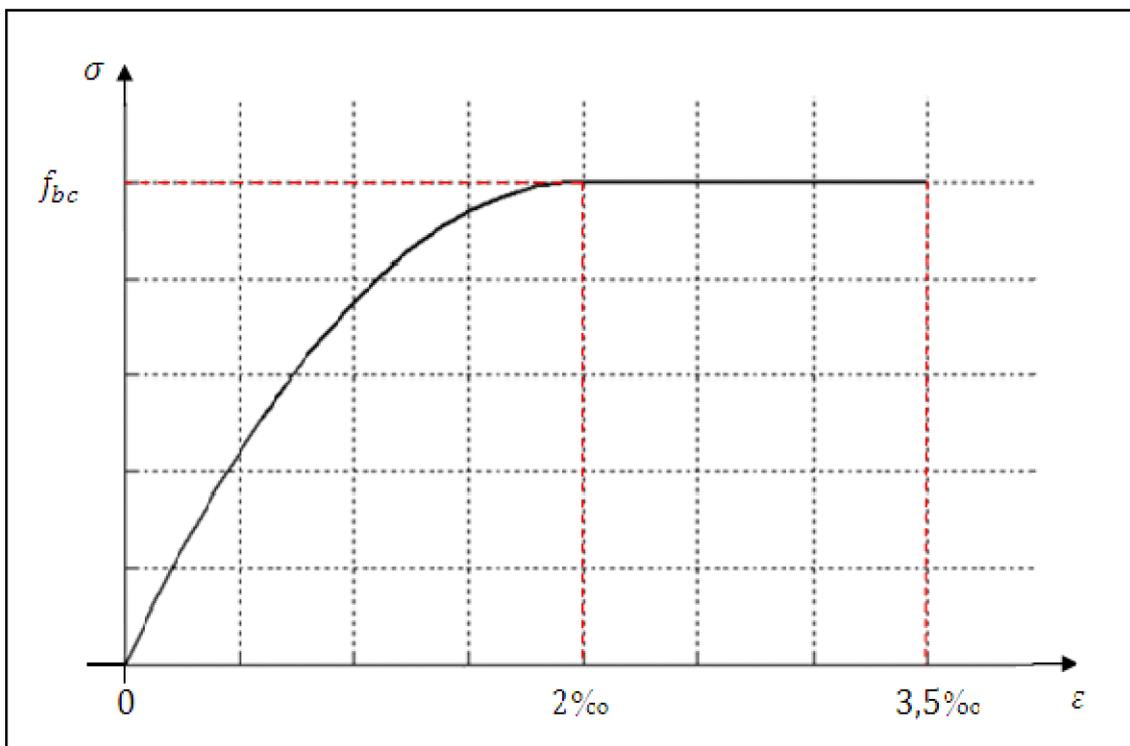


Figure II.3 : Loi Parabole-Rectangle du béton en compression BAEL[13].

Les relations entre les contraintes et les déformations sont les suivantes :

$$\begin{array}{ll} \sigma_{bc} = 0.25 f_{bc} 10^3 \cdot \varepsilon_{bc} (4 - 10^3 \cdot \varepsilon_{bc}) & 0 \leq \varepsilon_{bc} \leq 2\text{‰} \\ \sigma_{bc} = f_{bc} & 2\text{‰} \leq \varepsilon_{bc} \leq 3.5\text{‰} \end{array}$$

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.

$\gamma_b$  : vaut 1,5 pour les combinaisons fondamentales et 1,15 pour les combinaisons accidentelles.

#### • Le modèle de béton simplifié Eurocode 2 :

Les Eurocodes 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'Eurocode2 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.

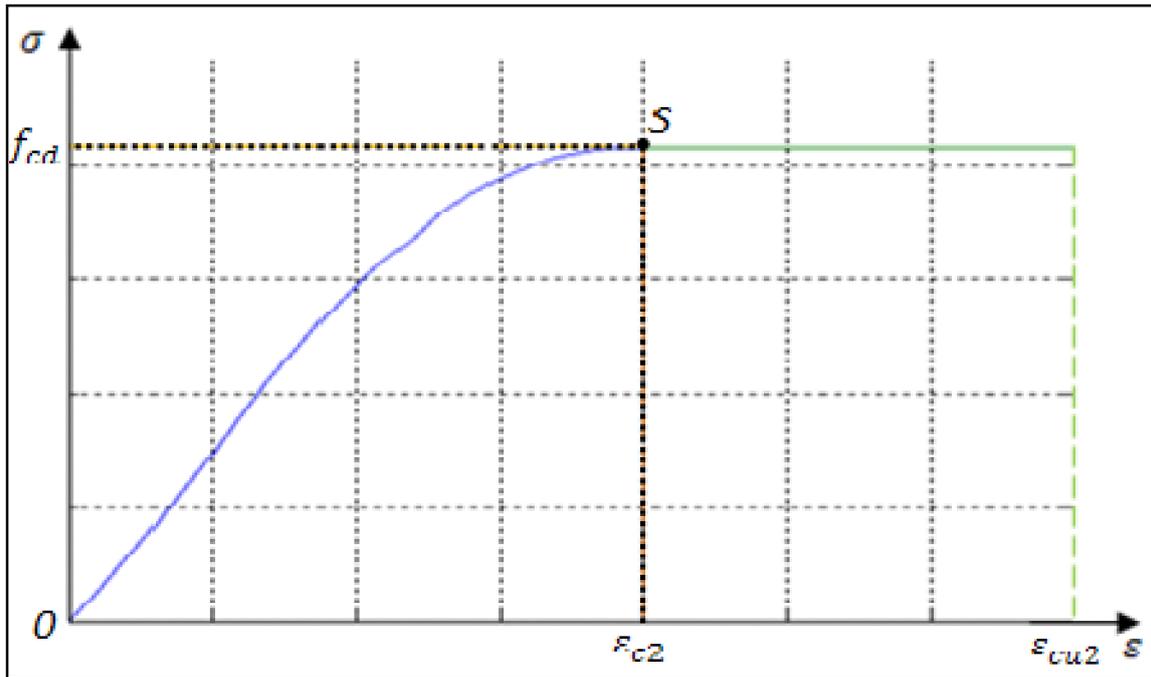


Figure II.4 : Diagramme parabo-rectangle du béton en compression EUROCODE2[14].

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

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \epsilon_c > \epsilon_{c2}$$

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

$\epsilon_{c2}$  : Déformation de pic correspondant à  $f_{cd}$ .

n : exposant.

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

Avec :

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

$f_{ck}$  : 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  $0.85 < \alpha_{cc} < 1$  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 :

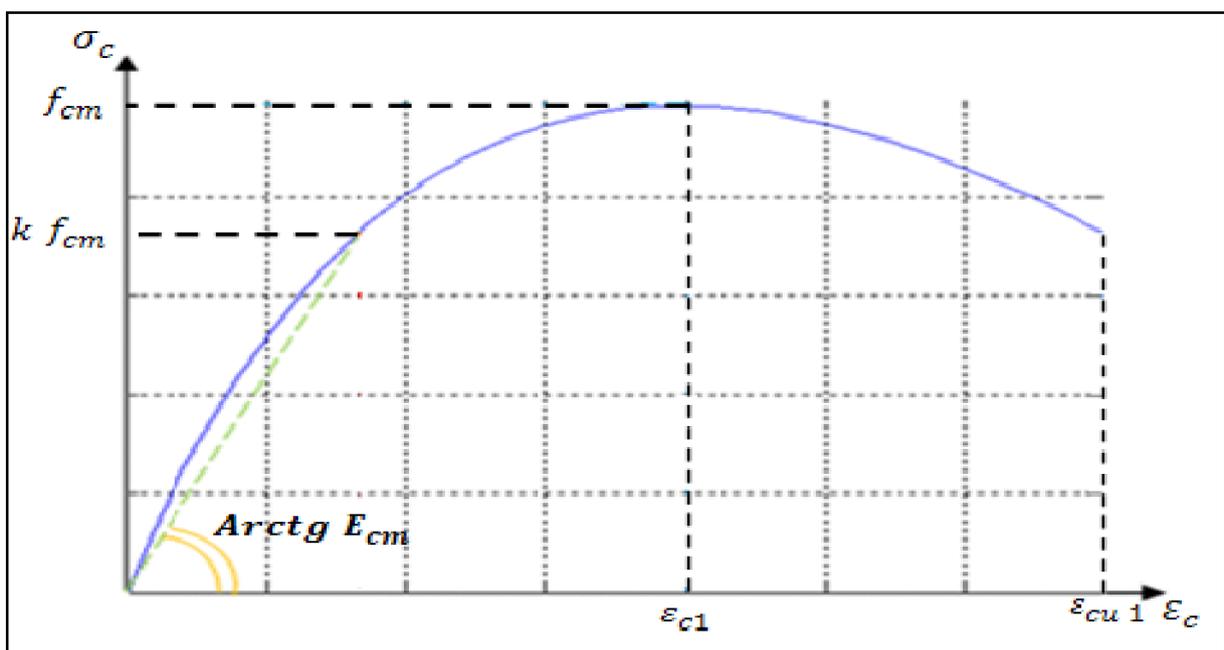


Figure II.5 : Diagramme non linéaire du béton en compression EUROCODE2.

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

Avec :

$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad \text{Où } \epsilon_c \text{ et } \epsilon_{c1} \text{ sont pris en valeur absolue.}$$

$$\epsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \quad : \text{Déformation correspondant au pic de la courbe } (\sigma - \epsilon)$$

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

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

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

## 2.2.2 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 [15]

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.

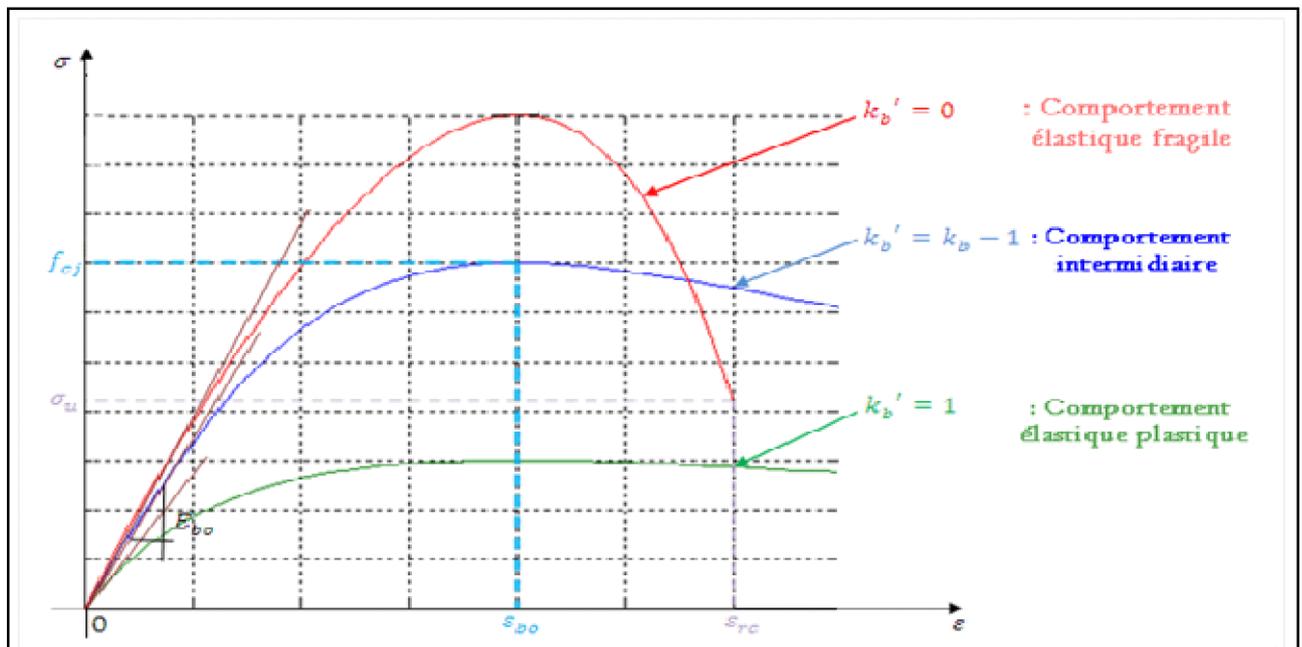


Figure II.6 : Comportement du béton en compression selon Sargin.

**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 :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \cdot \bar{\epsilon} + (k_b' - 1) \bar{\epsilon}^2}{1 + (k_b - 2) \bar{\epsilon} + k_b' \bar{\epsilon}^2}$$

Tel que :

$$\bar{\epsilon} = \epsilon / \epsilon_0$$

$$k_b = \frac{E_{b0} \cdot \epsilon_0}{f_{cj}}$$

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

Avec :

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

$\epsilon_{b0}$  : 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 plate.

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	$30 < f_{cj} < 55 [Mpa]$

La déformation  $\epsilon_0$  correspondant au pic de contrainte peut être estimée par la formule donnée par le BPEL :

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

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  $\epsilon_{cu}$  très limitée, de l'ordre de  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . Cette valeur est de l'ordre de 2 fois le raccourcissement maximum élastique  $\epsilon_{b0}$ .

### 3. Comportement en traction

Afin de définir complètement le comportement du béton, il est nécessaire de connaître aussi sa résistance à la traction, la résistance mécanique du béton ordinaire en traction reste inférieure au 1/10 de celle en compression.

Le comportement réel d'un élément soumis à la traction directe est très complexe alors plusieurs recherches ont été réalisées afin d'étudier les différents phénomènes (élasticité, plasticité, fragilité, endommagement,..) selon les conditions de chargement (mono-axiale, bi-axiale, triaxial, température..).

On représente dans ce qui suit quelques modèles de comportement du béton en traction uni axiale.

### 3.1 Comportement du béton en traction uni axiale

La courbe contrainte-déformation du béton obtenue en traction uni axiale (Figure II.7) est similaire à celle de la compression, mis à part le fait que la résistance limite en traction  $f_t$  soit nettement plus faible que celle en compression ( $f_t=0.1f_c$ ).

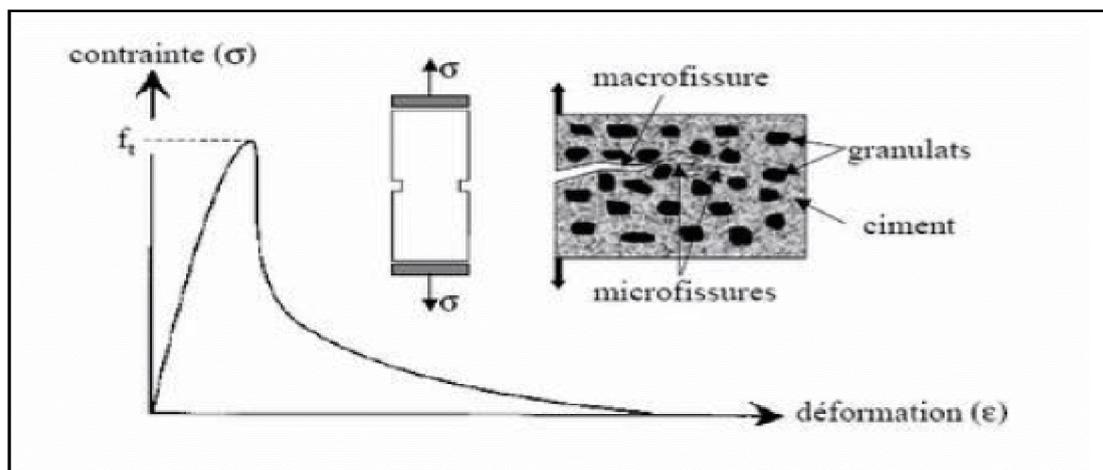


Figure II.7 : Courbe contrainte-déformation du béton en traction.

La courbe est linéaire jusqu'à environ 75% de sa résistance limite de traction,  $f_t$ . Les microfissures s'initient à se développer dans la région qui précède la résistance au pic et qu'elles s'agrandissent plus rapidement que lors du test de compression et par conséquent la rupture survient plus tôt.

Des tests expérimentaux de traction directe effectués sur des éprouvettes en béton ont montré que, juste avant le pic, une décohésion des granulats les plus importants apparaissait et que les fissures nées de cette décohésion coalescent ensuite avec les microfissures existantes pour former une macro fissure continue. De plus, les résultats révèlent la présence de nombreux grains reliant les surfaces de la fissure, ce qui explique la branche d'adoucissement de la courbe contrainte-déformation. La ruine des éprouvettes apparaît lors de la rupture de ces grains.

### **3.2 La résistance à la traction du béton**

La fissuration du béton, essentiellement due à son comportement en traction, est un phénomène critique dans le calcul des constructions en béton armé. Depuis le début des années quatre-vingts, des chercheurs ont tenté de modéliser le comportement du béton sous charges **cycliques** en traction. Nous citons les modèles de **Rots (1985)**, de **Gylltoft (1984)**, de **Reinhardt (1986)** et de **Yankelevski (1989)**.

La résistance à la traction du béton est d'une part influencée par l'état de contraintes, la géométrie de l'élément de structure, les conditions d'essai (vitesse de chargement, contrôle en déformation, ...).

La détermination de la résistance à la traction par d'autres types d'essais donne des résultats différents, car cette résistance dépend de la façon dont elle est déterminée. On a une résistance à la traction différente pour chaque sorte de béton. L'évolution dans le temps de la résistance à la traction dépend de nombreux facteurs, comme la composition du béton, le type et la classe du ciment, les adjuvants et les ajouts, les conditions de production et de durcissement du béton ainsi que le type de cure.

### **3.3 Les causes de la fissuration**

La fissuration du béton est un processus hasardeux, hautement variable et influencé par plusieurs facteurs. Cette fissuration est due au fait que le matériau béton a un comportement très fragile en traction. Ces niveaux de résistance peuvent être atteints par les contraintes de retrait et celles des variations thermiques climatiques et donc le béton peut se fissurer même en l'absence de charges externes. Dans ce sens, il est utile de noter que malgré la présence des aciers de renforcement pour reprendre les contraintes de traction dans les éléments en béton armé, les fissures ne sont pas éliminées. En effet, les fissures créées par les charges de flexion sont non seulement inévitables, mais réellement nécessaires pour que les armatures puissent être utilisées efficacement.

On peut ainsi classer la fissuration du béton en deux catégories :

- 1ère catégorie : les fissures causées par les charges externes appliquées à la structure telles que celles dues aux charges de flexion ou celles inclinées induites par l'effort tranchant.
- 2ème catégorie : les fissures causées par le retrait et celles causées par les effets thermiques.

### 3.4 Quelques modèles de comportement du béton et du béton armé en traction

#### 3.4.1 Comportement local du béton en traction (Béton seul)

##### • Comportement du béton selon MAZARS

Une loi théorique a été développée par MAZARS [16]. Elle présente l'avantage d'ajuster la courbe décroissante avec deux paramètres  $A_t$  et  $B_t$

(Figure II.8).

$$\sigma = E_{c0} \left\{ \varepsilon_{ct} (1 - A_t) + \frac{A_t \varepsilon}{e^{B_t (\varepsilon - \varepsilon_{ct})}} \right\} \quad \text{si } \varepsilon > \varepsilon_{ct}$$

Avec :

$0.7 < A_t < 1$  en moyenne ;  $A_t = 0.8$

$10^4 < B_t < 10^5$  en moyenne ;  $B_t = 2 * 10^4$

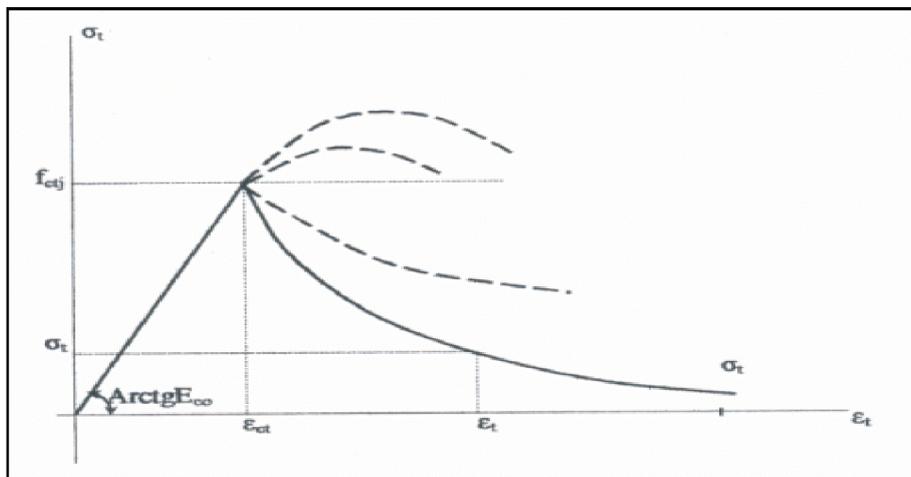


Figure II.8 : Comportement local du béton en traction selon MAZARS.

### 3.4.2 Lois de Comportement uni axiales fictives du béton tendu

Pour approcher correctement le comportement d'une structure (surtout pour les courbes charge-flèche), les lois de comportement en traction du béton seul ne sont pas adéquates.

En effet, plusieurs facteurs rentrent en jeu quand le béton est mélangé à des aciers, à savoir ;

- le diamètre des armatures et leur disposition,
- la fissuration,
- le mode de mise en charge,
- l'interaction acier-béton, etc.....

On se limitera au comportement du béton selon Grelat.

#### •Comportement du béton en traction selon Grelat

La formulation de Grelat [17] tient compte d'une répartition linéaire des contraintes, elle attribue au béton tendu fissuré un diagramme fictif triangulaire à partir de l'axe neutre (Figure II.9), dont la contribution du béton s'annule à la plastification des aciers.

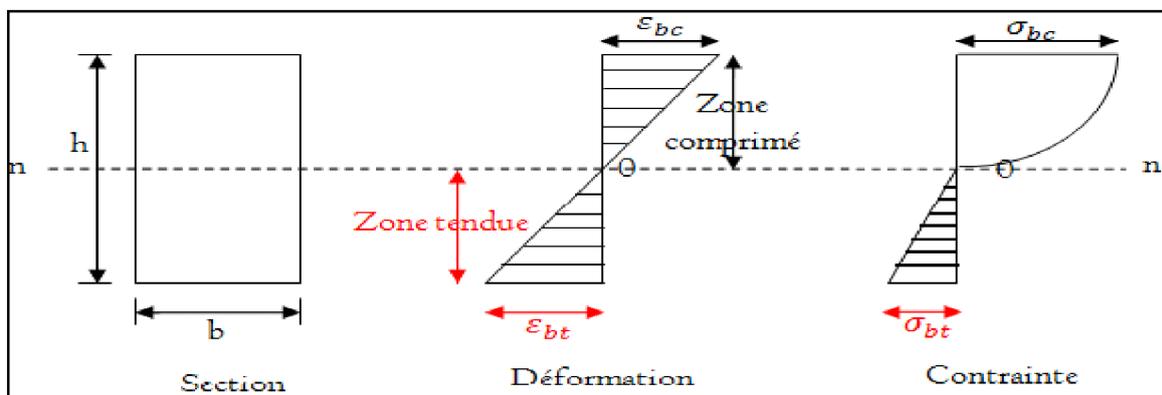


Figure II.9 : Comportement de béton avant fissuration.

Les fibres du béton tendu d'un module de déformation  $E_{bt}$  est défini par la contrainte et la déformation instantanée du bord tendu :

$$E_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{\varepsilon_{bt}}$$

Au-delà de la fissuration en traction on tient compte d'une participation du béton tendu situé entre deux fissures successives.

La contrainte ne s'annule pas brusquement, elle décroît selon une loi parabolique progressivement jusqu'à plastification et rupture des aciers tendus (Figure II.10). Dans ce cas, l'étude concerne le comportement moyen d'une section située entre deux fissures donne les relations suivantes :

- Domaine élastique linéaire :

$$\sigma_{bt} = E_{b0} \cdot \varepsilon_{bt} \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{ft}$$

- Fissuration avec participation du béton tendu :

$$\sigma_{bt} = -f_{tj} \frac{(\varepsilon_{bt} - \varepsilon_{rt})^2}{(\varepsilon_{rt} - \varepsilon_{ft})^2} \quad \text{si} \quad \varepsilon_{ft} < |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{rt}$$

- Fissuration sans participation du béton tendu

$$\sigma_{bt} = 0 \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| > \varepsilon_{rt}$$

Avec :

$E_{b0}$  : Module d'élasticité longitudinale du béton,

$f_{tj}$  : Résistance de béton a la traction,

$\varepsilon_{ft}$  : Déformation de traction correspondant à  $f_{tj}$ ,

$\varepsilon_{rt}$  : Déformation correspondant à plastification de l'acier le plus tendu,

$\varepsilon_{bt}$  : Déformation de la fibre de béton la plus tendue,

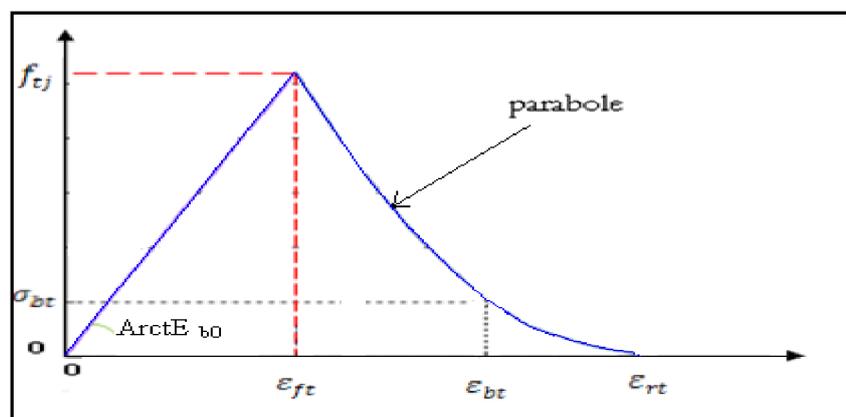


Figure II.10 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat.

# Chapitre III

## Les ajouts cimentaires

## 1. Introduction

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en addition ou en substitution partielle du ciment portland à travers le monde. Leur valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques.

Les ajouts cimentaires influencent plus au moins sur les caractéristiques physico – mécaniques des liants en fonction de leur composition minéralogique, leur finesse et leur pourcentage.

L'utilisation de la poudre de verre broyé au remplacement du clinker présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets.

## 2. Rôle des ajouts cimentaires

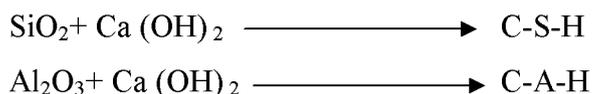
### 2. 1. Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés combles les interstices granulaire inaccessible aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [18].

### 2. 2. Rôle pouzzolanique de l'ajout

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux suite à la réaction d'hydratation de  $C_3S$  (silicate tricalcique) et  $C_2S$  (silicate bicalcique) (30% de la masse du ciment), les ajouts cimentaires réagissent avec cette chaux pour donner naissance à des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau.

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes [19] :



### **3. Classification des ajouts minéraux [20]**

Les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

#### **3.1. Principaux ajouts minéraux inertes**

L'objectif de leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Ils sont également utilisés pour améliorer la consistance des bétons, parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires.

- **Les fillers calcaires**

Les fillers sont des poudres fines à granulométrie inférieure à 80 microns obtenue par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, bentonite, cendres volantes,....etc.) .

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

Les fillers se différencient les uns des autres par :

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

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés aux CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Rôle de remplissage.
- Rôle chimique conduisant à l'accélération de l'hydratation de  $C_3S$  et  $C_3A$ .

#### **3.2. Ajouts minéraux actifs**

##### **3.2.1. La pouzzolane**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes [21].

On distingue :

- **La pouzzolane naturelle**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique.

- **La pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer les propriétés pouzzolanique.

### **3.2.2. La fumée de silice**

La fumée de silice est un sous produit de fabrication de silicium dont la teneur en  $\text{SiO}_2$  varie selon le type d'alliage produit.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité du déclenchement de la réaction pouzzolanique.

L'utilisation de cette dernière dans le béton se fait de deux façons différentes :

\*Comme substitution du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en générale pour des raisons d'économie.

\*Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

### **3.2.3. Le laitier de haut fourneau**

Est le sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans les proportions de l'ordre 40% à 50%, de la silice entre 25% à 35%, de l'alumine entre 12% à 30% ainsi que le magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités (tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker).

### **3.2.4. Les cendres volantes:**

Sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz de chaudières des centrales thermiques, elles peuvent avoir plusieurs compositions chimiques parce qu'elles sont reliées exclusivement au type d'impuretés contenues dans le charbon brûlé dans les centrales thermiques.

### 3.2.5. La poussière:

La poussière est une matière à particule fines, recuperée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000cm<sup>2</sup>/g, le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajout.

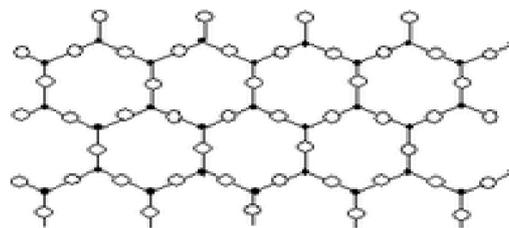
### 3.2.6. Le verre

#### 1 .Définition

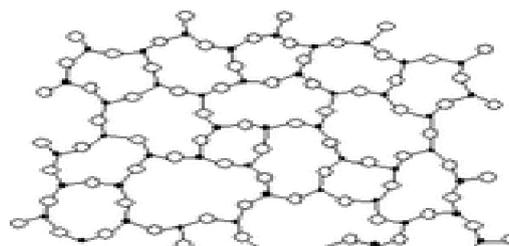
Le **verre** est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO<sub>2</sub>, le constituant principal du sable). Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique.

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, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé.

Comparons, par exemple, la structure de la silice (SiO<sub>2</sub>) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse :



**Figure III.1 : Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) [22].**



**Figure III.2 : Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice vitreuse [22].**

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres  $\text{SiO}_4$  ; 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  $\text{SiO}_4$ , la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques  $\text{SiO}_4$ .

## **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  $\text{SiO}_4$  qui s'enchaînent les uns aux autres par leurs sommets pour donner la silice  $\text{SiO}_2$ . 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 :  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ . D'autres produits (généralement des oxydes) peuvent être ajoutés aux verres en fonction de l'application recherchée afin de modifier ses propriétés chimiques, physiques ou mécaniques telle que la viscosité et la durabilité chimique.

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

## **3. Modification de la structure d'un verre**

En raison de sa structure amorphe, le verre peut inclure en son sein une très grande variété d'éléments et présenter des compositions très complexes.

Dans un verre d'oxydes, ces différents éléments sont sous une forme cationique, afin de former des oxydes avec l'anion oxygène  $\text{O}^{2-}$ .

Les cations intervenant dans la composition de verres peuvent être classés en trois catégories selon le rôle structural qu'ils jouent lors de la vitrification (formation du verre) : les formateurs de réseau, les non-formateurs de réseau (ou modificateurs de réseau) et les intermédiaires. Les critères structuraux de cette classification prennent en compte le nombre de coordination (nombre d'atomes d'oxygène auquel est lié le cation) et les forces de liaison.

- **Les formateurs de réseau**

Sont des éléments qui peuvent à eux seuls former un verre. Les éléments formateurs les plus courants sont le silicium Si (sous sa forme oxyde  $\text{SiO}_2$ ), le bore B (sous sa forme oxyde  $\text{B}_2\text{O}_3$ ), le phosphore P (sous sa forme oxyde  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), le germanium Ge (sous sa forme oxyde  $\text{GeO}_2$ ) et l'arsenic As (sous sa forme oxyde  $\text{As}_2\text{O}_3$ ).

Ce sont des éléments métalliques de valence assez élevée (généralement 3 ou 4, parfois 5), qui forment des liaisons covalentes avec les atomes d'oxygène. Ils donnent des polyèdres liés par leurs sommets et forment le réseau vitreux.

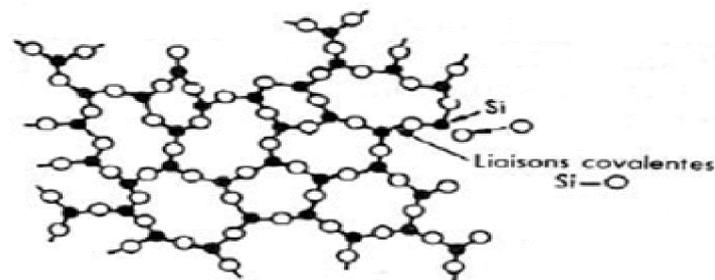


Figure III.3: Formation du verre par l'élément silicium Si [23].

- **Les modificateurs de réseau**

Les modificateurs de réseau ne peuvent pas former de verre à eux seuls. Ce sont essentiellement les alcalins de formule  $\text{M}_2\text{O}$  comme  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ , les alcalino-terreux de formule  $\text{MO}$ , comme  $\text{CaO}$  et  $\text{BaO}$ .

Les modificateurs de réseau cassent les liaisons entre les polyèdres du réseau vitreux provoquant une dépolymérisation de ce dernier. Ils transforment alors les oxygènes portants, qui lient deux éléments formateurs de réseau, en oxygènes non-portants, liés à un seul formateur de réseau. Ceci se traduit à l'échelle macroscopique par une diminution du point de fusion (la température de fusion passe de  $1730\text{C}^\circ$  à  $1400\text{C}^\circ$ ) et de la viscosité [23].

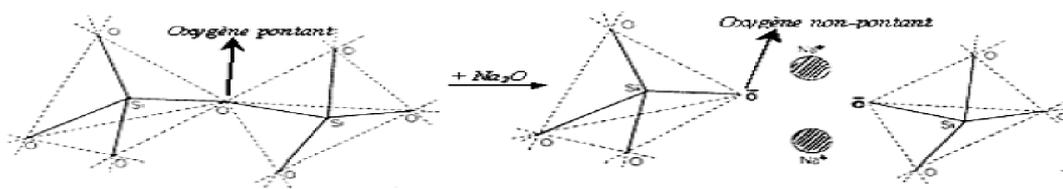
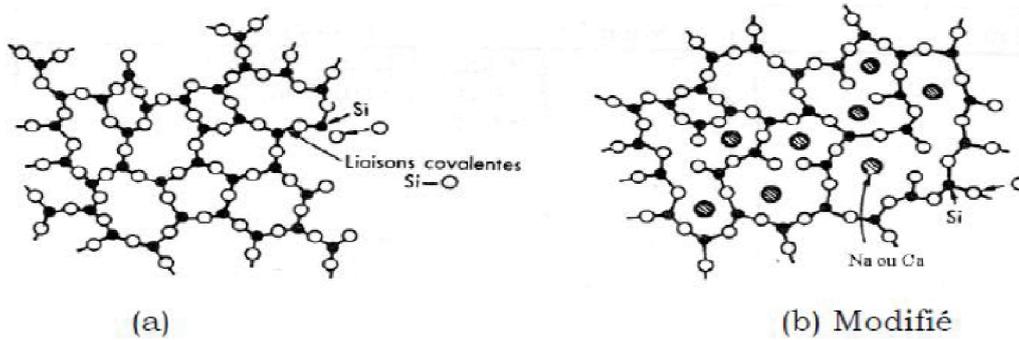


Figure III.4: Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modification  $\text{Na}_2\text{O}$  [23].



**Figure III.5: (a)empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na<sub>2</sub>O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe [23].**

- **Les intermédiaires**

Les éléments intermédiaires ont différents comportements : certains de ces éléments sont soit formateurs, soit modificateurs selon la composition du verre tandis que d'autres n'auront ni l'une ni l'autre de ces fonctions mais un rôle intermédiaire.

Les principaux éléments intermédiaires dans les verres d'oxydes sont l'aluminium Al, le fer Fe, le titane Ti, le nickel Ni et le zinc Zn.

Suivant la concentration utilisée, le nickel permet de produire des verres bleus, violets ou même noirs.

L'ajout de titane conduit à un verre jaune-brun.

#### 4. Propriétés du verre

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

- **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.

- **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, 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 base 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 [24].

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 [24] :

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

$\sigma$  : 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.

**5. Durabilité du verre dans une matrice cimentaire**

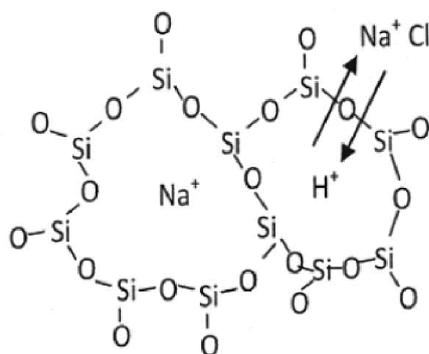
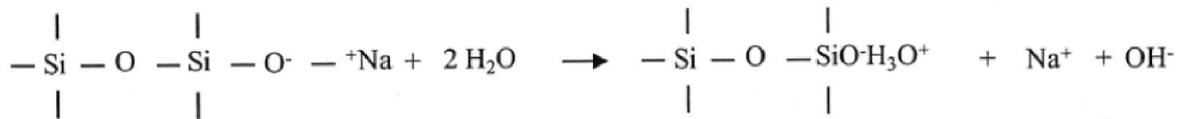
Le verre a été longtemps considéré comme un matériau inerte. Mais aujourd’hui, il faut considérer que tous les produits vitreux sont chimiquement réactifs en solution. Selon les milieux d’attaque, différentes réactions ont lieu. Plusieurs auteurs, ont étudiés la réaction du verre en milieu acide, en milieu neutre et en milieu basique :

• **Mécanisme de corrosion de verre en milieu acide**

Le mécanisme de dégradation du verre par une solution acide est la desalcalinisation de la surface ou le leaching qui se traduit par un échange d’ions entre la solution aqueuse et la surface du verre [25].

La figure III.6 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<sup>+</sup> et un échange ionique rapide libérant des ions Na<sup>+</sup> 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 III.6 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : desalcalinisation du verre (leaching) [25]**

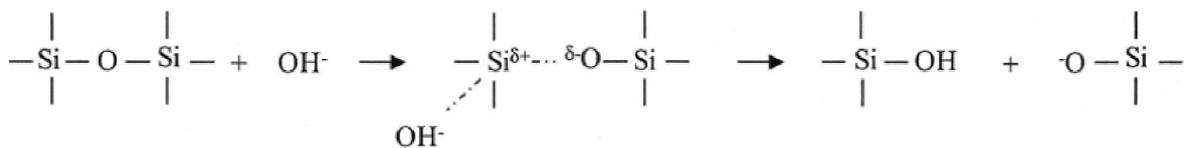
• Mécanisme de corrosion de verre en milieu neutre

La diffusion des espèces chimiques est le mécanisme régissant la corrosion du verre en solution neutre. Les atomes d'oxygène non-pontant se transforment en groupe silanol (SiOH). Ceci permet à l'ion Na<sup>+</sup> libéré de diffuser à la surface du verre avec l'ion OH<sup>-</sup>. 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 suivante [26]:



• 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 [25]:



L'équation montre que l'étape essentielle dans le processus de dépolymérisation et la rupture de la liaison siloxane Si-O-Si. Les ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) contenus dans la solution entraînent la rupture des liaisons Si-O-Si pour donner lieu à de nouvelles liaisons Si-O<sup>-</sup> et Si-OH, la figure III.7 illustre ce mécanisme dans le cas où le verre est attaqué par une solution de NaOH.

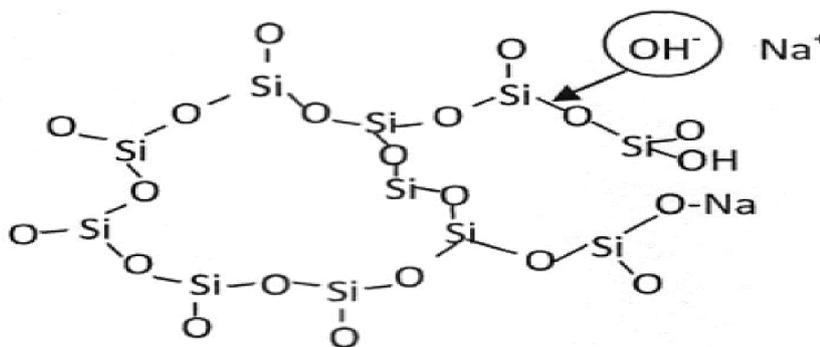
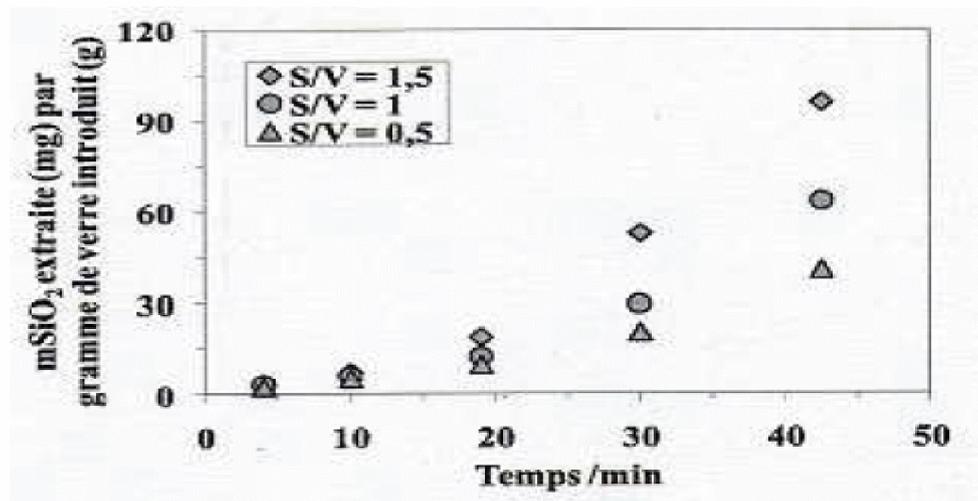


Figure III.7 : Mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (etching) [25].

## 6. 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 40C° ont montré que la quantité de SiO<sub>2</sub> dissoute augmente avec le rapport S/V en fonction du temps [27].



FigureIII.8 : Evolution de la masse de SiO<sub>2</sub> dissoute par gramme de verre en fonction du rapport S/V [27].

- **Influence 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'alcalin dans la composition du verre fait chuter rapidement sa durabilité chimique, à cause de la présence d'oxygène non pontant qui crée un réseau plus favorable à la diffusion des cations [27].

- **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 attaquante. En effet, les verres de silicates deviennent particulièrement sensibles à la décomposition au dessus de PH<sub>9-10</sub>. La figure III.9 montre la variation de dissolution de la silice et de la soude en fonction de PH à 35°C d'un verre de composition initiale Na<sub>2</sub>O-3SiO<sub>2</sub> à 35°C.

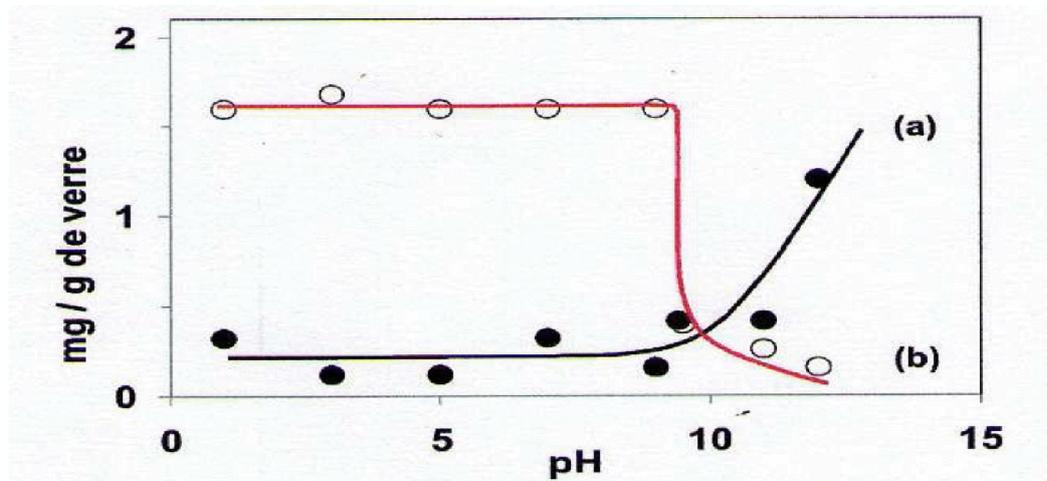


Figure III.9 : variation de la quantité de silice (a) et d'oxyde de sodium (b) en fonction du PH d'un verre de composition initiale Na<sub>2</sub>O-3SiO<sub>2</sub> à 35°C [27].

- **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 Maclillan et entre 8°C° et 15°C° et en fonction de la composition du verre et du type d'ions alcalins selon Paul [27].

## **7. Comportement du verre dans un milieu cimentaire**

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement essentiellement :

### **7.1 .Réaction en fonction de la granulométrie du verre**

En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Qualifiée de "cancer des bétons".

### **7.2. Réaction pouzzolanique du verre**

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes, des testes mécaniques sur des éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore des tests chimiques de consommation de chaux.

Il a été difficile, voir 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 possède une activité pouzzolanique considérable.

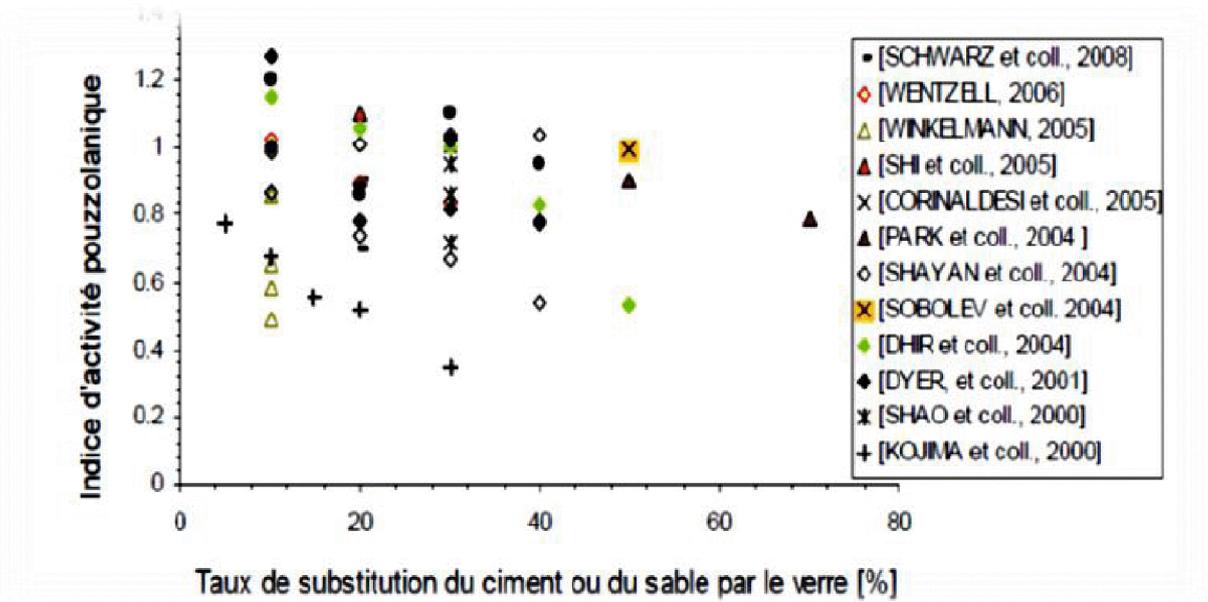


Figure III.10 : indice d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [28].

### 7.3. Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans le béton, améliore ses propriétés mécaniques notamment la résistance en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériaux en prenant certaines précautions.

La réaction alcali silice (RAS) est le résultat de la réaction de la silice amorphe du verre avec les ions hydroxyles et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction, cette réaction est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

La réaction alcali-silice qui est délétère, généralement associée aux grosses particules, est liée à la formation de gels composés principalement de silice et d'alcalins (Na et K) avec de faibles quantités de calcium (qui ont tendance à augmenter avec le temps) [29].

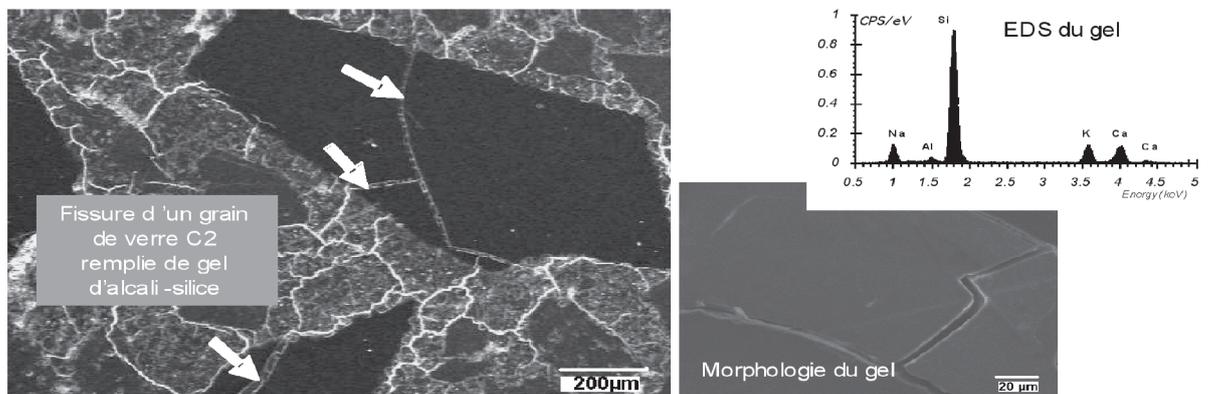


Figure III.11 : Réaction alcali-silice du verre [29].

## 8. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes

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 soit suffisante : en effet, dans le cas du verre, celui là apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affichent une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante [30]. Les travaux de SHI et Coll. (2005), viennent confirmer cette tendance.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre au remplacement du ciment est 70% plus importante que celle des mortiers confectionnés avec de la cendre volante [30]. Cela peut 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.

## 9. L'utilisation simultanée du verre et de la pouzzolane

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 de ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [31,32].

# Chapitre IV

## Étude expérimentale

## **IV.1 MATERIAUX ET FORMULATION**

### **1. Introduction**

La formulation d'un béton requiert une étude précise notamment 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.

### **2. Matériaux utilisés**

Les matériaux utilisés sont locaux et naturels. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux.

#### **2.1 Ciment**

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

Les différentes caractéristiques physico- chimiques sont représentées sur le tableau IV.1

Voir la fiche technique en **annexe 3** pour plus de détails sur ce ciment.

<i>Composants chimiques</i>	<i>%</i>	<i>Caractéristiques physiques</i>
$SiO_2$	18,13	<i>Début de prise :</i> 150 – 180 min
$Al_2O_3$	4,42	<i>Fin de prise :</i> 3 h 30 – 4 h 30
$Fe_2O_3$	3,03	<i>Masse spécifique :</i> 3,1 g/cm <sup>3</sup>
$CaO$	60,78	<i>SSB :</i> 3555 cm <sup>2</sup> /g
$MgO$	1,84	<i>Chaleur d'hydratation :</i> 456,60 (j/g)
$SO_3$	2,34	
$K_2O$	0,64	<i>Résistance à la compression (MPa)</i>
$Na_2O$	0,13	7j : 36,74
$P_2O_5$	0,10	14j : 41,07
$TiO_2$	0,23	28j : 45,07
<i>Perte au feu</i>	8,36	

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

## 2.2 Granulats

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

## 2.3 L'eau de gâchage

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

## 2.4 Ajout minéral

- La poudre de verre :

Provenant essentiellement des déchets de verre de vitrage brisé. La poudre de verre est obtenue par broyage des débris ramassés ; le broyage dure 4h de temps (au niveau du laboratoire de département Génie Civil de l'université SIDI AMMAR DE ANNABA).

Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans les tableaux IV.2 et IV.3.

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PAF
%	72,84	0,98	9,66	0,55	0,25	0,43	1,76	12,69	0,04	0,01	0,79

**Tableau IV.2: Composition chimique de la poudre de verre.**

Caractéristiques	
Surface spécifique (cm <sup>2</sup> / g)	2500
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,43
couleur	Blanc grisâtre

**Tableau IV.3 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.**



**Figure IV.1 : La poudre de verre utilisé.**

Six mélanges de bétons sont préparés, la seule variable étant la poudre de verre, la substitution est faite conformément au tableau IV.4.

Mélanges	Ciment	Verre broyé
1 <sup>er</sup> mélange	100%	0%
2 <sup>ème</sup> mélange	90%	10%
3 <sup>ème</sup> mélange	85%	15%
4 <sup>ème</sup> mélange	80%	20%
5 <sup>ème</sup> mélange	75%	25%
6 <sup>ème</sup> mélange	70%	30%

**Tableau IV.4 : Mélange des bétons préparés**

### 3. 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.

#### 3.1 Essais sur granulats

- **Echantillonnage (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'utilisation 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 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 annexe1**).

La courbe granulatoire 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 compact (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulatoire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton.

Les résultats de l'essai pour les granulats utilisés (**Voir annexe2**). Sur la figure IV.2 sont représentées les courbes granulatoires (Sable 0/3 ; gravillons 3/8 et gravillons 8/16).

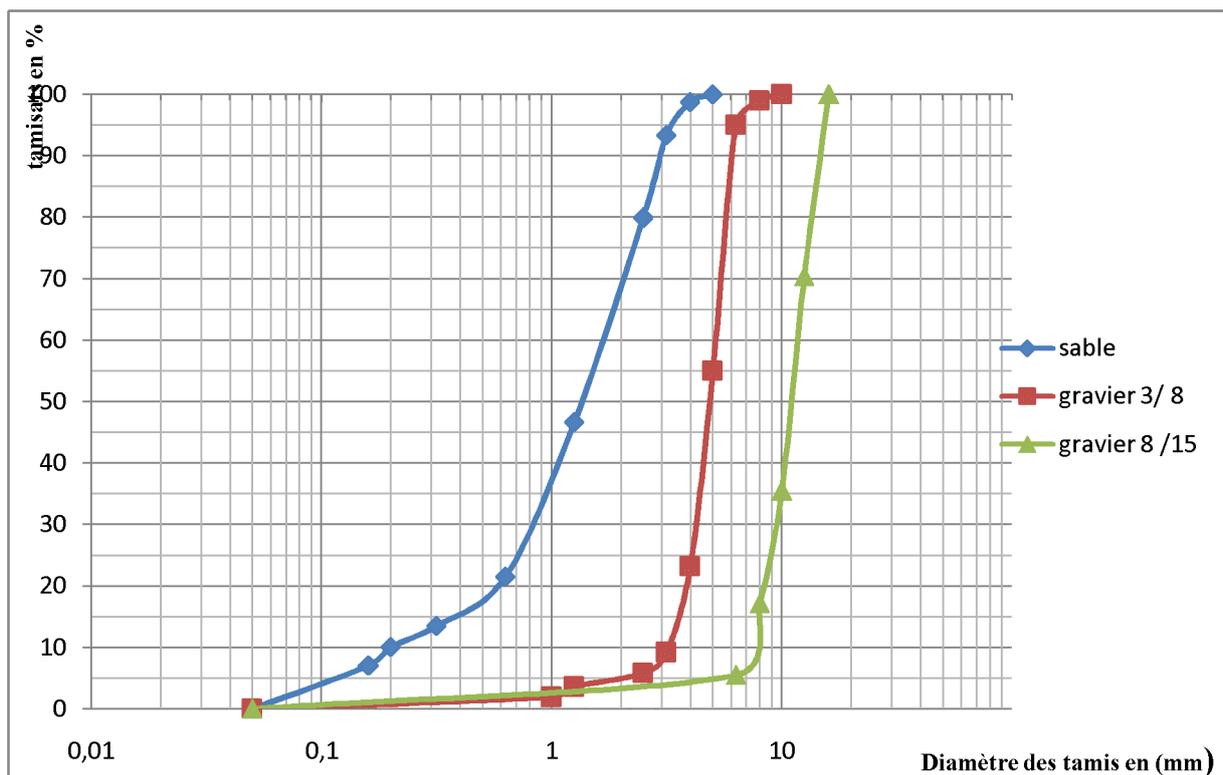


Figure IV.2 : Courbes granulatoires des trois granulats.

- **Masse volumique apparente et absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555) :**

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

Les résultats sont indiqués dans le tableau IV.5.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /16)
Masse volumique absolue ( $g/cm^3$ )	2,6	2,5	2,5
Masse volumique apparente ( $g/cm^3$ )	1,5	1,40	1,34

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

- **Module de finesse du sable (NF P18-304) :**

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 de 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 à 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.6.

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
Module de finesse $M_f$	3,00	$2,8 < M_f < 3,2$ sable grossier
		$2,2 < M_f < 2,8$ sable moyen
		$1,8 < M_f < 2,2$ sable fin

**Tableau IV.6: module de finesse du sable.**

En conclusion, le sable est grossier.

- **Equivalent de sable (NF P18-598):**

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S. exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable.

L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact.

L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C donc une faible valeur de la résistance.

L'essai a donné les résultats présentés sur le tableau IV.7.

Granulats	Sable (0/3)	spécification
Equivalent de sable visuel (ESV) (%)	91,49	70 à 80 pour un sable roulé  > 65 pour un sable concassé
Equivalent de sable sous le poids d'un piston(ES) (%)	90,20	

**Tableau IV.7: valeur de l'équivalent de sable.**

Donc le sable est propre.

### 3.2 Essais sur le ciment

- **Essai 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 (**voir annexe1 pour les détails de la méthode**).

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

- **Temps de prise à 20 °C:**

Il est nécessaire de connaître les début et 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 et 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 repérés pratiques : le début de prise et la fin de prise.

Début	Fin
130 min	235min

**Tableau IV.8: Le début et la fin de prise.**

#### 4. Elaboration des bétons

##### 4.1 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  $\sigma'_{28J}$ .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression  $\sigma_{28J}$  nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

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

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

$$\sigma_{28J} = 25MPa$$

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

$$\sigma'_{28J} = 1,15 \times 25$$

$$\sigma'_{28J} = 28,75MPa$$

• **Dosage en ciment et en eau :**

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

$$R'_{28} = G\sigma'_c \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

$$D'où : \quad \frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{G\sigma'_c} + 0.5$$

$R'_{28}$  : Résistance visée à 28 jours.

$\sigma'_c$  : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment /m<sup>3</sup> de béton).

E : Dosage en eau (Kg d'eau /m<sup>3</sup> de béton ou litre d'eau/m<sup>3</sup> de béton).

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

**Tableau IV.9 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.**

Les granulats utilisés ont un diamètre de 16 mm et sont de bonne qualité, d'où un coefficient granulaire **G=0,45**.

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

Donc Le rapport  $\frac{C}{E}$  vaut :  $\frac{C}{E} = \frac{28.75}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2,00$ .

**Dosage en ciment par 1m<sup>3</sup> de béton :**

Connaissant le rapport  $\frac{C}{E}$  et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, grâce à l'abaque (figure IV.3),  $\frac{C}{E}$  en fonction de A, le dosage en ciment correspond :

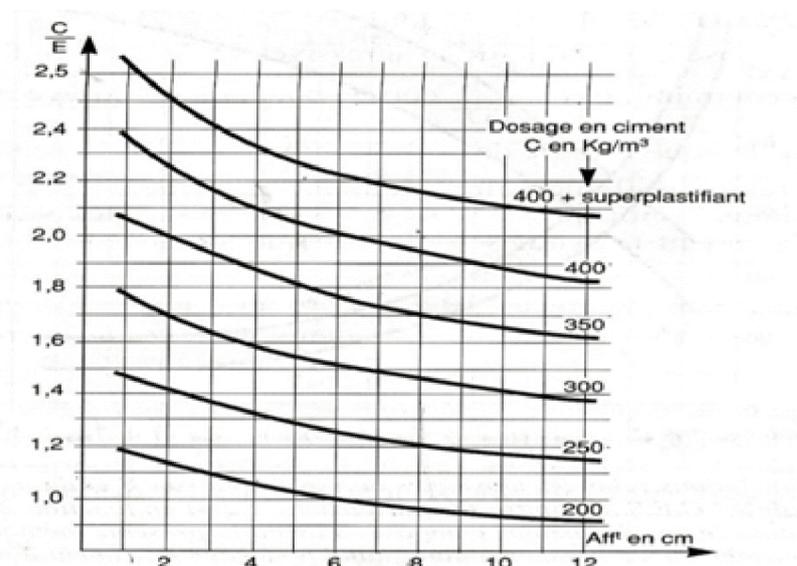
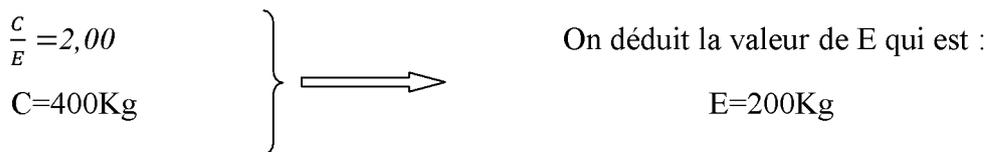
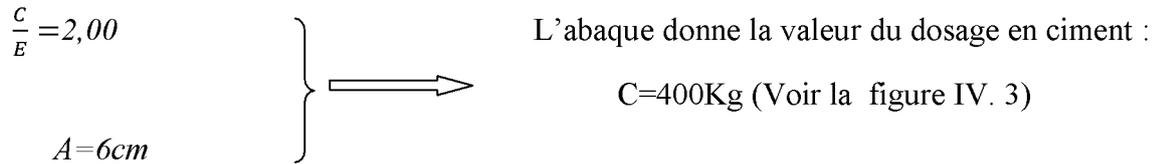


Figure IV.3 : abaque permettant la détermination du dosage en ciment.

• **Tracé de la courbe granulaire de référence :**

Cette courbe correspondant au mélange des granulats sable et graviers.

Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis), déjà obtenu (voir figure IV.4), on trace une courbe granulaire de référence OAB avec :

Le point **O** est repéré par les coordonnées : [0,080 ; 0].

Le point **B** est repéré par les coordonnées : [D ; 100], (D : le diamètre du plus gros granulats).

Le point de **brisure A** correspond aux coordonnées suivantes :

**En abscisse :**

Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse est a  $D/2$ .

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

Le plus gros granulat est de diamètre  $D=16$ mm, donc le point de brisure a pour abscisse :  $D/2=8$ mm.

**En ordonnée:**

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

Avec :

K : coefficient qui dépend du dosage en ciment, de l'intensité de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés.

Dans cette étude, le dosage en ciment vaut  $400 \text{Kg/m}^3$ , la vibration est normale les granulats sont concassés, d'où le coefficient  $K=0$  (tableau 10-12 de [2]).

$K_s$  : Coefficient tenant compte du module de finesse du sable  $M_f$ .

Le module de finesse du sable vaut **3**, la valeur de  $K_s$  est calculée par la formule suivant :  $K_s = 6M_f - 15 = 3$ .

$K_p$ : Coefficient de pompabilité, on prend en générale  $K_p = + 5\%$  à  $10\%$ .

Le béton étudié n'est pas de qualité pompable d'où  $K_p = 0$ .

Donc :  $Y = 50 - \sqrt{16+0+3+0} = 49,00$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure **A** sont :  $[8 ; 49,00]$ .

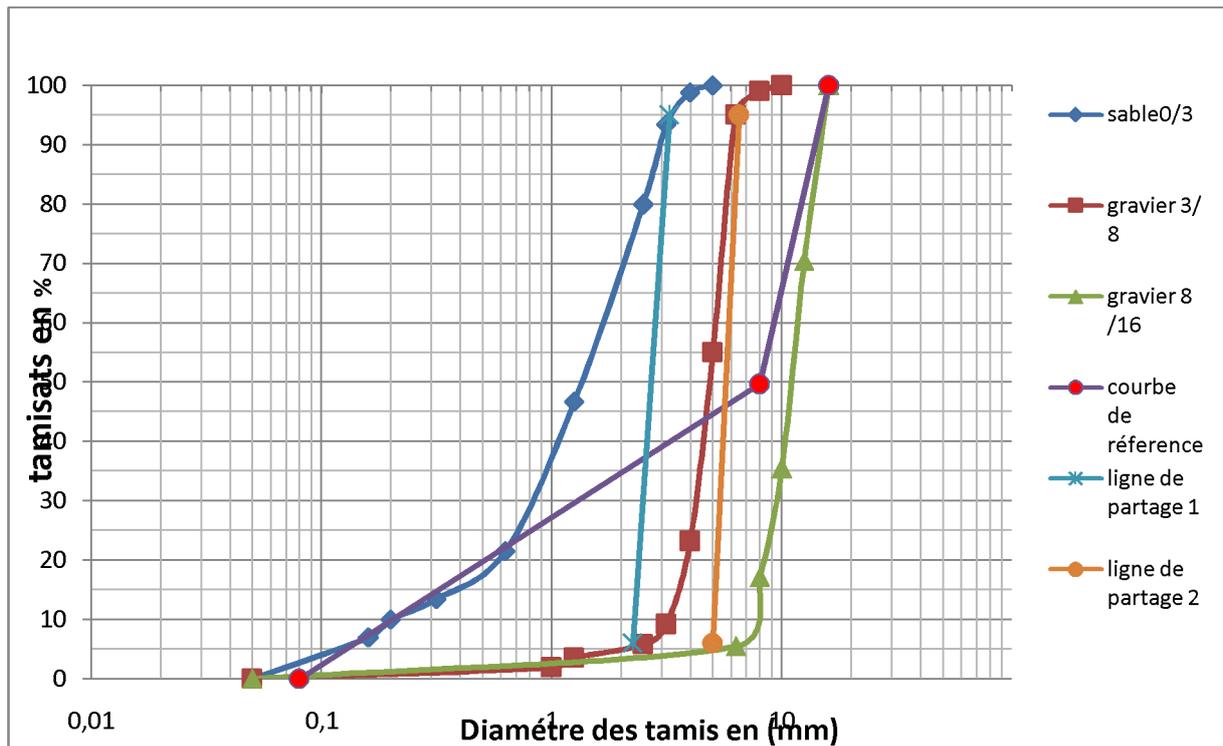


Figure IV.4 : Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage.

- **Les lignes de partage :**

Les droites jointant la point à 95% (tamisât) d'un granulat au point à 5% du granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées **lignes de partage**. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs. Il s'agit de pourcentages en volumes 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) : 38%

Gravier (3/8) : 8%

Gravier (8/16) : 54%

- **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 10 des valeurs du coefficient de compacité [2], et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats à 16 mm, on trouve une valeur de  $\delta = 0,820$ .

D'où  $V_M = V_g + V_c = 0,820 \times 1000 = 820L$ .

- **Dosage des granulats :**

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

**Volume absolu du ciment :**  $V_c = \frac{m_c}{\gamma} = \frac{400}{3,1} = 129,03 L$ .

Avec  $m_c$  : Dosage en ciment (en masse).

$\gamma$  : Masse volumique du ciment.

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

$$V_g = 1000 \delta - V_c = 820 - 129,03 = 691L.$$

**Volume absolu du sable :**

$$V_s = \frac{V_g \times 38}{100} = \frac{691 \times 38}{100} = 262,58L$$

**Volume absolu du gravier 3/8 :**

$$V_{G\ 3/8} = \frac{V_g \times 8}{100} = \frac{691 \times 8}{100} = 55,28 L$$

**Volume absolu du gravier 8/16 :**

$$V_{G\ 8/16} = \frac{V_g \times 54}{100} = \frac{691 \times 54}{100} = 373,14 L$$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour  $1m^3$  de béton sont donnés par :

**Masse de sable :**  $M_s = V_s \times \gamma_s = 683 \text{ kg}$

**Masse de gravier 3/8 :**  $M_{G\ 3/8} = V_{G\ 3/8} \times \gamma_{G\ 3/8} = 138,20 \text{ kg}$

**Masse de gravier 8/16 :**  $M_{G\ 8/16} = V_{G\ 8/16} \times \gamma_{G\ 8/16} = 933 \text{ kg}$

La composition finale du béton ordinaire (de référence) est résumée dans le tableau IV.10

	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	Ciment	E/C
<b>Volume (l/m<sup>3</sup>)</b>	262,58	55,28	373,14	200	129,03	1,550
<b>Poids (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	683	138,20	933	200	400	0,500

**Tableau IV.10 : Composition volumique et pondéral du béton témoin pour 1m<sup>3</sup>.**

#### 4.2 Formulation des bétons avec poudre de verre :

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

L'incorporation de la poudre de verre dans notre béton s'est effectuée par substitution d'une partie du ciment allant de 10% à 30% avec un pas de 5% tout en fixant le rapport E/C à 0,5 pour tous les bétons testés.

Les compositions des différents bétons avec poudre de verre sont résumées dans tableau IV.11.

<b>Composants (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Béton 1 10% de PV</b>	<b>Béton 2 15% de PV</b>	<b>Béton 3 20% de PV</b>	<b>Béton 4 25% de PV</b>	<b>Béton 5 30% de PV</b>
<b>Ciment</b>	360	340	320	300	280
<b>Poudre de verre</b>	40	60	80	100	120
<b>Sable (0/3)</b>	683	683	683	683	683
<b>Gravier (3/8)</b>	138.20	138.20	138.20	138.20	138.20
<b>Gravier (8/16)</b>	933.00	933.00	933.00	933.00	933.00
<b>Eau</b>	180	170	160	150	140
<b>E/C</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

**Tableau IV.11 : Composition des différents bétons avec poudre de verre pour 1m<sup>3</sup>.**

Les compositions des différents bétons sont résumées sur le tableau IV.12.

Composants ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Béton témoin	Béton 1 10% de PV	Béton 2 15% de PV	Béton 3 20% de PV	Béton 4 25% de PV	Béton 5 30% de PV
<b>Ciment</b>	400	360	340	320	300	280
<b>Poudre de verre</b>	/	40	60	80	100	120
<b>Sable (0/3)</b>	683	683	683	683	683	683
<b>Gravier (3/8)</b>	138,20	138.20	138.20	138.20	138.20	138.20
<b>Gravier (8/16)</b>	933	933.00	933.00	933.00	933.00	933.00
<b>Eau</b>	200	180	170	160	150	140
<b>E/C</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

**Tableau IV.12 : Composition des différents bétons pour  $1\text{m}^3$ .**

## IV.2 ESSAIS SUR BETON

### 1. Introduction

Cette étude expérimentale a, 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 ciment par les déchets de verre finement broyés sur les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Pour cela on a fixé le rapport  $E/C = 0.5$  et on a varié le paramètre poudre de verre de 10%, 15%, 20%, 25% et 30%.

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

Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

- Gravier concassé de classe : 3/8 et 8/16
  - Sable concassé de classe : 0/3
  - Ciment CPJ CEMII 42.5 R
- 
- **Les ajouts utilisés :**
    - La poudre de verre.
  - **Bétons élaborés :**
    - Béton ordinaire témoin(BO).
    - BPV1 avec ajout de la poudre de verre (10%C) et  $E/C = 0,5$ .
    - BPV2 avec ajout de la poudre de verre (15%C) et  $E/C = 0,5$ .
    - BPV3 avec ajout de la poudre de verre (20%C) et  $E/C = 0,5$ .
    - BPV4 avec ajout de la poudre de verre (25%C) et  $E/C = 0,5$ .
    - BPV5 avec ajout de la poudre de verre (30%C) et  $E/C = 0,5$ .

Dans ce cadre, ont été confectionnées :

- 18 éprouvettes cylindriques ( $16 \times 32$ )  $\text{cm}^2$ , soit 3 pour chaque type de béton, pour la mesure de la résistance à la compression simple à 28 jours.

## 2. Confection des bétons

### 2.1 Préparation de la gâchée

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 60 litres.

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite 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 malaxeur le sable et la poudre de verre et les foisonner puis mettre le reste des granulats.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange pendant 30 secondes.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage et mélanger pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement et malaxage pendant 2 minutes.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais (**voir la description des essais en annexe 4**).
- Mettre en place les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons témoins et les bétons à base de poudre de verre ont été mis en place par vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (principalement aiguille vibrante et table vibrante).



**Figure IV.5 : Foisonnement du mélange de la poudre de verre avec le sable.**



**Figure IV.6 : Ajout des autres granulats et du ciment au mélange précédent.**

## **2.2 Conservation des éprouvettes**

Après le coulage, les éprouvettes sont laissées à température ambiante au laboratoire et sont démoulées après 24 heures. Par suite, elles sont conservées sous un chiffon maintenu humidifié afin de garantir l'hydratation du ciment jusqu'à l'âge de 28 jours.

### 3. Essais sur bétons

#### 3.1 Essais sur béton frais

- **Essai d'affaissement au cône d'Abrams :**

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer son affaissement (annexe 4). Il faut rappeler qu'est considéré comme plastique, un béton qui a un affaissement compris entre 6 et 9 centimètres.

L'affaissement est mesuré pour les six mélanges de béton préparés, les résultats sont illustrés sur la figure IV.7.

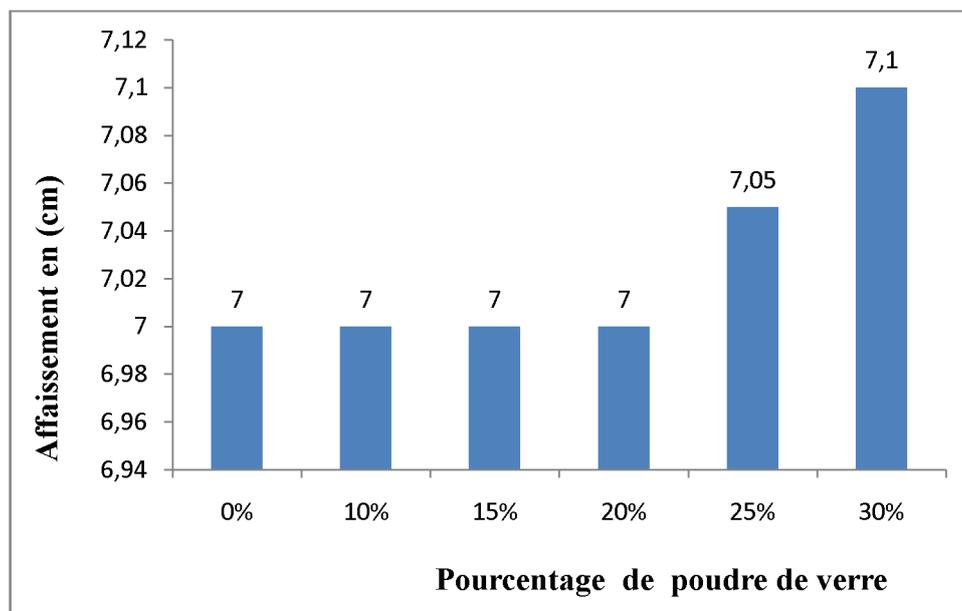


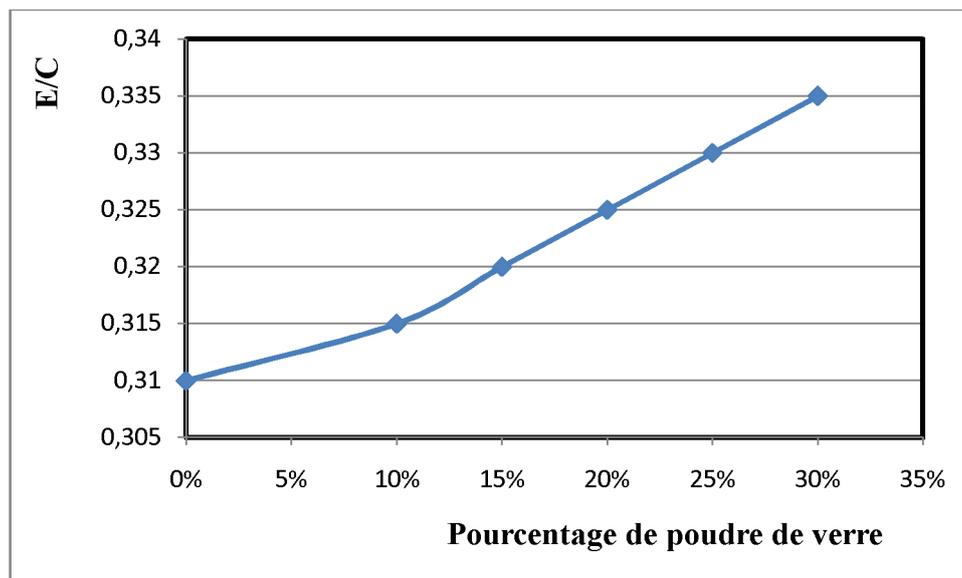
Figure IV.7 : L'affaissement en fonction de la teneur en poudre de verre.

On peut constater que l'ajout de la poudre de verre n'affecte pas mais n'améliore pas la plasticité de notre béton ce qui est dû à la non absorption de la poudre de verre à l'eau de gâchage.

- **Essai de consistance :**

Afin d'étudier l'effet de la poudre de verre ajoutée au ciment sur la consistance, cette dernière est ajoutée avec un pourcentage de 10%, 15%, 20%, 25% et 30%.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.8.



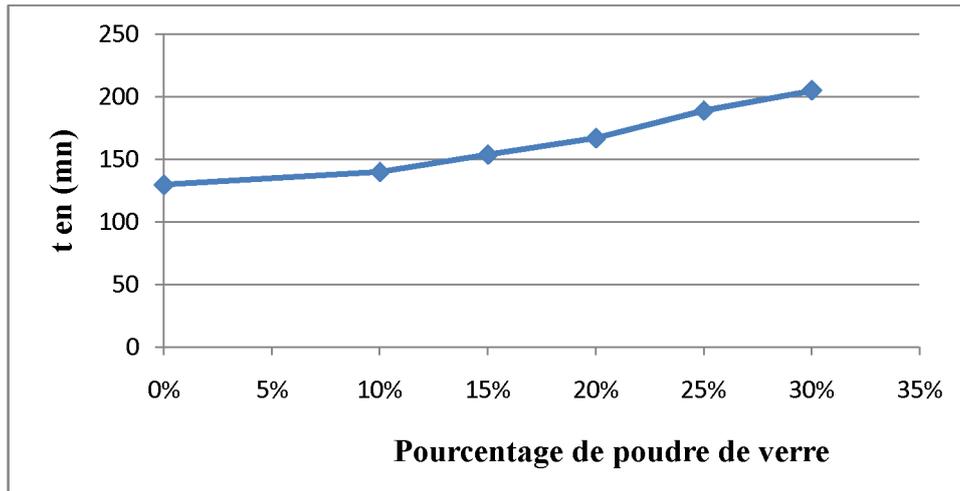
**Figure IV.8 : La consistance en fonction du rapport E/C et la teneur en poudre de verre.**

La consistance normalisée est obtenue pour un rapport de  $E/C = 0.31$ , mais sous l'effet de l'augmentation de la teneur en poudre de verre ce rapport augmente en comparaison avec le ciment témoin, ce qui peut être expliqué par la finesse de la poudre de verre ( $2500\text{cm}^2/\text{g}$ ) qui est inférieure à celle du ciment témoin ( $3555\text{cm}^2/\text{g}$ ), ce qui demande une quantité d'eau supplémentaire pour son mouillage.

- **Le délai de prise**

On garde les mêmes mélanges de consistances normalisés (ciment + poudre de verre), afin de pouvoir évaluer le temps de début de prise de ces différents mélanges.

Les résultats sont représentés sur la figure IV.9.



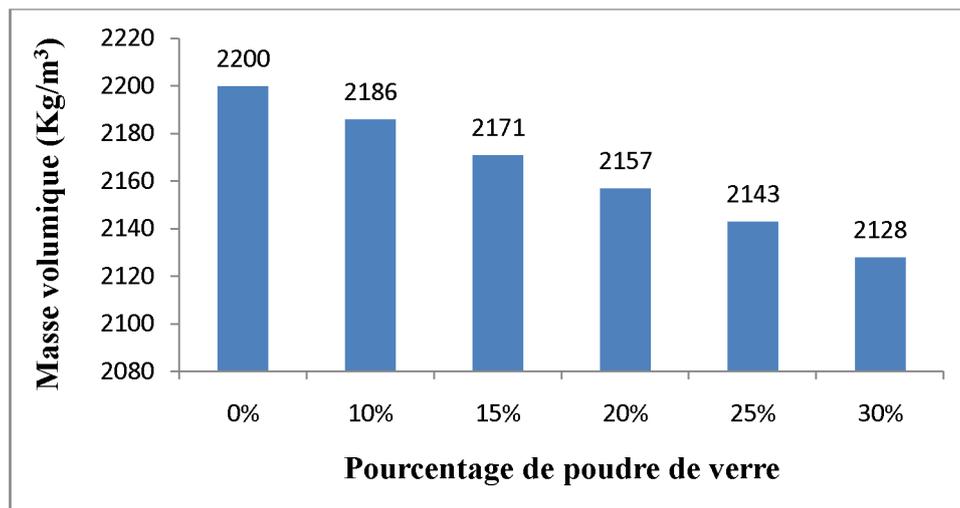
**Figure IV.9 : Le temps du début de prise en fonction de la teneur en poudre de verre.**

Le temps de début de prise augmente légèrement proportionnellement à la teneur en poudre de verre, la surface spécifique du verre a affecté le début de prise et la poudre de verre joue le rôle d'un retardateur de prise.

- **La masse volumique :**

Le calcul de la masse volumique du béton permet la classification des bétons en bétons lourds et en béton légers

Sur la figure IV.10 sont présentées les masses volumiques des différents bétons préparés en fonction des ajouts en poudre de verre.



**Figure IV.10 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en poudre de verre.**

L'augmentation de la teneur en poudre de verre dans le béton, influe sur la masse volumique.

La réduction de la masse volumique d'un béton présentant une poudre de verre de 30% est de l'ordre de 3,27% par rapport au béton ordinaire ; cette diminution est liée à la masse volumique absolue du verre ( $2,43\text{g/cm}^3$ ) qui est inférieure à celle du ciment ( $3,10\text{g/cm}^3$ ).

### **3.2 Essais à l'état durci**

- **Essai de compression uniaxiale (NF P 18-406)**

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (figure IV.11).

On note alors la charge maximale atteinte  $P$  (MN) et la surface de chargement  $S$  ( $\text{m}^2$ ), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

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

L'aire de la section droite est de  $200 \text{ cm}^2 = 0,02 \text{ m}^2$

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques ( $16 \times 32$ )  $\text{cm}^2$ , en utilisant une presse hydraulique de capacité maximale 2000 kN (voir figure IV.11).

La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



**Figure IV.11: Presse hydraulique utilisée pour les essais de compression**



**Figure IV.12 : Eprouvettes après écrasement**

Les résultats obtenus à l'âge de 28 jours sont représentés dans le tableau ci- dessous.

Béton	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)
BO	25,05
BPV 10%	26,87
BPV 15%	28,17
BPV 20%	30,10
BPV 25%	23,48
BPV 30%	23,08

**Tableau IV.13 : Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés**

Les résultats des essais de laboratoire sont représentés sous forme de courbes contraintes-déformations. Chaque courbe représente la courbe moyenne de trois spécimens.

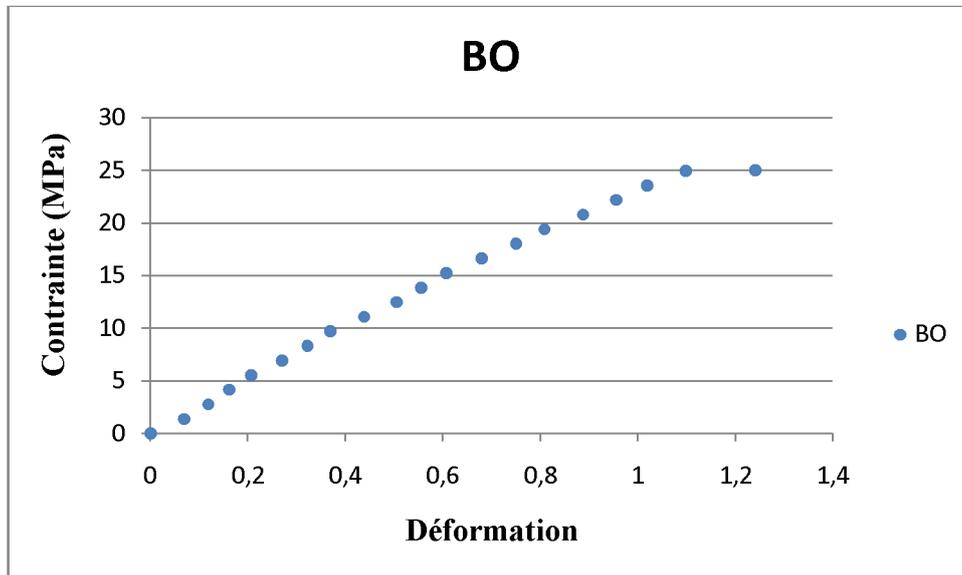


Figure IV.13 : Courbe contrainte-déformation du béton ordinaire

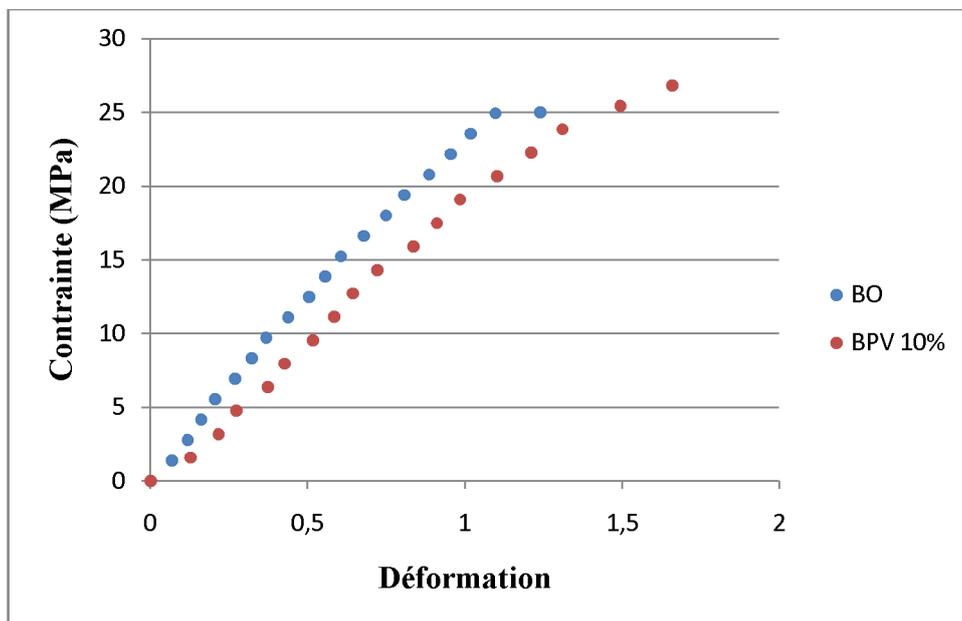


Figure IV.14 : Courbe contrainte-déformation du BPV 10%

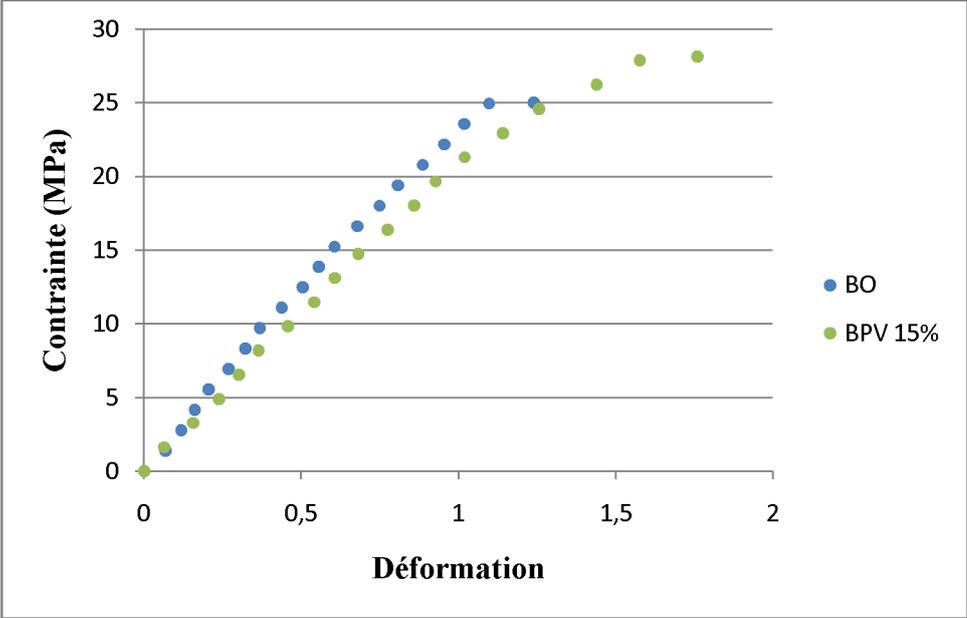


Figure IV.15 : Courbe contrainte-déformation du BPV 15%

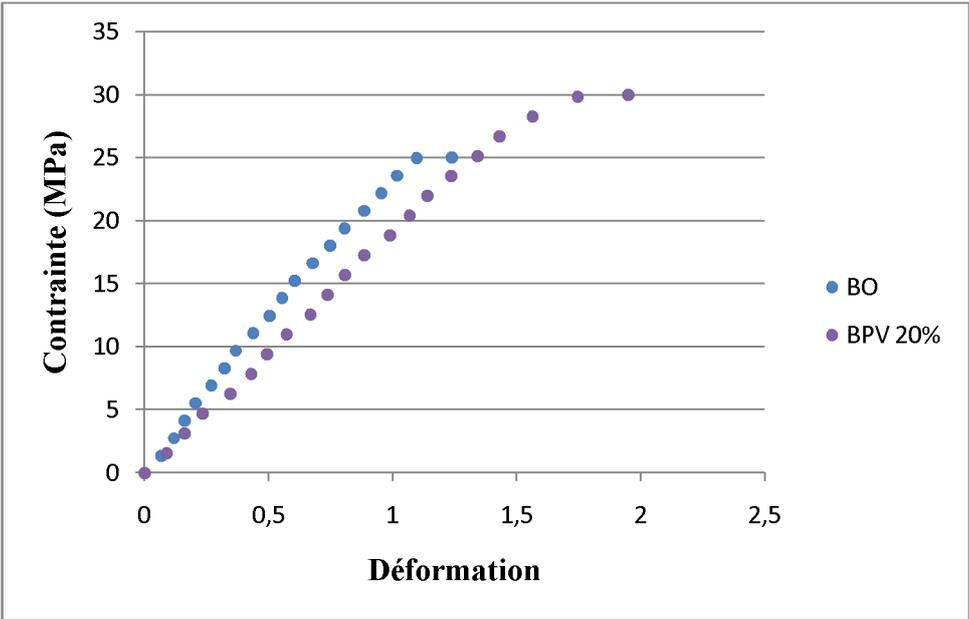


Figure IV.16 : Courbe contrainte-déformation du BPV 20%

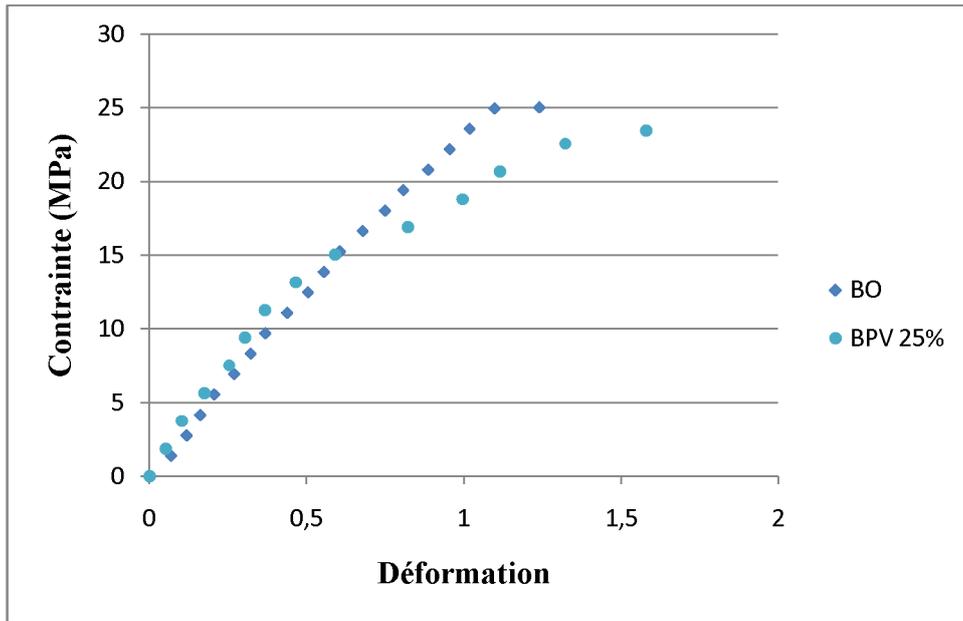


Figure IV.17 : Courbe contrainte-déformation du BPV 25%

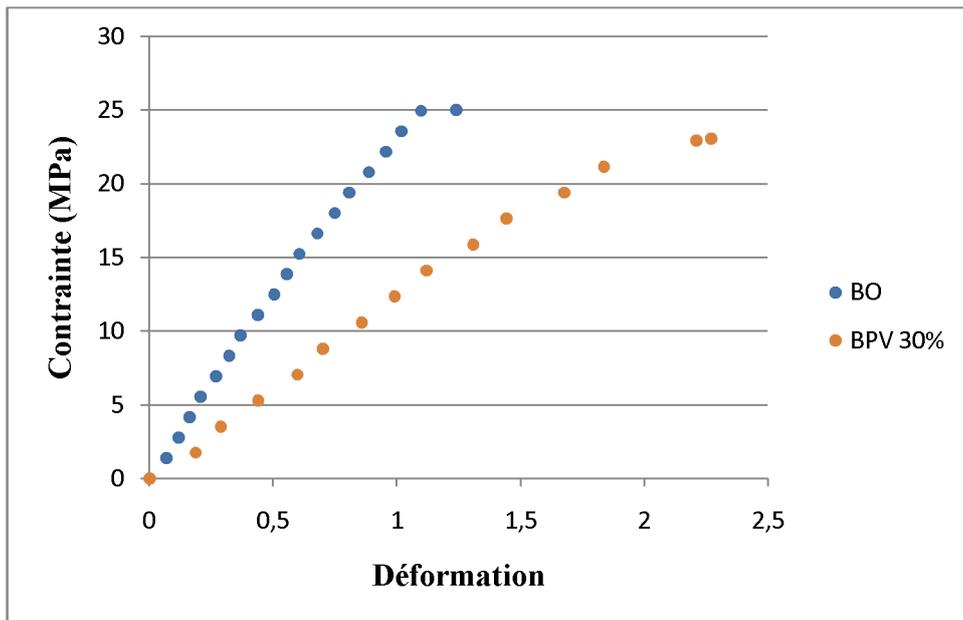
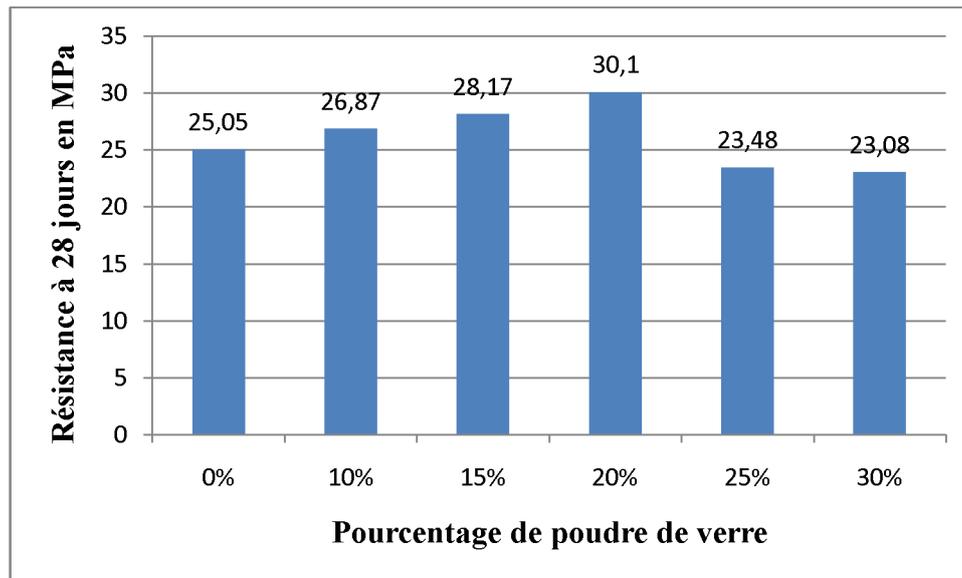


Figure IV.18 : Courbe contrainte-déformation du BPV 30%



**Figure IV.19 : Résistance à la compression des différents bétons étudiés.**

L'ajout de la poudre de verre améliore de manière significative les propriétés du béton.

Pour une addition de 10%, 15% et 20% de poudre de verre, les résistances en compression à l'âge de 28 jours sont nettement supérieures à celles du béton ordinaire. Cette augmentation de résistance peut être attribuée à l'effet chimique de la poudre de verre qui déclenche une réaction pouzzolanique qui lui permet de consommer la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) issue de l'hydratation du ciment et former des Silicates de Calcium Hydratés C-S-H, ce qui rend la structure plus résistante.

Les résultats montrent aussi qu'au-delà de 20% de poudre de verre, la résistance en compression est affectée.

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 bonne résistance mécanique à la compression ( $\approx 26\text{MPa}$ ) à 28 jours.
- L'introduction de la poudre de verre finement broyé, a permis de :
  - \*Formuler des bétons de même ouvrabilité que celle du béton ordinaire.
  - \*Formuler des bétons plus légers que le béton ordinaire.
  - \*Retarder légèrement le début de prise par rapport au béton ordinaire.
- La résistance en compression est considérablement améliorée pour un ajout de 20% de poudre de verre, dues essentiellement à son rôle pouzzolanique.
- Une addition au-delà de 20% de poudre de verre affecte les propriétés mécaniques.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

L'objectif de notre travail est la substitution partielle du ciment par la poudre de verre finement broyé pour la confection des bétons dans le but de les caractériser à l'état frais et à l'état durci. Dans ce contexte, plusieurs formulations des BPV et BO 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 suivie l'évaluation de l'influence de l'ajout (poudre de verre) sur le comportement des BO à l'état frais. Enfin, les performances mécaniques des BPV, ont été comparées en termes de résistance mécanique par rapport à un béton ordinaire.

Les résultats obtenus ont montré que :

- La consistance normalisée est obtenue pour un rapport E/C = 0,31, pour un ciment témoin et croît avec l'augmentation de la teneur en verre.
- Le début de prise est influencé par l'addition de la poudre de verre, il augmente légèrement par l'augmentation de l'addition.
- La masse volumique des bétons avec poudre 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%, 15% et 20% de poudre de verre améliore considérablement la résistance en compression. Cette augmentation est estimée respectivement à 7%, 12% et 20%.
- Au delà d'un ajout de 20% de poudre de verre, les résistances mécaniques sont affectées, on relève une diminution de résistance de 7% pour un ajout de 30% de poudre de verre.

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

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

- L'utilisation de plusieurs couleurs de verre.
- L'utilisation de plusieurs dimensions de verre.
- L'utilisation de verre en association avec un autre déchet qui répond au profil d'un ajout cimentaire.
- L'utilisation des bétons à base de poudre de verre pour la confection d'éléments structuraux.

# Annexes

# Annexe 1

## 1. Analyse granulométrique (EN 933-1 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 de la dimension des grains et la **granularité** qui concerne la distribution 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 (mm)	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 (mm)	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 (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

. Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2

### 1.3 Préparation de l'échantillon

Il faut que l'échantillon analysé soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop important 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 plage :

$$0.2D < M < 0.6D$$

Où D représente la dimension du plus gros granulat en mm et M est 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.

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 tamisats cumulés

TAMISAT : granulats passant à travers le tamis

- Tracé de la courbe granulométrique

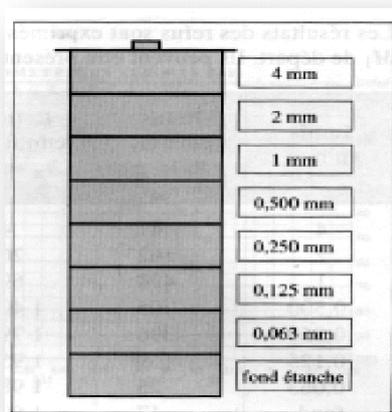


Figure 1.1 : colonne de tamis

## 2. Mesure des temps de début et de fin de prise

### 2.1 Objectif de l'essai

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 et des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: le début de prise et la fin de prise.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT (**figure1.3**) équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que  $d = 4\text{mm} \mp 1\text{ mm}$ , on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

### 2.2 Equipement nécessaire

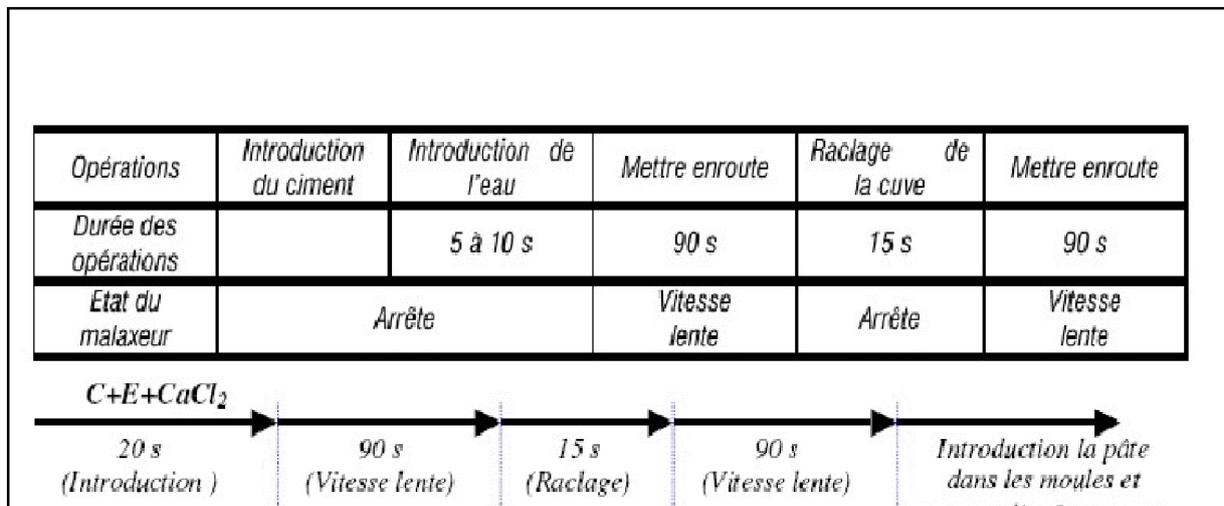
- Salle climatisée: l'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .
- Malaxeur normalisé: avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dite lente : 140tr/mn et rapide : 285tr/mn).
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précis à 0,1 s près.

### 2.3 Conduite de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée: On préparera 2 Kg de ciment, une pâte pure de rapport  $E/C=0,31$ .

Ceci permettra de préparer cinq moules. On versera l'eau dans la cuve du malaxeur, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres,

(Un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).



La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat. Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon puis lâchée sans élan (sans vitesse).

L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance (d) séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~ 10-15 mn) jusqu'à ce que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$ .

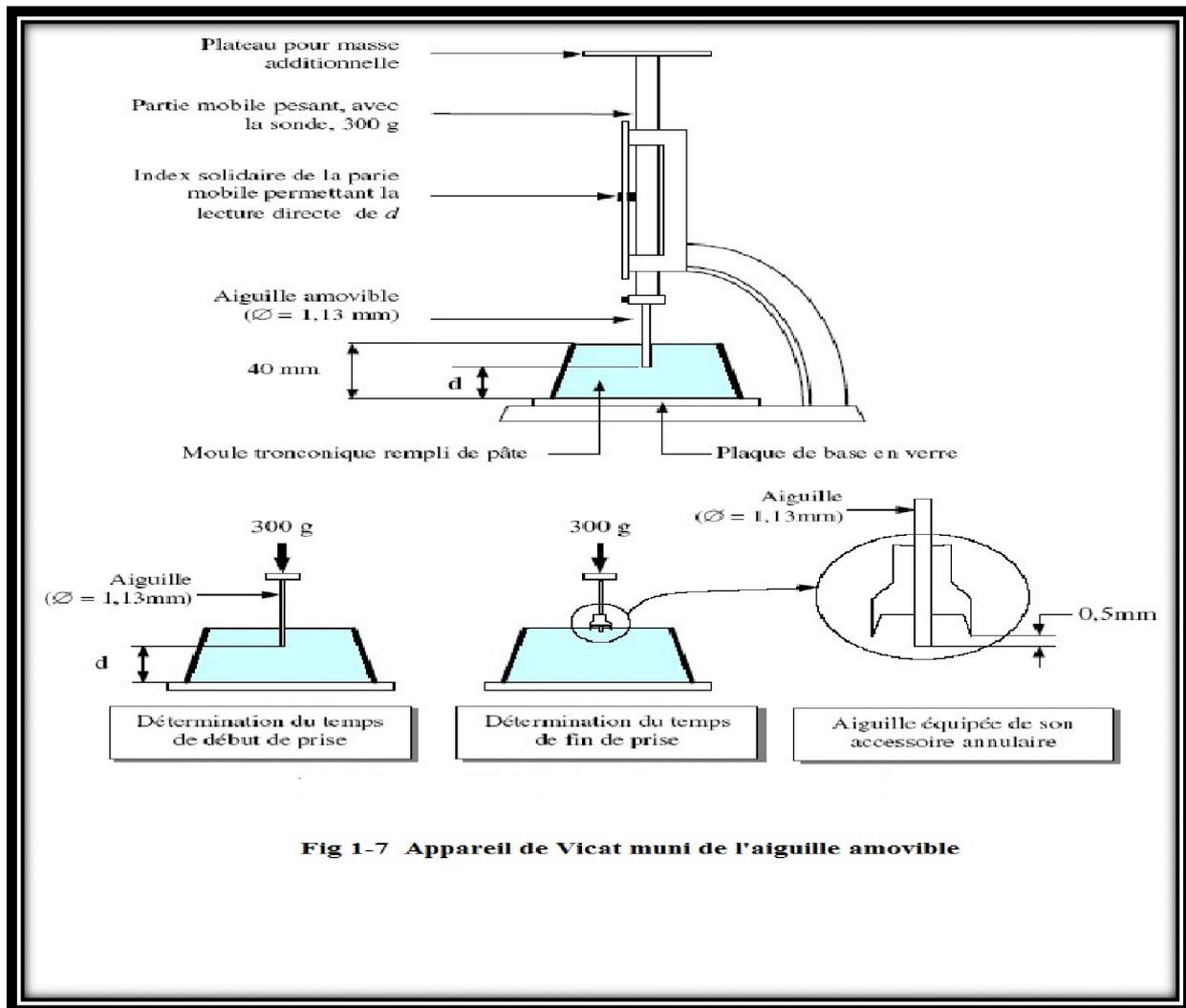


Figure 1.2 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible

### 3. Mesure la consistance de la pâte

#### 3.1 Objectif de l'essai

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance.

1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3.
2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NFP-18 358.

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui est la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite «**CONSISTANCE NORMALISEE**».

### 3.2 Principe de l'essai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

La consistance évaluée de cette manière sera appelée « **CONSISTANCE VICAT** ».

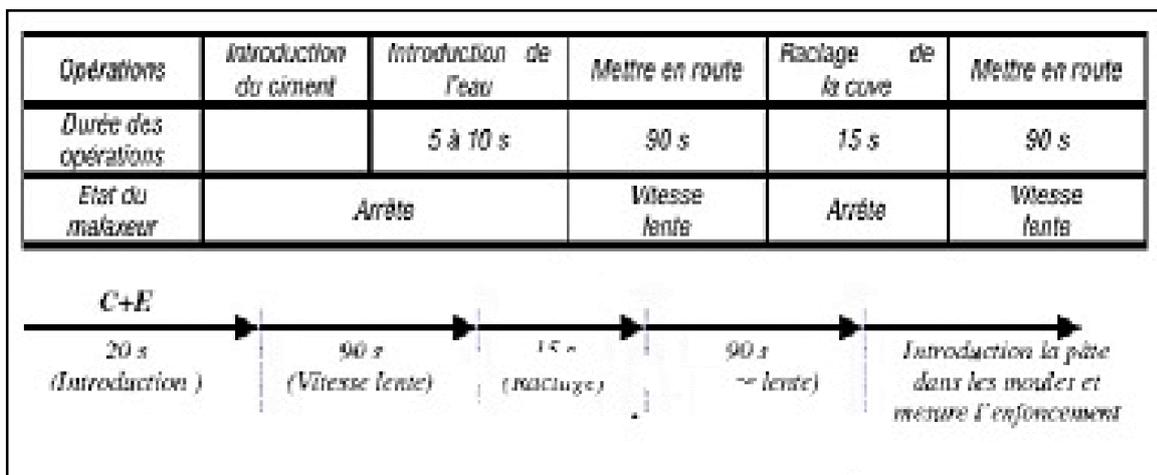
### 3.3 Equipement nécessaire

- Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn) - Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre (**figure 1.3**). La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près. - Un Chronomètre précis à 1 s près.

### 3.4 Conduite de l'essai

500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.



La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat. Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan.

La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance (d) séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

- Si  $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d.  $d > 7\text{ mm}$  ou  $d < 5\text{mm}$ ), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

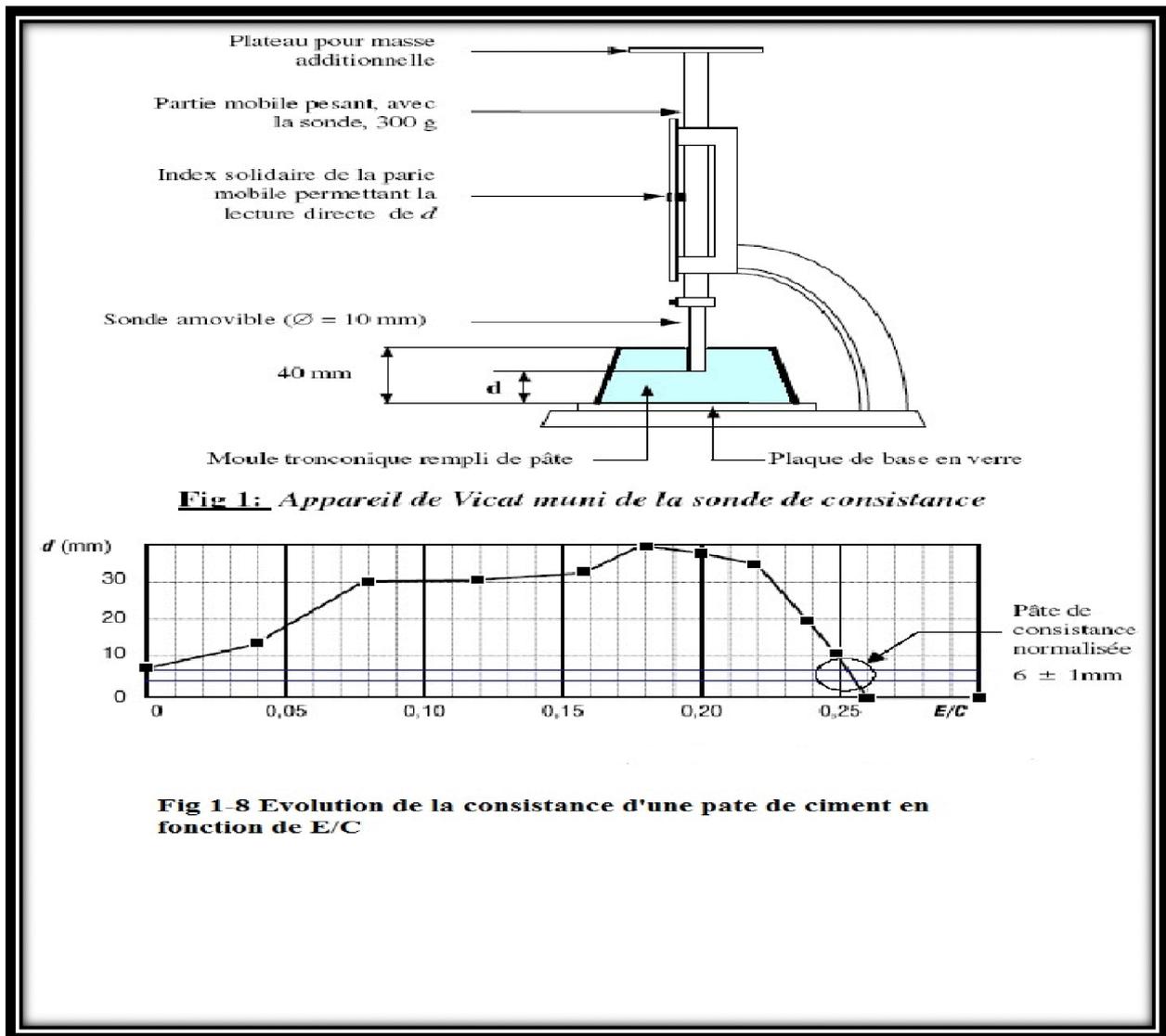


Figure 1.3 : Evolution de la consistance d'une pate de ciment en fonction de E/C

# Annexe 2,

## ANNEXE 2 Résultats des différents essais de caractérisation

**1. Analyse granulométrique (résultats de caractérisation expérimentale des granulats) :** Dans cette annexe sont présentés les résultats de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

<i>Matériau : sable 00/03</i>				
Nature	Gravier concassé 00/03			
Provenance	Carrière de Tiziouzhou			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
<b>Analyse granulométrique</b>				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			<b>M<sub>1</sub></b>	<b>2000g</b>
Masse sèche après lavage			<b>M<sub>2</sub></b>	<b>1500g</b>
Masse sèche des fines retirées après lavage			<b>M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub></b>	<b>500g</b>
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
5	0	0	0	100
4	18.00	18.00	1.20	98.80
3.15	71.00	99.00	6.60	93.40
2.5	202.50	301.50	20.10	79.90
1.25	498.00	799.50	53.30	46.70
0.63	378.00	1177.50	78.50	21.50
0.315	120.50	1298.00	86.53	13.47
0.2	51.50	1349.50	89.97	10.03
0.160	45.00	1394.50	92.97	7.03
0.08	51.50	1446.00	96.40	3.60
fond	50.50	1496.50	99.77	0.23
<b>C : cumulé</b>				

## ANNEXE 2 Résultats des différents essais de caractérisation

<i>Matériau : Gravier 03/08</i>				
Nature	Gravier concassé 03/08			
Provenance	Carrière de Tiziouzou			
Caractérisation faite selon EN 933-1  <b>Analyse granulométrique</b>  Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			<b>M<sub>1</sub></b>	<b>3100g</b>
Masse sèche après lavage			<b>M<sub>2</sub></b>	<b>3000g</b>
Masse sèche des fines retirées après lavage			<b>M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub></b>	<b>10g</b>
Tamis en(mm)	Refus en (gr)	Refus Cen (gr)	Refus Cen (%)	Tamisât C en (%)
12.5	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	30.70	30.70	1.02	98.98
6.3	220.00	250.70	8.36	91.64
5	1224.00	1474.70	49.16	50.84
4	830.00	2304.70	76.82	23.18
3.15	419.50	2724.20	90.81	9.19
2.5	100.70	2824.9	94.16	5.84
1.25	67.70	2892.60	96.42	3.58
1	50.00	2942.6	98.09	1.91
fond	28.90	2971.50	99.05	0.95
<b>C : cumulé</b>				

## ANNEXE 2 Résultats des différents essais de caractérisation

<b>Matériau : Gravier 08/16</b>				
<b>Nature</b>	<b>Gravier concassé 08/16</b>			
<b>Provenance</b>	<b>Carrière de Tiziouzou</b>			
Caractérisation faite selon EN 933-1  <b>Analyse granulométrique</b>  Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			<b>M<sub>1</sub></b>	<b>5010g</b>
Masse sèche après lavage			<b>M<sub>2</sub></b>	<b>5000g</b>
Masse sèche des fines retirées après lavage			<b>M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub></b>	<b>10g</b>
Tamis en(mm)	Refus en (gr)	Refus Cen (gr)	Refus Cen (%)	Tamisât C en (%)
16	0	0	0	100
12.5	1480.00	1480.00	29.60	70.40
10	1750.00	3230.00	64.60	35.40
8	913.50	4143.50	82.87	17.13
6.3	481.00	4624.50	92.49	7.51
5	232.50	4857.00	97.14	2.86
3.15	40.00	4897.00	97.94	2.06
2.5	24.00	4921.00	98.42	1.58
1.25	18.00	4939.00	98.78	1.22
1	10.00	4949.00	98.98	1.02
fond	44.00	4993.00	99.86	0.14
<b>C : cumulé</b>				

# Annexe 3

**MATINE**  
Ciment pour béton exigeant  
CEM II/B 42,5 N NA 442



## FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

### Analyses et caractérisation

#### Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO <sub>3</sub> (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

#### Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C <sub>3</sub> S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C <sub>2</sub> S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C <sub>3</sub> A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C <sub>4</sub> AF (%):	10,00 – 12,00

#### Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

#### Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

#### Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hamim Dalaï, M'sila (ACC)  
Tel: +213.35.50.78.20  
Fax: +213.35.59.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger  
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65  
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)  
BP 67, 29350, Mascara  
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



# Annexe 4.

## **1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams :**

**1.1 Le but de l'essai :** caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

### **1.2 Matériel nécessaire :**

- Plateau équipé d'une plaque métallique plane 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 30cm de hauteur (Cône d'Abrams) dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- Tige de piquetage de 16mm de diamètre.
- Mètre.

### **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 quatre couches piquées avec la tige à raison de 25coups 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.

<b>Consistance du béton</b>	<b>Affaissement (cm)</b>	<b>Serrage nécessaire</b>
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	$\geq 16$	Léger piquage

**Tableau 4.1 : consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.**

# Références Bibliographiques

## Références Bibliographiques

- [1]- Gunning .J.G," concrete technology: level 4 ", Longman technician series, Const & civil engineering, england, 1983.
- [2]- Dreux.G et Festa.J, " Nouveau guide du béton et de ses constituants", édition Eyrolles, 2002.
- [3]- Oliveir.E," Technologie des matériaux de construction", Techniciens de la construction (Tome 1), entreprise moderne d'édition, Paris, 1978.
- [4]- Rissel Khelifa.M , " Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants", thèse de doctorat, 2009.
- [5]- Aitcin.P.C, " l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les bétons à ultra hautes performances", Presses de l'ENPC, 1992.
- [6]- Paillere.A.M, "Les adjuvants", Le béton hydraulique, Presses de ENPC, 1982.
- [7]- Kantro.D.L, "Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – un slump test miniature", Cement Concrete and Aggregate, Vol. 2, 1980.
- [8]- Kara-Ali.R, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", Thèse Doctorat, Université Cergy Pontoise, décembre2002.
- [9]-Chen.W.F, "Plasticity in reinforced concrete", published by McGraw-Hill Bookstore, New York, 1982, 456p.
- [10]- Karsan.P, Jirsa.J.O, "Behavior of concrete under compressive loading", Journal of Structures Div, Vol-95, 1969.
- [11]- Mazars.J, Millard.A, "Comportement dynamique des bétons et génie parasismique", Hermès Sciences, 2004, 390 pages.
- [12]- Exadaktylos.G.E, Vardoulakis.I, Kourkoulis.S.K, "Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - I". Technical Theory. International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, 2001, pp. 4091-4117.

[13] - BAEL 91 modifié 99. "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites".

[14]- Eurocode 2, PAILLÉ.J.M, "Calcul des structures en béton", G12043, 2009.

[15]-Sargin. M, " Stress-strain relation- ships for concrete and the analysis of the structural concrete sections", S.M Study n<sup>o</sup>4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1971.

[16]-Mazars. J, "Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non-linéaire et à la rupture du béton de structure". Thèse de doctorat d'état, Université Paris6, 1984.

[17]- Grelat.A, "Calcul non linéaire des ossatures en béton armé ", Thèse de Docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 1978.

[18]- R.CHAID, R.JAUBERTHIE et A.BOUKHALED.Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons .Lebanese Science Journal.Vol.11.No.1,2010.

[19]- R.CHAID. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006.

[20]-ZEROUB Hamid, "Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (approche expérimentale) ". Thèse de magister, Université de Boumerdes, Février 2012.

[21]-M.VENUAT.la pratique des ciments, mortiers et bétons- tome 1 « caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » édition 2-Collection moniteur .1989.

[22]- Le verre est-il un solide ou un liquide ? Philip Gibbs, octobre 1996.

[23]-M.F.ASHBY et M.F.JONES ?matériaux, propriétés et applications, Paris ,1996.

[24]-MALOU MALIKA, influence de l'introduction des fibres métallique sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, Octobre 2008, thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.

[25]-J.BARTON, C.GUILLEMENT, Le verre : science et technologie,EDP, Juin 2005.

[26]-K.G.NICKEL,S.MERKEL,Mechanisms and Kinetics of silica-rich binary  $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$  glass corrosion in  $100^\circ\text{C}$  water at  $\text{PH}=7$ , Key Engineering,336-338,pp;2007.

[27]-A.PAUL. Chemistry, ED Chapman and Hall, NewYork, 1982.

[28]-H.SCHOLZE. Le verre, nature, structure et propriétés ;Institut de verre, Paris 1980.

[29]- Rachida IDIR «Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Université de Toulouse;2010.

[30]-KOJIMA.T, TAKAGI.N et HARUTA.K.Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles,11<sup>th</sup> international conference on Alkali Aggregate Reaction.Quebec.2000.

[31]-BYARS.E,ZHU.H et MORALS.B.Conglasseerete,the Waste and Ressources Action Programme,Mars 2004.

[32]-SCHWARZ.N,NEITHALATH.N.Influence of a fine glass powder on cement hydration:Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration,Cement and concrete Research.Vol 38;n°4,2008.