

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil



Mémoire

Présenté par

Oukil Youcef
OukilAbdelhak

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : INGENIERIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

**Formulation et caractérisation d'un béton de
sable à partir des déchets minéraux**

Soutenu le 02 / 10 / 2017

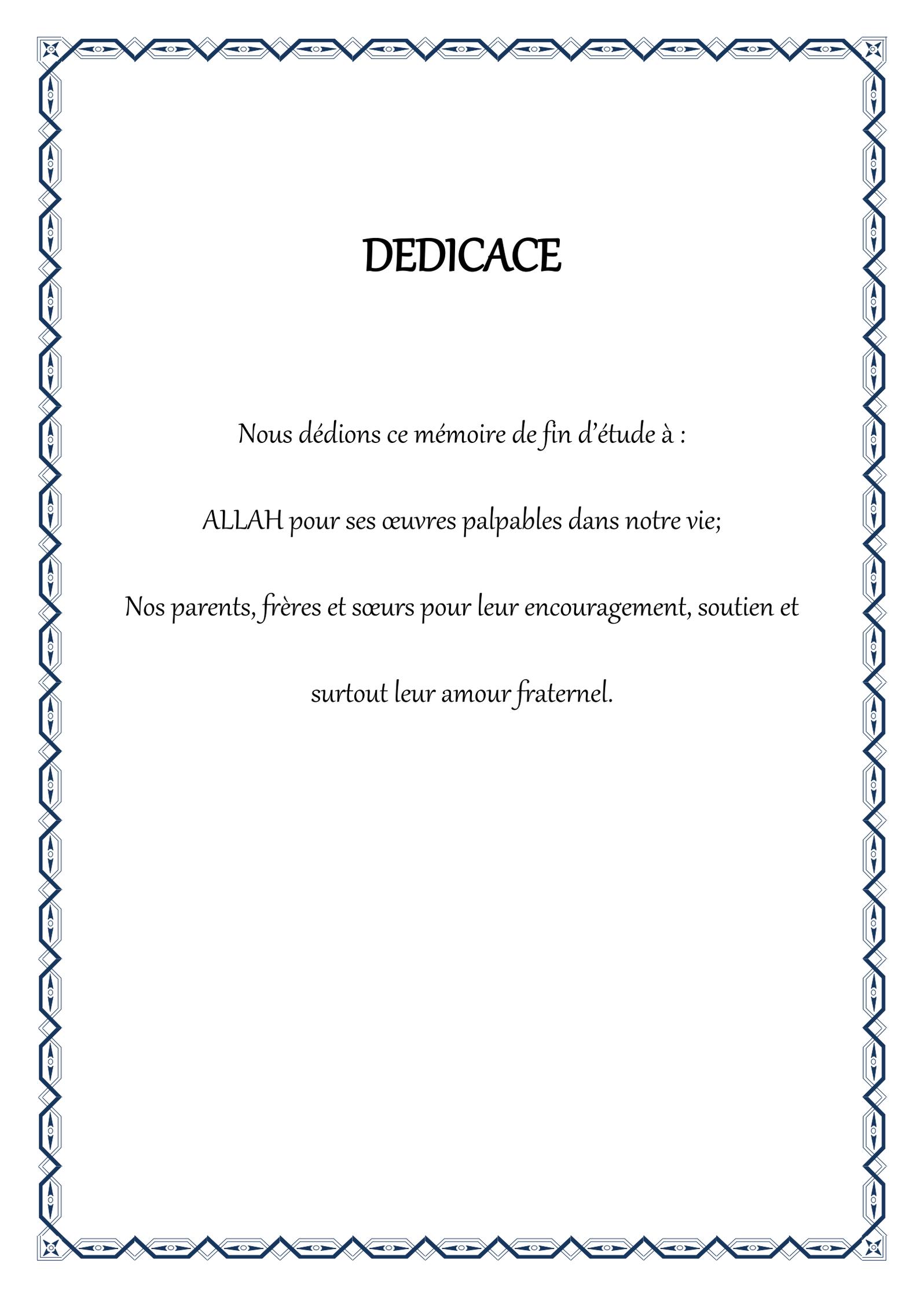
Devant le jury composé de :

Encadré par : Aribi Chouaib.

Président : Aribi Chouaib.

Membres : Mesbouaa. N.

M. Arab.



DEDICACE

Nous dédions ce mémoire de fin d'étude à :

ALLAH pour ses œuvres palpables dans notre vie;

Nos parents, frères et sœurs pour leur encouragement, soutien et

surtout leur amour fraternel.

REMERCIEMENT

Au terme de ce mémoire, je tiens tout d'abord à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon Directeur de mémoire, Monsieur ARIBI CHOUAIB, pour son entière disponibilité, ses conseils et ses directives pertinentes tout au long de cette étude.

Je remercie le chef du département de Génie Civil de BOUIRA, Monsieur KENNOUCHE SALIM pour sa disponibilité.

Je remercie tous les membres de la Faculté de Génie Civil de BOUIRA, du Laboratoire Matériaux en Génie Civil, enseignants et personnels administratifs avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Je ne puis mentionner tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail que ceux qui m'ont aide d'un simple encouragement à un appui continu trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.

SOMMAIRE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE :	1
I. GENERALITE SUR LE BETON :	4
I.1 L'histoire du béton :	4
I.2 Définition :	5
I.3 Les divers stades de fabrication et de vie du béton :	6
I.4 Classification du béton :	7
I.5 principaux avantages et inconvénients du béton :	10
I.5.1 Avantages du béton :	10
I.5.2 Inconvénients du béton :	10
II. ROLE DES GRANULATS DANS LE BETON :	12
II.1 Définition des granulats :	12
II.2 Différents types de granulats :	14
II.3 Production des granulats :	14
II.4 Caractéristiques des granulats :	15
II.5 Caractéristiques essentielles sur les granulats :	21
II.6 Le choix des granulats selon la fonction du béton :	21
II.7 Adéquation granulats-béton :	22
II.8 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés essentielles du béton :	23
II.8.1 Effet de G/S sur le retrait du béton :	23
II.8.2 Influence de grosseur maximale des gros granulats :	24
II.8.3 Influence de la granularité :	25
II.8.4 Influence de l'état de surface des granulats :	26
II.8.5 Influence de la granulométrie du sable :	28
II.8.6 Influence de module de finesse :	28
II.8.7 Influence de l'équivalent de sable :	30
III. BETON DE SABLE :	32
III.1 Définition :	32
III.2 Formulation de béton de sable : problématique.....	32
III.2.1 Approche théorique de la formulation de béton de sable :	33
III.2.2 Approche expérimentale de la formulation de béton de sable :	37
III.3 Autres approches de formulation du béton de sable :	38
III.3.1 Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984 :	38

SOMMAIRE

III.3.2 Approche de J.J.CHAUVIN en 1987 :	39
VI.ADDITIONS MINERALES :	41
VI.1 Types d`additions minérales :	41
VI.2 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons :	41
VI.3 L`utilisation des ajouts en Algérie :	43
VI.3.1 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :	44
VI.3.2 Les inconvénients d`utilisation des ajouts minéraux :	45
VI.4 La poudre de verre dans les bétons :	45
VI.5 Les chamottes :	46
V. FORMULATION ET CARACTERISATION DE BETON DE SABLE :	48
INTRODUCTION	48
V.1 Matériaux utilisés :	49
V.1.1 Ciment	49
V.1.2 L`adjuvant :	49
V.1.3 Sable :	50
V.1.4 Eau de gâchage :	52
V.1.5 Poudre de verre :	52
V.1.6 Chamotte :	53
V.2 La formulation de béton de sable :	54
V.2.1 Les différentes étapes de confection :	54
V.3 Caractérisation mécanique :	57
V.3.1. Essai de flexion :	57
V.3.2 Essai de résistance en compression :	58
V.3.3. Etude de l`activité pozzolanique :	61
CONCLUSION ET RECOMMANDATION	62
CONCLUSION GENERALE :	63
BIBLIOGRAPHIE	64

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau .1 : La teneur des constituants de béton en poids et en volume.....	06
Tableau.2 : Caractéristique des différents types des granulats.....	13
Tableau.3 : Différents types de granulats issus de roches massives.....	14
Tableau .4 :Caractéristiques essentielles sur les granulats.....	21
Tableau .5 : Choix des granulats des bétons.....	22
Tableau .6: Influence des caractéristiques du granulat sur les performances des bétons.....	23
Tableau.7 : Influence qualitative des paramètres d'état de surface sur la facilité de mise en œuvre du béton et l'adhérence pâte –granulat.].....	27
Tableau.8 : Composition théorique et expérimentale du béton de sable.....	38
Tableau.9 : Composition minéralogique de CEM I (CLINKER).....	49
Tableau .10 : Analyse granulométrique de sable de alluvionnaire (SA).....	51
Tableau .11 :Composition pratiques des différentes variantes de béton de sable.....	54

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Figure.1 : Le béton résulte de la combinaison des ingrédients Suivants le ciment, l'eau, le granulat fin et le gros granulat.....	05
Figure .2: Les constituants du béton (Fabrication du béton frais).....	06
Figure .3: Transport et mise en place le béton frais.....	06
Figure .4 : Durcissement finition.....	07
Figure. 5 : différents types des granulats.....	12
Figure.6 : Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons.....	16
Figure.7 : Essai « Équivalent de sable » (SE).....	18
Figure .8 : influence des granulats sur le retrait.....	24
Figure .9 : influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance enCompression du béton à 28 jours d'âge.....	25
Figure .10 : Effets de la granularité sur la résistance du béton.....	26
Figure .11 : la forme anguleuse conduit à un dosage supérieur en eau.....	27
Figure.12 : la forme sphérique conduit une réduction d'eau.....	27
Figure .13: variation de la plasticité et de la résistance en compression en fonction du module de finesse à dosage en eau constant.....	29
Figure.14 : affaissement au cône d'Abrams en fonction du module de finesse.....	30
Figure.15: Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable.....	30
Figure.16 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.....	35
Figure.17 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable.....	36
Figure.18: Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure.19: Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance à la compression.....	42
Figure.20 : Les résistances à la compression obtenues sur des éprouvettes(4x4x16) cm.....	44
Figure.21: MEB d'une poudre de verre.....	45
Figure.22: poudre de verre.....	45
Figure.23 : La chamotte.....	45
Figure.24 : CEM I.....	49
Figure.25 : l'adjuvant SIKA VISCOCRETE 655	50
Figure. 26 : sable naturel alluvionnaire	51
Figure.27 : Courbe granulométrique de sable alluvionnaire (SA).....	52
Figure 28 : les étapes de broyage de poudre de verre.....	53
Figure 29 : les étapes de broyage de chamotte.....	53
Figure.30 : Les différentes étapes de confection	56
Figure.31 :Conservation des éprouvettes 20°C	57
Figure.32 : l'Essai de flexion	57
Figure.33 : Histogramme des essais de flexion.....	58
Figure.34 : Essai de résistance de compression.....	59
Figure.35 : Histogramme des essais de compression.....	60
Figure.36 : Histogramme de l'activité pozzolanique.....	61

INTRODUCTION GENERALE

INRODUCTION GENERALE :

L'Algérie est un pays vaste et riche en qualité de sable, plus de 80% de sa surface est une zone saharienne qui contient des différentes variétés de sable, d'une façon ordinaire, l'utilisation de ce dernier dans le domaine de construction comme un élément nécessaire dans la formulation de béton permet d'assurer certaine critère de compacité, par contre, l'utilisation de sable comme un élément de base pour formuler certain type de béton, dite béton de sable, nécessite l'incorporation des quantités des fines, afin d'assurer les exigences de formulation, soit par approches théoriques qui basés sur la théorie de CAQAUT pour l'empilement compacte , ou soit par approches expérimentales qui basés sur les données des expériences et les méthodes statistiques.

Les objectifs ciblés par l'addition des fines ne s'arrêtent pas par les critères de compacité, mais aussi par les considérations de durabilité et performance. Le travail présenté est cité dans le cadre de valoriser les déchets d'industries minérale tel que le verre et la chamotte, comme des fines d'addition. Sachant que le rôle de compacité est assuré par la finesse, nous cherchons sur des fractions adéquates qui permet d'assurer certaine performance en répandant aux certains critères de durabilité, car ces fines sont théoriquement actives, la poudre de verre constitue des fractions de silice amorphe, et la chamotte contient la pyrite et la silice figée entre 950 et 1050°C, ce permet de supposer l'existence d'une activité hydraulique ou pozzolanique.

Ce travail est divisé en deux partie, une partie de recherche bibliographiques qui présente le matériau de béton et ces éléments de constitution, une bibliographie sur le béton de sable clôture cette partie, une deuxième partie consacré pour la présentation de travail expérimental, en commence par la caractérisation et la préparation de différents éléments qui rentrent dans la formulation de béton de sable. Ensuite, les résultats de caractérisation mécanique des éprouvettes confectionnées sont présentés avec analyse et commentaire afin de tirer les conclusions et les recommandations qui valorisent ce travail.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

I. GENERALITE SUR LE BETON :

I.1 L'histoire du béton :

L'histoire du béton est intimement liée à celle du ciment, qui entre dans sa composition. Mais elle est aussi contemporaine. Le béton a évolué pour devenir le matériau de tous les possibles et insuffler à l'architecture une créativité sans cesse renouvelée.

Du ciment au béton

Le ciment est déjà utilisé dans la Rome antique, mais ce n'est qu'au XIX^{ème} siècle que les Proportions idéales de sa composition sont étudiées. La pratique du moulage de « béton de Ciment » se répand alors très rapidement. Sables et graviers sont ajoutés au ciment et le tout, est ensuite moulé pour obtenir des pierres factices et des imitations des pierres de taille.

L'armature en métal, une idée de jardinier !

Joseph-Louis Lambot, inventeur « officiel » du ciment armé, fabrique en 1845 des caisses pour orangers et des réservoirs avec du fil de fer et du mortier. Joseph Monier propose en 1867 un système de « caisses-bassins mobiles en fer et ciment, applicables à l'horticulture », qu'il perfectionne dans les années suivantes. ;

La maîtrise du béton armé survient quelques années plus tard. François Hennebique dépose en 1892 le brevet qui fait de lui l'inventeur du béton armé. L'Exposition Universelle de 1900 le consacre comme « le plus important entrepreneur de travaux publics en béton armé ». L'aventure du béton dans la construction naît avec le nouveau siècle qui débute.

Un matériau enfin reconnu

En France, la circulaire du 20 octobre 1906 permet enfin au béton armé d'accéder au rang de matériau de construction.

Dès 1897, le béton armé entre à l'École des Ponts et Chaussées et sa technique est enseignée aux futurs ingénieurs... dont Eugène Freyssinet, le « père » du béton précontraint qui dépose un brevet en 1929.

Après la 2ⁿ de guerre mondiale, les besoins de logements développent la « préfabrication » : en France, de 1950 à 1965, le nombre de logements construits chaque année passe de 50000 à plus de 550 000. Le béton est à l'honneur !

Une histoire en mouvement : des bétons toujours plus innovants

La fin des années 1980 voit l'arrivée dans le monde des bétons à hautes performances (B.H.P.) : le béton fibré à ultra-hautes performances (B.E.F.U.P.) ainsi que les bétons autoplaçants (B.A.P.) et autonivelants (B.A.N.),

L'histoire du béton se mêle à celle de Lafarge, acteur pionnier de la recherche, et se poursuit avec la mise au point d'innovations qui libèrent la créativité des architectes.

I.2 Définition :

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 . Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

Le béton est essentiellement un mélange de deux constituants: le granulat et la pâte. Le granulat se compose normalement de sable et de gravier ou de pierre concassée. La pâte se compose normalement de liants (ciment portland avec ou sans ajouts cimentaires), d'eau et d'air. La pâte, agissant comme une colle, durcit et forme une masse qui, du fait de la réaction chimique du ciment et de l'eau, prend la consistance de la roche, pour former ce qu'on appelle le béton (**figure.1**).



Figure.1 : Le béton résulte de la combinaison des ingrédients suivants le ciment, l'eau, le granulat fin et le gros granulat.

Tableau .1: La teneur des constituants de béton en poids et en volume.

Constituants	Eau		Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22		1 – 6	7 – 14	60 – 78
Poids (%)	5 – 9		-	9 – 18	63 – 85

I.3 Les divers stades de fabrication et de vie du béton :

➤ Constituants d'un béton :

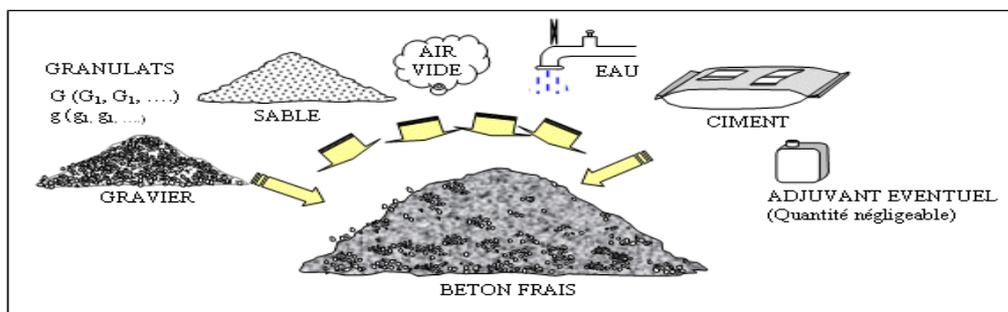


Figure .2: Les constituants du béton (Fabrication du béton frais)

➤ Mise en œuvre :

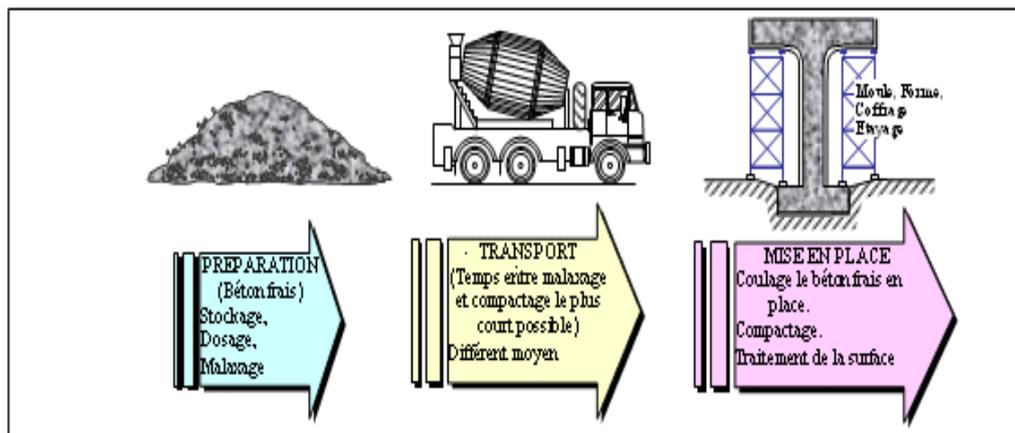
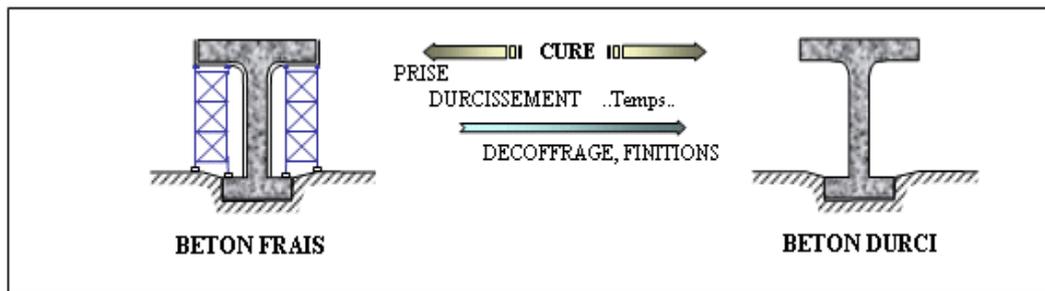


Figure .3: Transport et mise en place le béton frais

Toutes les opérations de mise en œuvre sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène .

Durcissement :**Figure .4 : Durcissement finition**

La condition favorable pour le durcissement d'un béton:

- L'humidité
- La température supérieure à 50 °c.
- Le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

I.4 Classification du béton :

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$.
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),

- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume).

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

a) Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2003 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

b) Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.

c) Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.

d) Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieurs de 500 kg/m^3 . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.

e) Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

Le béton est composé de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Parmi les quatre constituants, les granulats jouent un rôle important, d'une part car ils forment le squelette et présentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton et d'autre part car au point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est le plus cher. En plus, du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées :

- Minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée;
- Bonne étanchéité améliorant la durabilité
- Résistance chimique;
- Résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe: $\frac{2}{3}$ de gros éléments et $\frac{1}{3}$ d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

I.5 principaux avantages et inconvénients du béton :

I.5.1 Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

I.5.2 Inconvénients du béton :

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste quelques inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation).
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

CHAPITRE II

II. ROLE DES GRANULATS DANS LE BETON :

II.1 Définition des granulats :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

fillers ; sablons ; sables ; graves ; gravillons ; ballast ; enrochements.



Figure. 5 : différents types des granulats.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en terme de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

Tableau.2 : Caractéristique des différents types des granulats.

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2mm avec au moins 85% de passant a 1,25 mm Et 70% de passant a 0,063
Sable	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D =50 ou 63 mm

Les intervalles **d/D** et **0/D** sont appelés classes granulaires.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- les fillers ;
- les sables ;
- les gravillons ;
- les graves.

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m³ et léger si elle est inférieure à 2 t/m³. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques.

- Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple :
 - la masse volumique réelle ;
 - l'absorption d'eau et la porosité ;
 - la sensibilité au gel ;
 - la résistance à la fragmentation et au polissage ;
 - la gélivité.

- Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d’exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :
 - la granularité ;
 - la forme (aplatissement) ;
 - la propreté des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l’objet de méthode de détermination adaptée.

II.2 Différents types de granulats :

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

- **Naturel** : d’origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n’ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

Tableau.3 : Différents types de granulats issus de roches massives.

Différents types de granulats issus de roches massives	
Types de roches massives	Exemple de famille de granulats
Roche magmatique Roche éruptive	Granite, rhyolite, porphyre, diorite, basalte, etc...
Roche sédimentaire	Grés, grés quartziques, silex, calcaires, etc...
Roche métamorphique	Gneiss, micaschistes, quartzites, etc...

- **Artificiel** : d’origine minérale résultant d’un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d’une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

II.3 Production des granulats :

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes :

- **Le décapage** : consiste à enlever les terres situées au-dessus de la zone à exploiter.

- **L'extraction :** s'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement :
 - gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague) ;
 - gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs.

- **Le traitement :**

fait suite à l'extraction des matériaux, qui sont concassés et broyés (au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différentes, puis lavés (afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines) ou dépoussiérés et enfin stockés. Les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécifications précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers.

- La remise en état du site a lieu après exploitation.

II.4 Caractéristiques des granulats :

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintes, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

- **Caractéristiques géométriques :**

- **Classe granulaire :**

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire **d/D** (avec **d**: dimension inférieure et **D** : dimension supérieure). L'intervalle **d/D** est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm).

Série de base : 1 / 2 / 4 / 8 / 16 / 31,5 / 63

Série de base + série 1 : 1 / 2 / 4 / 5,6 / 8 / 11,2 / 16 / 22,4 / 31,5 / 45 / 63

Série de base + série 2 : 1 / 2 / 4 / 6,3 / 8 / 10 / 12,5 / 14 / 16 / 20 / 31,5 / 40 / 63

- **Granularité :**

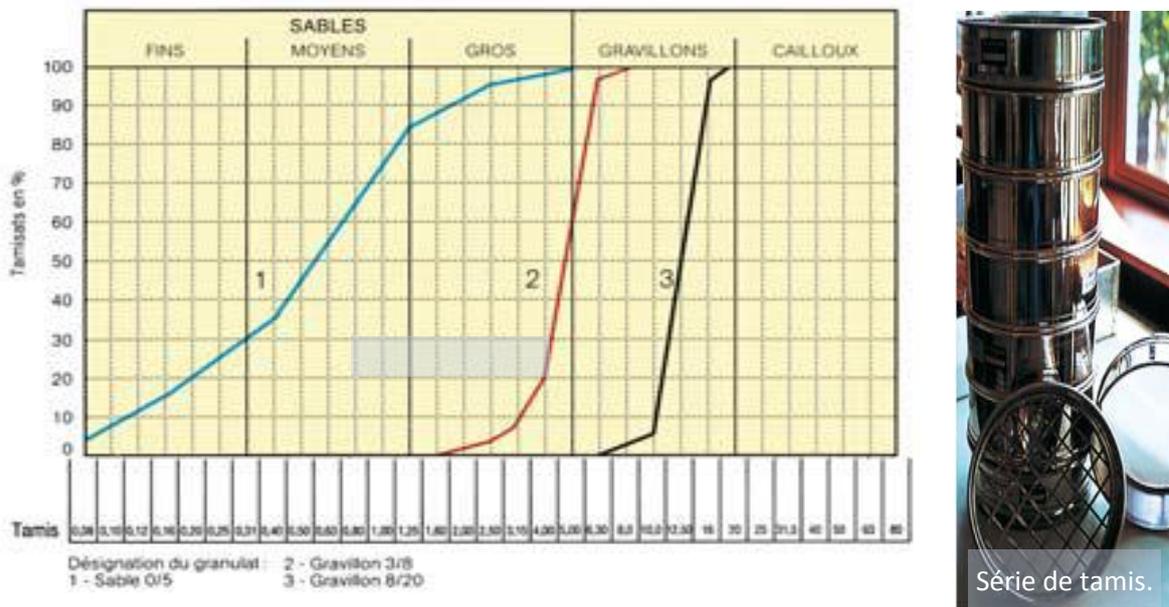


Figure.6 :Exemple de courbes granulométriques d'un sable et de deux gravillons.

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis.

La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant. Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains).

- **Forme des gravillons :** Coefficient d'aplatissement.

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

- **Module de finesse :**

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granula test égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis. Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

- **Caractéristiques physico-chimiques :**

- **Propreté des granulats :**

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).

Dans le cas des sables, la propreté (**SE**) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau. L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de **SE** est grande, plus le sable est propre). Elle peut également être évaluée par l'essai au bleu de méthylène (**VB**) – plus la valeur de **VB** est petite, plus les sables sont propres. Le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer. La valeur de bleu (**VB**) exprime la quantité de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

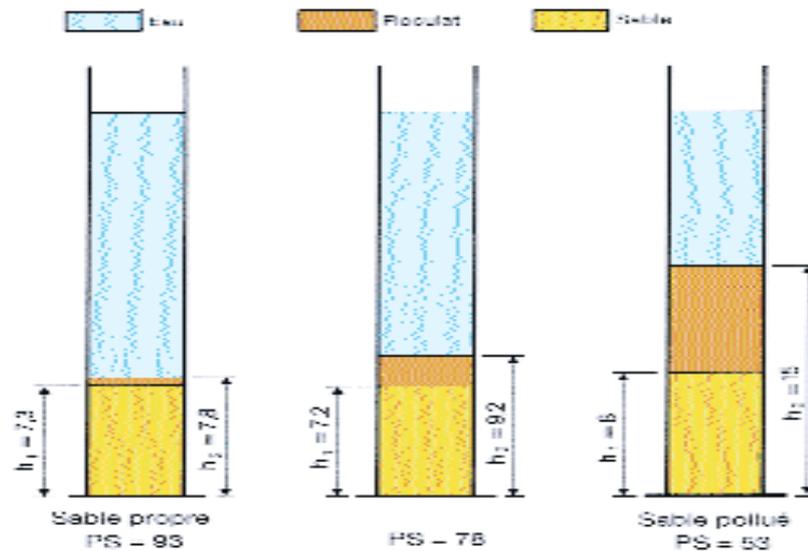


Figure.7 : Essai « Équivalent de sable » (SE)

Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en œuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement.

Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (lignites ou scories) sont à proscrire.

- **Caractéristiques physiques et mécaniques :**

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

- **Résistance à l'usure des gravillons :**

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval **MDE** qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient **MDE** est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

- **Porosité :**

La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

- **Résistance à la fragmentation des gravillons :**

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée.

- **Résistance au polissage des gravillons :**

Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.

- **Coefficient d'absorption d'eau :**

Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

- **Masse volumique en vrac ou apparente :**

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée: de 2500 à 2600 kg/m³.

- **Résistance des gravillons au gel-dégel :**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné).

- **Caractéristiques chimiques :**

- **Teneur en ions chlorures :**

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

- **Réactivités aux alcalis :**

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (**NR**), potentiellement réactifs (**PR**) ou potentiellement réactifs à effet de pessimisme (**PRP**).

- **Teneur en soufre et en sulfates :**

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (**SO₃**) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %.

Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

II.5 Caractéristiques essentielles sur les granulats :

Tableau .4 : Caractéristiques essentielles sur les granulats.

Caractéristiques essentielles sur les granulats	
Forme dimension des grains et masse volumique réelle	Classe granulaires Granularité Forme des gravillons Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau
Propreté	Teneur en éléments coquilliers des gravillons fine
Résistance à la fragmentation ou à l'écrasement	Resistances à la fragmentation des gravillons
Résistance au polissage, à abrasion et à l'usure	Resistances à l'usure des gravillons Résistance au polissage Résistance à l'abrasion
Composition teneur	Chlorure Sulfates solubles dans l'acide soufre totale Constitutions réduisant le temps de prise et la résistance du béton
Stabilité volumique	Stabilité volumique retrait au séchage
Absorption d'eau	Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau
Durabilité face au gel-dégel	Sensibilité des gravillons au gel / dégel
Durabilité face à la réaction alcali-silice	Réaction alcali-silice

II.6 Le choix des granulats selon la fonction du béton :

La variété des usages et fonctions remplies par le béton conduit à adopter des granulats qui, selon le cas, présenteront des caractéristiques d'aspect, de densité et de résistance mécanique différentes. Les granulats les plus couramment employés sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau .5 : Choix des granulats des bétons.

Choix des granulats des bétons			
Nature des bétons ou de l'ouvrage		Natures des granules	Masse volumique des bétons
Béton classique pour chantier ou usine de préfabrication		Tous granules roulés ou concassés avec préférences pour les siliceux, les calcaire ou les siliceux-calcaires	2 200 à 2 400 kg/m ³
Bétons apparents, architectonique		Les même mais aussi les porphyres, basaltes, granites, diorites, qui offrent une palette très riche d'aspect et de teintes	2 200 à 2 400 kg/m ³
Usage routiers		Toutes origines roulés ou concassés	2 200 à 2 300 kg/m ³
Béton légers	Pour structures	Argile ou schiste expansé, laitier expansé	1 500 à 1 800 kg/m ³
	Semi-isolant	Argile expansé, pouzzolane, pouce	1 000 à 1 500 kg/m ³
	Semi-porteur		
	Isolant	Vermiculites, léger, bois, polystyrène expansé, verre expansé	300 à 800 kg/m ³
Béton burds		Corindon, barytine, Magnétite	3 000 à 5 000 kg/m ³
Béton réfractaires		Corindon, déchets de produits réfractaires, granulats spéciaux	2 200 à 2 500 kg/m ³
Béton ou chapes pour dallages industriels		Corindon, carborundum, granulats métalliques	2 400 à 3 000 kg/m ³

II.7 Adéquation granulats-béton :

Les granulats présentent des caractéristiques très différentes selon leur origine. Ces caractéristiques influant sur celles du béton, il importe de bien les connaître et de veiller au respect des spécifications. Le tableau ci-contre synthétise l'influence que peuvent avoir sur le béton un certain nombre de caractéristiques géométriques et physiques des granulats.

Tableau .6 : Influence des caractéristiques du granulat sur les performances des bétons

Influence des caractéristiques du granulat sur les performances des bétons	
Caractère du granulat	Influence sur les bétons
Natures minéralogique	La plupart des granulats conviennent pour le béton. Influences défavorable des argiles des calcaires marneux (gonflement et altération à terme).
Présence de matières organiques	Influence défavorable sur la prise et le durcissement, chute de résistances.
Teneur élevée en sulfates, sulfures, chlorures	Réactions avec le ciment, fissuration, corrosion des armatures.
Propreté des granulats	Critère important. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérences granulats /pâte.
Forme des grains, angularités	Généralement peu importants : Certains sables concassés peuvent parfois êtres défavorables à la mise en œuvre du béton et à sa compacité finale
Granularité	Importante pour la bonne composition du béton.

II.8 Influence des caractéristiques des granulats sur les propretés essentielles du béton :

II.8.1 Effet de G/S sur le retrait du béton :

Pour montrer bien l'effet de G/S sur le retrait du béton on explique le schéma ci-dessus. Soient D1 et D2 les dimensions respectives des gravillons et du sable composant le squelette granulaire du béton.

Le retrait éventuel est le fait que la seule pâte liante qui enserme ces grains. Le retrait se produit donc dans l'épaisseur de la pâte qui lie les granulats deux à deux

Si le sable était le seul granulat, le retrait ΔL sur la distance L serait la somme des retraits affectent les liaisons entre tous les grains de sable rencontrés sur la distance L.

La présence de 2 gravillons sur la distance L (telle qu'elle est représentée sur la figure 8) fait que le retrait n'affectera en réalité que la distance $L-2D1$

Le retrait total en sera diminué d'autant, d'où l'intérêt d'utiliser des granulats de dimension la plus importante possible pour limiter le retrait.

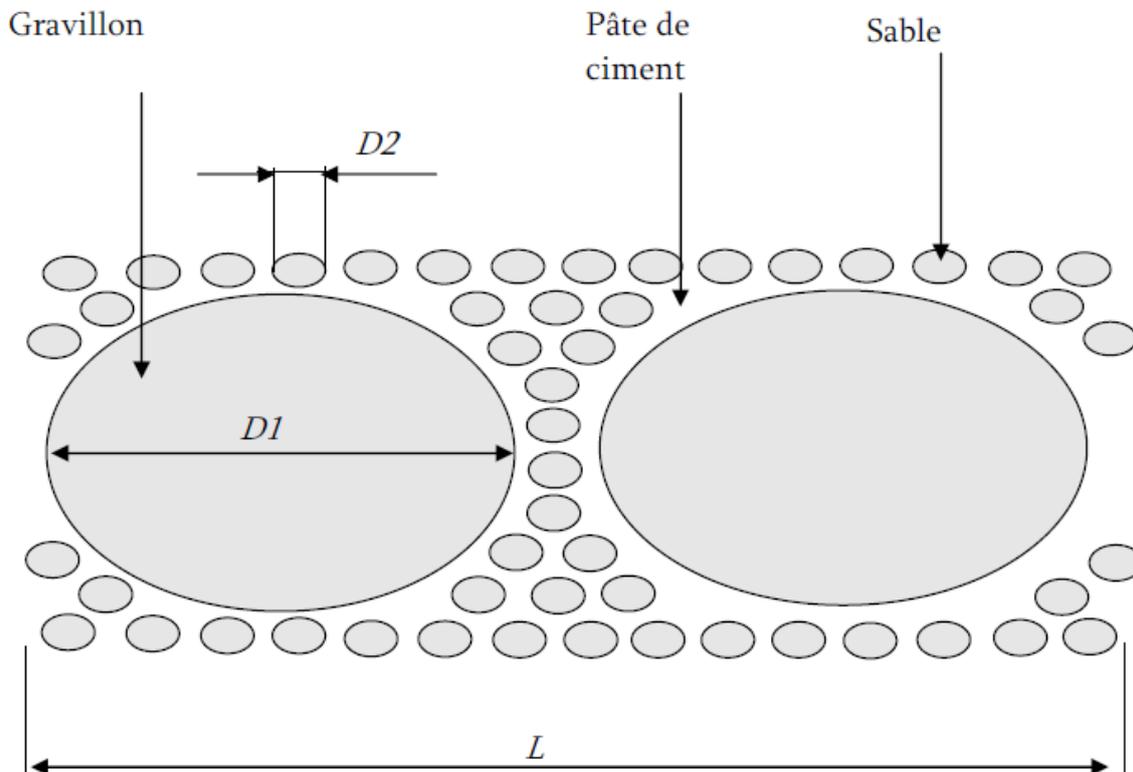


Figure .8 : influence des granulats sur le retrait.

II.8.2 Influence de grosseur maximale des gros granulats :

Le choix de la grosseur maximale des gros granulats dépend de différents facteurs tels que les dimensions des éléments façonnées, le degré de ferrailage, les dispositions de l'armature etc.

Avec l'augmentation de D_{max} des gros granulats la dépense en ciment a diminué de deux fois pour les bétons de même résistance. Donc, dans les conditions considérées l'augmentation de D_{max} accompagnée de la variation de la composition du béton est efficace.

D'après les auteurs des recherches l'accroissement de D_{max} est avantageuse pour les bétons hydrauliques de résistance modérée, car l'abaissement du dosage en ciment mène à la diminution du dégagement calorifique au cours de l'hydratation du ciment et, donc à l'augmentation de la résistance à la fissuration.

Brouks[2] a montré à l'aide de la figure 9 les relations entre les grosseurs maximales des granulats et les résistances à la compression du béton à 28 jours.

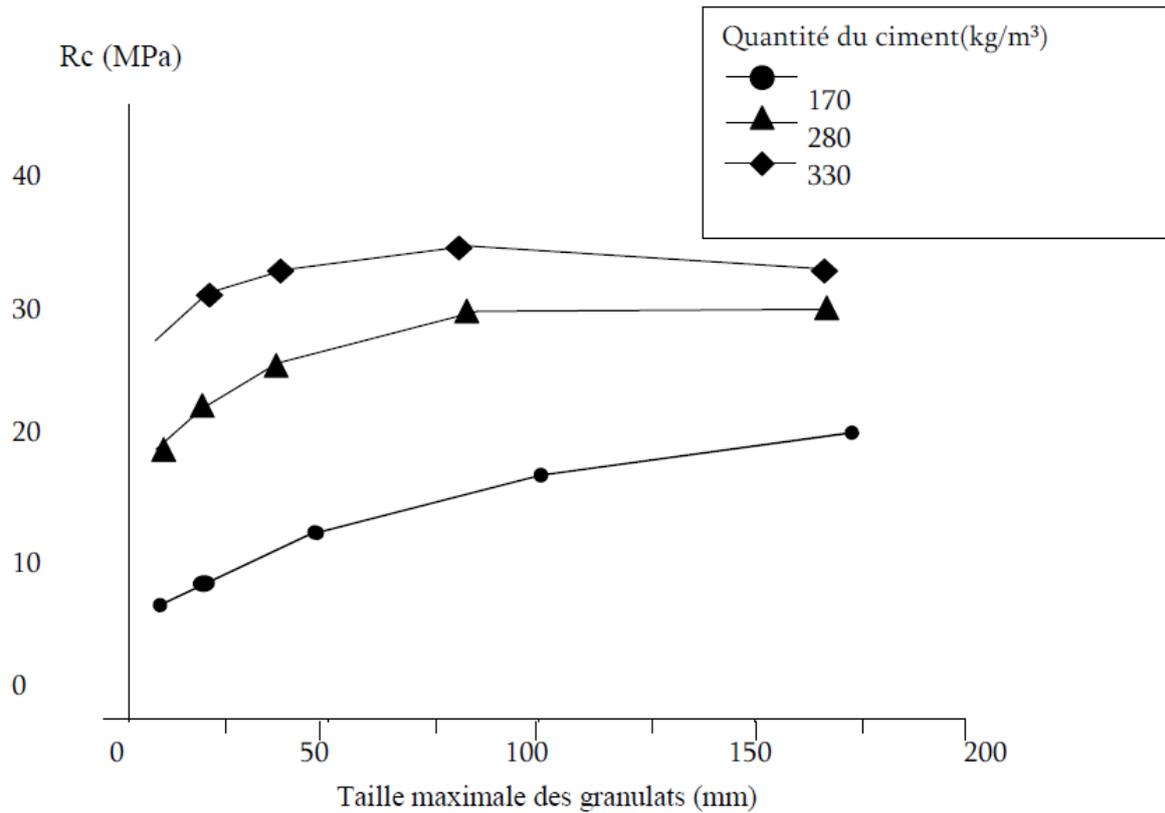


Figure .9 : influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance enCompression du béton à 28 jours d'âge [2]

La présente courbe montre que la résistance en compression du béton dépend de la taille maximale des granulats, alors que l'augmentation de cette dernière augmente la résistance et vice versa. Ceci dit les gros granulats sont les éléments inertes dans la masse du béton.

II.8.3Influence de la granularité :

La figure 10 ci-après donné une idée de l'effet de la granularité sur la résistance du béton à 28 jours [3]

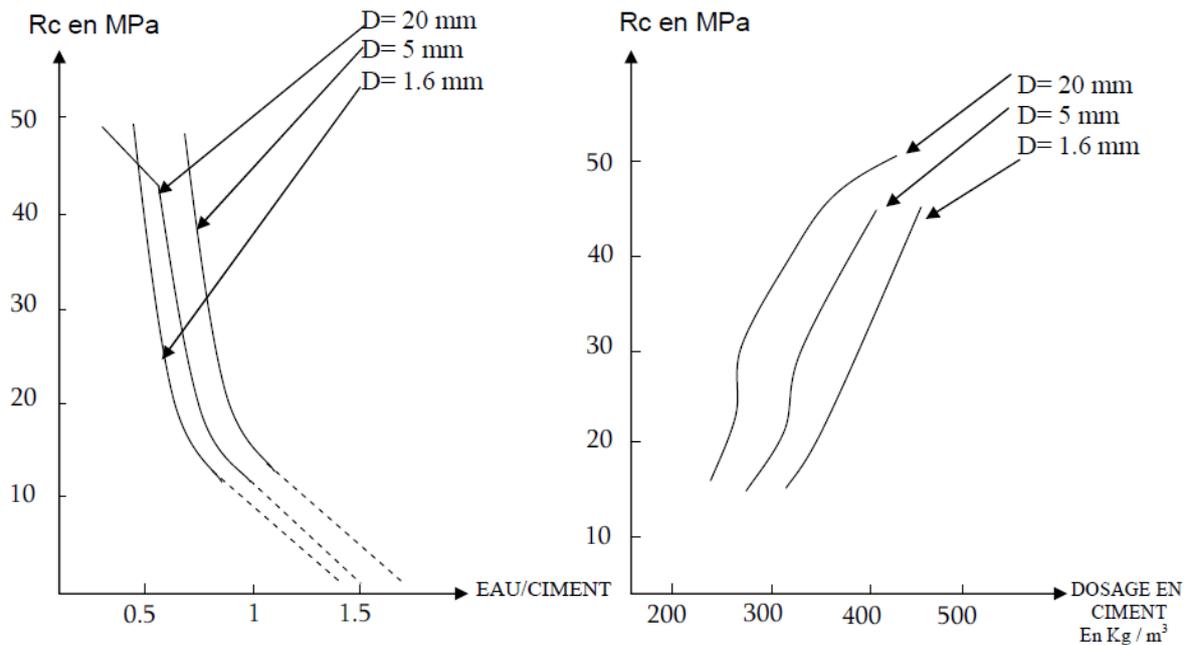


Figure .10 : Effets de la granularité sur la résistance du béton [3]

On remarque sur cette présentation, que l'augmentation de la granularité augmente la résistance. Mais si on fixe le paramètre E/C dans les limites de la plasticité (0.5-1.5) les meilleurs résultats correspondent de granularité moyenne.

II.8.4 Influence de l'état de surface des granulats :

La forme géométrique des granulats influe sur la cohésion entre les grains des granulats et la pierre de ciment, ce qui nécessite donc lors des choix des granulats une large connaissance des paramètres.

La forme et l'état de surface des granulats sont des paramètres selon le quelles on peut choisir le granulat favorable pour la composition du béton.

Quelques chercheurs indiquent le rôle négatif des agrégats lamelleux sous forme d'aiguilles dont l'utilisation diminue la résistance et augmente la dépense en ciment. [4]



Figure .11 : la forme anguleuse conduit à un dosage supérieur en eau [3]

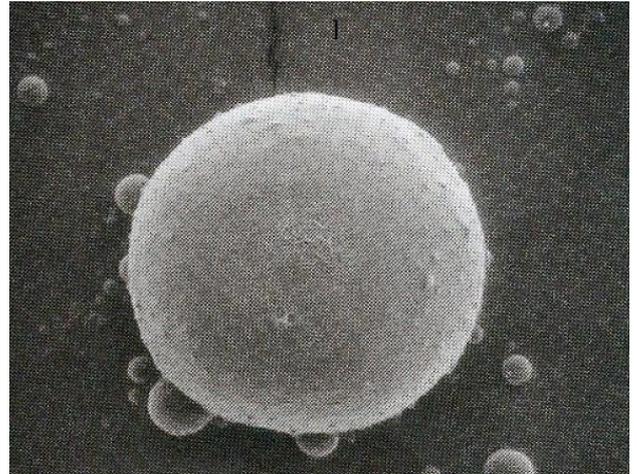


Figure.12 : la forme sphérique conduit une réduction d'eau [3]

Tableau.7 :ci-après récapitule en générale l'influence d'état de surface des granulats sur la facilité de mise en ouvre.

Tableau.7 : Influence qualitative des paramètres d'état de surface sur la facilité de mise en œuvre du béton et l'adhérence pâte –granulat. [1]

Caractéristique des granulats	Mise en œuvre	Adhérence
Mal propreté granulats	Défavorable	Très Défavorable
Granulats roulé (angularité faible on nulle)	Favorable	Défavorable
Granulats concassé (angularité maximale)	Défavorable	Favorable
Forme mauvaise (Granulats roulés)	Défavorable	Défavorable
Forme mauvaise (Granulats concassés)	Défavorable	Très Défavorable

II.8.5 Influence de la granulométrie du sable :

La granulométrie du sable a une grande importance sur la qualité des bétons. Une

Bonne granulométrie du sable permet d'économiser le liant sans réduire la résistance mécanique du béton. La granulométrie du sable doit assurer :

- d'une part un volume minimal des vides entre les grains.
- une surface spécifique minimale des grains.

L'analyse réalisée a été consacrée à la mise en évidence de l'influence de la composition granulométrique du sable sur les propriétés du béton et les mélanges de béton. D'après l'analyse expérimentale on voit que lorsque les intervalles entre les particules de sable sont petites, ils peuvent être remplis partiellement d'air ou d'eau mais ils ne remplissent pas de pierre de ciment. Ce phénomène apaise la résistance au gel et la résistance du béton ainsi que son étanchéité. [5]

Quand on utilise le sable avec une grande teneur en grains fins (de dimensions 0.15 à 0.6 mm) les boules sableuses non imbibé de pâte de ciment se forment.

Les grains de sable dont les dimensions s'approchent de celles du ciment jouent en réalité le rôle d'adjuvants minéraux actifs ou inertes en fonction de leur composition

Minéralogique et du régime de durcissement.

Le sable dont les dimensions dépassent 50 μ peut être considéré comme un vrai agrégat. On recommande de séparer les fractions inférieures à 0.15 mm en deux ou trois fractions ; par exemple :

- la fraction 0 à 50 μ
- la fraction 50 à 100 μ
- la fraction 100 à 150 μ

II.8.6 Influence de module de finesse :

La figure 13 montre les variations de la plasticité et de la résistance d'un béton en fonction du module de finesse à dosage en eau constant.

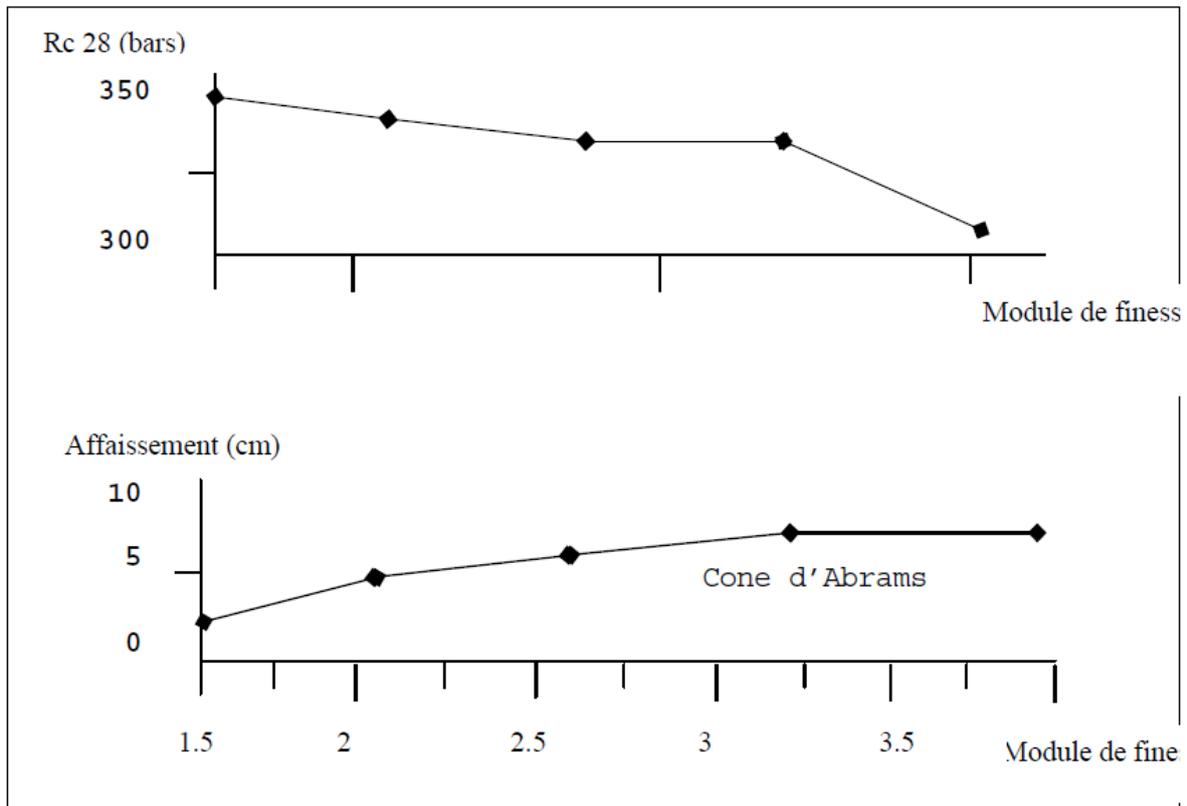


Figure .13: variation de la plasticité et de la résistance en compression en fonction du module de finesse à dosage en eau constant [5]

La figure 14 explique approximativement l'effet du module de finesse sur l'affaissement [6]

La figure 14, montre que la variation d'affaissement au cône en fonction de module de finesse, est liée également par les dimensions des granulats. Sachant que le module de finesse d'un bon sable est compris entre 2,2 à 2,8.

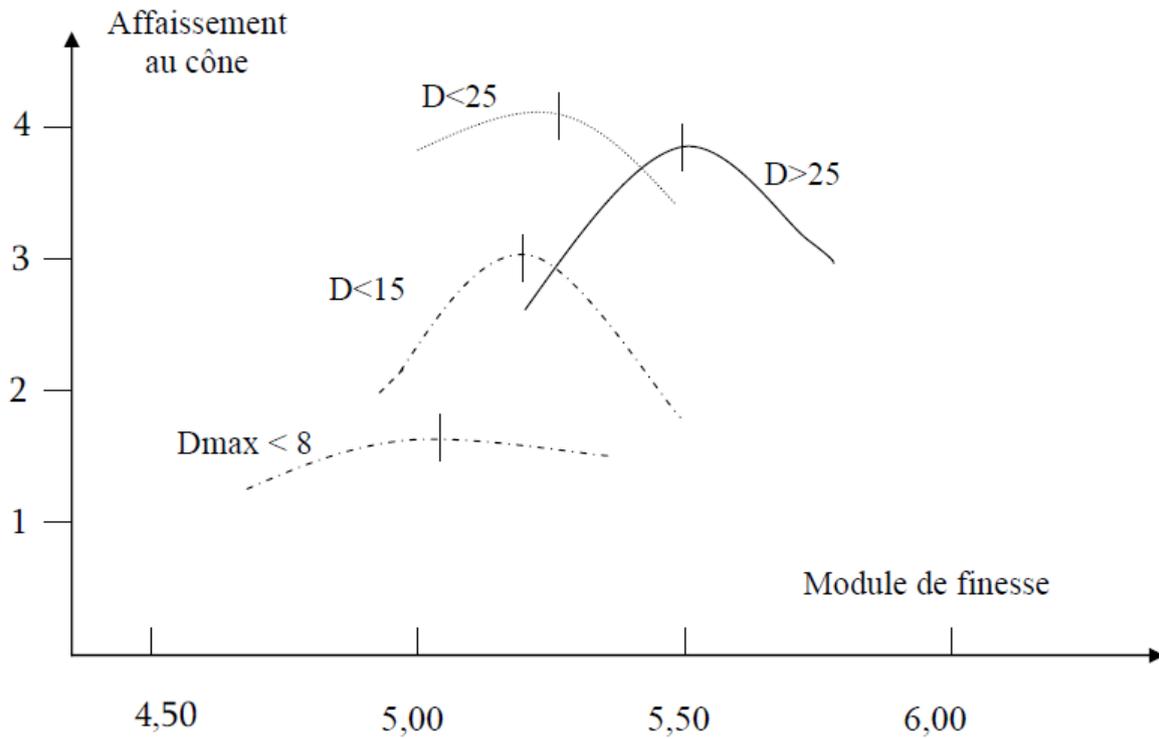


Figure.14 : affaissement au cône d'Abrams en fonction du module de finesse [6]

II.8.7 Influence de l'équivalent de sable :

La figure 15, montre bien que les valeurs favorables de l'équivalent de sable (E.S) pour un béton résistant, se trouvent dans l'intervalle entre 75% et 85%.

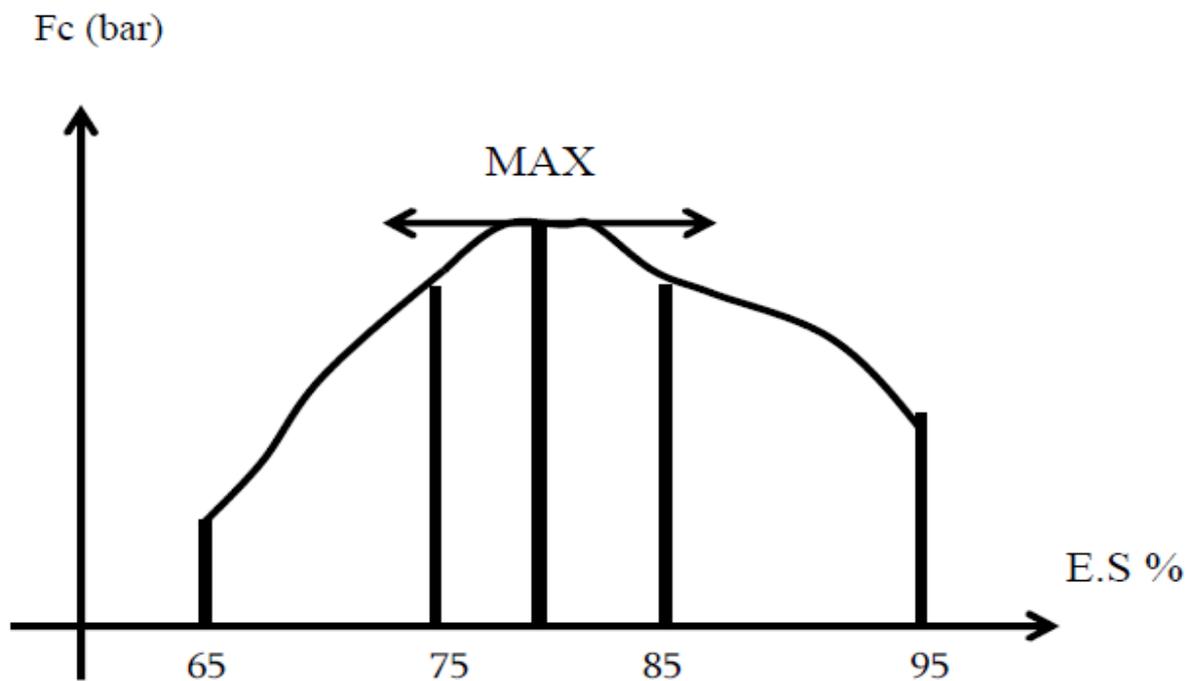


Figure.15: Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable [7].

CHAPITRE III

III. BETON DE SABLE :

III.1 Définition :

Un béton de sable est un béton fin constitué par un mélange de sables, de ciments, d'additions et d'eau ; et éventuellement des adjuvants. Pour répondre aux besoins de certains usages, des ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, colorants...

Un béton de sable chargé est un béton de sable comportant un ajout de gravillon avec un rapport gravillon (G) / sable (S) est inférieur à 0,7 ($G / S < 0,7$)

Par sables on entend tous granulats 0/D (plus gros grains) conformes aux définitions des normes en vigueur ; soit un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. D est inférieur ou égal à 4mm. Mais on peut admettre l'emploi d'un granulats à granulométrie continue de 0mm jusqu'à 8mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 4mm et les éléments inférieurs à 4mm reste inférieur à 0,7.

III.2 Formulation de béton de sable : problématique.

L'étude de formulation consiste à trouver le mélange optimal qui répond aux critères techniques et économiques fixés dans la norme. Compte tenu de la granularité de ce matériau, les méthodes utilisées pour la formulation du béton usuel qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence ne sont pas applicables. Par conséquent, la formule de Caquot est adoptée car elle donne la porosité minimale théorique du béton à partir de l'étendue granulaire du matériau. D'ailleurs, cette formule est la base des méthodes de formulation des bétons de Bolomey, Faury et Dreux. Selon Caquot, la porosité minimale se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume piégé[8], selon la formule suivante :

$$(e + v)_{\min} = 0.8 (d/D)^{0.2}$$

Où : d/D est l'étendue granulaire y compris les fines.

La différence entre un béton classique et un béton de sable réside principalement dans la granulométrie. L'optimisation de la compacité en relation avec la granulométrie obéit à certaines règles : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros. Dans le béton classique, on parle des éléments les plus gros (10 à 20 mm) ils créent macrolides que l'on peut remplir par les sables et les vides du sable par des fines. Ici ces sont du ciment, presque la quantité nécessaire de ciment pour assurer que la résistance coïncide

avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle

$$C = 550/\sqrt[5]{D} \quad \text{Ou} \quad C = 700/\sqrt[5]{D} \quad \text{selon l'usage du béton}$$

Lorsque la valeur de D diminue (≤ 6 mm), et c'est le cas du béton de sable, le dosage en ciment devient très élevé (> 400 kg/m³). En effet, les vides d'un sable sont plus petits, plus nombreux et, globalement, plus importants que ceux d'un granulat d/D ($D > 6$ mm). Il faut donc davantage de ciment pour les remplir : techniquement et économiquement cette règle n'est plus applicable ; il n'y a plus concordance entre dosage en fine et en ciment. Dans le cas du béton de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels. Dans ces conditions, la règle en $\sqrt[5]{D}$ peut encore s'appliquer, en première approximation, non plus au dosage en ciment seul mais à l'ensemble : ciment + fines.

Cet aspect est pris en compte dans les normes actuelles qui introduisent la notion de liant équivalent $C + k_1 A$ ou

C : est le dosage en ciment

A : le dosage de l'addition en fines et

k_1 : un coefficient de prise en compte de la nature de l'addition On peut ainsi parler, non plus de E/C (rapport eau /ciment), mais de $E/(C+k_1A)$

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 kg/m³

La méthode utilisé pour la formulation du béton de sable est basée sur deux types d'approche : une approche théorique qui constitue une base de formulation de béton de sable, et une approche expérimentale basée sur la réalisation de plusieurs gâchées successives :

III.2.1 Approche théorique de la formulation de béton de sable :

Le problème de la formulation d'un béton s'articule sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume développé par les constituants solides sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

Etape 1 : l'estimation du dosage en fines

L'approche théorique commence par l'estimation du dosage en fines qui s'inspire principalement de la formule de CAQUOT qui a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$v = V_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/5}$$

Où, V_0 : constante empirique, des valeurs de l'ordre de 0,7 à 0,8 permettent également d'obtenir une bonne estimation de la porosité du mélange granulaire.

d : correspond à la dimension du tamis retenant 90 % des granulats.

D : correspond à la dimension du tamis retenant 10 % des granulats.

Cette formule suppose que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé (la répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire est telle que le mélange présente une porosité minimale).

Pour l'optimisation la compacité des constituants du béton de sable, ces constituants sont séparés en deux fractions, les fines regroupant l'ensemble des grains de tailles inférieures à 80 μm et le sable couvrant l'étendue granulaire 80 $\mu\text{m}/D$ (D étant défini ici comme le diamètre maximal du sable).

Pour l'étendue granulaire du sable, il est alors évident qu'il présente une porosité (p_s) définie par la formule de CAQUOT, soit :

$$P_s = 0,75 \left(\frac{0,08}{D} \right)^{1/5} \text{ en \% volumique}$$

En ce qui concerne les fines, CAQUOT a obtenu le résultat suivant :

$$[\text{Fines}] = [V]$$

$[\text{Fines}]$: le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 μm et

$[v]$: le volume de vides associé à l'empilement de ces fines

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit, en combinant

$$[\text{fines}] = 0,38 \left(\frac{0,08}{D} \right)^{1/5}$$

La constante « 0,38 » a une précision de $\pm 0,10$

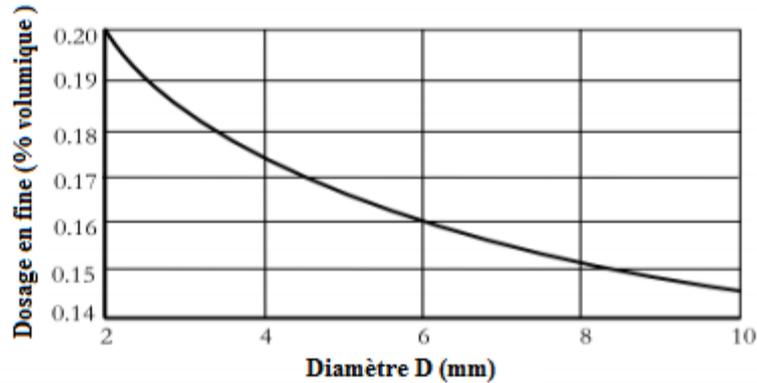


Figure.16 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [8]

Etape 2 : estimation de dosage en eau

Les vides inters granulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation de la compacité de CAQUOT :

$$(e + v)_{\min} = 0,8 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,2}$$

d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d, borne inférieure de l'étendue granulaire. L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin.

Connaissant alors la surface spécifique SSB (finesse Blaine en cm^2/g) de ce constituant et sa masse volumique absolue γ (exprimée en g/cm^3), il est facile de montrer que le diamètre moyen des grains, assimilés à des sphères, est donné par la formule suivante :

Si on a n grains de diamètre d_{\min} de surface Su et de volume Vu

$$f = \frac{S}{m} \quad \text{et} \quad s = n Su = n \pi (d_{\min})^2 \quad m = \gamma V_{\text{ads}} = n \gamma \pi \frac{d_{\min}^3}{6}$$

$$\text{En trouve} \quad d_{\min} = \frac{6}{f \gamma} \quad (\text{cm}) \rightarrow d = \frac{60}{f \gamma} \quad (\text{mm})$$

Cette première définition de dmin n'est valable que dans le cas de mélanges totalement défloculés, c'est-à-dire que chaque particule élémentaire agit indépendamment des autres. Dans la pratique, cette défloculation ne peut être obtenue que par l'utilisation des agents défloculants (adjuvants plastifiants ou fluidifiants). Cette définition de d_{min} ne peut pas être

retenue pour les mélanges floculés, il devient dans ce cas impossible de fixer une valeur précise, la dimension des floccs relevant de considérations physico-chimiques très complexes.

Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre. Ainsi, il est clair que la défloculation, par l'élargissement de l'étendue granulaire, est le seul recours pour la réduction de la porosité minimale théorique

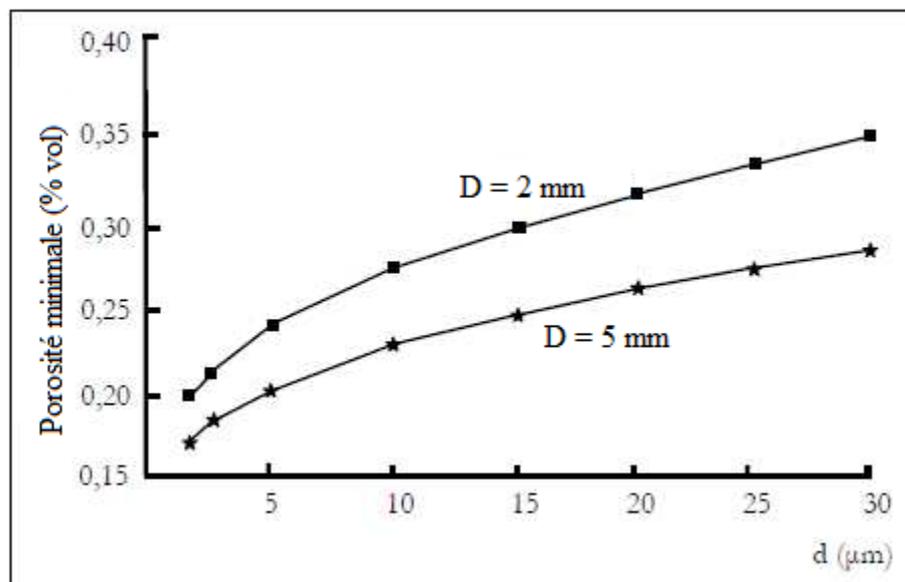


Figure.17 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable. [8]

Par sécurité, il sera préférable de mettre en œuvre un dosage en eau légèrement supérieur au dosage théorique obtenu au minimum de porosité, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sables, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5 %.

$$[\text{vide}] = k [\text{eau}] \quad (l/m^3)$$

Avec k compris entre 0,2 et 0,25

En ce qui concerne l'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors :

$$[\text{Sable}] = 1\,000 - [\text{fines}] - [\text{eau+adj}] - [\text{vides}] \quad (l/m^3)$$

Enfin le dosage en fines a pu être estimé en termes de compacité et donc imposé vis-à-vis de la résistance. Ces fines regroupent principalement le ciment, l'addition (filler calcaire) et la fraction du sable inférieur à 80µm souvent mineur pour les sables traditionnels. Ainsi, l'optimum de résistance serait atteint pour des dosages en ciment et en addition, solution du système suivant

Ciment + addition = fines

Addition / ciment = optimum d'activité

III.2.2 Approche expérimentale de la formulation de béton de sable :

Différentes formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode bétons de pieux, bétons routiers, bétons de projection, etc. et ont donné toute satisfaction.

L'objectif de la méthode expérimentale n'est pas d'expliquer ou de formuler les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation du béton.

Les différentes étapes de la formulation sont

- **Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :**
 - Choix de la teneur en ciment ;
 - Fixation d'une teneur en eau ;
 - Détermination d'un dosage en sable ;
 - Réglage de la maniabilité et du rendement :
- Détermination du dosage en fines d'addition
- Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre
- Contrôle des résistances
- Corrections éventuelles

Le dosage en eau, il peut être évalué par une autre formule théorique en fonction de la porosité du squelette granulaire :

$$[e] = \frac{800}{1+\alpha} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/5}$$

α : compris entre 0.1 et 0.15 ;

Enfin, on suit la même démarche que celle de la formule pour estimer le dosage en fine calcaire, puis il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants pour calculer le dosage en sable

Tableau.8 : Composition théorique et expérimentale du béton de sable. [8]

Tableau : compositions théorique et expérimentale du béton de sable.

Référence		Composition théorique	Composition expérimentale	Composition corrigée
Formule	Sable [Kg/m ³]	1615	1601	1433
	Ciment [Kg/m ³]	335	350	350
	Addition [Kg/m ³]	154	140	140
	Adjuvant [%]	1*	1*	1*
	Eau [Kg/m ³]	175	180	210
Calculé	Masse totale [Kg/m ³]	2282.4	2274.5	2176.5
	Volume total [l/m ³]	1000	1000	1000
	e/C+k.A	0.36	0.5	0.67
	A/A+C	0.32	0.29	0.29
	Affaissement [cm]	/	3.9	5

* pourcentage du poids du liant équivalent

III.3 Autres approches de formulation du béton de sable :

III.3.1 Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984 :

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité du béton par l'adjonction d'un filler.

L'étude a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 mm pour être ensuite étendue à d'autres types de sable. L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale, pour que les caractéristiques physiques et mécaniques soient meilleures.

➤ **Première étape** consistait à rechercher par tâtonnements un mélange de sable, ciment et eau (formulation de base) possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et des parpaings (autour de 8 MPa).

Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200Kg de ciment au m³ ont été soumises à des essais mécaniques.

➤ **Deuxième étape** consistait à améliorer les performances de la formulation de base par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, avec l'introduction du type de filler qui convient. Pour cela, trois types de fillers (calcaires), différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages.

Les dosages en ciment et en eau ont été fixés à 300Kg/m³ et 240l/m³ respectivement.

Les quantités de sable et de filler sont variables.

Les fillers employés avaient les caractéristiques granulométriques suivantes :

- Filler V : le plus fin, 75% des grains inférieurs à 20 microns.
- Filler R : 62 % des grains inférieurs à 40 microns.
- Filler F 3 : 20 % des grains inférieurs à 40 microns et 75 % inférieurs à 200 μ .

C'est la correction par le filler le plus fin (filler V) qui a donné les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques :

➤ **Troisième étape**, la quantité de ciment a été réduite à 250 Kg/m³ et divers adjuvants (plastifiants) ont été utilisés.

III.3.2 Approche de J.J.CHAUVIN en 1987 :

Pour formuler ses bétons de sable, J.J. CHAUVIN s'était fixé au préalable le dosage en ciment à 350 kg/m³ et 250l/m³ respectivement ; Le dosage en eau a été choisi arbitrairement. Il a ensuite étudié les relations existant entre la nature et le dosage en fillers d'un côté, et les principales caractéristiques du béton de l'autre coté (résistance, compacité et maniabilité) [8].

CHAPITRE IV

VI. ADDITIONS MINÉRALES :

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolaniques à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique du béton.

VI.1 Types d'additions minérales :

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et en fines inertes telles que le calcaire. Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique » à savoir :

- Additions de type I selon la norme EN 206-1 :
 - Les additions calcaires (NF P 18-308),
 - Les additions siliceuses (NF P 18-509),
 - Les fillers (NF P 18-501),
- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :
 - La fumée de silice (NF P 78-502),
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18-505),
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506)
 - La pouzzolane naturelle (EN 197-1)

VI.2 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons :

Il existe plusieurs mécanismes de l'action des additions minérales qui induisent des modifications dans la rhéologie de la pâte du ciment ou du béton. Les avantages de ces additions sont généralement attribués à la morphologie de la surface texturale.

- **La finesse de l'addition :**

Plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc du gain en résistance ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable (sable alluvionnaire, sable de dune...).

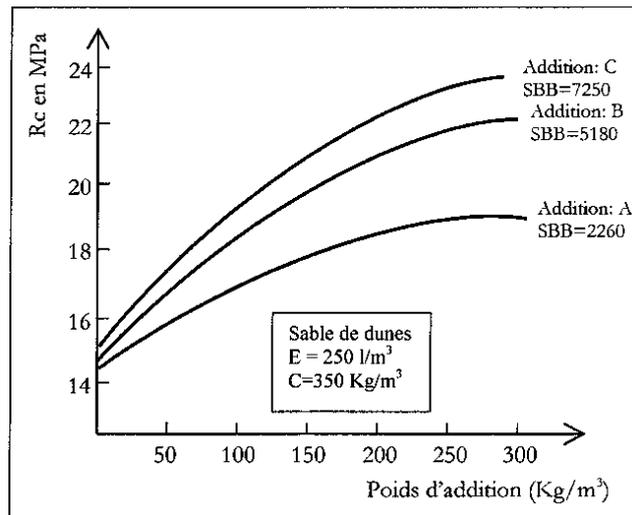


Figure.18: Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression. [10]

- **La nature de l'addition :**

A même dosage, la figure 19, permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.

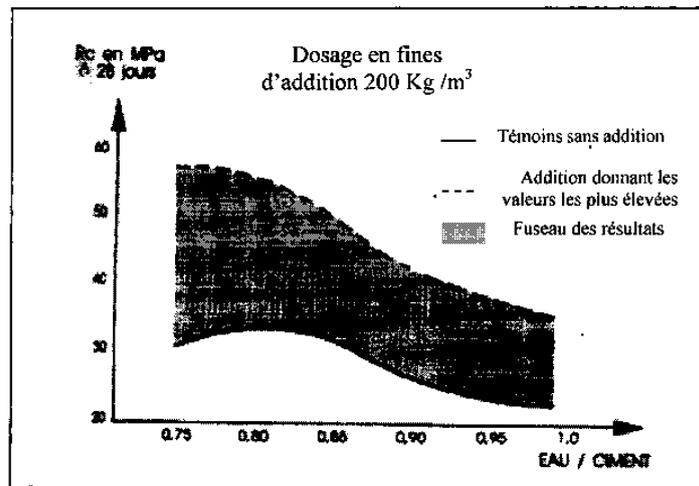


Figure.19: Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance à la compression.[10]

- **Amélioration de l'ouvrabilité:**

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire.

La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules > 45 μ m à un maximum de 34 %. [11]

- **Durabilité:**

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive. Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

VI.3 L'utilisation des ajouts en Algérie :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni Saf.

Pour cette étude **Boudaoud [12]** a utilisé un sable de dune qui provient de région de Boussaâda qui a un module de finesse **MF** égale à **2** et contient un fort pourcentage en vide ou la porosité égale à **40%**. Pour compenser l'absence de gros granulat et pour remplir l'important volume de vide, **Boudaoud [12]** a proposé à chaque fois de remplacer une quantité de sable par du filler calcaire de manière à garder le dosage en ciment fixé (**350 Kg/m³**).

Les fillers calcaires utilisés sont F3 de la carrière d'EL-EUCH et F1 de la carrière d'AIN TOUTA.

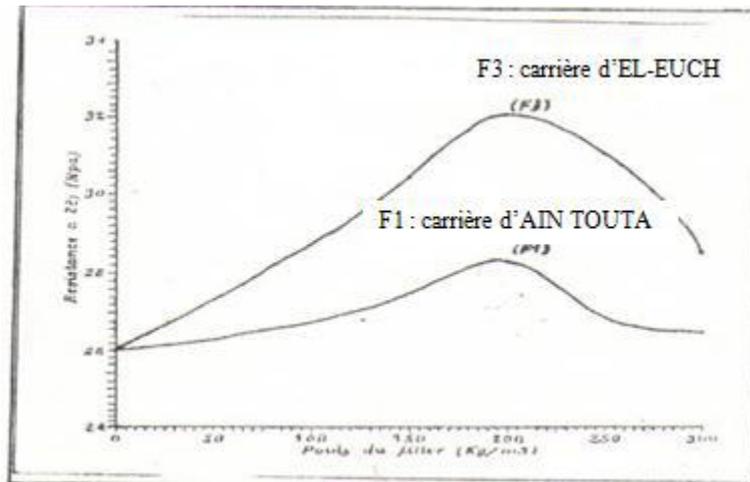


Figure.20 : Les résistances à la compression obtenues sur des éprouvettes (4x4x16) cm

VI.3.1 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

- **Intérêt du point de vue technique:**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [13].

- **Intérêt du point de vue économique:**

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessitent relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [13].

- **Intérêt du point de vue environnemental:**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂ [13].

VI.3.2 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux :

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher

VI.4 La poudre de verre dans les bétons :

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

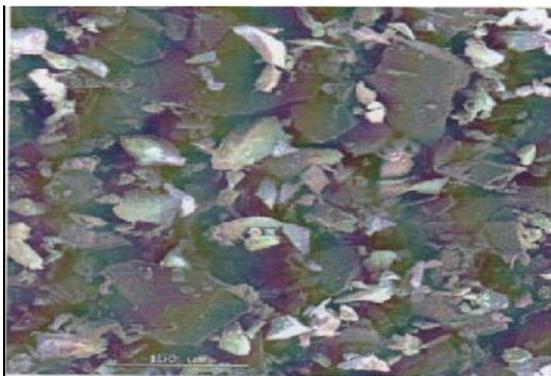


Figure.21: MEB d'une poudre de verre.

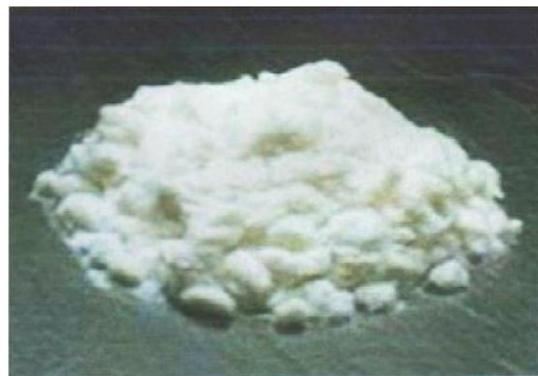


Figure.22: poudre de verre.

- **Incorporation de la poudre de verre dans le béton :**

SHAY AN et coll. (2006) ont mené des études sur une dizaine de mélanges de bétons de rapport $E/L=0,49$, dont trois incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre en substitution partielle du ciment et désignés respectivement par Mix1, Mix3 et Mix4 retiennent particulièrement notre attention. Les surfaces spécifiques Blaine des matériaux utilisés sont de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ et $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ respectivement pour le ciment et la poudre de verre. Les résultats de l'affaissement exprimés par le tableau III.6 montrent que la poudre réduit l'ouvrabilité des mélanges. Ceci serait lié à sa surface spécifique très élevée, plus que le double de celle du ciment utilisé. Ces résultats confirment ceux obtenus sur les poudres finement broyées [GALLIAS et coll., 2000, YAMAMOTO et coll., 2007]. [14]

VI.5 Les chamottes :

Les chamottes sont des compositions argileuses calcinées. Si le chamottage a été réalisé à des températures inférieures à celle de cuisson des pièces dans laquelle elles sont incorporées, elles prendront encore un peu de retrait lors de ces cuissons. Si les calcinations ont lieu à des températures égales ou supérieures à celles de cuisson de la pièce, les chamottes seront parfaitement inertes et n'auront alors strictement qu'un rôle de dégraissant.

Contrairement à ce qu'on puisse en penser, certains de ces additifs, comme par exemple la chamotte (rebut céramique cuit) en quantité contenue (5-10%) ne déterminent pas une usure accentuée des composants broyant, mais augmentent l'efficacité des moulins.



Figure.23 : La chamotte.

PARTIE PRATIQUE

V. FORMULATION ET CARACTERISATION DE BETON DE SABLE :

INTRODUCTION

Objectif : Le but de ce travail est l'étude l'effet d'ajout des fines (poudre de verre et poudre de chamotte) sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable, L'objectif principal fixé en introduction porté sur l'étude d'effets des différents types et pourcentages des fines sur le comportement physiques et mécaniques du béton de sable.

Dans notre étude expérimentale on a formulé différentes compositions du béton de sable, en variant au pourcentage des deux types de fines (la poudre de verre et la chamotte), les coulis témoins (ciment ; C+P.V ; C+CH ; C+S), B.S avec des différents pourcentages des fines (P.V ; CH et P.V+CH) avec une addition d'un adjuvant superplastifiant (SIKAVISCORETE-665) de pourcentage de 1% dans chaque composition de B.S. On a appliqué des essais de compression et de flexion afin d'étudier l'effet de ces fibres sur les caractéristiques mécaniques et le taux d'ouverture de fissures.

V.1 Matériaux utilisés :

V.1.1 Ciment

Dans ce travaille on a utilisé : CEM I, fabriquées et commercialisée par Lafarge, les tableaux suivant présente leurs compositions minéralogiques et chimiques selon ces fiches techniques.



Figure.24 : CEM I

Tableau.9 : Composition minéralogique de CEM I (CLINKER). [9]

Minéraux	Pourcentage
C ₃ S	60.61
C ₂ S	15.36
C ₃ A	6.60
C ₄ AF	10

V.1.2 L’adjuvant :

L’adjuvant utilisé dans ce travail est un produit employé par SIKA,

SIKA VISCOCRETE 655 : est un superplastifiants haut réducteur d’eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés. Conforme à la norme NF EN 934-2 [9].



Figure.25 : l'adjuvant SIKA VISCOCRETE 665

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes

- AspectLiquide Marron.
- Densité.....1.07±0.01.
- PH.....5±1.
- Teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Eq}}$ ≤1%.
- Teneur en ions Cl^- ≤0.1%
- Extrait sec32±1.2%

✓ **Condition d'application**

Plage d'utilisation recommandée : 0.5 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0.6 à 1.5% du poids du ciment ou du liant.

V.1.3Sable :

Le sable utilisé dans cette composition du béton de sable est un sable naturel alluvionnaire de classe O/D ($D \leq 5\text{mm}$). Il est donc, conformément aux normes NFP18-540 et NFP18-541, des sables.



Figure. 26 : sable naturel alluvionnaire

❖ **Analyse granulométrique :**

Puisque la courbe granulométrique intervient dans la composition du béton, on a effectué cette analyse sur le sable alluvionnaire (SA) :

Tableau .10 : Analyse granulométrique de sable de alluvionnaire (SA)

Analyse granulométrique de sable de alluvionnaire (SA)				
Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisé en (%)
10	0	0	0	100
5	5,9	5,9	0,98	99,02
2,5	22,73	27,63	5,526	94,474
1,25	77,86	105,49	21,098	78,902
0,63	158,04	263,53	52,760	47,294
0,31	108,62	378,15	74,43	25,67
0,16	85,6	457,75	91,55	8,45
0,08	63,91	494,66	98,932	1,068

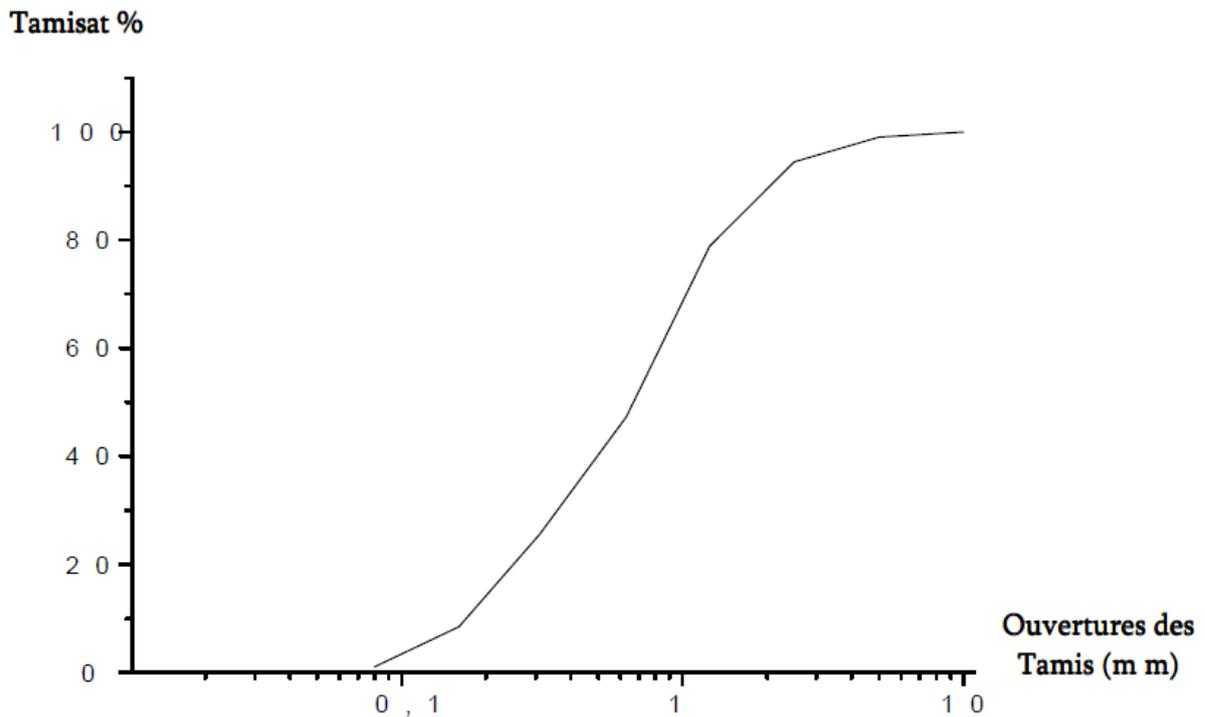


Figure.27 : Courbe granulométrique de sable alluvionnaire (SA).

On remarque sur la présente courbe que le sable alluvionnaire utilisé a une granularité étalée et contenue.

V.1.4 Eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla. L'eau sert d'une part à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte. Dès que l'eau entre en contact avec le ciment anhydre, elle réagit pour se combiner et former les hydrates de ciments.

V.1.5 Poudre de verre :

La poudre de verre utilisée est obtenue en broyant à une finesse d'environ 4000 cm²/g le verre des bouteilles récupérées, Nous prenons en compte le temps de broyage qui est de 1,30h à 2h et le tamisage juste après avec un tamis de 0.63μm,



Figure 28 : les étapes de broyage de poudre de verre

V.1.6 Chamotte :

Pour la chamotte on a récupéré les déchets de brique de construction, ensuite on a fait les mêmes démarches pour obtenir ce filler.



Figure 29 : les étapes de broyage de chamotte

V.2 La formulation de béton de sable :

La formulation de béton de sable s'effectue par approche expérimentales en fonction des travaux qui ont été réalisés sur ce béton, par suite les quantités sont ajustés pour une batterie de trois éprouvettes prismatique 4X4X16 cm, les quantités de chaque fraction sont présentés dans le tableau ci-après

Tableau .11 : Composition pratiques des différentes variantes de béton de sable.

Quantité	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	p. chamotte (g)	P. verre (g)	E/L (%)	SP (%)
Formulation							
C (Coulis)	1600	X	800	0	0	0,5	1 %
C+ P.CH	1200		600	400	0	0,38	
C+ P. V			600	400	400		
C+S	450		1350	225	X		
100 % P. CH	360	1234	180	205		0,33	
100% P. V					205		
90 % P. V 10 % P.CH				20,5	184,5		
80 % P. V 20 % P.CH				41	164		
75 % P. V 25 % P.CH				51,25	153,75		
50 % P. V 50 % P.CH				102,5	102,5		
25 % P. V 57 % P.CH				153,75	51,25		
20 % P.V 80 % P.CH				164	41		
10V%V P.V 90 % P.CH				184,5	20,5		

S.P : super plastifiant / (C+kA)= L : liant équivalent /A : filler

V.2.1 Les différentes étapes de confection :

Pesée les constituants : la masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction des éprouvettes à préparer ; dans le cas de la préparation de 3 éprouvettes 4x4x16, les quantités sont respectivement les suivantes :

❖ Le malaxage :

Le malaxage est effectué au moyen du malaxeur spécifié par la norme, le malaxeur étant en position de fonctionnement :

a-Mettre la quantité du ciment

b-Mettre la quantité de l'eau

c-Malaxer pendant 30s à vitesse lente, introduire le sable d'une manière aléatoire ; puis malaxer pendant 2mn à vitesse rapide.

d-Arrêter le mouvement avec le batteur démonter de son axe et racler les parois et le fon du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage.

e-Après le remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 2mn à vitesse rapide.

f-Après le malaxage couler le mortier dans des moules normalisées (4x4x16), qui doivent être graissés au préalable, remplir le mortier du moule qui doit être placé sur la table à choc, avec un nombre de coups égale à 60 coup/mn.

g-Retirer le moule après la vibration et le remplir de nouveau jusqu'au débordement, araser l'excès puis remettre sur la table à choc pour compléter l'homogénéisation.





Figure.30 : Les différentes étapes de confection.

❖ **Conservation :**

Après la mise en place du béton, les éprouvettes sont conservées dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire à une température de 20°C.

Pour éviter tout échange hydrique avec l'extérieur, la face supérieure du moule est protégée par un film en plastique.

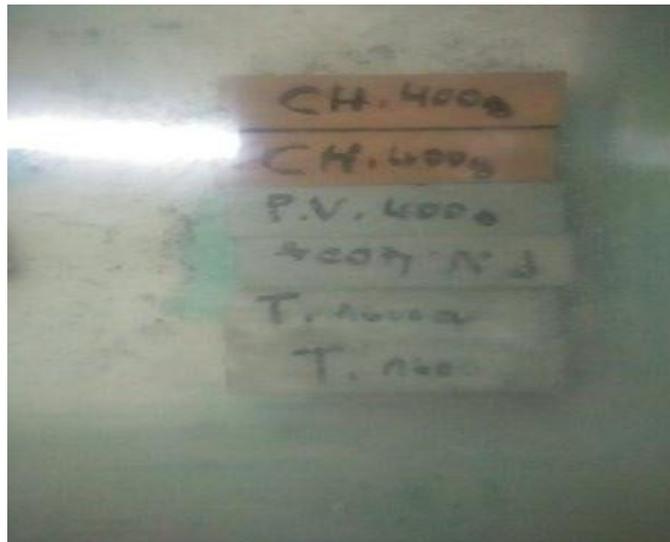


Figure.31 :Conservation des éprouvettes 20°C

V.3 Caractérisation mécanique :

V.3.1. Essai de flexion :

Cet essai a pour but de connaître la résistance à la flexion selon la modalité de norme des mortiers normalisés. Les éprouvettes prismatiques (au nombre de trois par essai), préalablement immergées sont sorties de l'eau, puis asséchées.

Une éprouvette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de cette éprouvette une force croissante jusqu'à rupture

On note la charge de rupture qui est la moyenne des trois charges de flexion enregistrées sur les éprouvettes de chaque variante de béton de sable.

La résistance à la flexion est calculée par la formule :

$$\delta = \frac{3fL}{2bh^2}$$



Figure.32 : l'Essai de flexion

Les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-après :

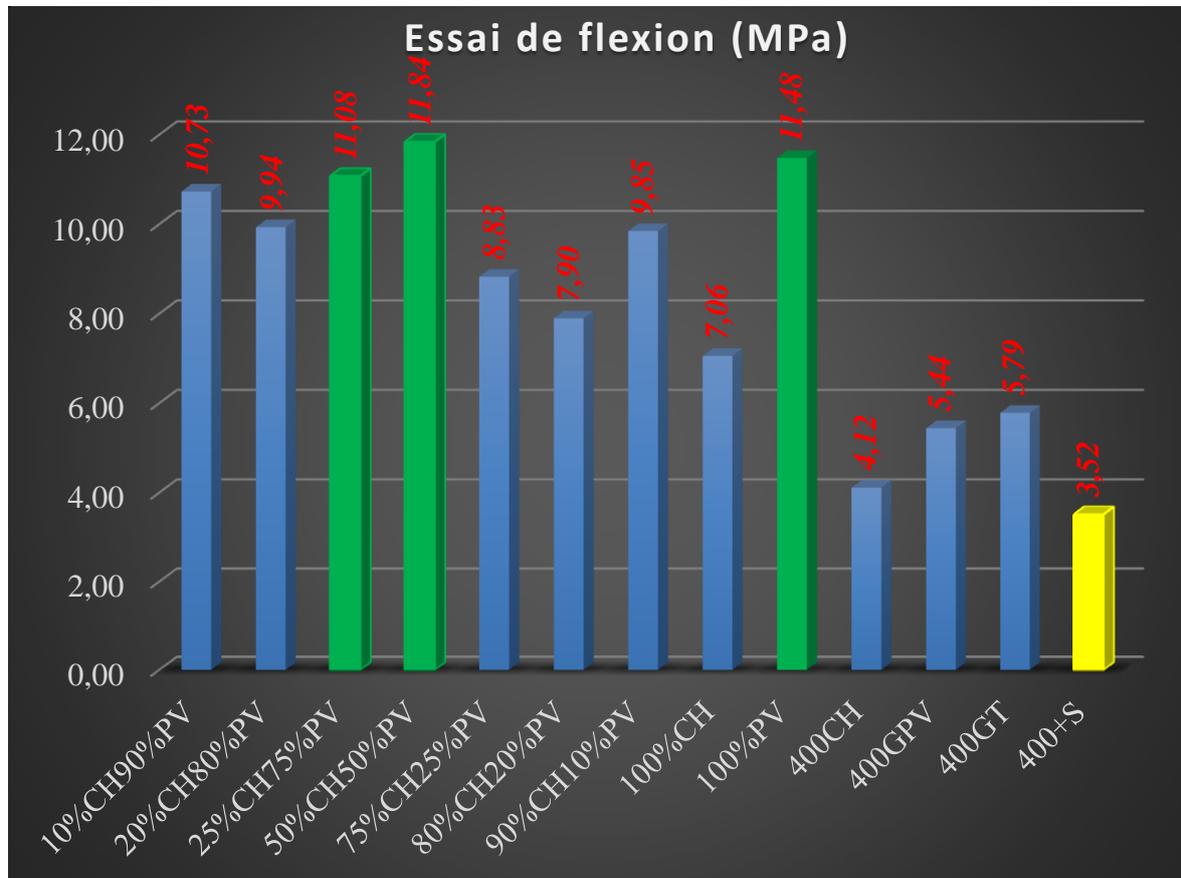


Figure.33 : Histogramme des essais de flexion.

- **Analyse :**

Par rapport au témoin (variante 400 + S) on remarque qu'il y a une amélioration générale, les meilleurs résultats sont enregistrés pour les éprouvettes qui sont formulées à partir de 100%, 75 % et 50% de poudre de verre qui améliorent la résistance plus de 300%, cela montre que cette poudre est plus compatible par rapport à la poudre de chamotte.

Si l'on compare les résultats des coulis, on constate que la résistance des coulis avec remplacement d'une quantité de ciment (400 g) par la poudre de verre et la poudre de chamotte donne des résultats plus faible cela est expliqué par l'activité soit pozzolanique ou hydraulique, on remarque que la poudre de verre est plus réactive par rapport à la poudre de chamotte.

V.3.2 Essai de résistance en compression :

Cet essai a pour but de connaître surtout la contrainte de rupture des matériaux. On prend une parmi les deux parties quand on a obtenu depuis l'essai de flexion des éprouvettes ; Les éprouvettes une fois rectifiées, sont alors centrées chacune de ces deux parties sur une presse

de chargement. Chaque partie est soumise à une charge croissante effectuée à la vitesse de 0,5 MPa/s ; Enfin, on note la charge de rupture qui est la moyenne des charges enregistrées sur les éprouvettes.

En désignant par P, la charge maximale qui provoque la rupture et (a) la section, la résistance par compression est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{a^2} \text{ (MPa)}$$

Avec :

f_c : Résistance par compression en Méga Pascal (MPa) ;

P: Charge en Newton (N) ;

a: Section en mm^2



Figure.34 : 2 Essai de résistance en compression

Les essais effectués à 28 jours donnent les résultats enregistrés au tableau suivant :

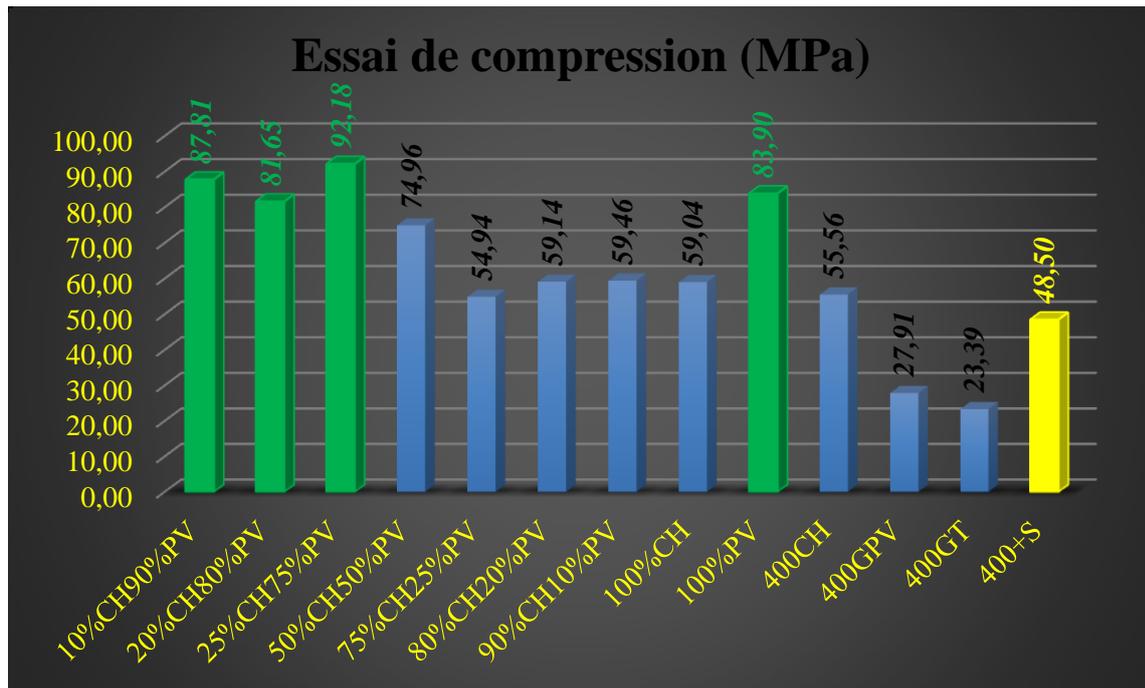


Figure.35 : Histogramme des essais de compression.

- **Analyse :**

L'analyse des résultats obtenus à l'âge de 28 jours, montre que le béton de sable réalisé présente des accroissements de la résistance, alors on constate que le B.S réalisé avec l'incorporation de P.V donne des bons résultats par apport au béton réalisé avec CH ;

Il apparaît au regard de ces résultats, que les meilleures résultats pratiques obtenus pour les fines est le pourcentage de (75% P.V/ 25% CH), Cet état de chose nous amènerait alors à dire que le béton de sable réalisé avec ce pourcentage présente un comportement acceptable en compression grâce aux ces éléments qui sont en meilleurs compatibilité entre eux, confèrent aux bétons de sable une bonne compacité d'une part, et une bonne résistance d'autre part.

En ce qui concerne les coulis témoins, on remarque que les coulis qui sont dotés par la poudre de chamotte présente meilleurs résultats par rapport aux autres coulis, et par rapport au témoin, cela est peut-être expliquée par la nature de l'activité, la poudre de verre qui présente un activité pozzolanique, elle réagir avec la portlandite mais lentement en présence de l'eau, alors que la poudre de chamotte qui se distingue par une activité hydraulique en plus, réagir directement, ou la portlandite joue le rôle d'un activateurs.

Le coulis à partir de témoin présente des résultats faibles causés par les fissures dues à la chaleur d'hydratation, car les adjuvants ne sont pas utilisés pour les coulis.

V.3. 3. Etude de l'activité pozzolanique :

Cette s'effectue par approche mécanique, basée sur le pourcentage de variation de résistance par rapport au témoin à partir de la formule

$$A = (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_T) / \bar{\sigma}_T$$

Où

A : est l'activité pozzolanique

$\bar{\sigma}$: la résistance à la compression à de B.S

$\bar{\sigma}_T$: la résistance à la compression de témoin

les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-apres

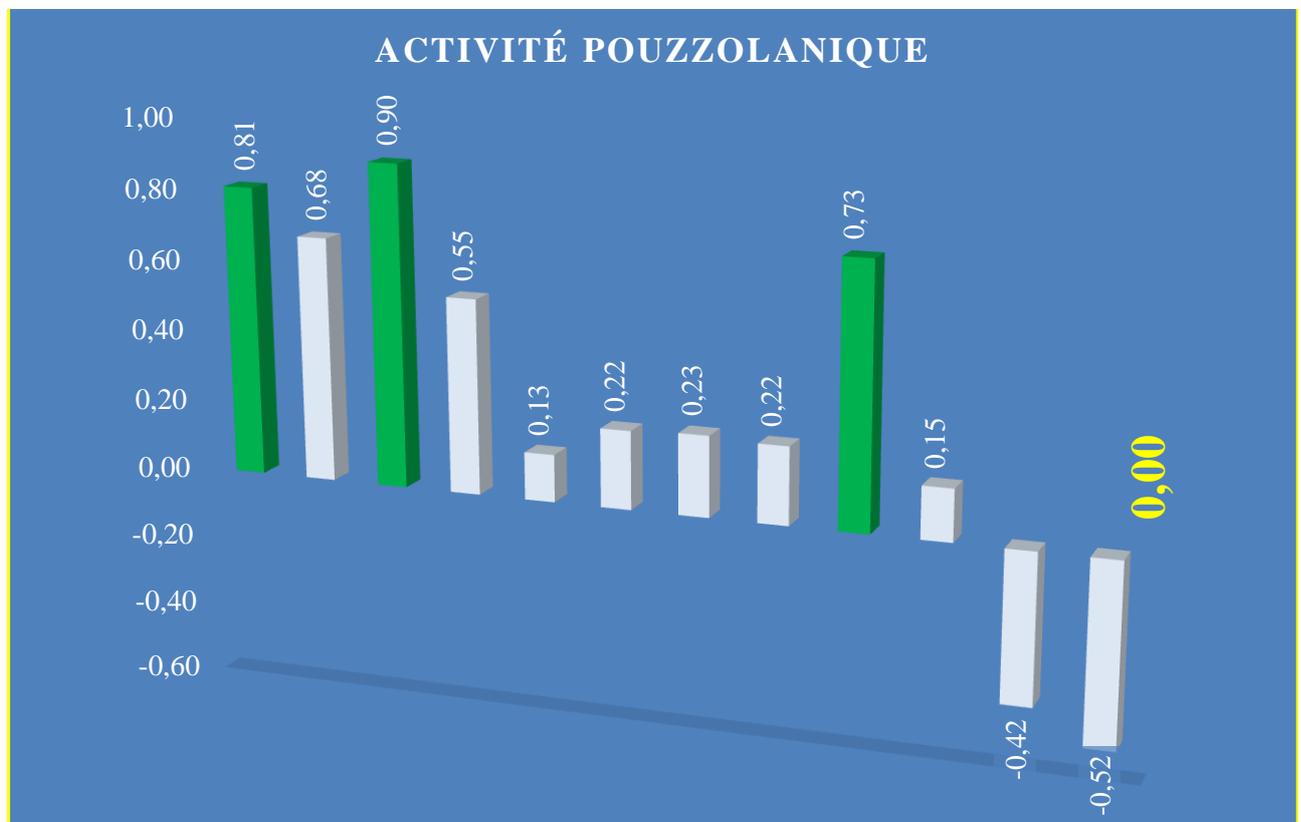


Figure.36 : Histogramme de l'activité pozzolanique.

• **Analyse :**

Ces résultats présentent le taux d'amélioration par rapport au témoin (0,00), toujours les bétons de sable qui dotés par la poudre de verre donne des meilleurs résultats, la variante qui contient 50% P. V et 50% P.CH donne la valeur la plus élevée, cela est revient à la notion de compatibilité chimique entre deux nature d'activité : hydraulique et pozzolanique. Les valeurs calculées sont des valeurs indicatives car l'effet de finesse n'est considéré.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Cette étude est réalisée au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Bouira, et de l'unité de recherche, matériaux-procédé et environnement (UR-MPE) au sein de l'université de Boumerdes faculté des sciences de l'ingénieur. Elle a permis de comprendre la formulation, la caractérisation des bétons de sable, et de valoriser les déchets de nature minérale, issus de l'industrie des verres et de la terre cuite.

L'objectif recherché à travers cette étude s'oriente vers un compromis entre les fractions des fines ajoutées à partir de la poudre de verre et de chamotte, les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Le remplacement d'une quantité de ciment par des substituts d'activité hydraulique permet d'améliorer les propriétés mécaniques, car ces additions consomment la chaux comme activateur en formant des C-S-H et évitant les dégâts causés par les chaleurs d'hydratation.
- ❖ L'addition des quantités adéquates entre les poudres (de nature d'activités différentes) permet l'obtention des B.S plus performants.
- ❖ L'addition des fines de nature supposée hydraulique, n'améliore pas considérablement les propriétés mécaniques, par suite, il y a un taux limite pour ces types d'additions.

• RECOMMANDATION

Ce travail est réalisé dans des conditions difficiles de préparation et de réalisation. Les résultats obtenus montrent que l'étude de l'aspect chimique et morphologique de ces types de béton est primordiale pour comprendre le mécanisme interactionnel entre ces additions et le ciment, pour cela on propose d'aller vers :

- ❖ L'observation microscopique de la matrice cimentaire.
- ❖ Etude de l'activité des deux poudres par approche chimique.
- ❖ Etude de l'effet de la granulométrie sur le mécanisme d'interaction dans la matrice.

CONCLUSION GENERALE :

L'incorporation des ajouts cimentaires dans les bétons de sable a fait l'objet de plusieurs recherches depuis des années, du fait que ce nouveau type de béton est très complexe au niveau de sa formulation et nécessite des dosages en liant et en adjuvants chimiques relativement supérieurs à un béton ordinaire, ce qui engendre un coût de revient relativement supérieur. C'est pourquoi l'utilisation des cendres volantes, de la fumée de silice et les laitiers de haut fourneau est monnaie courante. La poudre de verre et la poudre de chamotte sont déjà faites ses preuves dans la confection de bétons ordinaires, néanmoins cela n'a pas encore été concrétisé pour la production de béton auto plaçant. Le but de cette recherche étant d'apporter des réponses tangibles sur la faisabilité d'un tel projet, et éventuellement ouvrir une fenêtre vers la commercialisation d'un ciment composé à la poudre de verre et à la poudre de chamotte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- **Baron J.et Sauterey R.** 1995« Le béton hydraulique » -Presse de L'E.N.P.C- P
- [2] - **Brouks J.J.**, 1987 « concrete technologie »- London -
- [3] - « Béton de sable »- ENPC 1994- P 236
- [4] - « Rapport interne » - LTPS Ouargla - P 21
- [5] -**Dreux G.**, 1969« contribution à l'étude de la finisse des sables sur diverses qualités des bétons »-Annales J.T.B.T.P-
- [6] - **Djoudi A.**, 2001 « caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcement par les fibres végétales du palmier dattier » thèse de magistère - Centre universitaire de Laghouat - P 134
- [7] - Bultin de C.T.C mars - 1292« contrôle du béton » - P 38
- [8] - coursde l'année universitaire 2016/2017 « béton de sable »
- [9] – source d'internet.
- [10] - SABLOCRET, «béton de sable caractéristique et pratique d'utilisation» Presses de l'école nationale des pontes et chaussées (1994).
- [11] -Bouglada Mohamed Salah, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier», Mémoire de Magister, Université de M'sila, Année 2007 / 2008.
- [12] -BOUDAOUZ.Z, «étude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable a base de sable fin de Boussaâda» thèse de magistère, université de Boussaâda
- [13] - DJOBO YANKWA Jean Noël , effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique.
- [14]- Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. Cement and ConcreteResearch, vol. 36, n° 3, p. 457-468.

Résumé

Les produits métalliques tels que le verre, la brique et la terre cuite sont devenus une source de dégâts environnementaux. Dans notre étude, nous visons à exploiter ces déchets comme des additifs finis pour la formulation d'un nouveau type de béton dite (béton de sable) selon une approche pratique.

Dans ce travail, nous avons remplacé les différents rapports entre la poudre de verre et la poudre de brique (la chamotte). Les résultats obtenus ont montré une activité pouzzolanique avec la matrice de cimentaire, ce qui a permis d'améliorer les valeurs de résistance mécanique à plus de 90% dans certaines formulations.

ABSTRACT

Metal products such as glass, brick and terracotta have become a source of environmental damage. In our study, we aim to exploit these wastes as finished additives for the formulation of a new type of concrete (sand concrete) according to a practical approach.

In this work we have replaced the different ratios between glass powder and brick powder (fireclay). The results obtained showed a pozzolanic activity with the cementitious matrix, which made it possible to improve the mechanical strength values to more than 90% in certain formulations.

ملخص

ملخص

نواتج الصناعات المعدنية مثل الزجاج والأجر والقرميد أصبحت تشكل مصدر ضرر بالبيئية. في دراستنا هذه، نحن نهدف إلى استغلال هذه المخلفات والمواد كمضافات متناهية لصياغة نوع جديد من الاسمنت (الاسمنت الرملي) وفق مقارنة عملية.

في هذا العمل قمنا باستبدال مختلف النسب بين مسحوق الزجاج ومسحوق الأجر، النتائج المتحصل عليها أثبتت وجود نشاط تفاعلي بوزولاني مع مصفوفة الإسمنت، الأمر الذي سمح بتحسين قيم المقاومة الميكانيكية إلى أكثر من 90% في بعض الصياغات.