République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de Médéa
Faculté De Technologie
Département de Génie Civil

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil

***Option**:Matériaux en génie civil*

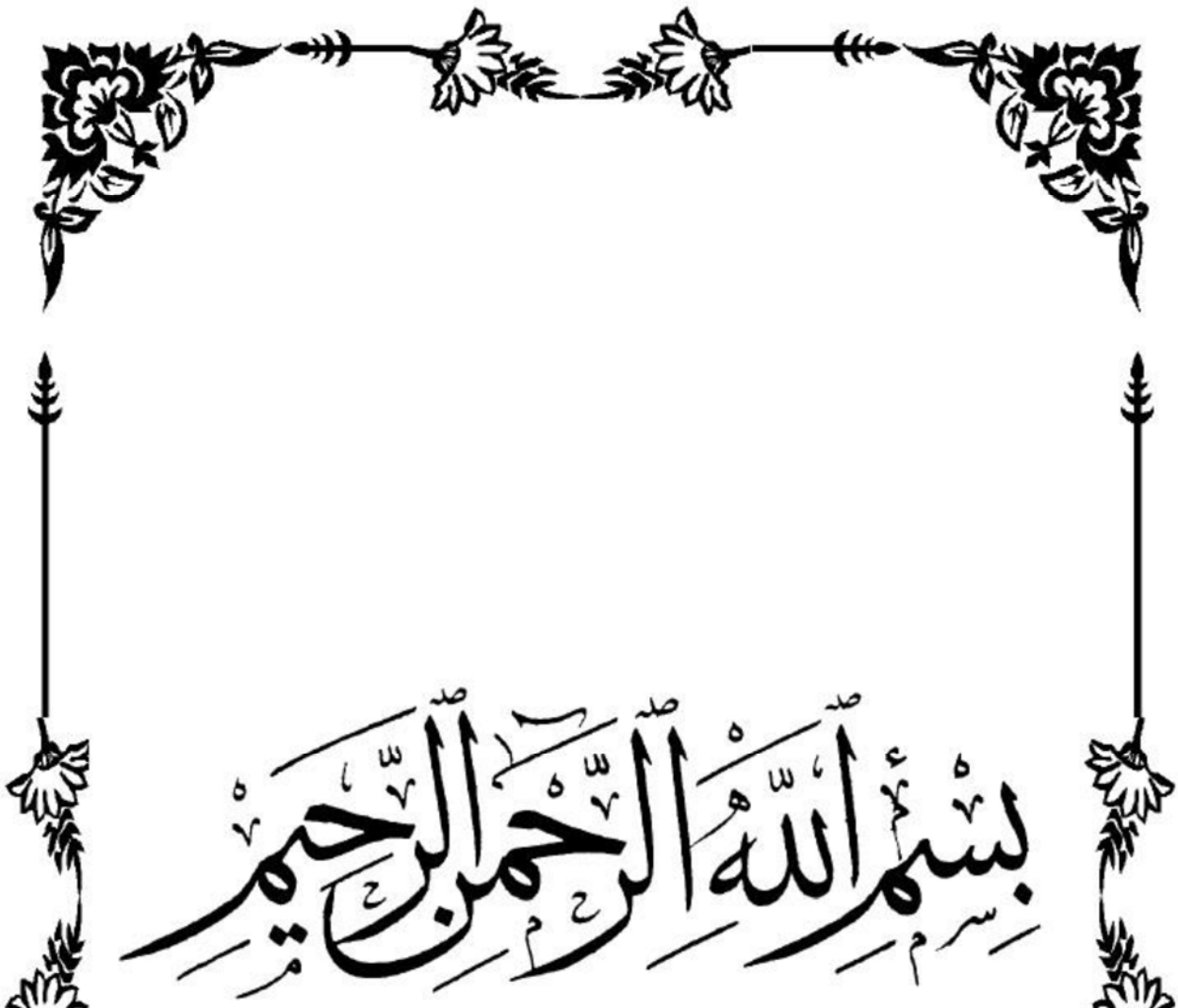
Thème :

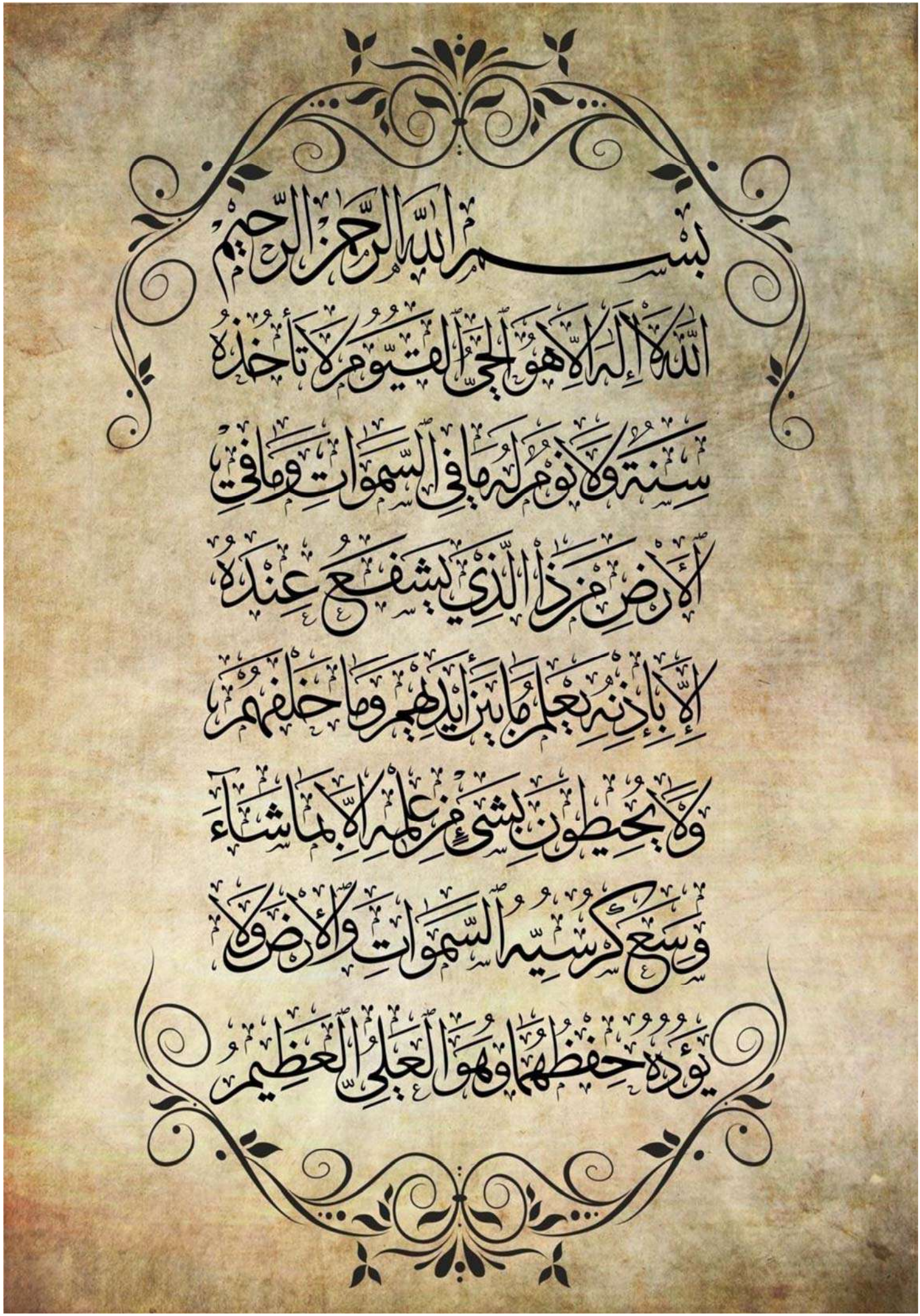
Comportement de béton de sable autoplaçant a base de ciment ternaire et quaternaire

Etudié par :
Mlle BENHAOUA Sihem
Mr TAZEGHOUINE El-mehdi

Encadré par :
Dr GUENDOUZ Mohamed
Mlle BOUKHELKHAL Djamila

Promotion Juin 2018


بسم الله الرحمن الرحيم


بسم الله الرحمن الرحيم
الله لا إله إلا هو الحي القيوم لا تأخذه
سنة ولا نوم له ما في السموات وما في
الأرض من ذا الذي يشفع عنده
إلا بإذنه يعلم ما بين أيديهم وما خلفهم
ولا يحيطون بشيء من علمه إلا بما شاء
وسع كرسيه السموات والأرض ولا
يؤوده حفظهما وهو العلي العظيم

Remerciements

Nous remercions avant tout, ***« Dieu »*** *le tout puissant, pour avoir permis de présenter ce modeste travail.*

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Dr. ***GUENDOUZ MOHAMED*** *pour sa disponibilité,aide durant tout le déroulement de tout ce projet. Grâce à son dévoument, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.*

Nous remercions Mlle. ***DJAMILA BOUKHELKHAL*** *Car le grand plaisir revient en premier lieu pour leurs conseils, encouragements, et aide pendant les essaies réalisés au niveau de laboratoire.*

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique pour son aide et sa disponibilité.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Enfin nous remercie tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous les dit merci de tout notre cœur.



Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :

- A Ma cher mère que dieu la garde et préserve.

- A Ma chère grande mère que je la souhaite une longue vie.

- A toute ma famille sans exception.

Je remercie mon binôme Mehdi qui est contribué à la réalisation de ce modeste travail.

- Mes amies intimes

- A Tous mes collègues de la 2ème Année master génie civil.

Benhaoua Sihem



Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :

- A Mon cher père que dieu le garde et préserve.

- A Mon cher frère et ma chère sœur.

- A toute ma famille sans exception.

Je remercie mon binôme Sihem qui est contribué à la réalisation de ce modeste travail.

- Mes amies intimes

- A Tous mes collègues de la 2ème Année master génie civil.

Tazaghouine El-Mehdi



ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو دراسة تأثير الإسمنت الثلاثي(خبث المعادن+البوزلان+خبث الفرن العالي) والإسمنت الرباعي(خبث المعادن+البوزلان+خبث الفرن العالي+حجر الكلس) على الخرسانة الرملية مائعة مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية .

وقد أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكيةللخرسانة الرملية المائعة تتحسن باستعمال الإسمنت الثلاثي(خبث المعادن+البوزلان+خبث الفرن العالي)على المدى القريب والإسمنت الرباعي(خبث المعادن+البوزلان+خبث الفرن العالي+حجر الكلس) على المدى البعيد.

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à étudie l'effet de ciment ternaire (Clinker +pouzzolane+laitier de haut fourneau) et quartenaire (Clinker+calcaire+pouzzolane+laitier de haut fourneau) sur les propriétés physico-mécanique de béton de sable autoplaçant . Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons de sable autoplaçant témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que les meilleures performances mécaniques du béton de sable autoplaçant sont obtenues avec l'utilisation de ciment ternaire (Clinker+pouzzolane+laitier de haut fourneau) à jeune âge et le ciment quartenaire (Clinker+calcaire +pouzzolane+laitier de haut fourneau) à long terme. Á long terme.

Abstract

The main objective of this project is to study the effect of ternary cement (Clinker + pozzolana + slag) and quarterly (Clinker + limestone + pozzolana + slag) on the physical and mechanical properties of self compacting sand concrete. The properties in the fresh state and in the hardned state of the various mixtures made were analyzed and compared to the respective control self-compacting sand concretes.

The results obtained show that the best mechanical performance of self-compacting sand concrete is obtained with the use of ternary cement (Clinker + pozzolana + slag) at a early age and the cement (Clinker + limestone + pozzolana + slag) over the Later age.

Sommaire

Remerciements
Dédicace
ملخص
Résume
Abstract
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures
Listes des symboles et des abréviations

Introduction générale.....……..…….……01

CHAPITRE 01 : SYNTESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.Le béton de sable…….....04

1.1.1 . Introduction…….……..…….....04

1.1.2 Historique……..…….....04

1.1.3 Définition 05

1.1.4 Les composants du béton de sable …..……...……...06

1.1.4.1Les sables ……..……..06

1.1.4.2 Les fines d'ajout (ou addition)……..……..06

1.1.4.3 Les ciments ……..……...08

1.1.4.4 L'eau ……..…….08

1.1.4.5 Adjuvants ……..…….08

1.1.5Propriétés du béton de sable ….....…..……....09

1.1.5.1Propriétés générales ….…….……..……10

1.1.5.2 Propriétés spécifique ……...……...……13

1.1.6 Techniques particulières…..……..…….……17

1.1.6.1. Domaines d'emploi des bétons de sable …….……18

1.1.6.2. Types de sable ……19

1.1.7 Formulation du béton de sable ……...……22

1.1.7.1. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable ……...……22

1.1.7.2. Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable ……..……...29

1.1 Les ajouts minéraux…….……32

1.2.1. Définition…….……...……..32

1.2.2. Classification des ajouts ……32

1.2.2.1. Ajouts minéraux inertes…..……..……33

1.2.2.2. Les ajouts minéraux actifs……..……36

1.2.3. Modes d'utilisation des ajouts……44

1.2.3.1.Utilisationdans les ciments…….……...….44

1.2.3.2.Utilisation dans le béton…….45

1.2.4. **Utilisation des additions minérales en Algérie**…….....45

1.2.5.**Avantage de l'utilisation des additions minérales**……...……..…46

1.2.5.1. Avantage technique……...….46

1.2.5.2. Avantage écologique…….....…..46

1.2.5.3. Avantage économique…….....46

1.3 Influence de combinaison des ajouts minéraux sur les propriétés des matériaux cimentaire …..……..…...47

1.3.1. Etats frais ……..……47

1.3.2. Etat durci…….....…47

1.4. Conclusion ……47

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction……...……51

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés……..52

2.2.1 Ciment…….……..…….……52

2.2.2. Le sable …….……...……54

2.2.3 Fillers (Laitier)……..…….……56

2.2.4. Ajouts minéraux…….……..……57

2.2.4.1. Le calcaire …….……57

2.2.4.2. LaPouzzolane ..……...…….……58

2.2.4.3. Le laitier ……...…….……59

2.2.5 Eau de gâchage…….…….……60

2.2.6 Adjuvant……..……60

2.3 Protocol expérimental…….…....60

2.3.1 Composition des bétons……..…….....60

2.3.2 Mode opératoire……..……62

2.3.3 .Confections des éprouvettes……...…….....63

2.3.4. Essais réalisés……..……..64

2.3.4.1. Essai réalisé à l'état frais……...…….65

2.3.4.2. Essais réalisé à l'état durci……...…….....66

2.4 .Variables étudiées……..71

CHAPITRE 03: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

3.1. Influence de ciment ternaire et quaternaire…….....73

3.2. Caractéristiques du BSAP à l'état frais ……...73

3.2.1.Etalement ……..……..…73

3.2.2Temps d'écoulement dans l'entonnoir (V-funnel).....74

3.3.3Densité…….……75

3.3 Caractéristiques du BSAP à l'état durci ……...76

3.3.1Résistances à la compression……..76

3.4 Approche de durabilité ……..78

3.4.1Absorption capillaire……...….78

3.4.2Retrait ……..……79

3.4.3Gonflement……..……80

3.5. Conclusion ……...……..81

CONCLUSIONSGENERALESETRECOMMANDATIONS ……...…..…88

Références bibliographiques……..…..……..…90

Annexe……97

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes 33
Tableau. 1.2. Avantages et inconvénients de pouzzolane..... 38
Tableau 1.3. Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau..... 40
Tableau 1.4. Propriétés du béton de ciment au Laitier granulés de hauts Fourneaux 40
Tableau 1.5. Utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes. 45
Tableau.2.1. Analyse chimique du ciment..... 52
Tableau.2.2. Caractéristique physiques du ciment 53
Tableau. 2.3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge..... 54
Tableau.2.4. Propriétés physiques du sable utilisé 55
Tableau. 2.5. Caractéristiques chimique de les fillers de laitier noire utilisées..... 56
Tableau. 2.6. Caractéristiques physique de les fillers de laitier noire utilisées 57
Tableau.2.7. Composition chimique du calcaire utilisé..... 57
Tableau. 2.8. Caractéristiques physique de calcaire 58
Tableau. 2. 9. Composition chimique de la pouzzolane de Beni-Saf utilisée..... 58
Tableau.2.10. Composition physique de la pouzzolane de Beni-Saf utilisée..... 59
Tableau. 2.11. Les Caractéristique physique de laitier blanc 59
Tableau. 2.12. Compositions des Béton de sable auto plaçant à base de ciment ternaire et 61
Tableau. 2.13. Essais de caractérisation sur bétons frais..... 64
Tableau. 2.14. Essais de caractérisation sur bétons durci..... 66

Liste des Figures

Liste des figures

Figure. 1.1. Phare de port Saïd réalisé en Béton aggloméré Coignet (Egypte) 5

Figure. 1.2. Microstructure des fines (forme anguleuses) 7

Figure. 1.3. Microstructure des fines (forme sphériques)……7

Figure 1.4. Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) 8

Figure 1.5. Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse..... 10

Figure 1.6. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)... 10

Figure 1.7. Effet de fillers calcairesur la densité des sables DS, RS et RDS..... 11

Figure 1.8. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression..... 11

Figure 1.9. Influence de la nature de l'additionsur le niveau de résistance à la compression 12

Figure 1.10.Effets de la granularité sur la résistance 12

Figure 1.11. Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation..... 13

Figure 1.12. Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores 14

Figure 1.13. Evolution du retrait dans le béton de sable..... 15

Figure 1.14. Evolution du fluage du béton de sable 16

Figure 1.15. Eprouvettes non vibrées non piquées 17

Figure 1.16. Le béton de sable dans la Préfabrication 18

Figure.1.17. Le béton de sable en projection 19

Figure 1.18. Le béton de sable coulé 19

Figure.1.19. Dallage en BS fluidifié auto compactant 21

Figure 1.20. Le béton de sable en projection 21

Figure. 1.21. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines 23

Figure 1.22. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D24

Figure 1.23. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en.... 25

Figure. 1.24. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) 27

Figure 1.25. Organigramme de la method théorique 28

Figure.1.26. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition 31

Figure. 1.27. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition 32

Figure. 1.28. Secteurs d'activité dontsontissus les fillers calcaires 34

Figure 1.29. Illustration de l'effet filler 35

Figure 1.30. Roche volcanique de pouzzolane 37

Figure 1.31. pouzzolane naturelle 37

Figure. 1.32. Massif pouzzolane 15/25 38

Figure. 1.33. Laitier granulé 39

Figure. 1.34. Laitier de haut fourneau granule 40

Figure. 1.35. Laitier de métallurgie primaire (laitier noir) 42

Figure. 1.36.Séchage de SCCs avec mélanges cimentaire binaire. 48

Figure 1.37. Gonflement des differentes éprouvettes à 20°C 49

Figure.2. 1. Le ciment utilisé 52

Figure. 2.2. Sable utilisé 54

Figure. 2.3. La granulométrie du sable 55

Figure. 2.4. Analyse chimique de sable utilisé 56

Figure. 2.5. laitier noire 57

Figure.2.6 .le calcaire utilisé 58

Figure. 2.7.la pouzzolane utilisée 59

Figure. 2.8. Le laitier blanc 60

Figure. 2.9. Procédure de malaxage 63

Figure. 2.10. Fabrication des éprouvettes 63

Figure. 2.11. Mesure de la maniabilité du béton de sable 64

Figure.2.12. Essaid'écoulement à l'entonnoir 65

Figure. 2.13. Mesure de la densité du béton de sable 66

Figure. 2.14. Presse hydraulique (2000 kN) 67

Figure. 2.15. Dispositif de rupture à la compression 67

Figure. 2.16. Essai d'absorption 68

Figure. 2.17. Mesure des variations dimensionnelles. 69

Figure. 2.18. Variables étudiées..... 71

Figure.3.1. Etalement des BSAP à base de ciment ternaire et quartenaire..... 73

Figure.3.2. Etalement des BSAP à base de ciment ternaire et quartenaire après réglage..... 74

Figure. 3.3. Temps d'écoulement des BSAP à base de ciment ternaire ou quartenaire après..... 75

Figure. 3. 4. Densité des BSAP à base de cimentternaireouquartenaire..... 76

Figure. 3.5. Résistance à la compression des BSAP à base de ciment ternaire ou quartenaire ... 77

Figure.3.6. Absorption capillaire des BSAP à base de ciment ternaire ou quartenaire 78

Figure. 3.7. Retrait des BSAP à base de ciment ternaire ou quartenaire 79

Figure. 3.8. Gonflement des BSAP à base de ciment ternaire ou quartenaire..... 80

Liste des symboles et des abréviations

Liste des Symboles et des Abréviations

PS : la porosité du sable

f : surface spécifique exprimée en cm2/g du constituant.

ρ: densité du constituant exprimée en g/cm3.

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

E : dosage en eau totale (l/m3) ;

V : air piégée (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

Kcv., Kfs, Kfil : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m3)

MPZ :mortier de pouzzolane

MT : mortier temoin

ML : mortier de laitier

MCL : mortier de calcaire

CEM I/A 42.5(CRS) : Ciment résistante au sulfate classe 42.5

PF *:* Phénoplastes

BS : Béton de sable

E/C : Eau/Ciment

C_2S : Silicate bicalcique (belite)

C_3A : Aluminate tricalcique

C_3S : Silicate tricalcique (alite)

C_4AF : Aluminate-ferrite tétracalcique

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

$MgCO_3$: carbonate de magnésium

Al2O3 : Oxyde d'Aluminium

Fe2O3 : Oxyde de fer

Cao : Oxyde de calcium

S_iO_2 : Silicium

MgO : Magnésium

Dmax**:** Diamétre maximale des granulats

ES : Equivalent de sable

R7j : Résistance à 7 jours

R28j : Résistance à 28 jours

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire

Msable: masse nécessaire pour 1 m3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V_{sable} : volume du sable.

S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement

LGHF : laitier granulé a haute fourneaux .

BSAP : béton de sable autoplaçon

R_C: Résistance à la compression en (MPa)

F_C: Charge de rupture en (N);

b: Côte de l'éprouvette

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

A : Addition en fines

BS : béton de sable

B1 : béton de sable témoin

B2 : 5%Pouzzolane +5%Laitier

B3: 10%Pouzzolane +5%Laitier

B4: 15%Pouzzolane +5%Laitier

B5: 20%Pouzzolane +5%Laitier

B6: 40%Pouzzolane +5%Laitier

B7: 60%Pouzzolane +5%Laitier

B8 : 10%Laitier +5%Pouzzolane

B9: 15%Laitier +5%Pouzzolane

B10: 20%Laitier +5%Pouzzolane

B11: 25%Laitier +5%Pouzzolane

B12: 30%Laitier +5%Pouzzolane

B13 : 10%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

B14: 15%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

B15: 20%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

B16: 25%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

B17: 30%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

B18: 40%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier

Introduction Générale

Introduction général

Les bétons de sables autoplaçants (BSAP) se caractérisent par une grande fluidité. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte pour assurer une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation. Pour garantir un volume de pâte suffisant deux possibilités sont offertes, la première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration par une exothermie importante, sur le plan technique.

Dans l'industrie de ciment lorsqu'un des ajouts cimentaires est ajouté au ciment, ce dernier est dit binaire et s'il y'en a deux ajouts il est appelé ternaire et s'il y'en a trois ajouts il est appelé quaternaire .cette approche qui consiste à unir divers matériaux cimentaires existe depuis le début des années 80. Par contre ce n'est que depuis quelques années que l'industrie du béton se montre de plus en plus réceptive à cette nouvelle façon de faire le béton. En plus de procurer une très grande durabilité, le ciment ternaire et quaternaire permet au béton d'être beaucoup plus imperméable aux agressions chimiques.

Ces substances minérales sont des sous-produits industriels et des produits naturels réputés par leurs compositions chimiques où leurs finesses. Ces ajouts jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de la qualité de la pâte du ciment à l'état frais et durcis. Mais leurs utilisations n'est pas non plus sans inconvénients, car la substitution d'une partie du ciment affecte le comportement mécanique et fait chuter la résistance à cours comme à long terme. Pour résoudre ce problème, il existe plusieurs techniques, parmi ces méthodes, nous pouvons citer l'activation thermique de l'ajout par l'augmentation des températures de cure.

De nos jours ce procédé à commencer à prendre place et à fait ses preuves notamment dans le changement des propriétés physico-chimique et mécanique des matériaux.
Dans ce travail, nous avons choisis quelques ajouts minéraux déjà utilisés dans les différentes cimenteries du pays afin de caractériser leurs modifications apportées au ciment. Nous avons choisi la pouzzolane considérée comme une substance pouzzolanique, le laitier considéré comme une substance hydraulique latente et le calcaire connu comme étant un produit inerte. Ces substances sont incorporées aux mortiers normalisés où quelques propriétés sont suivies et quantifiées afin de dévoiler l'efficacité de chaque ajout et afin d'optimiser son utilisation.

De nos jours, l'utilisation de mélanges de béton ternaires et quaternaire comme solution valable dans le domaine de génie civil (bâtiments et travaux publics) est de plus en plus répandue dans le monde, car ces mélanges permettent aux effets bénéfiques d'un ajout cimentaire donné de compenser les inconvénients que pourraient présenter un autre.

Objectifs de l'étude :

L'étude entreprise dans ce mémoire vise à atteindre les objectifs principaux suivants :

- Etude des effets de l'incorporation des ajouts minéraux : pouzzolane, calcaire et laitier de haut fourneau sur les propriétés mécanique et la durabilité du béton confectionné à base de ciments ternaires et quaternaire
- Sélection du dosage optimal des ajouts minéraux les plus performants du point du vue résistance mécanique que du point de vue durabilité.

Chapitre 01 :
Synthèse bibliographique

1.1.Le béton de sable

1.1.1.Introduction

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire.

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 [AFNOR]et se compose de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Il se distingue des bétons ordinaires par son moindre dosage en gravillons et des mortiers par son moindre dosage en ciment.

Le béton de sable possède des propriétés physiques et mécaniques qui lui permettent de remplacer le béton ordinaire dans certains usages et résoudre certains problèmes économiques et techniques posés par le béton traditionnel. Pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants etc.

1.1.2. Historique

Le premier grand ouvrage ayant fait appel à l'usage du béton de sable est sans doute le phare de Port Saïd construit par François Coignet à l'embouchure du canal de Suez. Coignet utilisa du sable de mer et si le phare proprement dit n'est plus en service, l'édifice est toujours debout. Après la seconde guerre mondiale, l'URSS, riche en sable mais pauvre en granulats, et devant faire face à un très grand programme de reconstruction utilisa largement le béton de sable pour bâtir des routes, des aérodromes, des bâtiments…

Dans un article du Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (Le béton de sable en Union Soviétique, 1991, n° 174, pp. 61-69), Jean-Jacques Chauvin fait le point sur l'usage du béton de sable en Union Soviétique. Dans son introduction, il mentionne l'ouvrage de Nicolas de Rochefort publié en Russe en 1918 : « si l'on broie en même temps clinker et sable dans un rapport de un pour un, on obtient un produit qui, mélangé au sable naturel dans un rapport de un pour trois (soit au total un de clinker pour 6 de sable), conduit aux mêmes résistances qu'un mélange de 1/3 de clinker broyé seul et de sable, c'est-à-dire que l'on double les performances du ciment ! » L'explication est donnée quelques lignes plus

loin : « Le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage on libère des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant ».

En France, pour limiter l'extraction des ressources naturelles des lits rivières, démarra, en 1988, le projet MATERLOC qui visait à optimiser l'usage des matériaux locaux et notamment celui du sable issu du broyage des roches calcaire



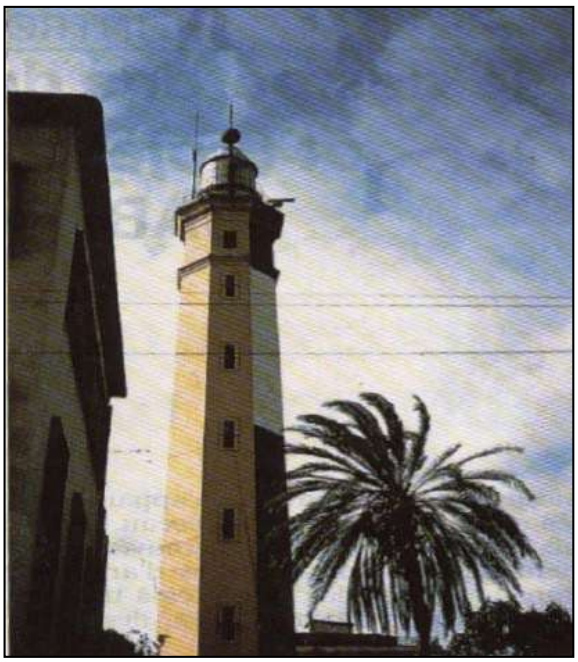


Figure. 1.1. Phare de port Saïd réalisé en
Béton aggloméré Coignet (Egypte) **[1]**

1.1.3.Définition

Le béton de sable est un béton formé par mélange de sable,de ciment, d'additions et d'eau. Des ajouts (adjuvants,fibres ...) peuvent également être incorporés au mélange. Il estdonc principalement constitué de sable.

Son dosage en ciment est du même ordre que celui des bétonsclassiques soit entre 250 à 400 kg/m}. Cette similitude lui vaut, entre autre, le terme de "béton". Il se distingue dumortier par, notamment, son dosage en ciment, celui d'un mortier étant de 400 à 700 kg/m}, et par son domaine d'utilisation. **[2]**

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (D_{max} = 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel desbétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines(fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400à 600)Kg/m3**. [3]**

1.1.4. Les composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certain usage, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants.**[3]**

1.1.4.1. Les sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux spécifications des bétons classiques, mais des sables considérés non performants peuvent également être employés. D'ailleurs, des programmes nationaux de recherche (SABLOCRETE en France, par exemple) s'efforcent de promouvoir l'utilisation de tous les types de sables. **[2]**

1.1.4.2. Les fines d'ajout (ou addition)

Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) addition(s)
Il s'agit essentiellement de fillers- calcaires, siliceux, de laitier - de cendres volantes, mais aussi d'autres fines (argile calcinée, ultra-fines...).
Les additions proviennent directement du sable (cas dessables fillérisés) et/ou d'apport. Elles comblent en partie les vides du sable : elles augmentent donc sa compacité naturelle etcréent une granulométrie aussi continue que possible. Mais elles participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange. Elles permettent ainsi d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité provoqués par un surdosage en ciment**.[2]**
On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumé de silice, pouzzolanes broyées…) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives…)**[4]**

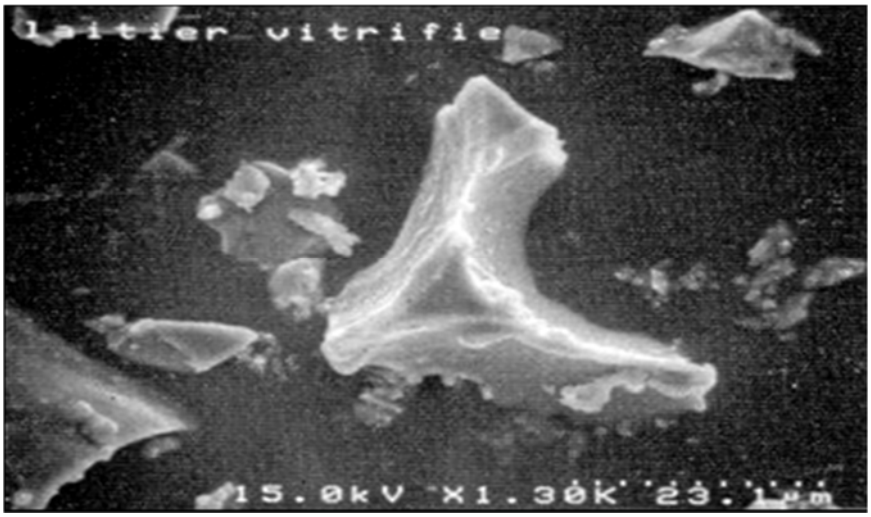


Figure.1.2. Microstructure des fines (forme anguleuses)**[1].**

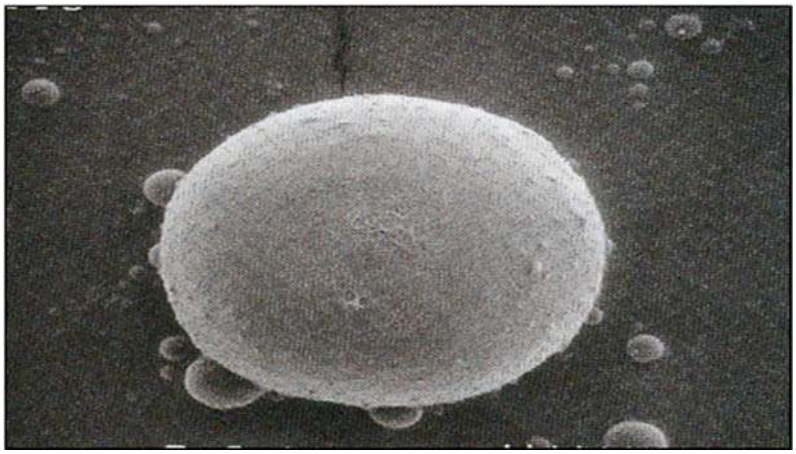


Figure.1.3. Microstructure des fines (formesphériques)**[1].**

A. Les fillers calcaire

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles.

Les fillers calcaires conformes à la norme **NFP18-508** sont du type inerte selon la norme **EN 206-1** et sont substituable au ciment au sens et sous les conditions de cette norme **[5].**

B. Fumé de silice

Les fumées de silice sont des résides évacuées de la chambre de combustion d'un four destiné à produire de silicium ou des alliages contenant du silicium. La fumée de silice se présente

sous forme de microsphères de silice amorphe d'un diamètre moyen de l'ordre de 0.1 µm, leur surface spécifique est de l'ordre de 20 et 25 m2/g, lorsque les microsphères sont bien dispersées, elles vont s'empiler dans l'espace industriel resté vide entre les grains de ciment qui possèdent un diamètre moyen environ 100 fois plus élevé. Ces fines particules améliorent les propriétés rhéologiques du mélange (fluidité, diminution de la ségrégation et du ressuage). Leur grande finesse et leur structure vitreuse en font un produit très réactif. Elles permettent aussi d'obtenir une pate plus dense car le squelette granulaire est plus compact. **[6]**

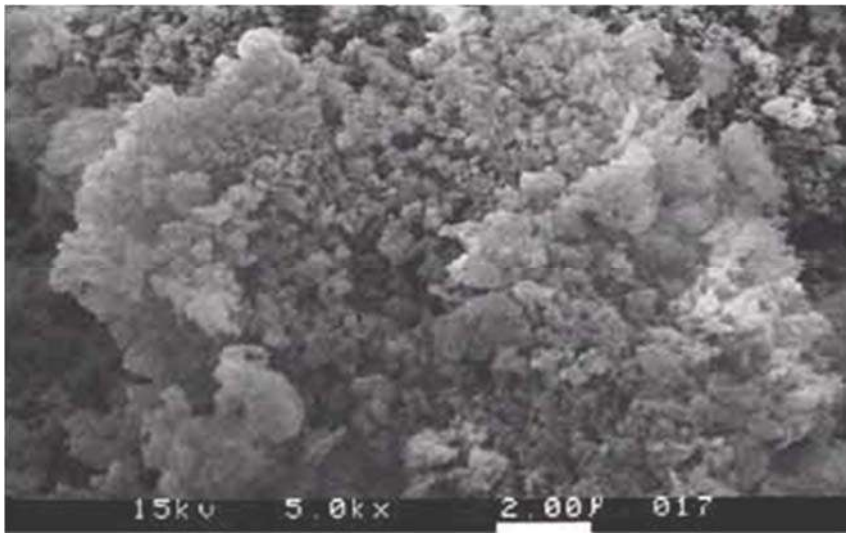


Figure1.4. Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) **[7]**.

C. Laitier

Ce sont des résidus minéraux résultant du refroidissement rapide des scories provenant de la fusion de minerais de fer en haut fourneau. Ce sont des combinaisons d'oxydes de calcium (CaO), de silicium (S_iO_2) et de magnésium(MgO).Les ciment en laitier offrent une meilleure résistance chimique aux environnements agressifs (eau sulfatées, milieu marin) et permettent l'obtention d'une bonne durabilité du béton.

D. Cendres volantes

Ce sont des produits pulvérulents provenant du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz brûlés des chaudières industrielles alimentées en charbon pulvérisé. Essentiellement siliceuses, parfois calciques, elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

1.1.4.3Les ciments

Le ciment habituellement utilisé pour la confection des bétons de sables doit êtreconforme à la norme NF P15-301. Les dosages en ciment sont proches des bétons ordinaires (200 à

400kg/m³). Il est à noter que pour un même usage, le dosage en ciment pour les bétons de sable est généralement plus élevé que les bétons classiques **[8]**

1.1.4.4 L'eau

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante : le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons de gravillons et pour le réduire on a recours à des adjuvants plastifiants et on sélectionne les fillers nécessitant la plus faible quantité d'eau de mouillage. Le rapport E/C est généralement compris entre 0.6 et 0.7. **[2]**

1.1.4.5 Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités (environ de 5% du poids de ciment) pourmodifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires.

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés **[3]**

1.1.5. Propriétésdu béton de sable

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité.**[3]**

1.1.5.1. Propriétés générales

- **Granulométrie et maniabilité**

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter davantage d'eau que lebéton classique ; ceci traduit par des valeurs du rapport E/C (eau/ciment) systématiquement supérieur à 0.5, ce rapport se situant généralement entre 0.6 et 0.8.

D'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport E/C+A (A=Addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau : plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité. **[9]**

La figure (**1.5**) qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité

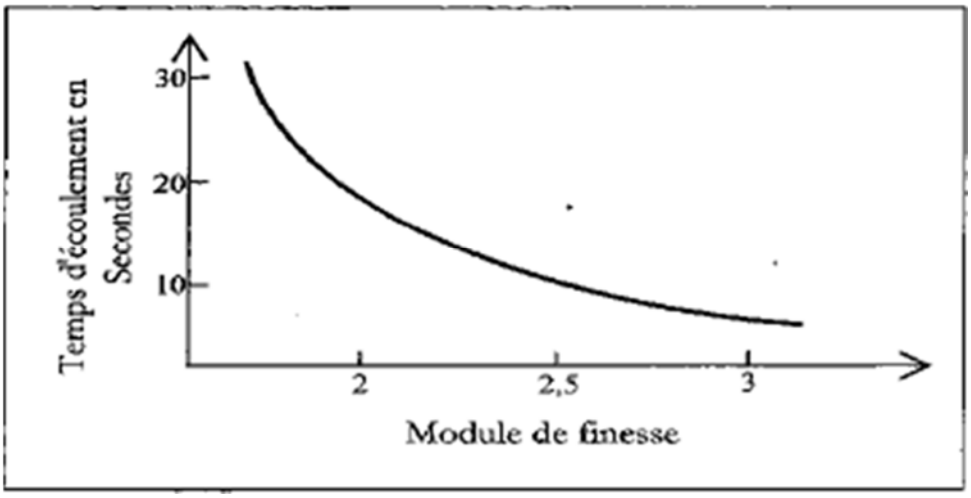


Figure 1.5. Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse. **[9]**

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la (Figure. 1.6), montrent l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune. Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une chute de maniabilité, ce qui n'est pas le cas pour le sable plus compact.

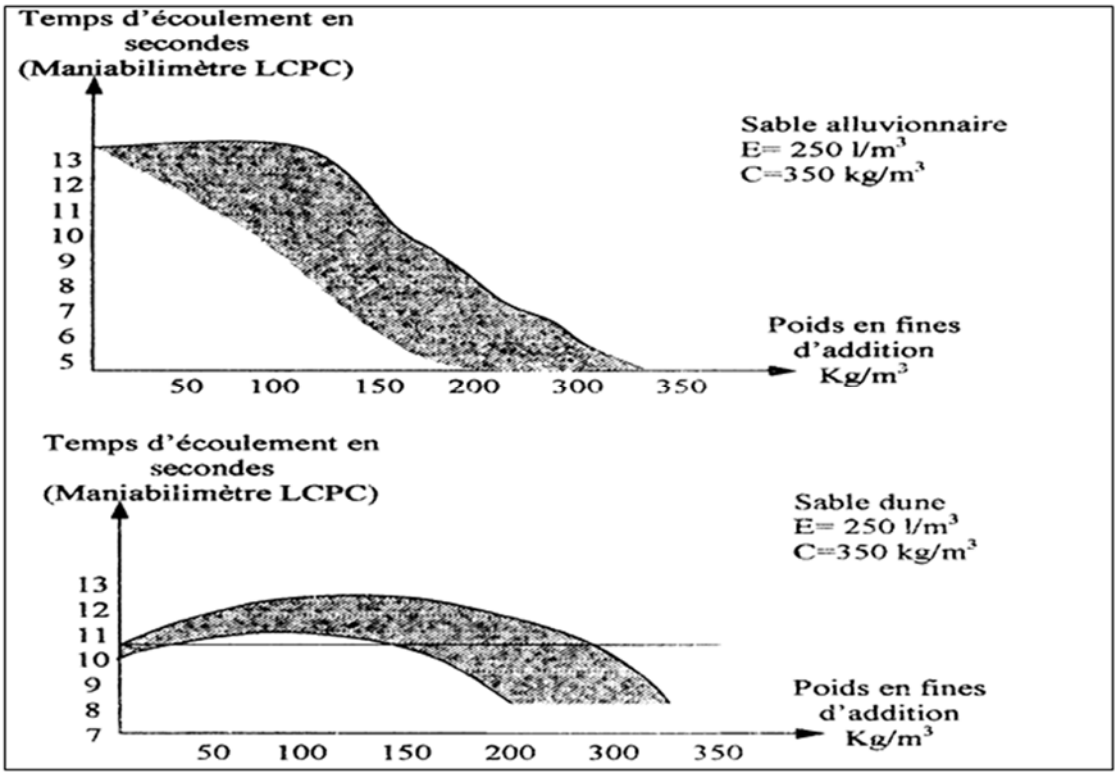


Figure 1.6. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)**[4]**

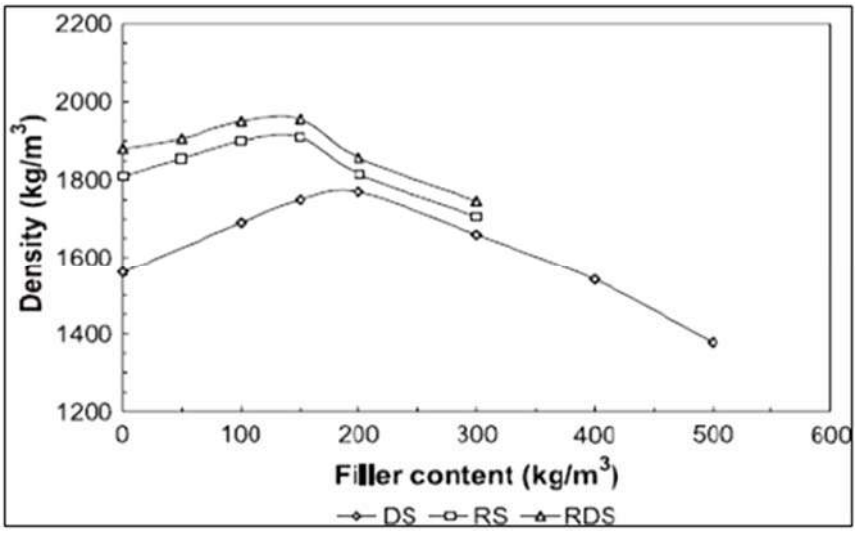


Figure 1.7. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS **[9].**

D'après la (Fig. I.7), on remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

- **Granulométrie et résistance**

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètre et en particulier

- **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…). **[9]**

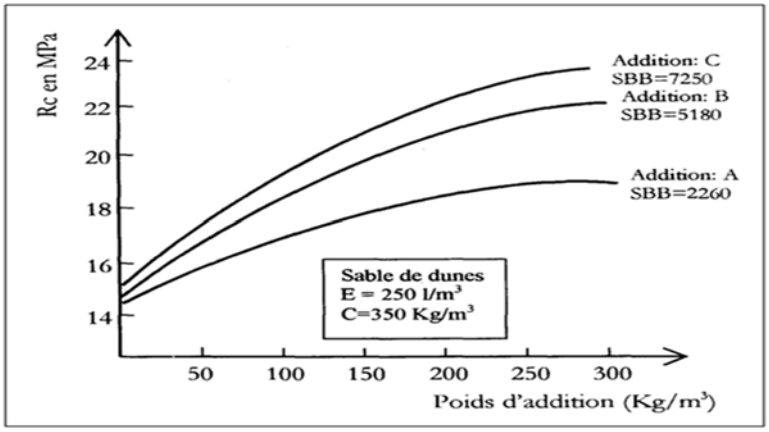


Figure 1.8. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression. **[9]**

- **La nature de l'addition**

A même dosage, la (figure I.9), 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.**[9]**

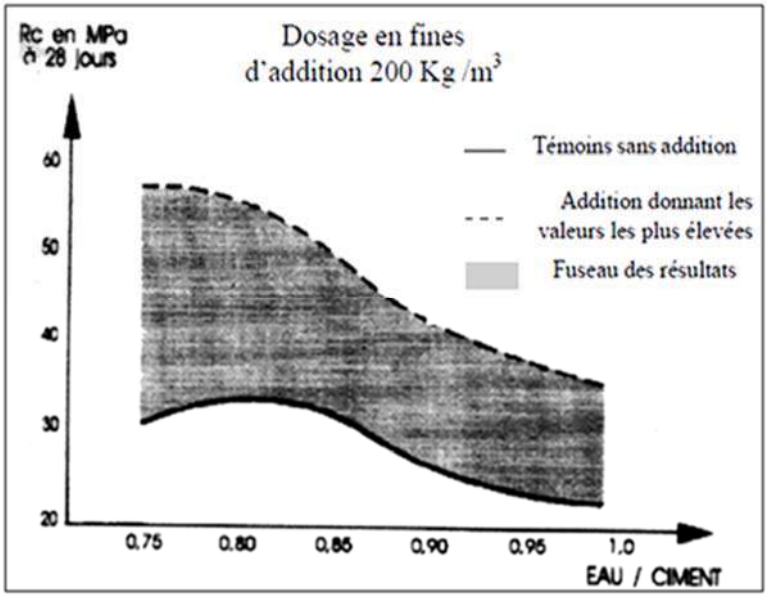


Figure 1.9. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance à la compression. **[9]**

- **La dimension du D_{max}**

Pour une même valeur du rapport E/C, on constat (figure I.10) que l'effet du diamètre Dmaxdu plus gros granulat est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sable.Cependant on constant que la maniabilité est très différente selon le type de sable. **[9]**

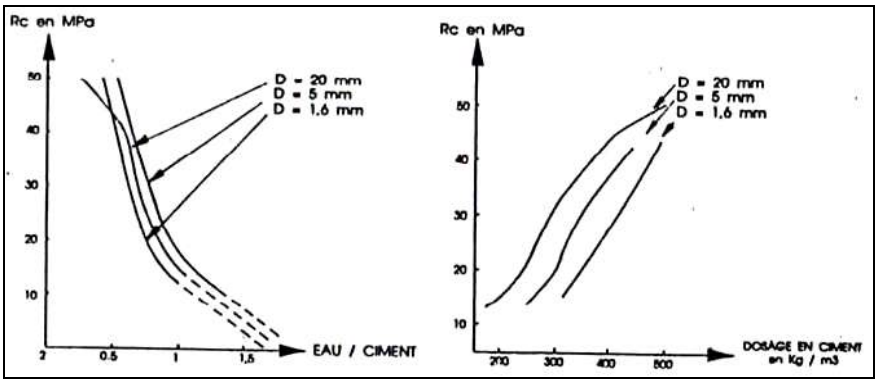


Figure (a) **Figure (b)**

Figure 1.10.Effets de la granularité sur la résistance. **[9]**

I.1.5.2.Propriétés spécifique

- **L'adhérence aux armatures**

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bons que le béton de référence. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pullout. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué. Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de compositions appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques. (Figure 1.11).**[1]**

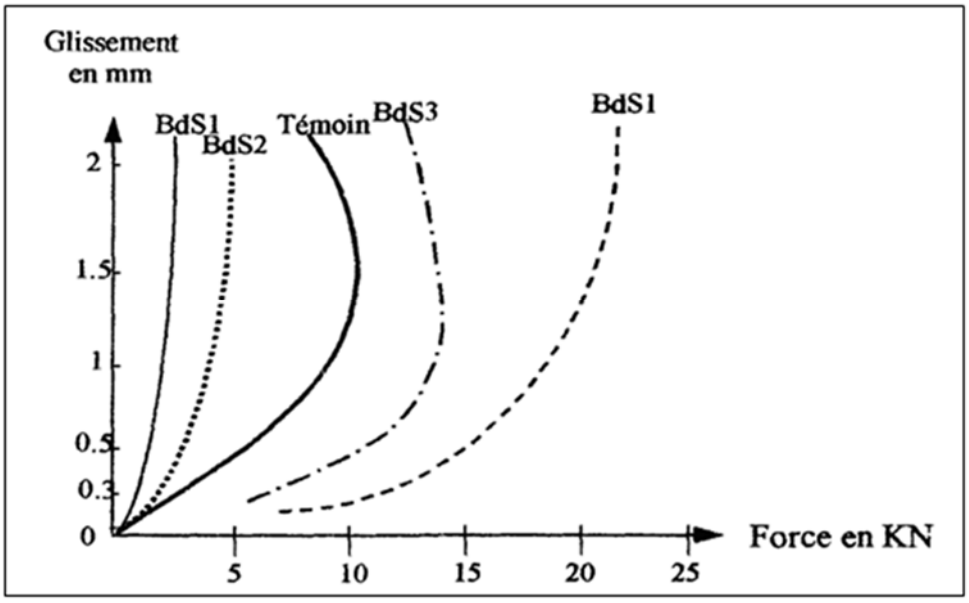


Figure1.11. Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation **[1]**

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondant au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée. Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure.

- **Durabilité des bétons de sable**

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques…etc. c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données dur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la vanne, phare de Port-Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc. **[10]**

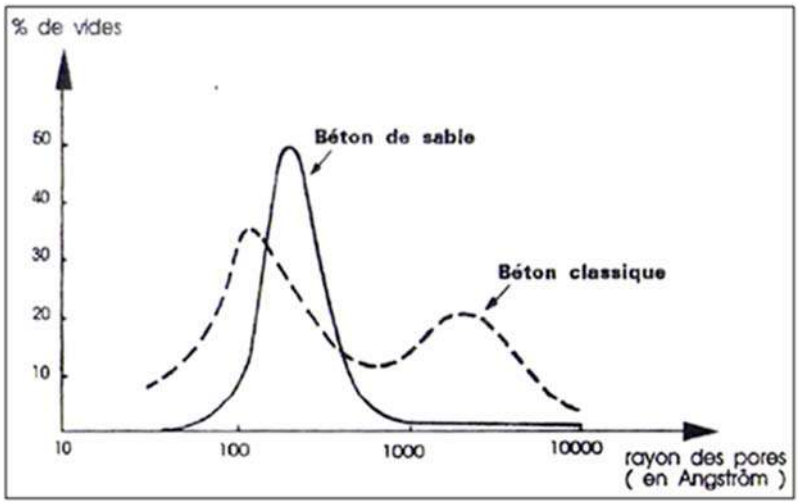


Figure 1.12. Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores **[1].**

- **Résistance au gel et au dégel**

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalent aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par

l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores **[1].**

- **Retrait et Fluage**

Les essais de retrait et fluage ont été réalisés sur un béton de sable et un béton classique, afin de les comparer. **[11]**

- **Le retrait**

✓ **Retrait hygrométrique**

Le retrait est la diminution de longueur ou de volume du béton au cours du temps.
Mais lorsqu'il est conservé dans l'eau, le retrait devient presque nul. **[11]**

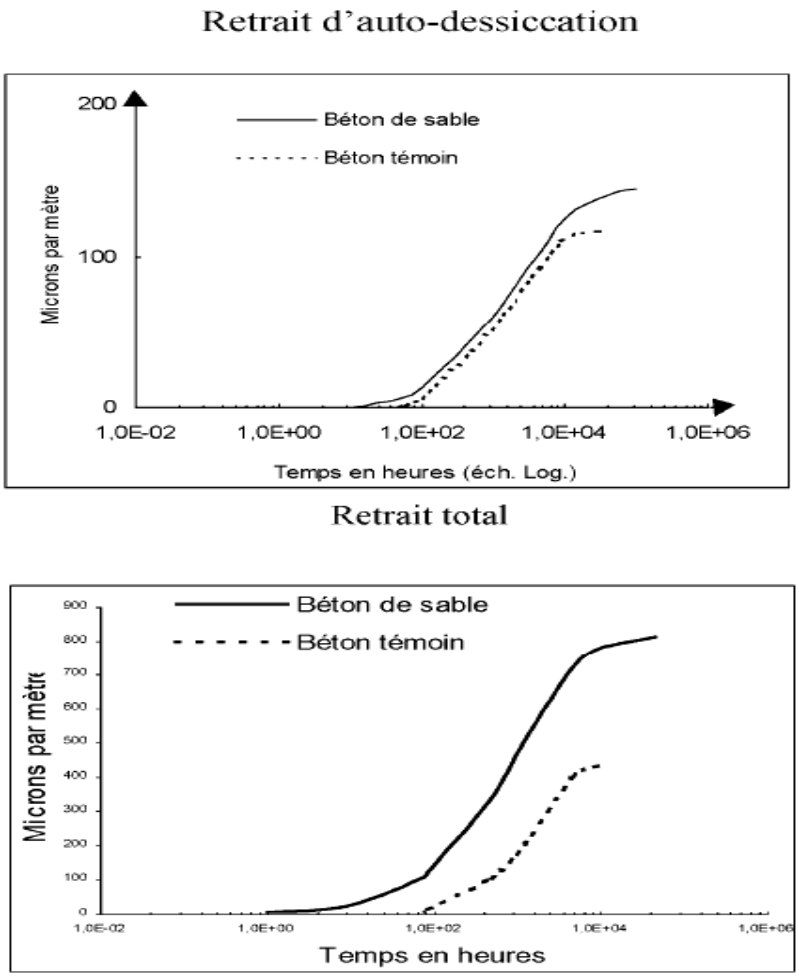


Figure 1.13. Evolution du retrait dans le béton de sable. **[12]**

✓ **Retrait sous charge ou fluage**

Le retrait était plus important lorsque le béton était conservé en étant soumis à une compression. Il existe donc un retrait sous charge, ou fluage, qui vient s'ajouter au retrait hygrométrique. **[11]**

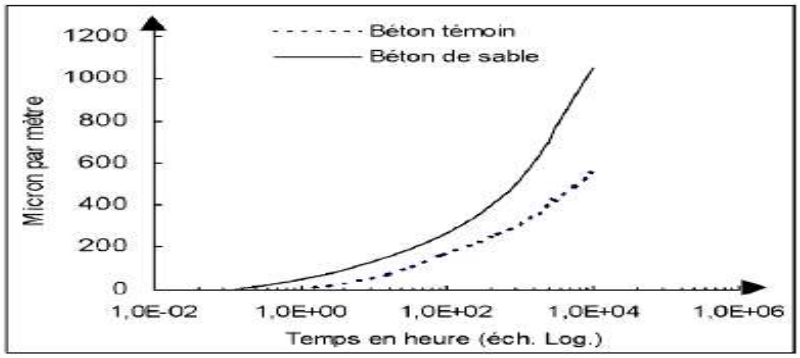
- **Le fluage**

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton.

Afin d'atténuer ce phénomène, il est conseillé de réduire le dosage en ciment en ajoutant des granulats.

Les essais de fluage effectués sur le fluage ont concerné les bétons de sable et les bétons ordinaires afin de les comparer. La (figure I.14) montre que la valeur du fluage du béton de sable est plus importante que celle du béton classique. Ceci est lié aux paramètres rentrant

Dans la composition des deux matériaux et qui influent systématiquement sur les déformations et donc sur les résistances.



Fluage d'auto-dessiccation

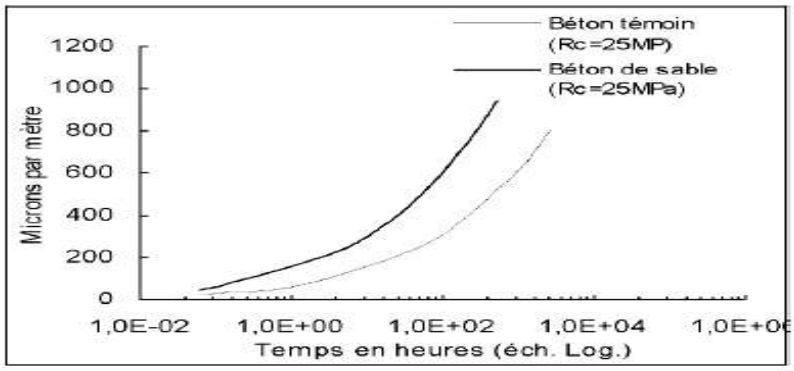


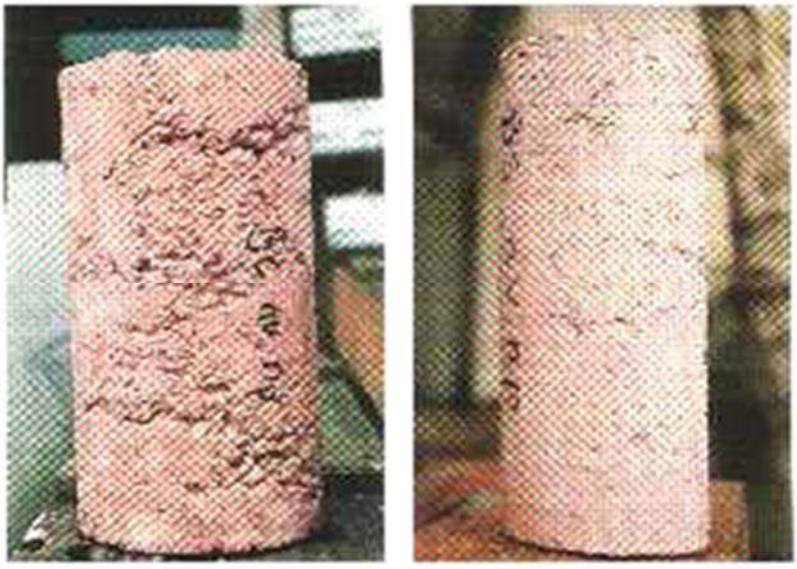
Figure 1.14. Evolution du fluage du béton de sable**[12]**

- **Comportement thermique du béton de sable :**

La conductivité thermique des bétons traditionnels varie de 1.4 à 1.8 W/m°C. Les conductivités thermiques mesurées sur bétons de sable sont légèrement inférieurs. Le béton de sable est donc plus isolant. Ce résultat s'explique par la porosité plus importante du béton de sable **[4].**

- **Phénomène de ségrégation des constituants :**

Du fait de leur faible étendue granulaire, et donc de leur plus grande homogénéité, combinée à une bonne maniabilité, cela confèrent aux bétons de sable un meilleur comportement vis à vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels. Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables. Les deux Figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cône de 14 cm).



a) Béton ordinaire **b)** Béton de sable

Figure 1.15. Eprouvettes non vibrées non piquées **[1].**

1.1.6. Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des BS par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du

BS répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

Indépendamment à l'aspect économique et aux gains de productivité, le BS fluidifié peut être une meilleure adaptation aux plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnels.

Les applications avec bétons de sable citées précédemment ont été privilégiées dans certainscas aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du bétonde sable répond parfaitement à la solution de quelques problèmes techniques qui restent de nosjours mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton etdes bétons des éléments minces renforcés par des fibres.

1.1.6.1. Domaines d'emploi des bétons de sable

L'utilisation de ces matériaux est à envisager dans différents domaines, et sous plusieursformes [Chauvin et coll., 1988], notamment dans les domaines du bâtiment, des travauxsouterrains, des barrages, des chaussées routières, des travaux portuaires mais aussi en tant quebétons projetés. **[1]**

1. La préfabrication

Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie (Photos 1.16).**[13]**

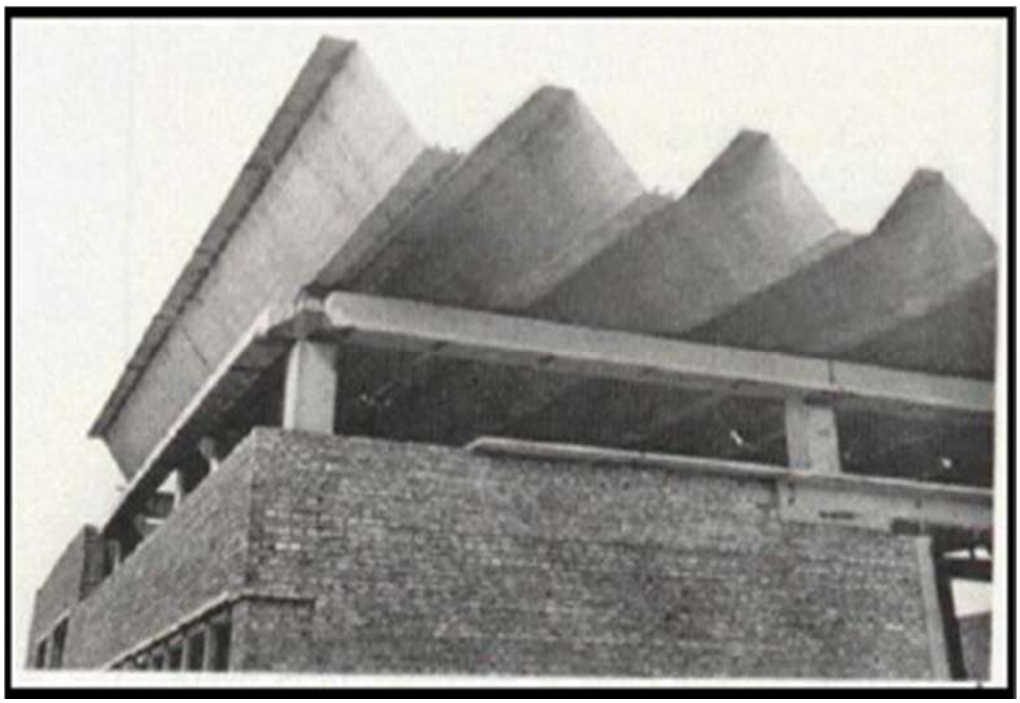


Figure 1.16. Le béton de sable dans la Préfabrication.

2. La projection

Le béton de sable peut être également utilisé en projection dans destravaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments (Photos 1.17). **[14]**

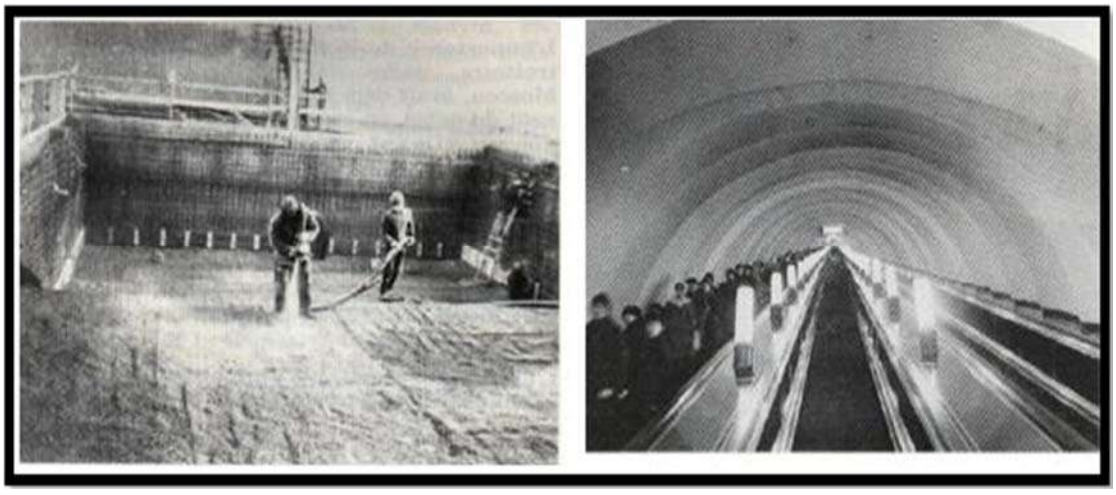


Figure.1.17. Le béton de sable en projection**[14]**

1.1.6.2. Types de sable

- **Béton de sable coulé**

Il peut être coulé sur place dans les routes et autoroutes, dans les aérodromes et en bâtiment (Photos 1.18). **[1]**



Réalisation d'une piscine Tunnel d'accès au métro de Leningrad
(Exemple d'application d'ombrelles)

Figure 1.18. Le béton de sable coulé

- **Bétons de sable fluides**

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation.

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants afin d'éviter l'ajout excessive et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire.

Les bétons de sable fluides sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous-œuvre. Les bétons de sable fluides sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'auto-nivellement est un atout considérable. L'intérêt réside dans les avantages suivants

- Rapidité et simplicité d'exécution ;
- Limitation des moyens en personnel et en matériels.
- Nuisances réduites (absence de vibration).

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétons), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de BS.

Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des BS, il pourra être mieux adapté aux cas suivants

- Risques de ségrégation préjudiciable.

- Forte densité de ferraillages.

- Recherche d'un produit fini.

Le BS fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BS nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques.



Figure.1.19. Dallage en BS fluidifié auto compactant (Base aérien de Dijon) **[1].**

- **Béton de sable projeté**

Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes**[15]**.

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (Fig.1.20). Par sa finesse granulométrique, le BS représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillages denses. Le faible taux de perte liée à l'utilisation de BS 20 projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilité en fait du BS projeté une solution adapté à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels**[15]**.



Figure 1.20. Le béton de sable en projection**[16].**

1.1.7Formulation du béton de sable

1.1.7.1. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci. Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité.

Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}). Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V=Vo\ (d\ /D_{\mathbf{max}})^{1/5}\text{……..(1)}$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

Vo : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

D_{max}: La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence telles que la méthode de Faury, Bolomey, Dreux, etc. **[1]**

- **Dosage en fines d'un béton de sable**

Pour le but d'optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable, il faut que ces constituants soient séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80 µm.

2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80 µm et le diamètre maximal du sable Dmax,

ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 µm, provenant des fines d'ajout. En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 µm et l'étendue

du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)^{1/5} \text{.....(2)}$$

Ps (v) : Porosité du sable d'étendue granulaire comprise entre 80 μm et Dmax.

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (Vo) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par lacoupure 80 μm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80 μm) et le volume de vide associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout. [Fines]= [Vides].

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/D_{max})^{1/5} \text{.....(3)}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.(Figure 1.21)

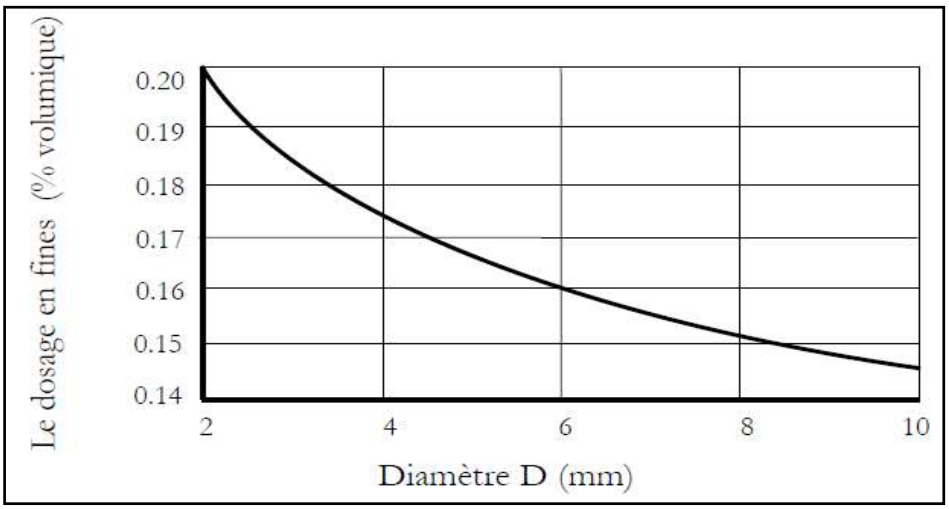


Figure. 1.21. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines **[1]**

- **Dosage en eau d'un béton de sable**

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v.

$$(e+v)_{min} = 0.8\ (d/\ Dmax)^{1/5} \text{……..(4)}$$

Le calcul de la porosité minimale exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (\ 60 / (f))\ mm \times \rho \text{……..(5)}$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm2/g du constituant.

ρ : densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères.

Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés

la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale. (figure1.22)

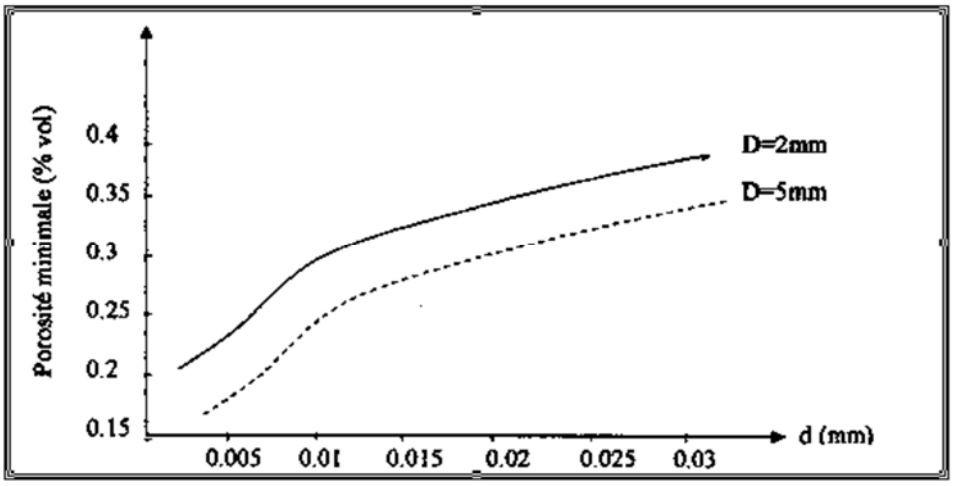


Figure 1.22. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable **[1]**

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à (e+v) min, alors pour des quantités d'eau supérieures à celles qui donnent l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire. (figure.1.23)

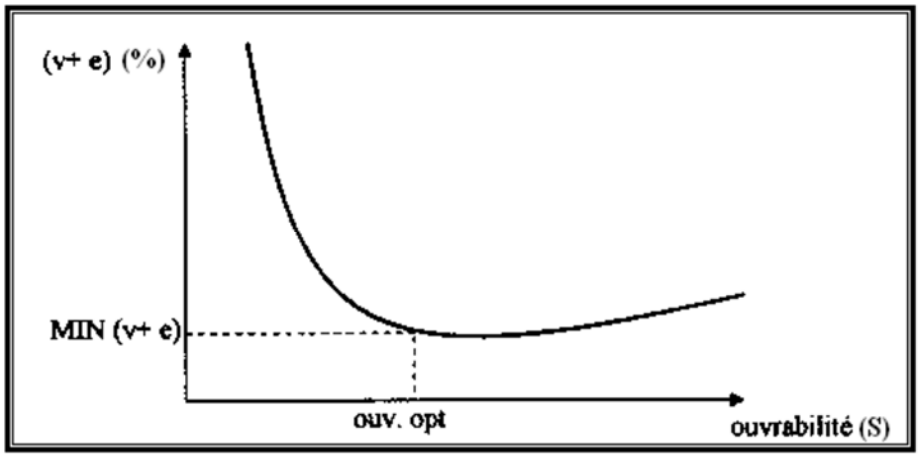


Figure 1.23. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée **[1]**

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vide}] = K\,[\text{eau}] \quad \text{.....(6)}$$

Avec :

K: constante comprise entre 0.2 et 0.25.

- **Dosage en sable**

Pour estimer le dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des constituants fines, eau et vides, comme ci-dessous :

[Sable]=1000-[fine]-[eau]-[vide] (l/m3)

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80 μm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

- **Estimation de la résistance en compression**

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [1] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf * Rc}{\left(1+\frac{3.1(e+v)}{c(1+K1+K2)}\right)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

e : dosage en eau totale (l/m3) ;

V : air piégée (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec

K1 = Kcv (CV/C) +Kfs (FS/C);

0.2<Kcv<0.4 ;

2<Kfs<3.3 ;

K1 0.5 K2= Kfi1 (Fil/C);0<Kfil 0.4 ;

K1<0.2

K1: coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

Kcv., Kfs, Kfil : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m3)

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés (Kcv., Kfs et Kfil).

Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente **[17].**

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum au-delà duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques. (figure.1.24**)**

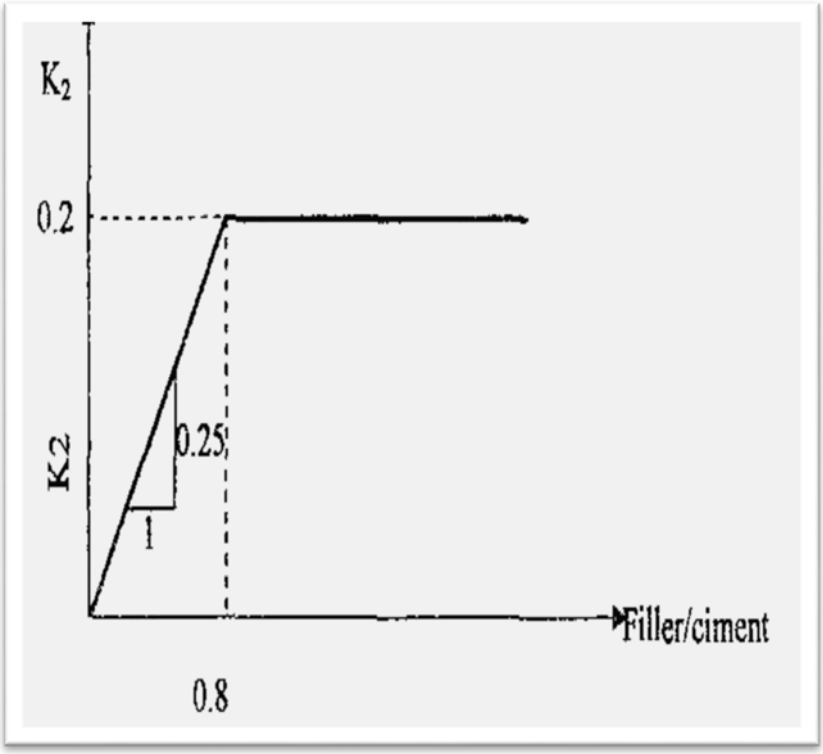


Figure. 1.24. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) **[1]**

Ainsi il y a d'autre paramètre qui s'ajoutant pour le dosage en fines, toute fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité, ces fines regroupant le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes …) et la fraction du sable inférieur à 80 µm, ainsi que l'optimum de la résistance serait atteint pour les dosages en ciment et en addition, solution du système suivant :

- Dosage en ciment + dosage en fines d'addition = dosage en fines.
- Dosage en fines d'addition / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

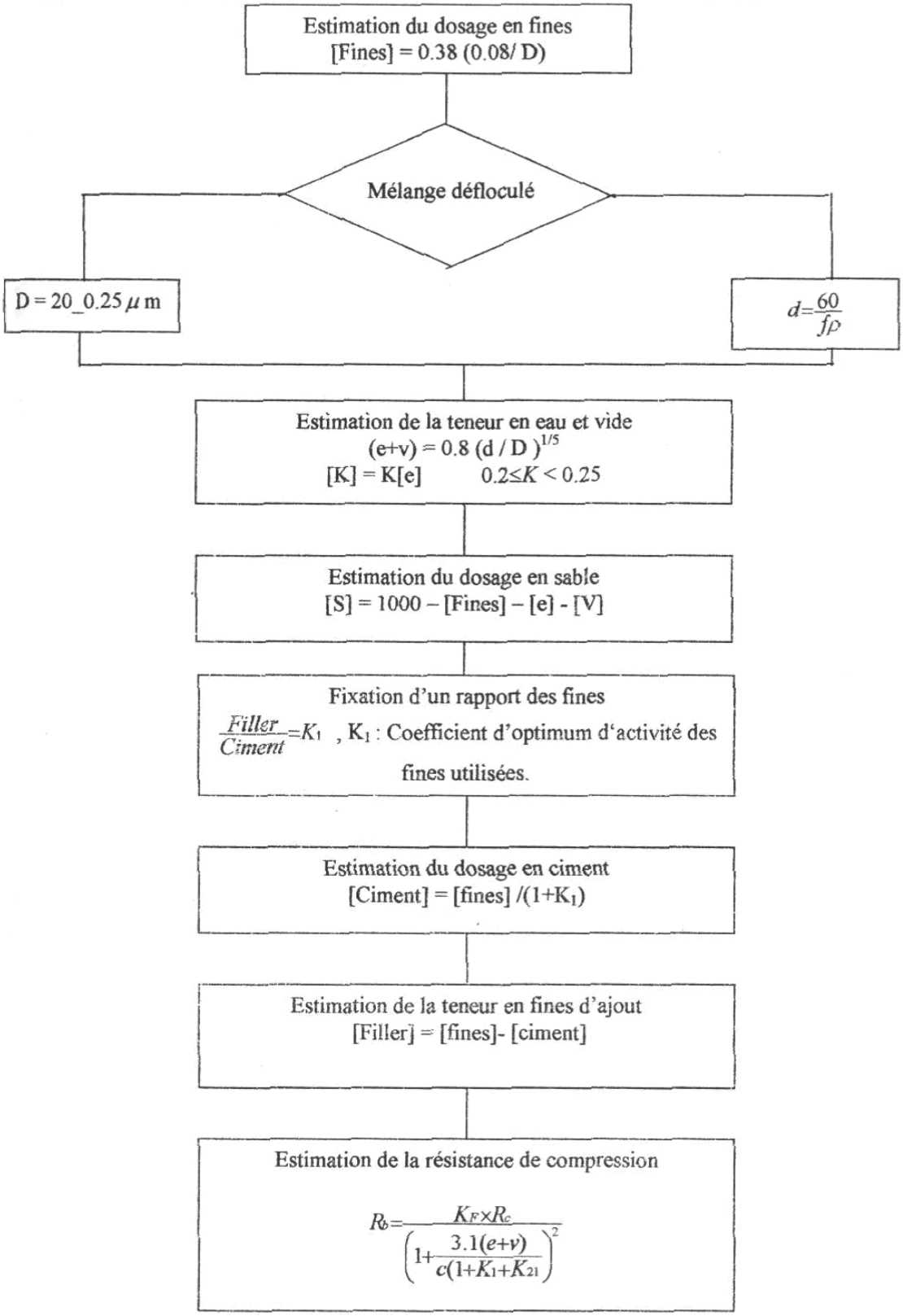


Figure 1.25. Organigramme de la méthode théorique **[18]**

1.1.7.2. Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

- **Détermination d'une formule de base sans fines d'addition**

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable.

✓ **Le dosage en ciment**

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif...etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et sont notés par C (kg/m3).

✓ **Dosage en eau**

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de 220 l/m3 pour un dosage en ciment de 350kg/m3, 250l/m3 d'eau pour un dosage en ciment de 400Kg/m3, mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique permettant d'estimer le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire.

$$E = \frac{800}{1+\alpha} * \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{5}}$$

α: compris entre 0.1 et 0.15 ;

d : est la borne inférieure de la phase solide du béton (mm) ;

D : est la borne supérieure de l'étendue granulaire du sable (mm) ;

✓ **Détermination du dosage en sable**

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, on utilise un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm) [1].

Le béton contient toujours un volume d'air Vair , la teneur en air des bétons est de l'ordre 3% en volume. Cette valeur est supérieure pour le béton de sable et se situe entre 5 % et 7 % du volume. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents

$$V_{sable} = 1000 - V_c - V_{adj} - V_{air} - V_{eau} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$M_{sable} = MVA * V_{sable} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

Msable: masse nécessaire pour 1 m3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V_{sable} : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m3).

$$MVAT = m_{ciment} + m_{eau} + m_{adj} + m_{sable} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

- ✓ **Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule**

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à10 S.

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$Si = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{sable}. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

Où

Si : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction MVAT,

MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 10). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 10) Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable.

- **Détermination du dosage en fines d'addition**

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total (MVAR=(MVAT).

Ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle. Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés et fixés précédemment afin de les comparer aux critères imposés. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$Si = S_{i-1}-(MVAT_{i-1} -MVAR_{i-1}) \text{ ……..(12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton desable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées

- Fine d'addition N° 1 : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m^{3}de fines. Figures 1.47 et 1.48

- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum demaniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.

- **Fine d'addition N° 3 :** Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60et 90 Kg/m3de fines.

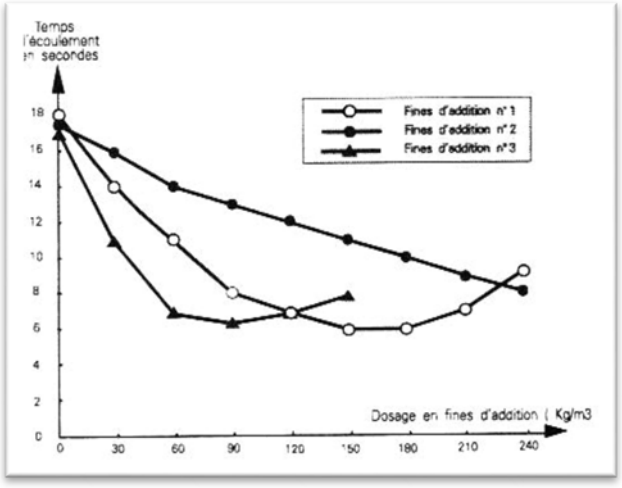


Figure.1.26. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition **[1]**

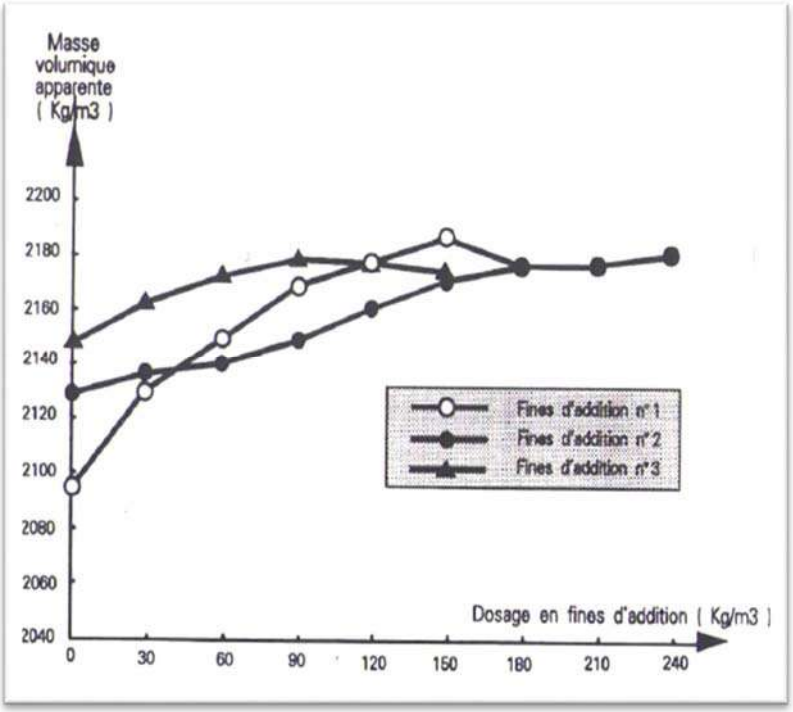


Figure. 1.27. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition **[1]**

1.2. Les ajouts minéraux

1.2.1. Définition

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts tels que les cendres volantes le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, pouzzolanes, les fillers etc. Permettent soit d'améliorer les caractéristiques rhéologiques ou mécaniques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la Composition du béton. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire.**[19]**

1.2.2. Classification des ajouts

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (1.2) ci dessous.

Tableau 1.1. Classification des ajouts selon leur réactivité **[19].**

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,…) fibres, pigments colorants, matières Expansives

1.2.2.1. Ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305) En outre, les particules les plus fines d'un ajout

inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

A. Fillers calcaires

Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, facilement solubles dans l'eau (voir karst), composées majoritairement de carbonate de calcium $CaCO_3$, mais aussi de carbonate de magnésium $MgCO_3$



Figure. 1.28. Secteurs d'activité dont sont issus les fillers calcaires.**[20]**

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (ils'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes (calcite,aragonite, vatérite).Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires etpeuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus parbroyage du matériau cru. Leurs compositions chimique est celle du carbonate de calcium(CaCO3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme CaMg (CO3)2), s'il réagit de calcaires dolomitique.**[21]**.L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finements'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre lesautres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats)(Figure I.3).L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelettegranulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'a l'état durci.

Les additions calcaires sont des additions de type(I) classées comme quasiment inertes

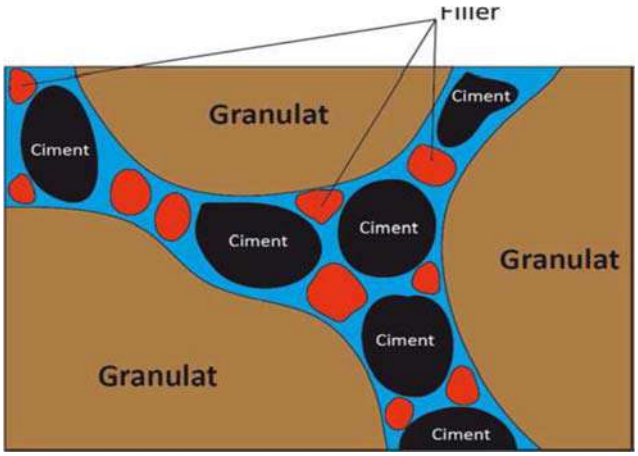


Figure 1.29. Illustration de l'effet filler **[22]**.

➢ Composition chimique de calcaire

Le calcaire peut être identifié car il peut être attaqué par les acides tel que l'acide chlorhydrique en solution, l'acide éthanoïque ou acétique contenu dans le vinaigre ou encore par l'acide tartrique (il forme alors du tartrate de calcium et du CO_2). L'hydrogénocarbonate étant une base, il réagit avec l'acide chlorhydrique en solution.

Le chauffage aux environs de 900 °C produit l'oxyde de calcium ou chaux vive avec du CO_2. Cette chaux vive réagit vigoureusement avec l'eau pour produire la chaux éteinte ou hydroxyde de calcium. Des suspensions de chaux dans l'eau (eau de chaux) répandues sur les murs (chaulage) réabsorbent le CO_2 de l'air et les couvrent d'une couche de carbonate de calcium**.[23]**

➢ Composition minéralogique et couleur

Il est composé d'au moins 70 % de calcite et peut contenir de la silice, de l'argile et de la matière organique ainsi que quelques autres minéraux dont les plus courants sont la dolomite, l'aragonite et la sidérite, qui influent sur sa couleur. En général blanc, le calcaire existe aussi dans des teintes de jaune, gris, brun ou même noir.

➢ Typologie de calcaire

- Calcaire oolithique
- Calcaire saccharoïde
- Calcaire lité
- Calcaire massif
- Calcaire lithographique
- Calcaire pisolithique

➢ **Utilisation de calcaire**

Les roches de calcaires sont utilisées

- comme matériau en sculpture (technique de la taille directe) .
- comme roche à bâtir utilisée dans la construction : par exemple, la pierre de Caen a servi édifier de nombreux édifices religieux au Moyen Âge ou tout simplement pour construire des maisons. Cet usage est à présent marginal dans la construction. La taille de pierre est un métier de la restauration des monuments historiques.
- comme matériau d'empierrement de la voirie : macadam, graves calcaires, ballast, d'un usage très fréquent.
- comme matière première entrant dans la fabrication du ciment.
- comme sable et granulat dans la fabrication des bétons, plus rarement dans les enrobés bitumineux, pour les calcaires les plus durs. **[24]**

1.2.2.2. Les ajouts minéraux actifs

A .La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes.

La pouzzolane est une roche à granulométrie variable d'origine minérale et volcanique. Autrefois utilisée comme composant et mortier incontournable dans la construction des comptoirs commerciaux par les Romains dans les bassins portuaires (il tire d'ailleurs son nom de la ville de Pozzuoli), elle est aujourd'hui utilisée dans plusieurs domaines, notamment les assainissements, le drainage des sols et pour des éléments de construction. Ce matériau est moins énergivore que le ciment Portland et se conjugue favorablement à la chaux pour former un bloc résistant et antibactérien. Il est disponible sur le marché sous sa couleur d'origine, c'est-à-dire rouge brun, d'un diamètre allant de 4 mm à 40 mm, suivant sa destination dans le sol ou dans la préfabrication. Il existe également une variété grise, disponible en diamètre de 1 mm à 15 mm. **[25]**



Figure 1.30: Roche volcanique de pouzzolane **[26]**

- **Les types de pouzzolane**

Il existe deux types de pouzzolanes

- **Pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produit généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive dans des proportions supérieures à 25%, d'alumine et d'oxyde de fer

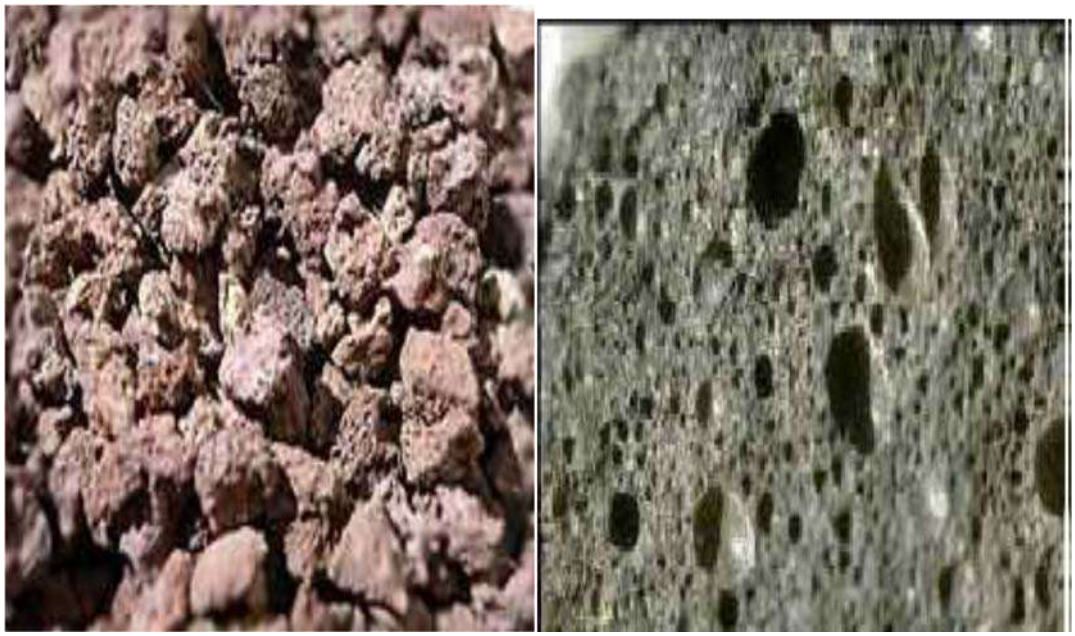


Figure 1.31: pouzzolane naturelle **[27]**

- **Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

➢ **Utilisation de pouzzolane**

- Elle est utilisée pour le jardinage, les constructions, le béton de chanvre, l'aquariophilie afin de filtrer l'eau car cette pierre est poreuse et constitue un bon support bactérien, l'assainissement non collectif et les routes.
- Présentant une forte hétéromère, elle exige pour son exploitation de passer au concassage et au tamisage pour parvenir à la granulométrie souhaité
- La pouzzolane, en raison de sa très forte porosité, est à la base de la fabrication de certains ciments à prise lente, utilisés notamment dans la constitution du béton pour les barrages de type BCR (Béton Compacté au Rouleau).



Figure. 1.32. Massif pouzzolane 15/25. **[27]**

➢ **La composition chimique de pouzzolane**

Domaine élargi des compositions chimiques des pouzzolanes (surtout d'origine volcanique)

Est donné dans le tableau (1.2) suivant

Tableau. 1.2. Avantages et inconvénients de pouzzolane**[28]**

Eléments	Pourcentages
SiO2	42-73
AL2 O3	10-20
CaO	1-10
MgO	1-3
Fe2O3	4-14
Alcalins	1-8

- La pouzzolane est un matériau très poreux, favorisant le drainage. Elle peut donc être associée à hauteur de 75 % avec des matériaux comme la tourbe ou les fibres de coco.
- La pouzzolane a une excellente stabilité physique et chimique, ce qui lui confère une grande durabilité. Elle ne se dégrade pas (pas de tassement, n'est pas friable) et ne réagit pas avec la solution nutritive. C'est un substrat inerte avec un pH neutre à légèrement acide.
- Par contre la pouzzolane a un pouvoir de rétention en eau très limité, ce qui oblige à réagir rapidement en cas de panne de distribution.
- Ce substrat s'utilise dans les tables à marée et les systèmes à percolation ou la solution nutritive peut être distribuée en continu.

  L'utilisation de la pouzzolane comme substrat en horticulture professionnelle, est réservé aux zones à proximité des carrières où est extraite la roche.

B. Le laitier

Le laitier correspond aux scories qui sont formées en cours de fusion ou d'élaboration du métal par voie liquide. Il s'agit d'un mélange composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux, avec divers oxydes métalliques, à l'exception des oxydes de fer. Ses rôles dans la métallurgie des métaux ferreux en fusion sont multiples.

Cette matière est un important coproduit des hauts fourneaux, appréciée comme remblai ou comme matière première dans la fabrication du ciment. Quant aux laitiers d'aciérie, si les scories Thomas étaient également un débouché essentiel de la sidérurgie au début du XX^{e} siècle, la valorisation des laitiers modernes passe après l'optimisation des procédés métallurgiques de la sidérurgie.



Figure. 1.33. Laitier granulé **[29]**

➢ **Les types de laitier**

Il existe plusieurs types de laitiers à savoir :

- **Laitier haut fourneau**

Les laitiers de haut fourneau sont des coproduits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. **[30]**



Figure. 1.34. Laitier de haut fourneau granulé. **[30]**

Tableau 1.3. Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau **[30]**

Eléments	(%)
CaO	40 à 48
SiO_2	32 à 41
Al_2O_3	9 à 18
MgO	1 à 9
MnO	0,4 à 0,7
FeO	0,2 à 1
S	0,6 à 1,5

➢ **Utilisation de l'ajout laitier granulé de hauts fourneaux LGHF**

L'utilisation de LGHF Est donné dans le tableau (1.4) suivant

Tableau 1.4. Propriétés du béton de ciment au Laitier granulés de hauts Fourneaux **[30]**

Propriétés du béton frais	**Commentaire**
L'affaissement et l'ouvrabilité	Le LGHF améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton, etl'ampleur de cette amélioration va de pair avec la proportion de LGHF utilisé, cependant que le LGHF à

	finesse élevéen'améliore pas l'ouvrabilité du béton.
Le ressuage	L'utilisation de laitier n'as pas d'incidence significative sur le ressuage du béton.
Temps de prise	Le temps de prise du béton du laitier peut être plus lent quecelui du béton de ciment Portland, en particulier en tempsfroid. La prise plus lente dépend de la réactivité du laitier et de sonpourcentage dans le mélange.
Propriétés du béton durci	
Développement de la résistance	En général la résistance du béton contenant du LGHF sedéveloppe plus lentement, est plus faible initialement et égaleou supérieure à long terme à celle du béton Portland de Résistance à la compression à 28 jours semblable. Par temps chaud, le développement de la résistance peut êtreaussi rapide, sinon plus, que celui du béton de cimentportland.
Retrait au séchage	Il n'y a pas de différences notables ence qui concerne lescaractéristiques de retrait entre le béton avec et sans LGHFcomme ajout cimentaire, si la proportion de la pâte est lamême. Il est par ailleurs possible de tirer avantage de l'ouvrabilitéaméliorée et de la réduction possible d'eau nécessaire dans lecas du béton contenant du LGHF
Fluage	Le LGHF semble réduire le fluage en raison del'augmentation de la résistance finale et du moduled'élasticité du béton qu'il entraîne

- **Laitier de métallurgie primaire (ou laitier noir)**

Dans une aciérie, le laitier vient à la fois des convertisseurs, où celui-ci est très oxydé, de la métallurgie en poche ou des fours électriques. Pour une tonne d'acier produite, on compte de 150 à 200 kg de laitier d'aciérie produits, quelle que soit la filière (haut fourneau - convertisseur ou fusion de ferrailles).

Le laitier de convertisseur (ou laitier noir) est généré par l'oxydation des éléments indésirables (comme le silicium et le phosphore) ou l'oxydation inévitable due au procédé (comme le fer et le manganèse). Ces oxydes sont dilués dans des matières destinées à donner au laitier un caractère plus ou moins basique, ou visqueux, etc.. Ces matières sont généralement basiques, comme la chaux magnésienne .



Figure. 1.35. Laitier de métallurgie primaire (laitier noir).**[31]**

- **Laitier de métallurgie secondaire (ou laitier blanc)**

Le rôle du laitier de métallurgie secondaire (ou laitier blanc) est aussi variable que complexe. Il rassemble les impuretés et les éléments chimiques indésirables en absorbant les inclusions d'oxydes dissoutes dans le métal, généralement issues du calmage. Pour cela, il est essentiel de gérer sa composition, de manière à le rendre réactif. Par exemple, une haute teneur en chaux et en fluor va favoriser la captation des inclusions d'alumine, qui sont acides. Cependant, ce laitier doit aussi ménager les briques réfractaires… le réglage des laitiers d'aciérie est donc un compromis.

Par ailleurs, certains oxydes du laitier, comme le FeO, peuvent oxyder les additions d'alliage comme le ferrotitane, l'aluminium, le ferrobore… Dans ce cas, ces éléments d'alliages sont

consommés avant d'atteindre le métal liquide : leur oxydation est donc un gaspillage. Une quantité de laitier trop importante, ou une oxydation du laitier mal maîtrisée est dans ce cas rédhibitoire.

- **Le laitier au soudage**

On appelle laitier la croûte qui se forme sur le bain de la soudure. Il protège ce bain de l'oxygène de l'air, et l'isole thermiquement.

Dans le soudage à l'électrode enrobée, c'est l'enrobage qui va, en fondant, créer le laitier.

On distingue alors les électrodes en fonction de leur enrobage

- enrobage basique (riche en chaux), dont la mise en œuvre est difficile, mais qui assure une excellente résistance mécanique.
- enrobage acide (riche en silice), à l'utilisation plus facile.

➢ **Utilisation de laitier**

- **Utilisation sous forme de liant hydraulique**

Les laitiers granulés ou bouletés peuvent développer une prise hydraulique lente sous l'effet d'un activant (clinker ou chaux). Après broyage fin (3 500 à 4 500 blaines) avec séchage simultané, ils trouvent leurs utilisations comme composant principal ou secondaire du ciment.

- **Utilisation sous forme de granulats**

L'utilisation sous forme de granulats est moins rentable que l'utilisation sous forme de liant hydraulique. Cependant, tous les types de laitiers cristallisés sont utilisables sous forme de granulats.

L'utilisation des laitiers de haut-fourneau cristallisés est reconnue sous deux formes

- en fraîche production : le laitier est refroidi à la sortie du haut-fourneau et subit un concassage dans la foulée.
- après un passage en crassier : le laitier est stocké dans un crassier, équivalent d'un terril. Ce stockage peut entraîner une hétérogénéité du matériau notamment en cas de mauvais suivi des approvisionnements.

- **Utilisation comme engrais et pour amendement de sols**

La minette lorraine, minerai de fer pauvre et contenant beaucoup de phosphore, générait une fonte qu'il fallait déphosphorer au convertisseur Thomas. Le laitier de convertisseur alors obtenu, riche en P_2O_5, est un excellent engrais.

C.Fumée de silice

La fumée de silice est un sous produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électriques dans lesquels sont élaborés du silicium et d'autres alliages. La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour donner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante (> 90%). La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire en comblant les vides et en augmentant la compacité. De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

La fumée de silice a été introduite dans le ciment par les Norvégiens ; en 1952 Bernhart**[32]** mettait en évidence l'amélioration des résistances mécaniques apportées par cette addition. La première utilisation de la fumée de silice dans le béton de construction a eu lieu en 1971 à la fonderie de Fiskaa en Norvège . Depuis 1979, les ciments Islandais renferment de 6 à 7 % de fumée de silice. Au Canada, les ciments produits par Several Canadian Cement Companies contiennent prés de 7 à 8 % de fumée de silice **[32].** Aujourd'hui cet ajout est très répandu dans le monde et ses performances apportées ne sont plus à discuter.

D.Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre allant de 1 à 150 µm. En 1937, Davis de l'Université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie. En 1948, la construction du barrage de Hungry Horse aux USA **[33]** fut la première application pratique. Depuis, les études se sont multipliées et l'utilisation de ses cendres s'est énormément répandue grâce aux améliorations apportées au béton et à l'économie enregistrée par leur emploi.

1.2.3. Modes d'utilisation des ajouts

Les ajouts peuvent se diviser en deux catégories selon leurs modes d'utilisation

1.2.3.1. Utilisation dans les ciments

Les cimenteries fabriquent un ciment nommé CEM II (CRS) ayant un intérêt économique et écologique. Ce ciment peut contenir des proportions différentes des sous-produits industriels tels que les cendres volantes, le laitier ou les roches naturelles comme lecalcaire et la pouzzolane.

1.2.3.2. Utilisation dans le béton

Les ajouts minéraux sont indispensables dans la confection du béton à hautesPerformances. Ils viennent s'ajouter à la composition du béton pour rendre l'empilementgranulaire plus compact. Ils apportent avec les adjuvants organiques une cohésion Intergranulaire modifiant la rhéologie du béton dans le sens d'une maniabilité favorable.Après durcissement, le béton obtenu est plus résistant et plus durable

1.2.4. Utilisation des additions minérales en Algérie

Bien que l'emploi des additions minérales soit généralisé dans le monde, il reste limitéen Algérie malgré la disponibilité en grande quantité de ces ajouts et leurs coûts relativementréduit par rapport au ciment. Leurs emploi dans le domaine du génie civil n'est pas encorerépandu. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions

minérales sur plusieurs aspects des bétons ; actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé.

On peut citer l'utilisation des ajouts actifs tels que le laitier d'EL-Hadjar par lacimenterie de Hamma Bouziane, et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf par l'ERCO. Parcontre, d'autres cimenteries utilisent des ajouts inertes tels que le calcaire comme l'ECDE(Chlef). La nouvelle cimenterie de M'sila utilise déjà un ciment ternaire combinant laPouzzolane(7.5%) et le calcaire (7.5%) **[34].**

Tableau 1.5. Utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes. **[34]**

Cimenterie	**Ajouts utilisés**
Ain Touta (Batna) Ain El Kebira (Sétif) Hamma Bouziane (Constantine) Beni Saf (Tlemcen) Zahana (Oran) Saida	Pouzzolane
HadjarSoud (Skikda) Tebessa	Laitier granulé
Meftah (Alger) Raïs Hamidou (Alger)	Tuf/Calcaire
Chlef	Calcaire

M'sila	Laitier granulé / Pouzzolane

1.2.5. Avantage de l'utilisation des additions minérales

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présentedes avantages dont les plus importants sont

1.2.5.1. Avantage technique

L'incorporation des ajouts minéraux dans le ciment conduit à une améliorationconsidérable des propriétés du béton, cela est favorisée par l'incorporation des particulesfines qui vient combler les vides entre les granulats fins et les grains du ciment. Cetteincorporation améliore la maniabilité, contribue à la réduction du dosage en eau et engendreune réduction de la ségrégation dans le béton frais, et par conséquent améliore les propriétésmécaniques du béton durci.

1.2.5.2. Avantage écologique

L'industrie cimentaire se trouve dans l'obligation de diminuer les rejets dansl'atmosphère des gaz à effet de serre responsable du réchauffement de la planète. Lesadditions minérales telles que les cendres volantes, laitiers, pouzzolanes naturelles constituentune alternative favorable pour réduire la quantité de clinker responsable de l'émission duCO2, et par la même occasion, on les récupère dans la construction aux lieux de les rejeter dansla nature.

D'autres solutions permettant de réduire l'émission de gaz carbonique ont été mises enœuvre par l'industrie cimentaire depuis de nombreuses années telles que **[35]**

-L'incorporation, dans les matières premières, avant cuisson, de certains matériauxsélectionnés, déjà décarbonatés ou ne contenant pas de calcaire.

-L'utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets destinés àl'incinération. Leur utilisation comme combustible permet, outre la réduction de CO2,

-Une destruction totale des molécules organiques, une élimination de toute sorte dedéchets ou mâchefer et une économie des dépenses énergétiques.

1.2.5.3. Avantage économique

Le remplacement ou la substitution d'une partie de ciment par l'addition minéralepermet de réduire la consommation en clinker. En effet, le clinker étant obtenu partransformation de la crue (argile+calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante.

Cette dernière peut être réduite par l'introduction de ces ajouts dans le ciment dont le prix de

fabrication ne cesse d'augmenter. Cela nous amène à une réduction du coût énergétiquenécessaire à sa fabrication.

1.3. Influence de combinaison des ajouts minéraux sur les propriétés des matériaux cimentaires

1.3.1. Etats frais

- **Etalement**

M. Gesog˘lu et al**.[36]** ont étudie l'influence de substitution du ciment par 15%,30% et 35% de cendre volante et 5% ,10% et 15% de fumé de silice sur l'étalement et le temps d'écoulement de béton autoplaçon .Ils ont constaté que l'étalement de BAP augmente et le temps d'écoulement diminue en fonction d'augmentation de pourcentage des ajouts minéraux.

M. Gesog˘lu et al**. [36]** ont trouvé aussi que l'étalement de béton autoplaçon est augmenté et le temps d'écoulement est diminué en fonction d'ajout quartenaires des minéraux avec (7.5%cendre volante+7.5laitier+5%fumé de silice et 15%cendre volante+15laitier+10%fumé de silice et 22.5%cendre volante+22.5laitier+15%fumé de silice).

1.3.2. Etat durci

- **La résistance à la compression**

En combinant la pouzzolane et le laitier, CHABI et al **[37]** ont abouti à une quantité optimale de 35% qui représente une meilleure résistance et une meilleure économie, de même le ciment à la pouzzolane et au laitier montre une meilleure durabilité grâce à sa résistance aux milieux agressifs. Avec 15% de laitier et 15% de pouzzolane dans une pâte de ciment.

GHRICI M et al **[38]** ont menés une étude pour évaluer l'effet de l'interaction entre des additions; le filler calcaire et de pouzzolane naturelle sur les propriétés des mortiers et bétons. Ils ont conclus que la substitution d'un ciment Portland par un taux de 10% de fines calcaire améliore les résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers binaires au très jeune âge (2 jours) par contre ces dernières sont améliorées par des taux de 30% de pouzzolane naturelle et 10% de fumée de silice à long terme (90 jours). Pour les mortiers ternaires combinant à la fois deux ajouts, les substitutions (10% pouzzolane/10% calcaire) et (10% pouzzolane/10% fumée de silice) améliorent nettement leurs résistances mécaniques à long terme (90 jours).

Une étude sur l'effet de l'incorporation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur les propriétés physico-mécaniques d'un ciment à base de calcaire a été menée par AICHOUBA.A

et al **[39]**, ils ont confirmés que l'utilisation des ciments ternaires contribue d'une façon positive à l'amélioration des résistances mécaniques des ciments, de La durabilité est une meilleure résistance aux acides.

M. Gesog˘lu et al**. [36]** ont étudie l'effet de substitution du ciment par 15%,30% et 35% de cendre volante et 5% ,10% et 15% de fumé de silice sur la résistance à la compression de béton autoplaçon. Ils ont trouvé que la résistance à la compression de BAP diminue en fonction d'augmentation de pourcentage des ajouts minéraux.

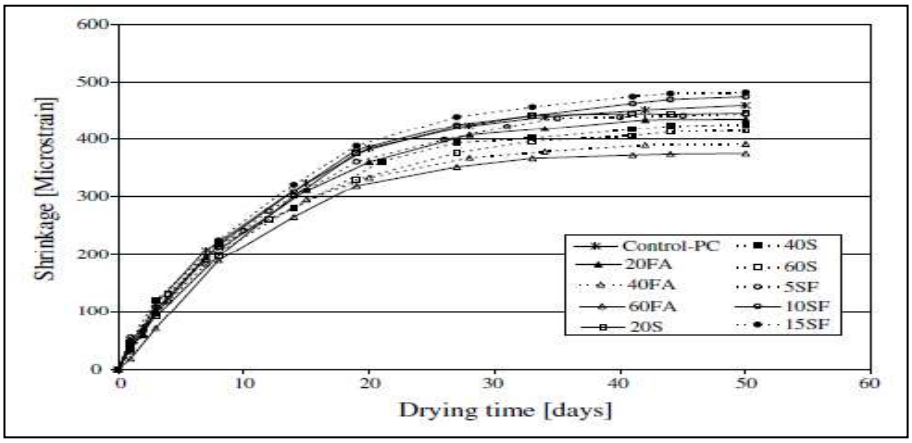


Figure. 1.36.Séchage de SCCs avec mélanges cimentaire binaire. [**36]**

- **Retrait**

ITIM, A **[40]**rapporte que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de desiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure. Le calcaire engendre un retrait semblable à celui du ciment ordinaire, par contre le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. De son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution et une fois ce taux dépassé sa valeur est réduite. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire et le laitier. Ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes de laitier et de calcaire et un peut moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eau qui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation.

- **Gonflement**

Berkani, B**[41]**a étudié les variations dimensionnelles des éprouvettes des mortiers de différents ajouts (calcaires, laitier et pouzzolane) en fonction de l'âge, à la température de cure humide de 20°C. Il a constaté que l'effet des additions est négligeable jusqu'à l'âge de

7jours, audelà de cette période il remarque que le calcaire est celui qui présente la variationdimensionnelle la plus élevée (15,87% sup MT). L'effet du MPZ et ML se manifeste à partirde 20éme jours de conservation ou le MPZ provoque un gonflement supérieur au MT de8,62% et ML participe à la réduction de 10,42% par rapport au MT.

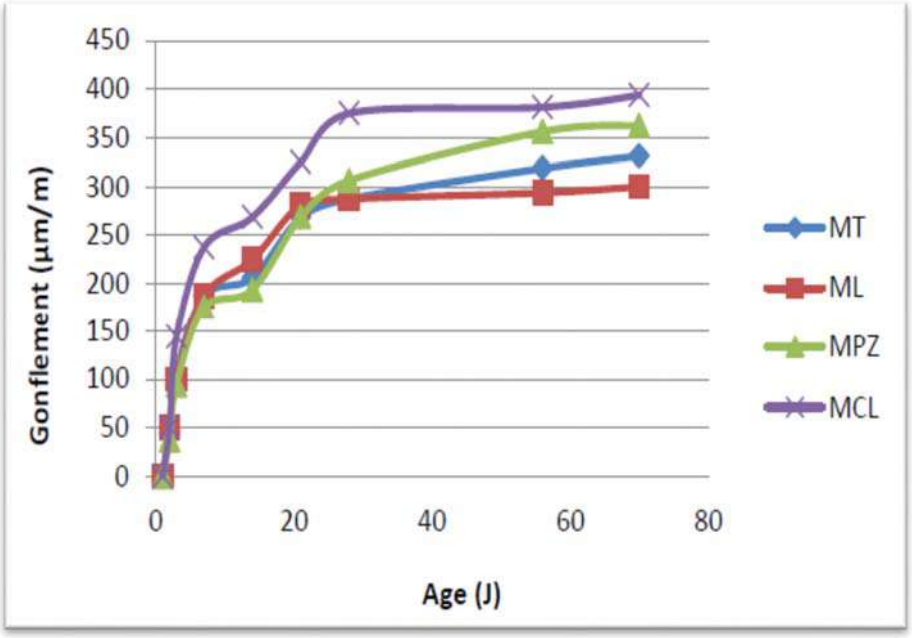


Figure 1.37. Gonflement des différentes éprouvettes à 20°C. [**41]**

1.4. Conclusion

A l'issue de la consultation des textes et l'analyse bibliographique des études sur l'incorporation des additions minérales dans la formulation des bétons et matériaux cimentaires, certains facteurs bénéfiques et avantages ont été tirés dont les principaux sont :

- Il est possible même indispensable d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle de Beni-saf, les fillers de calcaire ainsi que le laitier de haut fourneau en Algérie pour produire des ciments ternaires et quaternaires vue leurs grande disponibilités.
- Les ajouts employés comme substituant du ciment ou comme aditions dans le béton peuvent apporter des modifications du comportement des matériaux cimentaire tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Chapitre 02 :

MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction

Ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes quiSeront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristique Bien connues à savoir

- la granularité ou le fuseau granulaire du squelette.

- les dosages en sable, ciment, d'addition, d'eau et d'adjuvant.

-La caractérisation des bétons de sable autoplacon à base de ciment ternaire et quaternaire, à l'état frais et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais faits au cours de ce travail sont

- **Sur béton frais**

- Etalement
- Temps d'écoulement
- Densité

- **Sur béton durci**

- La résistance a la compression pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16cm
- Absorption d'eau par capillarité
- Retrait et Gonflement

2 .2. Caractérisation des matériaux utilisés

Pour la confection des bétons, des matériaux locaux de la wilaya de Médéa ont été utilisés et caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil du Hall de Technologie de l'université de Médéa et suivant les normes en vigueur.
Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région (Médéa) et surtout pour fabriquer un bétoncomparable à celui utilisé dans les chantiers.

2.2.1 Ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment résistante au sulfate composé CEM I/A 42.5(CRS), produit par cimenterie (Msila) sous le nom "Mokaouem plus "

Le Ciment CRS (ciment résistant aux sulfates) est constitué de

- 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans Ce ciment ;
- Du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.



Figure.2.1. Le ciment utilisé.

B. Analyse et caractérisation

Le Tableau **2.1** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment.

Tableau.2.1. Analyse chimique du ciment **[42]**

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%)	≤ 4
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	≤ 3
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	≤ 3.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	≤ 5.5
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	≤ 50
	Aluminates tricalciques C3A (%)	≤ 5

➢ **Essais physiques**

- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[42]**.

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[43]**.

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P 15-473 **[44]**.Le Tableau.**2.2**résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau.2.2. Caractéristique physiques du ciment. **[44]**

Caractéristiques	**Valeurs**
Finesse (Cm^2/g)	4050
Consistance normale (%)	27
Le temps de prise (min)	2:40-3:45
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	3200 ±250

➢ **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme NF P 15-471 **[45]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le Tableau.**2.3**.

Tableau. 2.3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge **[45].**

Ages (jour)	Résistance à la compression (MPa)
2	19.3
28	49.5

2.2.2. Le sable

Le sable utilisé est un sable de dune provient de la région de Oued-Souf. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie (figure 2.2). Il est séché pondant 24h à température de 120 °C. Les caractéristiques physiques de ce sable sont représenté dans le tableau 2.4 et sont données ci-après et sa courbe granulométrique est présentée dans la figure **2.2**



Figure.2.2.Sable utilisé

L'analyse granulométrique de sable utilisée est présentée sur la Figure**.2.3**suivante

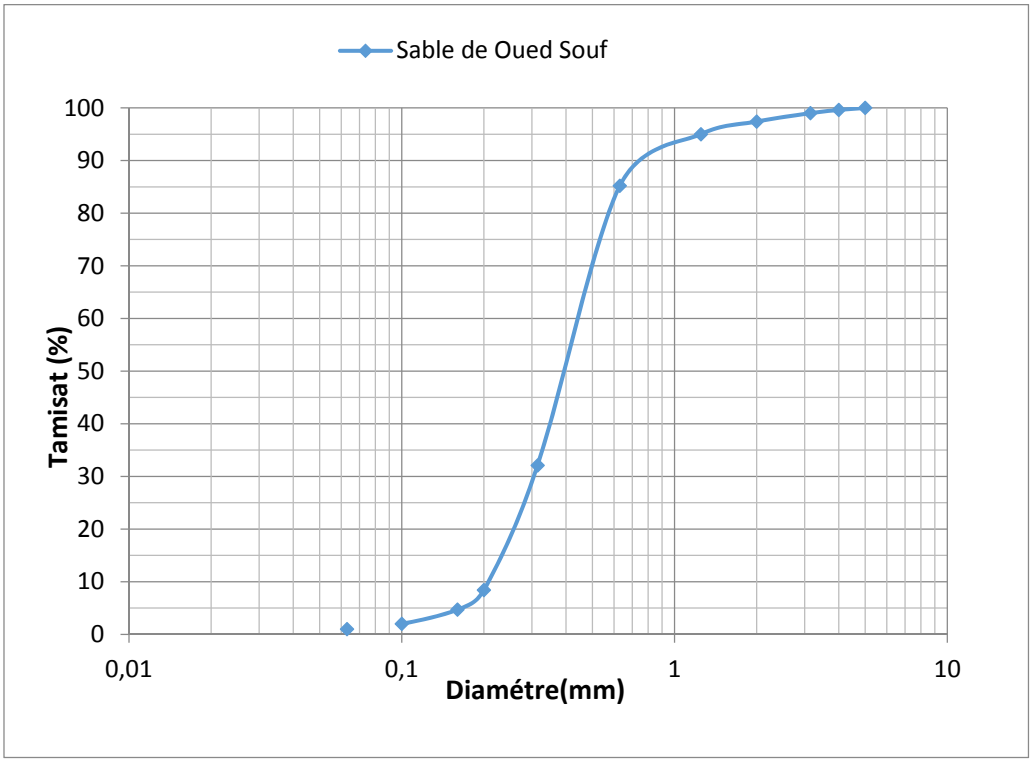


Figure.2.3. La granulométrie du sable utilisé

Tableau.2.4. Propriétés physiques du sable utilisé

Caractéristique	**Type de sable**	**Normes**
Provenance	**Sable**	
Classe granulaire	0 /3	NF EN 933-1**[46]**
Module de finesse	2.02	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.64	NF EN 1097-6**[47]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.58	NF EN 1097-3**[48]**
Equivalent de sable (%)	à vue : 88.01	NF EN 933-8**[48]**
	à piston : 82.11	
Compacité (%)	60	NF EN 933-8**[48]**
La porosité (%)	40	NF EN 933-8**[49]**
Taux d'absorption d'eau (%)	0.44	NF EN 1097-6**[47]**

Le sable utilisé a été analysé a l'aide d'un spectrophotométrie infrarouge, pour l'identification des différents groupements caractéristiques de la biomolécule**.**

Le spectre obtenu sur le sable utilisé démontre que sa nature est calcaire (Figure**2.4**).

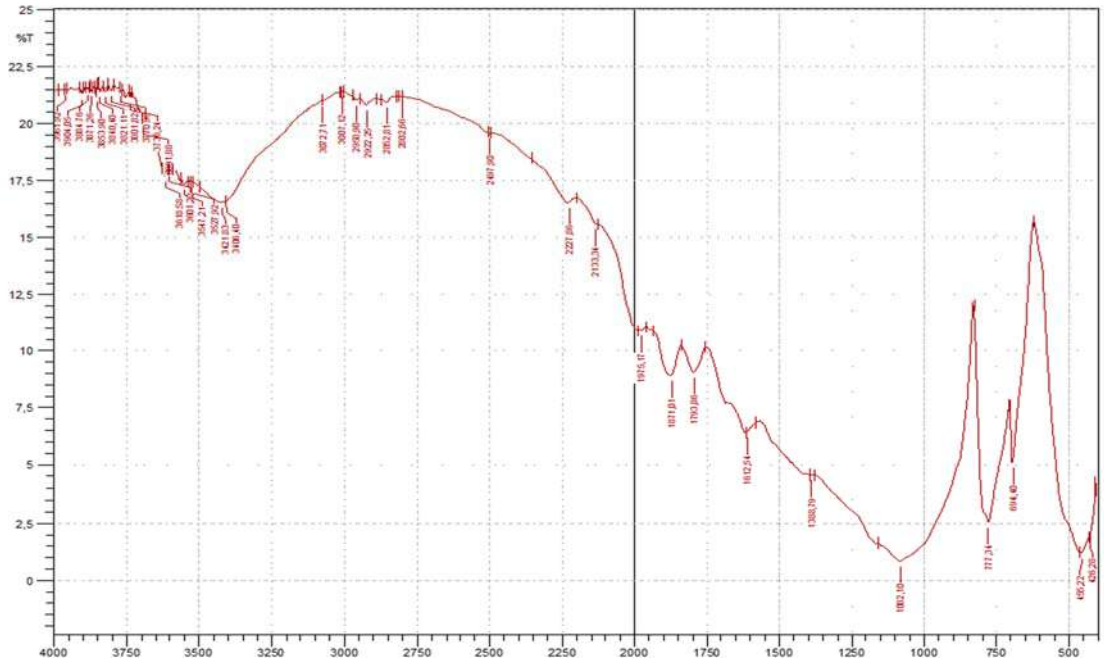


Figure.2.4. Analyse chimique de sable utilisé

2.2.3Fillers (Laitier)

Le filler utilisé dans ce travail est de filler de laitier de hauts fourneaux de couleur noir provient d'usine d'El Hadjar , sa composition chimique est donnée dans les tableaux ci-dessous et ses caractéristiques physiques sont représenté dans le tableau 2.6

Tableau. 2.5. Caractéristiques chimique de les fillers de laitier noire utilisées.

Si O2	Al2 O3	Fe2 O3	Ca O	Mg O	Na2 O	K2 O	S O3
42.20	5.85	1.90	42.20	4.72	0.12	0.43	1.54

Tableau.2.6. Caractéristiques physique de les fillers de laitier noire utilisées.

Caractéristique	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.91
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.22
Surface spécifique Blaine(cm²/g)	5539



Figure.2.5. Laitier noire

2.2.4. Ajouts minéraux

2.2.4.1. Le calcaire

Le calcaire utilisé dans cette étude, est extrait de la carrière de la région de Mascara, Algérie et fourni aussi par la cimenterie de LAFARGE (figure 2.4) Cette addition de couleur blanc jaunâtre est fournie sous forme de pierres concassées et ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2/g. Le temps de broyage par un broyage à disque a été fixé à 20 min. Sa masse volumique absolue est de l'ordre de 2.47 g/cm^3. Sa composition chimique est reportée sur le tableau **.2.7** sa teneur en $CaCO_3$ est 95,80 % le tableau 2.8 représenté les caractéristiques physiques de calcaire utilisé.

Tableau.2.7. Composition chimique du calcaire de Mascara utilisé.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	RI	PF
0,85	0,93	0,56	53,08	0.23	0,60	0.08	0,53	0,52	42,55

Tableau.2.8. Caractéristiques physique de calcaire

Caractéristique	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm³)	3.20
Masse volumique apparente (g/cm³)	0.81 g/cm³
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	5200



Figure.2.6 . Le calcaire utilisé

2.2.4.2.La Pouzzolane

La pouzzolane utilisée au court de ce travail est fournie par la cimenterie de LAFARGE. Cette pouzzolane de Couleur grise rougeâtre (figure 2.7) est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite

Broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. Le temps de broyage par un broyage à disque a été fixé à 30 min. Sa masse volumique absolue est de 2.43 g/cm^3. Sa composition chimique est donnée Dans le tableau .2.9 et ses caractéristiques physiques sont motionnée dans le tableau 2.10 .

Tableau.29. Composition chimique de la pouzzolane utilisée.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PAF
46.40	17.50	10.50	10.50	3.80	3.40	1.50	0.40	4.31

Tableau.2.10. Composition physique de la pouzzolane utilisée.

Caractéristique	Valeur
asse volumique absolue (g/cm³)	2.65
Masse volumique apparente (g/cm³)	0.81 g/cm³
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	3200 cm²/g



Figure.2.7.le pouzzolane utilisée

2.2.4.3. Le laitier

Le LHF utilisé comme ajout dans le ciment est provient d'usine d'El Hadjar de la wilaya d'annaba il a une couleur blanc.

Les Caractéristique physique de LHF utilisé est présenté dans le tableau 2.11 suivant

Tableau.2.11. LesCaractéristiquephysique de laitier blanc

Caractéristique	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.80
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.12
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	5332



Figure.2.8. Le laitier blanc

2.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du BSAP est celle de distribution considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme [NF EN 1008] **[50].**

2.2.6 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne Granitex commercialisé sous l'appellation 'MEDAFLOW30', de forme liquide ; de couleur marron ; d'un PH égal à 6-6.5, de densité 1,07 ± 0,01et d'une teneur en chlore < 0.1g/L

2.3 Protocol expérimental

La composition du béton de sable pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode théorique SABLOCRETE 1994[13]. Nous sommes basé sur la confection des bétons dont le nombre de gâchées réalisées s'élève à 20. Avec une gâchée on produit03éprouvettes qui seront destinées aux différents essais de caractérisation, d'où le nombre d'éprouvettes a dépassé 60.

2.3.1 Composition des bétons

Les différentes compositions obtenues sont représentées dans les tableaux ci-dessous

Tableau. 2.12. Compositions des Béton de sable auto plaçant à base de ciment ternaire et quaternaire pour 1m³

composant	Sable(Kg/ m³)	Ciment(Kg/ m³)	Fillers(Kg/ m³)	Eau(L/ m³)	Adjuvant* (%)	Pouzzolane (Kg/ m³)	Laitier(Kg/ m³)	Calcaire(Kg/ m³)
B1	1400	400	200	240	1%	0	0	0
B2	1400	364.8	200	240	1%	16.8	18.4	0
B3	1400	348	200	240	1%	33.6	18.4	0
B4	1400	331.2	200	240	1%	50.4	18.4	0
B5	1400	314.4	200	240	1%	67.2	18.4	0
B6	1400	247.2	200	240	1.5%	134.4	18.4	0
B7	1400	180	200	240	1.8%	201.6	18.4	0
B8	1400	346.4	200	240	1.3%	16,8	36.8	0
B9	1400	328	200	240	1.4%	16,8	55.2	0
B10	1400	309.6	200	240	1.5%	16,8	73.6	0
B11	1400	291.2	200	240	1.6%	16,8	92	0
B12	1400	272.8	200	240	2%	16,8	110.4	0
B13	1400	344.2	200	240	1.3%	16,8	18.4	20.6
B14	1400	333.9	200	240	1.4%	16,8	18.4	30.3
B15	1400	323.6	200	240	1.5%	16,8	18.4	41.2
B16	1400	313.3	200	240	1.6%	16,8	18.4	51.5
B17	1400	303	200	240	1.8%	16,8	18.4	61.8
B18	1400	282.4	200	240	1.9%	16,8	18.4	82.4

(*** %** par rapport la masse de liant).

Avec :

B1 : béton de sable témoin

B2 : 5%Pouzzolane +5%Laitier +90%Cklinker

B3: 10%Pouzzolane +5%Laitier+85%Cklinker

B4: 15%Pouzzolane +5%Laitier+80%Cklinker

B5: 20%Pouzzolane +5%Laitier+75%Cklinker

B6: 40%Pouzzolane +5%Laitier+55%Cklinker

B7: 60%Pouzzolane +5%Laitier+45%Cklinker

B8 : 10%Laitier +5%Pouzzolane+85%Cklinker

B9: 15%Laitier +5%Pouzzolane+80%Cklinker

B10: 20%Laitier +5%Pouzzolane +75%Cklinker

B11: 25%Laitier +5%Pouzzolane+70%Cklinker

B12: 30%Laitier +5%Pouzzolane+65%Cklinker

B13 : 10%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+80%Cklinker

B14: 15%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+75%Cklinker

B15: 20%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+70%Cklinker

B16: 25%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+65%Cklinker

B17: 30%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+60%Cklinker

B18: 40%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier+50%Cklinker

2.3.2 Mode opératoire

Le malaxage des bétons obtenus a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 l pour la confection des éprouvettes 4X4X16cm. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant, afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés. La même procédure de gâchage a été utilisée pour toutes les gâchés de béton (Figure.**2.9)**

1- Introduction du sable et du ciment plus fillers; puis un malaxage à sec pendant 30sec ;

2- Ajout deux tiers d'eau de gâchage, puis un malaxage pendant 1minute ;

3 – Ajouts super plastifiant, on le mélange avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire, puis un malaxage pendent1 minutes et malaxage de 3 min ; après laissé reposer 3 minutes et malaxer 1.5min

4 - En cas de béton à base de déchet de céramique on ajoute le sable et ciment plus fillerset le de déchet de céramique, puis malaxage pendent une minute jusqu'à ce qu'on voit tous les constituants soient mouillés et tout le mélange soit homogène ;

5 - Mesurer l'ouvrabilité la densité et v-fanal du béton frais immédiatement au fin malaxage.



Figure. 2.9. Procédure de malaxage

2.3.3 .Confections des éprouvettes

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton a été coulé dans des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de compression et de variation dimensionnelles , ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 [105]. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 1800, et elles ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuel.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvette sont été démoulées et conservées selon deux modes différents : dans l'eau à 20°C ± 2°C (Figure**.2.10**) et à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire).

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai et jusqu'à poids constant.



Figure.2.10. Fabrication des éprouvettes.

2.3.4. Essais réalisés

Deux types d'essais réalisés sont :

- ✓ les essais à l'état frais pour évaluer a Cône d'abrams et v-fanal et la densité.
- ✓ les essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques et la durabilité des bétons de sables réalisées.

2.3.4.1. Essai réalisé à l'état frais

Tableau. 2.13. Essais de caractérisation sur bétons frais.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Etalement	Mini Cône	5
Temps d'écoulement	v-funnel	5
Densité	Moule (1l) + balance	5

- **L'étalement**

Selon la norme NF EN 12350-8 **[51]** L'essai d'étalement au cône permet de mesurer la consistance d'un béton. L'appareil utilisé consiste:

• Table d'étalement: table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton. Le plateau de la table d'étalement doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable, d'une épaisseur minimale de 2 mm,

• Mini cône : moule en métal, d'une épaisseur min. de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités telles que des protubérances de rivets et sans déformations locales



Figure.2.11. Mesure de la maniabilité du béton de sable.

- **Ecoulement à l'entonnoir en (V-FUNNEL)**

Selon la norme NF EN 12350-9 **[52]** Essai d'écoulement à l'entonnoir en (V-funnel) décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BAP à travers l'ouverture d'un entonnoir en V figure 2.13. Pour cet essai, un entonnoir en forme de V, équipé d'une trappe, est rempli de béton frais. La trappe est ouvert 10 secondes après le remplissage et le temps nécessaire à l'écoulement du béton hors de l'entonnoir est mesuré et consigné comme la durée d'écoulement à l'entonnoir en V. Il permet d'évaluer la viscosité du BAP. Si le béton a une faible résistance à la ségrégation statique, un blocage partiel des granulats pourra également être observé. Figure**. 2.12.**



Figure.2.12. Essai d'écoulement à l'entonnoir en V**.**

- **La densité**

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[44]** NA436 **[53].**



Figure.2.13. Mesure de la densité du béton de sable.

2.3.4.2. Essais réalisé à l'état durci

Tableau. 2.14. Essais de caractérisation sur bétons durci.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Compression	Presse hydraulique	10
Retrait	Réctractomètre.	5
Gonflement		5
L'absorption d'eau	----------	5

- **Essais de compression**

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] **[54]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 7, 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme à la norme [NF P 18-412] **[55]**(Figure.**2.14**).



Figure.2.14. Presse hydraulique (2000 kN).

Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante, la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai (7j.28j). (Figure. **2.15**).

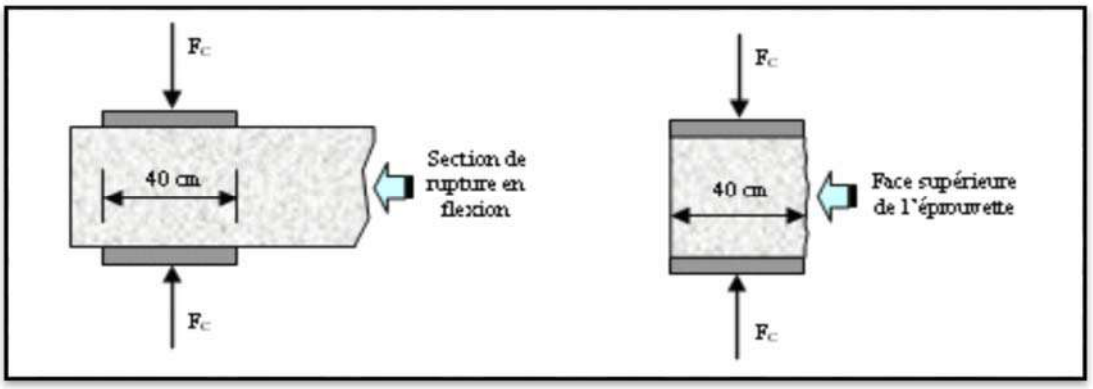


Figure.2.15. Dispositif de rupture à la compression **[50].**

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la Figure**. 2.16.**

La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = F_c / b^2$$

R_c: Résistance à la compression en (MPa).

F : Charge de rupture en (N).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

- **Absorption d'eau**

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher et on le pesé (m0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (Figure.**2.16**), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mi- m0) [NE 13057] **[56].**

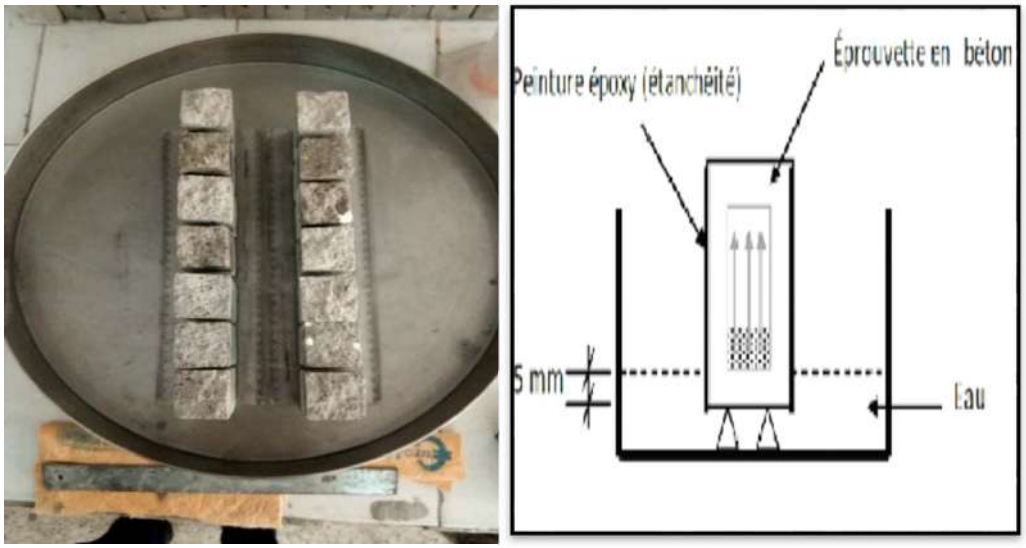


Figure.2.16. Essai d'absorption.

- **Les variations dimensionnelles (Retrait et gonflement)**

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conformément à la norme [NF P 15-404] **[57].** Ces éprouvettes au

Nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (Figure.**2.18**) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait et

gonflement à tout moment à court terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C en cas de retrait et à l'eau en cas de gonflement.



Figure.2.17. Mesure des variations dimensionnelles.

- **Mesure des variations de masse**

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g près l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.

- **Expression des résultats**

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine.

L0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage.

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge

déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

- **Conduite de l'essai**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 280 mm Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette aune longueur au temps considéré :

$$l=L+dl\ (t)$$

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi d'origine. En générale, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes .La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l(t)=l(t)-l(t0)=dl(t)-dl(t0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t0)}{L}$$

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif : il y a alors gonflement).

2.4 .Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumés dans la Figure.**2.19** Suivante

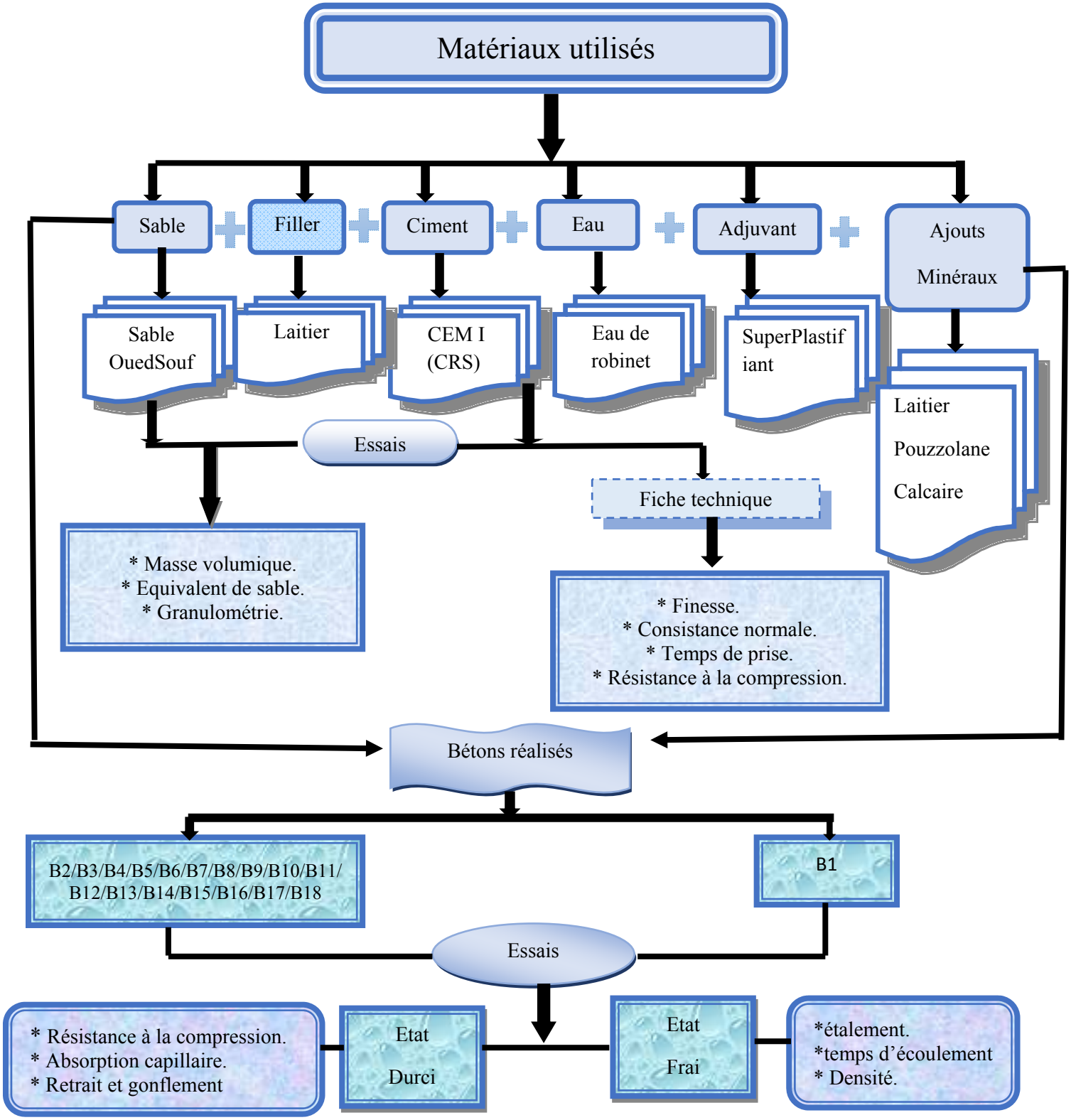


Figure. 2.18. Variables étudiées.

Chapitre 03 :
Rèsultats et interprétations

3.1. Influence de ciment ternaire et quaternaire sur le comportement du béton de sable autoplaçant

- **Introduction**

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable autoplaçant à base de ciment ternaire et quaternaire à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.2. Caractéristiques du BSAP à l'état frais

3.2.1Etalement

L'étalement des bétons de sable autoplaçant trouvés sont résumés sur la figure 3.1 suivant :

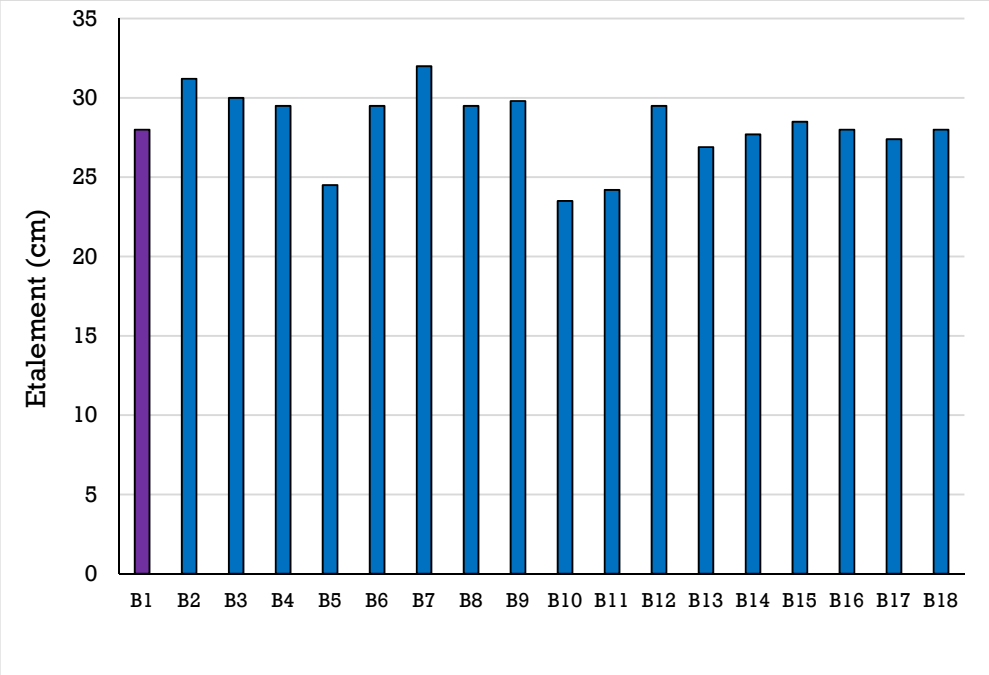


Figure.3.1. Etalement des BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'étalement de bétons de sable autoplaçant varie en fonction de différents types de d'additions minérales. On constate aussi les valeurs d'étalement dépond plusieurs paramètres comme le coefficient d'absorption et la forme de grain de chaque types de d'addition minéral.

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir un étalement constant (compris entre 25 (cm) et 29(cm) estvisé) comme indiquent la figure suivante

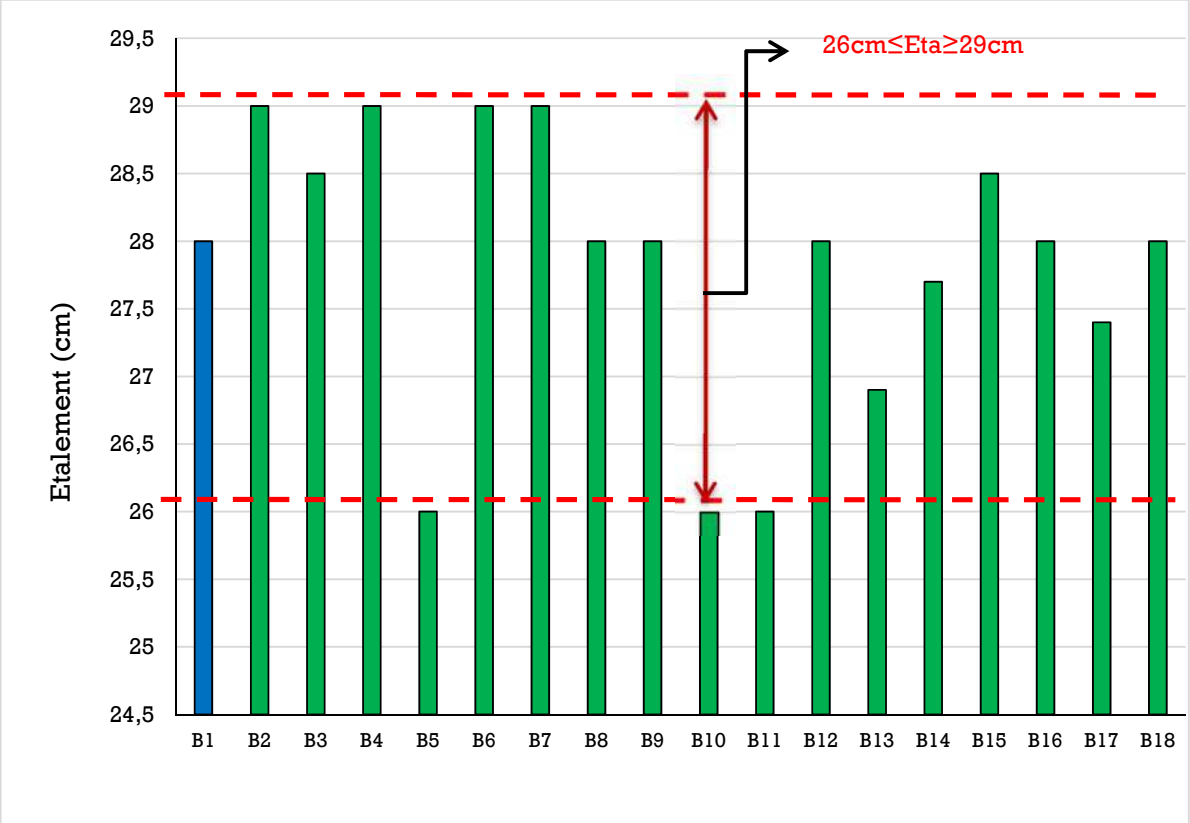


Figure.3.2. Etalement des BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire après réglage

3.2.2Temps d'écoulement dans l'entonnoir (V-funnel)

La mesure du temps d'écoulement de différents BSAP obtenus est représentée dans la figure ci-dessous :

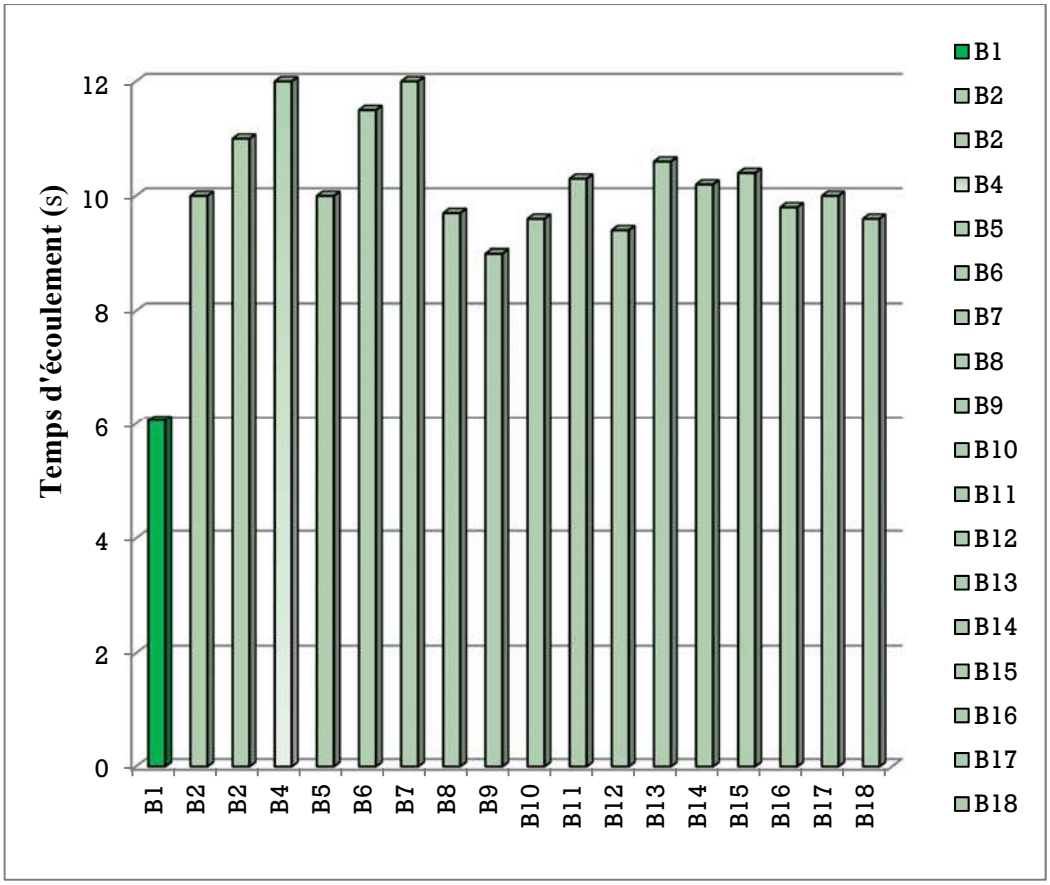


Figure.3.3. Temps d'écoulement des BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire après réglage

De la même façon que l'étalement, les résultats d'essais V-funnel montrent que le temps d'écoulement varie en fonction de la variation de chaque typed'ajouts minéraux. Cette variation est liée à la forme et à l'absorption de chaque type de fillers incorporé qui joue un rôle d'obstacle.

3.3.3Densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures ci-dessous :

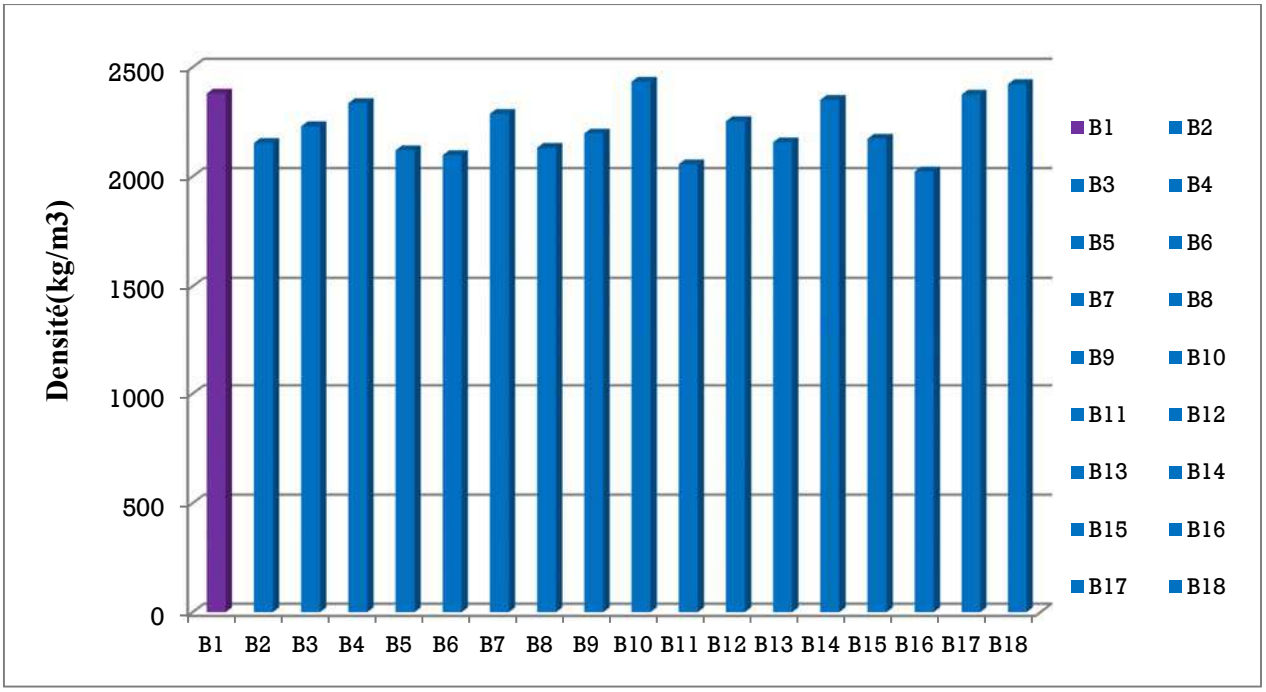


Figure.3.4. Densité des BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire

La figure précédente montre que la densité de BSAP varie d'un béton à un autre. Cette variation est liée à la densité et à la porosité de chaque type de d'addition incorporé. Le béton de sable autoplaçant témoin présent le BSAP le plus dense avec une densité de 2380 Kg/m^3.Par contre le B16 (B16: 25%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier) à base de fillers de laitier donne le béton le plus léger avec une densité de 2023 Kg/m^3.

3.3 Caractéristiques du BSAP à l'état durci

De la même façon que le béton de sable frais, les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable durcis sont résumés ci-dessous :

3.3.1Résistances à la compression

Pour chaque essai, les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures prises sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 3,7 et 28jours. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figuresuivante :

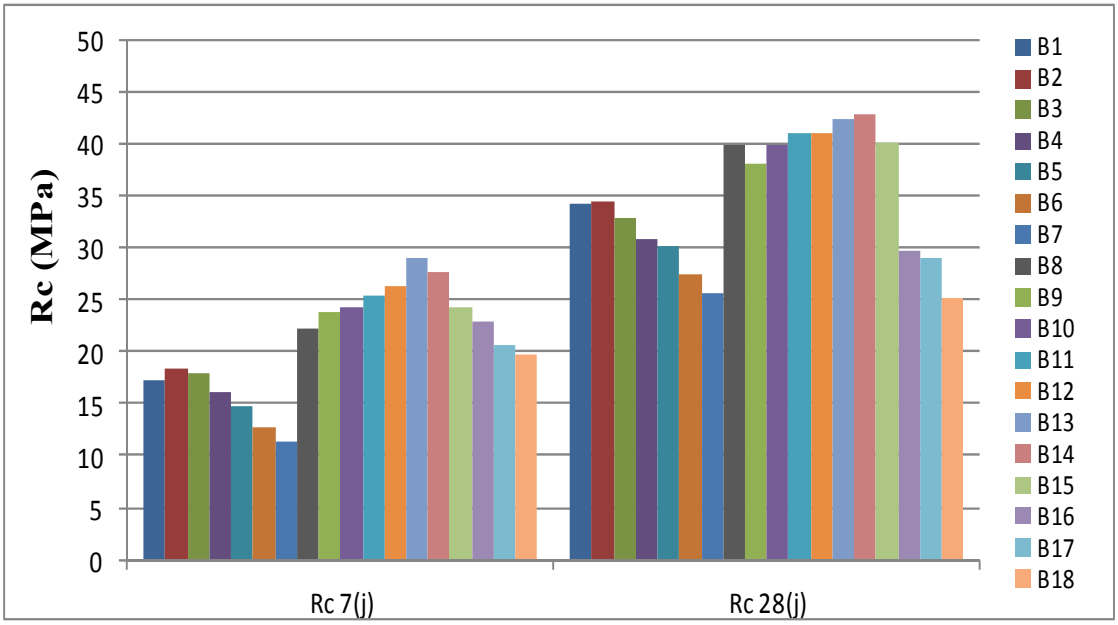


Figure.3.5. Résistance à la compression des BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des différents bétons de sable autoplaçant augmente en fonction de l'âge et suit la même cinétique que celle du béton de sable autoplaçant de référence. La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression à jeune âge de tous le BSAP à base de cimente ternaire et quartenaire est plus importante que celle du BSAP de référence à l'exception de (B4: 15%Pouzzolane +5%Laitier B5: 20%Pouzzolane +5%Laitier B6: 40%Pouzzolane +5%Laitier) .Cette augmentation est lié à l'incorporation des différents ajouts cimentaire qui ont accéléré la résistance à la compression à jeune âge. Á long terme, On remarque que les BSAP à base de combinaisonquartenaire (Clinker+calcaire+ Laitier+Pouzzolane) présenteles résistances plus importantespar rapport au autres BSAP. Cette augmentation est liée principalement au caractère hydraulique de laitier haut fourneau. Les résultats obtenus montrent aussi que les combinaisons quartenaire (B13 : 10%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier, B14: 15%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier, B15: 20%Calcaire+5Pouzzolane+5%Laitier) présentent aussi des résistances plus importante que celle de BSAP de référence.

3.4 Approche de durabilité

3.4.1Absorption capillaire

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable réalisés sont illustrés dans les figures suivantes :

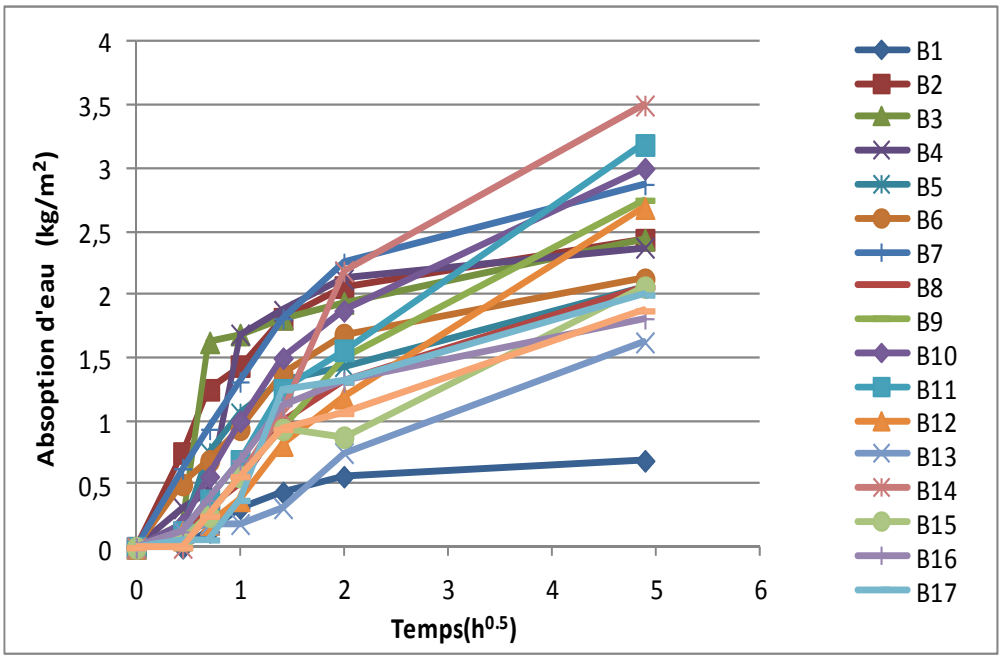


Figure.3.6. Absorption capillaire des BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire

A partir des résultats précédents on constate que l'absorption de tous les bétons de sable autoplaçant à base de ciment ternaire et quartenaire est nettement plus importante que celle du béton autoplaçant de référence. Cette augmentation est liée à la fois à l'absorption capillaire des ajouts minéraux incorporé dans la masse de BSAP,et à la porosité contenue de BSAP fabriqué à partir de ciment ternaire et quaternaire. M. Gesog˘lu et al**.[36]** ont étudiel'influence de substitution du ciment par 15%,30% et 35% de cendre volante et 5% ,10% et 15% de fumé de silice sur l'absorption capillaire et la permiabilité de béton autoplaçant. Ils ont constaté que tous les BSAP à base de ont une sportivité et un coefficient de perméabilité inférieur que celle de BSAP témoin.

3.4.2Retrait

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Dans notre cas, et pour les différents pourcentages en ciment ternaire et quaternaire, les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par les courbes présentées dans la figuresuivante :

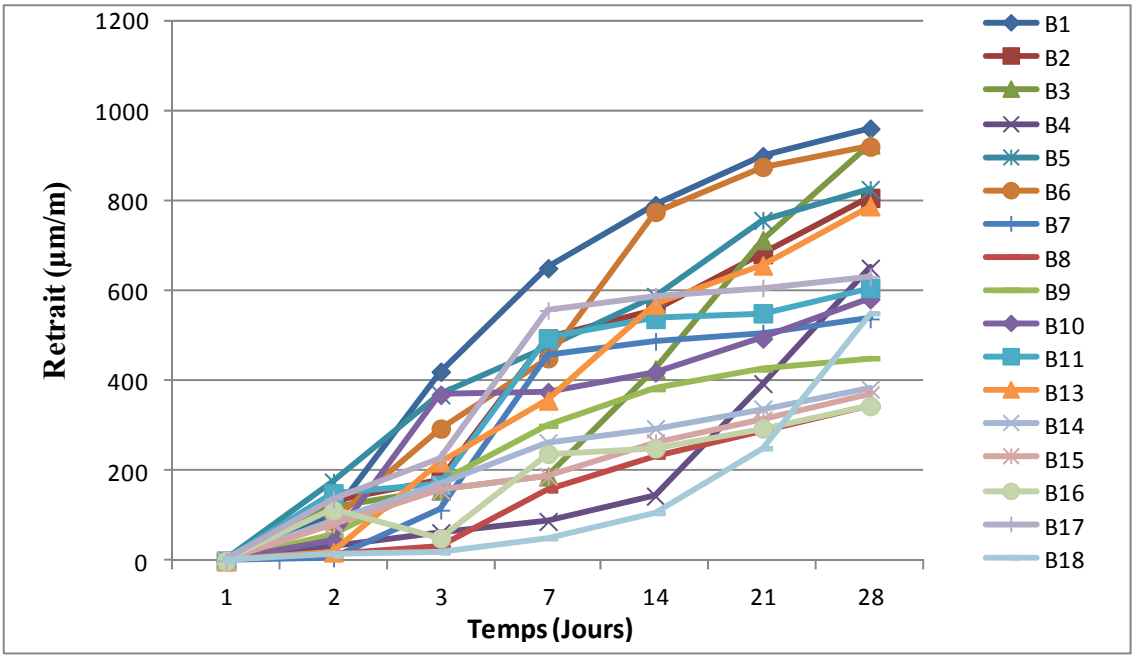


Figure.3.7. Retrait des BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de béton de sable autoplaçant à base de ciment ternaire et quartenaire est nettement moins important que celui du béton de sable autoplaçant de référence. Cette diminution est lié probablement aux chaleurs d'hydratation de ciment ternaire et quartenaire qui est nettement moins importante que celle du ciment ordinaire ce qui engendre un retrait moins important. Cependant ces valeurs du retrait sont acceptables pour divers usages de béton structural. Ce résultat confirme les résultats de E. Güneyisi et al**.[58].**

3.4.3Gonflement

De la même façon que le retrait, les résultats du gonflement des différents bétons après 28 jours d'immersion dans l'eau, sont illustrés dans la figure ci-dessous :

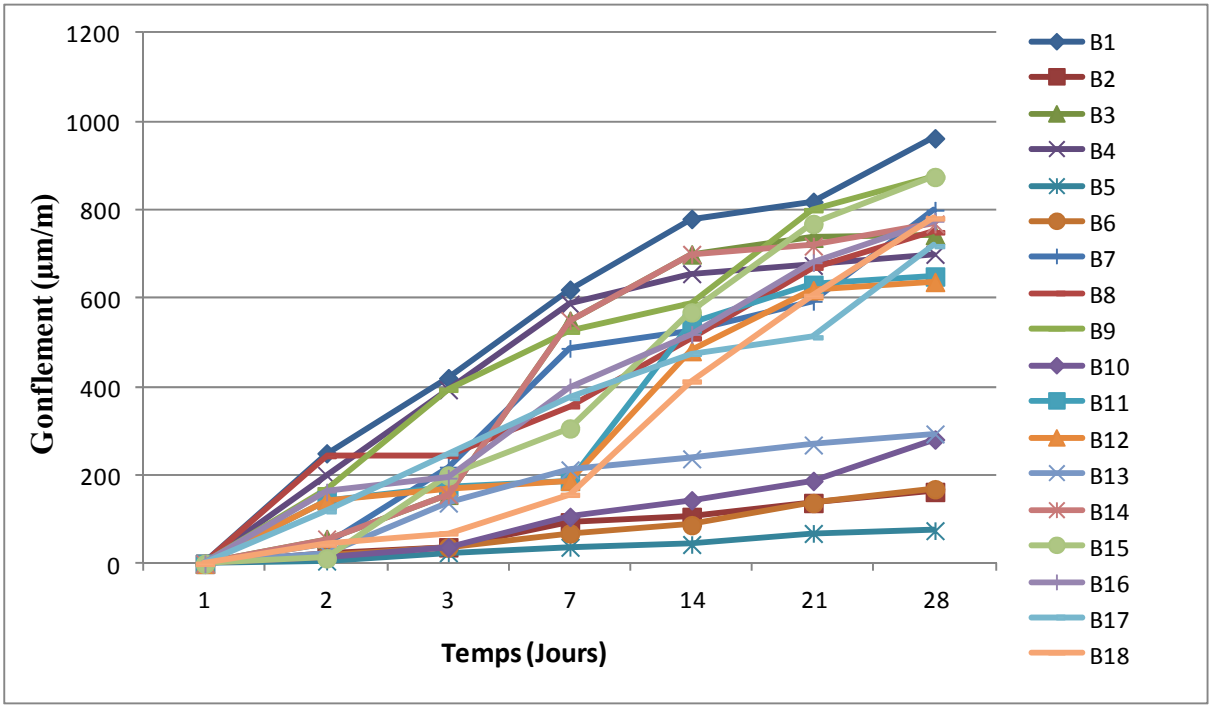


Figure.3.8. Gonflementdes BSAP à base de ciment ternaire ou quaternaire

D'après les figures ci-dessus, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable autoplaçant augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable autoplaçant à base de ciment ternaire et quartenaire ayant un taux de gonflement sous eau moins important que celui du béton de sable de référence. Les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage et le type d'ajouts minéraux incorporé dans la masse du BSAP.Ceci semble logique a cause de la compacité présenté par les différents BSAP fabriqué à base de ciment de minéraux.

3.5. Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de ciment ternaire et quaternaire sur le comportement du BSAP peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement et le temps d'écoulement de BSAP varie en fonction de la morphologie de chaque type d'ajouts minéraux.
- La densité de BSAP à base de ciment ternaire et quaternaireest moins importante que celle de densité de BSAP témoin.
- Á jeune âge de tous le BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire est plus important que celle de BSAP de référence à l'exception de (B4: 15%Pouzzolane +5%Laitier B5: 20%Pouzzolane +5%Laitier B6: 40%Pouzzolane +5%Laitier)
- Á long terme, les BSAP à base de combinaison quaternaire (Clinker+Laitier+Pouzzolane+calcaire) présente des résistances plus importantes que le BSAP témoin.
- Tous les BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire présente un retrait moins important par rapport au BSAP témoin.
- Tous les BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire présente un taux de gonflement sous eau moins important que celle de BSAP de référence.

Conslusions générales et Recommandations

Conclusions générales

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de ciment ternaire et quaternaire sur le comportement du BSAPpeut mener aux quelques conclusions suivantes

- L'étalement et le temps d'écoulement de BSAP varie en fonction de la morphologie de chaque type d'ajouts minéraux.
- La densité de BSAPdiminue légèrement en fonction de substitution du ciment par les ajouts minéraux.
- Les BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire présente des résistances à la compression plus important par rapport au BSAP témoin. Á long terme, les BSAP à base de combinaison quaternaire (Clinker+Laitier+Pouzzolane+calcaire) présente les résistances les plus importantes que le BSAP témoin.
- Tous les BSAP à base de ciment ternaire et quaternaire présente un retrait et un taux de gonflement le moins important par rapport au BSAP témoin.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des ciments ternaire et quaternairedans la fabrication de BSAP constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays. L'utilisation de ces types de béton est conseillé pour les différent voie de construction (béton structurel, dallage, route, chaussé, réparation, ouvrage d'art…..)

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de propriétés rhéologiquesdu béton de sable autoplaçant à base de ciment ternaire.
- Incorporation d'autres types d'ajouts minéraux comme un liant dans le BSAP.
- Etude du pompage de BSAP à base de ciment binaire, ternaire et quaternaire.
- Durabilité de BSAP à base de cimente ternaire et quaternaire.
- Influence de haute température sur le comportement de BSAP à base de cimentbinaire, ternaire et quaternaire.

References bibliographiques

[1]]Ngab A.S, Nilson A.H. , Slate F.O "Shrinkage and creep of highstrength." A.C.I Journal. 1981, Vol. 78, n°4, p.255 261.

[2] Http://www.premium-engineering.com/downloads/beton-routes.pdf.

[3] Mélanie SHINK, « Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres

d'aciers » Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA (2000).

[4] SABLOCRETE, (1994) « Béton de sable », Presse de l"école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

[5]F.Buyle, Bonin, «Bétons autoplaçants »

[6]Okamura. H, and M. Ouchi, «Self CompactingConcrete: Development, present use and future», In self compactingconcrete: Proceedings of thefirst international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999**.**

[7] Ozawa. K, et. al. «Development of high performance concretebased on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

[8]K.Ozawa, S.Tagtemsirikul, and K.Maekawa, «Role of materials on the filingcapacity of freshconcrete», In Proceedings of The Fourth CANMET and ACI International Conference on flyash, silica fume, slag and naturalpozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

[9]J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, le béton autoplaçant ou autocompactant, 2000.

[10] ROUIS F. « formulation et propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant a basse ciment pouzzolanique et (ou) ciment de laiter »

[11] Bethmont S. « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des interactions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.

[12] Jin J. « Properties of mortar for self-compactingconcrete » PhDthesis, UniversityCollege London, 2002, 398 pages

[13] BOUKERROU MOHAMED, Étude des Propriétés Rhéologiques et Physico-mécaniques du Béton de Sable avec Référence particulière au Sable de Dune, FACULTE DE GENIE CIVIL Université Houari Boumediene Algies, 2012

[14]http://www.beton-vicat.fr/Nos-produits/Par-Gamme/Defiperf BETONSPECIFIQUE/ Defiperf-Projete.

[15] http://doc.lerm.fr/beton-de-sable/

[16]https://www.google.dz/search?q=le+b%C3%A9ton+de+sable+en+projection&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioltWIlMDbAhWmw6YKHbjjCnoQ_AUICigB#imgrc=TIWdQttXlQCekM

[17] DREUX G. et FESTA J., « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, Paris 1998

[18] Veronique le Mestere, « Utilisation des bétons de sable : comblement cavités sous pile de pont », ITPE-DDE de Haute Garonne, Cellule, Ouvrage d'art N° : 22, PP : 29-33(Novembre 1995)

[19]A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB .les ajouts cimentaires et le développement durable .Département de génie civil ; Université de Sherbrooke.

[20]https://www.google.dz/search?q=secteurs+d%27activit%C3%A9+dont+sont+issus+les+fillers+calcaires&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjqzPTHncDbAhWBA5oKHZtCBFkQ_AUICigB&biw=1093&bih=530#imgrc=iBlw38hMnuCvaM.

[21]https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri contact&pag=Contact19&art=262&lang=fr

[22] DIEDERICH P, 2010, Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Thèse doctorat ,Toulouse

[23]https://www.actu-environnement.com/ae/environnement/definition/calcaire.php4

[24]https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/chimie-cristallographie-calcite-586/page/5/

[25]. M. Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

[26]https://www.google.dz/search?q=Roche+volcanique+de+pouzzolane&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiTu5iNocDbAhVByqYKHbfvBJ4Q_AUICygC#imgrc=nuN859Is_pfPvM

[27]. C. KIRPACH, Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001: Journée d'information technique, 23 novembre 2001, P 7-21.

[28]. H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.

[29]https://www.google.dz/search?tbm=isch&sa=1&ei=QncYWa6PKKjmwXi4aJA&q=Laitier+granul%C3%A9+&oq=Laitier+granul%C3%A9+&gs_l=img.12..0i30k1j0i24k1.714076.714076.0.716360.1.1.0.0.0.0.163.163.0j1.1.0....0...1c.2.64.img..0.1.163....0.kiLLMzSzMgc#imgrc=muoMu-BwBUdyZM

[30] Info ciments, Préserver les ressources naturelles : La valorisation des déchets en

Cimenterie, Collection comprendre N°3, www.infociments.fr

[31]http://www.ctpl.info/presentation/les-laitiers-siderurgiques/

[32]. C. KIRPACH, Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001: Journée d'information technique, 23 novembre 2001, P 7-21

[33]A.KERBOUCHE ; influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécanique des bétons ; mémoire de magister ; UST ;2009 .

[34]SGPIC ,Société de gestion et de participations , industrie de ciment.

[35] info ciments , préserver les ressources naturelles : la valorisation des déchets en cimenterie , collection comprendre N3,www.infociments.fr.

[36] Mehmet Gesog˘lu , ErhanGüneyisi, Erdog˘anÖzbay, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume,Construction and Building Materials 23 (2009) 1847–1854

[37] CHABI S, MEZGHICHE B. 2004, Etude de l'influence de s additions minérales actives sur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments pour les fondations immergées, (Cas du sud Algérien) BabEzzouar.

[38] GHRICI M., KENAI S, SAID-MANSOUR M., 2004, Efficiency of Beni-Saf'snaturalpozzolana in durability of mortars and concrete, CITDUB 1, Bab Ezzouar, 24-26 mai,7p

[39] AICHOUBA A., GHRICI M., BENAISSA A. 2005, Effets de la pouzzolane naturelle de Beni-Safsur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, Colloque CMEDIMAT, 06 et 07 décembre, 8p.

[40] ITIM .A, EZZIANE .K KADRI.H, 2010, Etude des déformations de retrait d'un

mortier contenant différentes additions minérales, Université de Chlef.

[41]Berkani.B ; Etude de l'activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d'un mortier de ciment normalisé ;mémoire de master ;2015.

[42] NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse », Aout 1990.

[43] NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des, essais

détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994

[44] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique ».AFNOR.

[45] NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 :

Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.j.

[46] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[47] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et

physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du

coefficient d'absorption d'eau », AFNOR

[48] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et

physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR

[49] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR

[50] NF EN 1008, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d"essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR. 2003.

[51] NF EN 12350-8 a présente norme européenne spécifie Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant Essai d'étalement au cône d'Abrams.

[52] NF EN 12350-9 a présente norme européenne spécifie la méthode de détermination de la durée d'écoulement à l'entonnoir en v pour le béton autoplaçant.

[53] NA 436 ,1992-08-20 «béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement». Norme algérienne.

[54] NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques - Avril 2006.

[55] NF P 18-412, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression. 1981.

[56] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[57] NF P 15-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989.

[58] E. Güneyisi et al Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures , Construction and Building Materials 24 (2010) 1878–1887

Annexe

Annexe A



Fig .A.1: Ciment CRS(CEM I/A)

Annexe B



Fig.B .1: L'adjuvant utilisé (MEDAFLOW 30)


NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 30

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.
Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :
- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Eviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Écoulement au cône de Marsh (ASTM C939)

Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau)
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

• Aspect	Liquide
• Couleur	Brun clair
• pH	6 – 6,5
• Densité	1,07 ± 0,01
• Teneur en chlore	< 0,1 g/l
• Extrait sec	30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

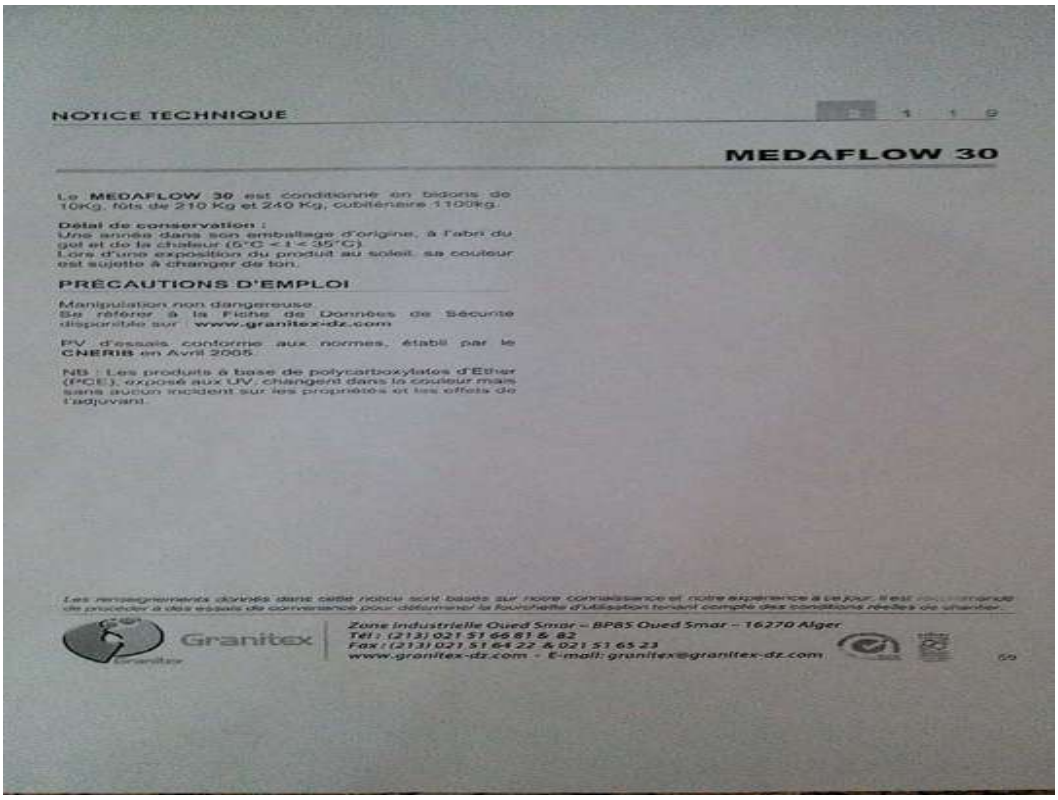
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Zone industrielle Oued Smar – BP83 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com – E-mail: granitex@granitex-dz.com

Fig. B .2:La fiche technique du super plastifiant.(1)



NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitainers 1100kg.

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur **www.granitex-dz.com**

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

Fig. B .3:La fiche technique du super plastifiant.(2)

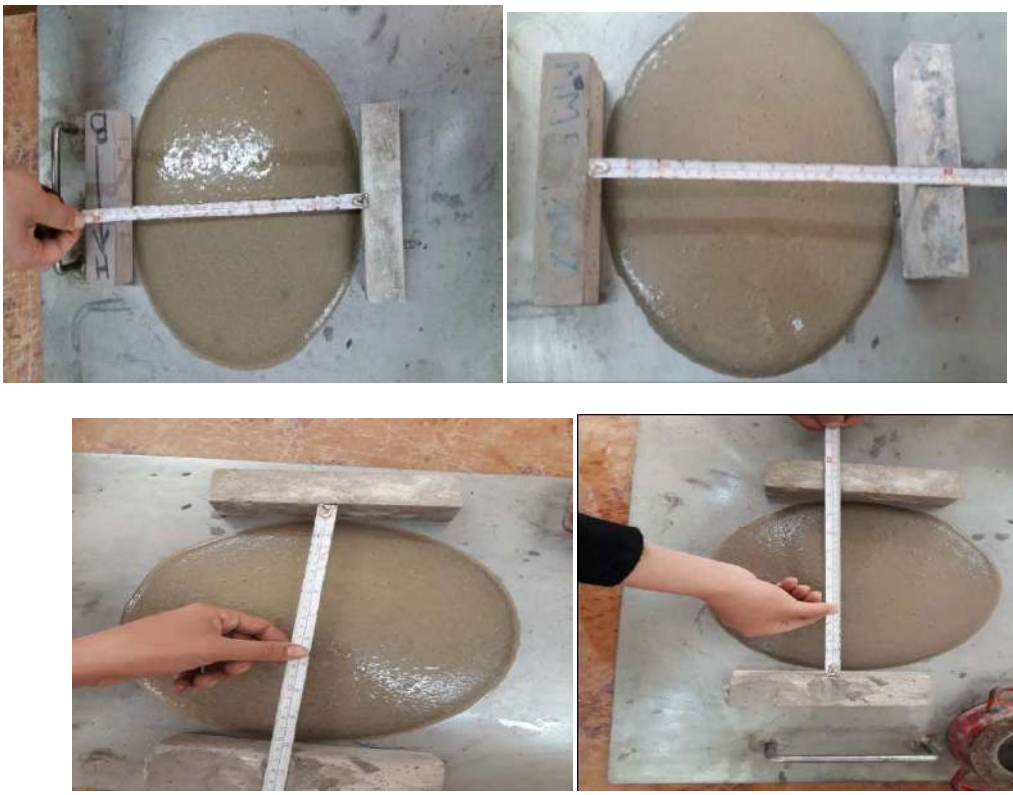


Fig B.4 .L'essai d'étalement

Annexe C



Fig C.1.Dispositif de compression



Fig C.2. Malaxeur utilisé