الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département du Génie Civil

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Civil

***Option* : Matériaux en génie civil**

Thème

L'effet du traitement thermique sur le comportement d'un béton de sable fluide à base des matériaux recyclés

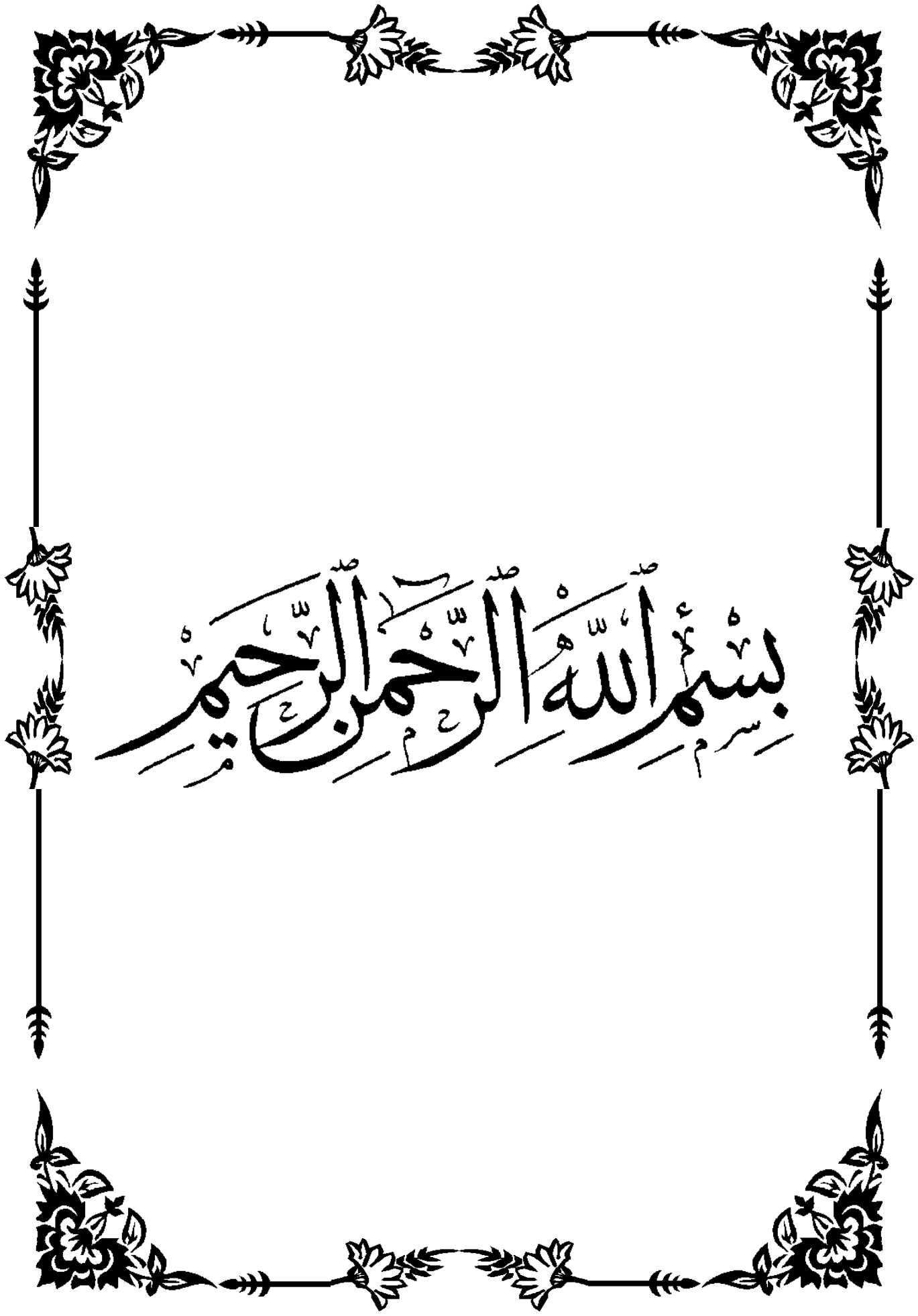
Préparés par :

-TRIFI Karim
- OTMANINE Yassine

Encadré par :

- Dr. GUENDOUZ Mohamed
- Melle. BOUKHELKHEL Djamila

Promotion Juin 2018


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

D'abord nous tenons à remercier le bon ***dieu*** *de nous avoir accordé la force et le courage de mener à terme ce projet.*

Toute notre reconnaissance et toute notre gratitude vont vers nos professeurs qui nous ont appris le savoir.

Nous tenons à remercier et à exprimer notre profonde gratitudeànotrepromotrice

D^r^ . GUENDOUZ Mohamed & **M^lle^BOUKHELKHEL Djamila** *de nous avoir guidé et orienté durant les différentes étapes de ce projet.*

Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Que tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué, par leurs conseils, leurs encouragements ou leur amitié à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Pour leur encouragement, leur soutien moral et la Patience qu'ils nous ont manifestée durant toute L'année, nous remercions fortement tous les membres de nos familles.

Enfin remercier nos parents serait se répéter, citer Leur affection serait pléonasme, parfois pour exprimer plus que ce qu'on a envie de direon a recours au silence.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Au premiére lieu, nous tenous à remmercier « ALLAH »qui nous a donnée le courage et la volonté

Pour terminer ce travail

A celle qui a bercé mes rêves et : ma mère hadjera amel et

mon pére : mohamed

A mes grands parent : noureddine ; bachir

A mon chère frère : walid ; amine

A toutes mes tantes

A toute ma famille Otmanine et Menacer

A mes chers amies : a tous mes collègues de 2 émme année Master de génie civil

A ma binôme karim

Et leurs familles

A tous ceux qui me connaissent.

« Yassine »



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Au premiére lieu, nous tenous à remmercier « ALLAH »qui nous a donnée le courage et la volonté

Pour terminer ce travail

A celle qui a bercé mes rêves : ma mère naima et mon pére : El hamzi ;

A mon chère frère : mohamed hocin ; djawed

A mes grands parent : Hocine rabi yrhmo ; Rachid

A toutes mes tantes et (khalti somia rabi yarhamha nchlah)

A toute ma famille Trifi et Geumana

A mes chères amies : à tous mes collègues de 2émme année Master de génie civil

A mon binôme yassine

Et leurs familles

A tous ceux qui me connaissent.

« karim »



ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين، رسكلة ودراسة مدى تأثير مختلف أنواع من نفايات البناء والمنتجات الثانوية الصناعية (الرخام والطوب والأفران العالية والحجر الجيري) كمواد إضافية على خصائص الخرسانة الرملية المائعة تحت درجة حرارة حرارية 23 و 60 درجة مؤوية. مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية .

وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أفضل أداء ميكانيكي للخرسانة الرملية الناعمة يتم الحصول عليه باستخدام الرخام والإ ضافات الخبثية تحت درجة حرارة حرارية تبلغ 23 درجة مئوية و 60 درجة مئوية على التوالي لذلك فمن الممكن الحصول على مواد بناء جديدة و التي يمكن استخدامها لأنواع مختلفة من عناصر البناء.

Résumé

L’objectif principal de ce projet consiste à valoriser, recycler et étudié l’effet des différents types de déchets de construction et sous produit industriel (Marbre, brique, laitier de haut fourneau et calcaire) comme fillers sur les caractéristiques de béton de sable fluide sous une température thermique de 23C° et 60 C°. Les propriétés à l’état frais et à l’état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons de sable fluide témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que la meilleure performance mécanique du béton de sable fluide est obtenue avec l’utilisation de fillers de marbre et de laitier de haut fourneau sous une température thermique de 23 C° et de 60C° respectivement. Donc, il est possible d’obtenir un nouveau matériau de construction à base de ces déchets utilisable pour différents types d’éléments de construction.

Abstract

The main objective of this project is to valorize, recycle and study the effect of the different types of construction waste and industrial by-products (marble, brick, blast furnace, and limestone) as fillers on characteristics of flowable sand concrete at a temperature of 23 ° C and 60 ° C. The properties in the fresh state and in the herdned state of the various mixtures made were analyzed and compared to the respective control flowable sand concrete.

The results obtained show that the best mechanical performance of the flowable sand concrete is obtained with the use of marble and slag fillers under a thermal temperature of 23 ° C and 60 ° C respectively. Thus, it is possible to obtain a new construction material based on this waste that can be used for different types of building elements.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

ملخص

Résume

Abstract

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Listes des symboles et des abréviations

Introduction générale..... 2

CHAPITRE 01 : SYNTESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Le béton de sable 5

1.1.1. Introduction 5

1.1.2. Définition 5

1.1.3. Spécificité du béton de sable 6

1.1.4. Historique 6

1.1.5. Les composants du béton de sable 8

1.1.5.1. Les sables 8

1.1.5.2. Les fines d'ajout (ou addition) 9

1.1.5.3. Les ciments 10

1.1.5.4. L'eau 11

1.1.5.6. Adjuvants 11

1.1.5.7. Autres ajouts 11

1.1.6. Domaines d'emploi des bétons de sable 12

1.1.6.1. Fondations profondes 12
1.1.6.2. Bâtiment 12
1.1.6.3. La préfabrication 13
1.1.6.4. Routes, chaussé et dallage 14
1.1.7. Intérêts et limites des bétons de sables 15
1.1.7.1. Intérêt des bétons de sable 15
1.1.7.2. Techniques particulières 16
1.1.8. Béton de sable projeté 16
1.1.9. Bétons de sable fluides 17
1.1.9.1. Limites des bétons de sable 19
1.1.9.2. Méthodes de formulation des bétons de sable 19
1.1.9.3. Approche théorique de la formulation des bétons de sable 20
1.1.9.4. Méthode expérimentale de formulation 27
1.1.9.5. Les différentes étapes de la formulation 27
1.2 Les ajouts minéraux 31
1.2.1. Fillers calcaires 31
1.2.1.1. Effet sur les caractéristiques des bétons frais 32
1.2.2. Fillers de brique 33
1.2.2.1. Propriétés des briques 34
1.2.2.2. Effet sur les caractéristiques des bétons frais 34
1.2.3. Fillers de marbre 39
1.2.3.1. Propriétés de marbre 40
1.2.3.2. Types La classification des marbres 40
1.2.3.3. Influence de déchets marbre sur le comportement des matériaux à base cimentaire 41
1.2.4. Fillers de Pouzzolane 43
1.2.4.1. Effet de la pouzzolane naturelle sur les béton 44
1.2.5. Filler de laitier 45
1.2.5.1. Propriétés de béton au ciment au laitier 46
1.2.6. Les fillers de verres 47
1.2.6.1. La composition du verre 48
1.2.6.2. Les différents types de verre 49

1.2.6.3. Effet de la poudre de verre 49
1.3. Effet de la température de cure sur les propriétés des bétons 50
1.3.1. Introduction 50
1.3.2. Effet de température sur les résistances mécaniques 51
1.3.3. Effet combiné des additions minérales et des températures sur les propriétés des bétons..... 52
1.4. Conclusion..... 53

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction 55
2.2 Matériaux utilisés 56
2.2.1. Le sable..... 56
2.2.2. Ciment 57
2.2.3 Ajouts (fillers) 61
2.2.3.1. Filler de marbre 61
2.2.3.2. Fillers de calcaire..... 63
2.2.3.3. Filler de briques..... 64
2.2.3.4. Fillers de Laitier 64
2.2.4. Adjuvant 65
2.2.5. Eau de gâchage 66
2.3. Composition des mélanges..... 66
2.4. Malaxage et conservation..... 67
2.5. Préparation des éprouvettes 68
2.6. Cycles du traitement thermique..... 69
2.7. Protocole expérimental 70
2.7.1. Essai sur béton de sable fluide à l'état frais..... 70
2.7.1.1. L'étalement..... 71

2.7.1.2. Temp d'écoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL 71
2.7.1.3. La densité……..72
2.7.2. Essais sur béton de sable fluide à l'état durci 73
2.7.2.1. Essai de compression 73
2.7.2.2. Essai du retrait et gonflement 75
2.7.2.3. Absorption capillaire 76
2.8. Variables étudiées 77
2.10. Conclusion 78

CHAPITRE 03: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

3.1 Influence de déchets de marbre sur les caractéristiques du béton de sable fluide…80
3.1.1 Introduction ..... ….80
3.2 Caractéristiques du BSF à l'état frais…….……..…80
3.2.1 Etalement……80
3.2.2 Temps d'écoulement dans l'entonnoir (V-funnel) 81
3.2.1 Densité 82
3.3 Caractéristiques du BSF à l'état durci……82
3.3.1. Résistances à la compression 82
3.4 Approche de durabilité……...84
3.4.1. Absorption capillaire 84
3.4.2. Retrait 85
3.4.3. Gonflement 85
3.5. Conclusion…….86
Conclusions générales et recommandations …….....89
Références bibliographiques ……92
Annexe……..101

Liste des tableux

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment 9

Tableau 1.2. 1es propriétés physico –mécaniques des Briques creuses et Perforées 34

Tableau 1.3. Composition chimique type de laitiers de haut fourneau……..……...46

Tableau 2.1. Caractéristiques physiques des sables utilisés 58

Tableau 2.2. Analyse chimique du ciment et composition du clinker.....60

Tableau 2.3. Caractéristique physiques du ciment 61

Tableau 2.4. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.....61

Tableau.2.5. Caractéristiques physiques des fillers de marbre utilisées.....63

Tableau 2.6. Caractéristiques physiques des fillers calcaires utilisées.....65

Tableau 2.7. Caractéristiques physiques des fillers des briques.....65

Tableau 2.8. Composition chimique de laitier.....66

Tableau 2.9. Compositions des Béton de sable fluide 68

Tableau 2.10. Essais sur bétons frais. 71

Tableau 2.11. Essais sur bétons de sable durci. 74

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1. Carte de désertsdans le monde …….05

Figure 1.2. Phare de port Saïd réalisé en 07

Figure 1.3. Métro de Saint-Pétersbourg…….07

Figure 1.4. Fines anguleuses……10

Figure 1.5. Fines sphériques 10

Figure 1.6. Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite) 12

Figure 1.7.Bâtiment à Toitures à plisenbéton de sable……..13

Figure 1.8. Moulage d'un élémentPréfabriqué en béton de sable……13

Figure 1.9. Ombrelles d'étanchéité en place 14

Figure1.10. Tunnel du métro de Leningrad..... 14

Figure 1.11. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface14

Figure 1.12. Déroulement d'un film polyane (cure 15

Figure 1.13. Le béton de sable en projection 17

Figure 1.14. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon) 18

Figure 1.15. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines 21

Figure 1.16. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable 23

Figure 1.18. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)..... 25

Figure 1.19. Organigramme de la méthode théorique..... 26

Figure 1.20. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition 33

Figure 1.21. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition..... 33

Figure 1.22. Effet des fillers calcaires dans une pâte cimentaire..... 31

Figure 1.23. Brique coccacée..... 33

Figure 1.24 .Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr)..... 34

Figure 1.25. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du pourcentage deDéchets de brique..... 36

Figure 1.26 .Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr 37

Figure 1.27 .Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr 37

Figure 1.28.Absorption d'eau des bétons a base de déchets de brique 38

Figure 1.29.Variation de la résistance à la compression des bétons à base de déchet de brique sous l'action du Gel-Dégel..... 38

Figure 1.30.La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés. 39

Figure.1.31. Pierre de marbre 40

Figure.1.32. Poudre de marbre……..40

Figure.1.33. Effet de substitution de ciment par la poudre de marbre sur affaissement du béton ……41

Figure 1.34. Variation de la densité en fonction du taux de substitution à poudre de marbre 42

Figure.1.35. Effet de substitution de ciment par la poudre de marbre sur la résistance à la compression du béton..... ….43

Figure.1.37.Roche de pouzzolane…….44

Figure.1.38.Poudre de pouzzolane…….44

Figure.1.39.Poudre de laitier..... 45

Figure 1.40.L'effet de températuresur leprise temps de début de prise de ciment avecajout de

laitier……..47

Figure 1.41.L'effetd'accélérateur detemps de prise de début de prisedeciment avec ajout de laitier……..47

Figure.1.42.Poudre de verre 48

Figure.1.43. Fractionnement la résistance à la traction de mortier de verre 50

Figure 2.1. Sable utilisé 56

Figure 2.2.La courbe granulométrique du sable utilisé.....56

Figure 2.3. Le ciment utilisé. 58

Figure 2.4. Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 MATINE. 60

Figure 2.5. Broyeur à disque utilisé. 61

Figure 2.6. Fillers de marbre utilisé. 62

Figure 2.7.Analyse minéralogique de la poudre de marbre. 63

Figure 2.8. Fillers de calcaire utilisées.....63

Figure 2.9. Fillers brique utilisée 64

Figure 2.10. laitier de haut Fournaux utilisée 65

Figure 2.11.D'adjuvant utilisé. 66

Figure2.12. Le malaxage de béton au laboratoire. 68

Figure 2.13. Séquence de malaxage du mortier 68

Figure 2.14. Fabrication des éprouvettes. 69

Figure 2.15. Enceinte climatique pour le traitement thermique des éprouvettes. 69

Figure 2.16. Cycles adoptés pour le cas du traitement thermique. 70

Figure 2.17.Mesure de l'étalement du béton de sable fluide 71

Figure 2.18. Essai de mesure de temp d'écoulement (V-Funnel) 72

Figure 2.19. Mesure de la densité du béton de sable Fluide 72

Figure2.20. Fabrication des éprouvettes. 73

Figure 2.21. Dispositif de rupture à la compression. 74

Figure2.22. Essais de compression. 74

Figure 2.23. Mesure des variations dimensionnelles à l'aide de déformètre. 75

Figure 2.24. Absorption d'eau par succion capillaire. 76

Figure2.25.Variables étudiées :.....77

Figure 3.1. Etalement des BSF à base de différents fillers avant réglage.....80

Figure 3.2. Etalement des BSF à base de différent type de fillers après réglage.....81

Figure 3.3.Temps d'écoulement des BSF à base de différents fillers après réglage 81

Figure 3.4. Densité des BSF à base de différents types de fillers.....82

Figure 3.5. Résistance à la compression des BSF à base de différents fillers conservé sous une température de 23C° 83

Figure 3.6. Résistance à la compression des BSF à base de différents fillers conservé sous une température de 60C° 83

Figure 3.7. Absorption capillaire des BSF à base à base de différents fillers.....84

Figure 3.8. Retrait des BSF à base à base de différents types de fillers 85

Figure 3.9. Gonflement des BSF à base de différents types fillers.....86

Figure A.1. Ciment MATINE utilisé. 102

Figure A.2. La fiche technique ciment.....103

Figure A.3. Fiche technique d'adjuvante utilisé.....105

Figure A.4.Les différents fillers incorporés au béton de sable fluide……106

Figure A.5. Tamiseuse électrique……107

Figure A.6. Malaxeur……...107

Liste des Symboles et des Abréviations

Liste des Symboles et des Abréviations

BS : Béton de sable

G/S: Gravillons sur sable

BSF: Béton de sable fluide

D : Diamètre mm

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

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

e : Porosité minimal en pourcentage

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

Dmax: La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80m m et D_{max}

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

f : Surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

d : 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 total (l/m^3) ;

V : Air piégé (l/m^3) ;

Rb : Résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

K1 : Coefficient pouzzolanique ;

K2 : Coefficient d'activité du filler calcaire. (Voir figure 1.18)

Kcv : Kfs, Kfill : Coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV : Dosage en cendres volantes

FS : Fumée de silice

FIL: Filler calcaire (kg/m^3).

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

E : Quantité d'eau (l/m^3).

Msable: Masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MVA sable : Masse volumique absolue du sable.

V sable : Volume du sable.

MVAT : Masse volumique apparente réelle

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.

E/C : Eau/Ciment

ES : Equivalent de sable

CPA : Le ciment portland artificiel

CEM II 42,5 : Ciment portland ordinaire de classe 42.5 MPa.

CPJ : Le ciment portland composé

C-S-H : La chaux hydraté

C3S : Silicate tricalcique

C3A : Aluminate tricalcique

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

Al2O3 : Oxyde d'Aluminium

Fe2O3 : Oxyde de fer

Cao : Oxyde de calcium

S_iO_2 : Silicium

MgO : Magnésium

SiO2 : Dioxyde de silicium

Na2CO3 : Carbonate de sodium

CaO : La chaux

Al2O3 : L'alumine

Fe2O3 : L'oxyde de fer

MgO: Oxyde de magnésium

Na2O : Oxyde de sodium

K2O : Oxyde de potassium

SP : Superplastifiant

LHF: Laitier des hauts fourneaux

BSF FM : Béton de sable fluide à base de fillers de marbre.

BSF FL : Béton de sable fluide à basse de fillers de laitier.

BSF FB : Béton de sable fluide à base de fillers de brique.

BSF FC : Béton de sable fluide à base de fillers de calcaire.

R7j : Résistance à 7 jours

R28j : Résistance à 28 jours

DRX : Diffractomètre au rayon X

MEB: Microscope électronique à balayage

MV sable : Masse volumique absolue du sable

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

ρ : Masse volumique apparente (kg/m^3)

ρs : Masse volumique absolue (kg/m^3)

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

I : Moment d'inertie de la section transversale

v: La distance de la fibre la plus éloignée

$\mathbf{R_C}$: Résistance à la compression en (MPa)

$\mathbf{F_C}$**:** Charge de rupture en (N);

b: Côte de l'éprouvette

ε : Porosité totale (%)

$\boldsymbol{M_{air}}$ **:** La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

$\boldsymbol{M_{sec}}$ **:** La masse d'éprouvette sec

$\boldsymbol{M_{eau}}$ **:** La masse d'éprouvette immergée dans l'eau

Δ**L** : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

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

Δ**M** : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

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

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte de ciment hydratée. L'étude de la technique du béton amène à celle de la structure du mélange et des facteurs déterminant la résistance, la durabilité du béton.

En outre ; pour atteindre les performances de ce béton, la technologie récente a développé une nouvelle étude est d'utiliser des substances aux bétons pour améliorer les résultats quelque soit pour le béton ou pour ces constituants. Alors que l'incorporation des ajouts dans le ciment pour la fabrication des mortiers et bétons offrent des avantages économiques et écologiques indéniable.

les ciments aux ajouts sont fabriqués dans plusieurs cimentaires algériennes et acceptés par les normes en vigueurs . Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'effet de ces ajouts cimentaires sur les propriétés physico-mécaniques et de durabilité de béton. peut d'études ont été faite sur le comportement de mortier a base de filler de verre, filler calcaire, marbre, pouzzolane, laitier vis-à-vis des propriétés mécanique et de durabilité.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier la possibilité d'exploitation des matériaux locaux, précisément les fillers calcaires , fillers des briques, fillers des marbres et fillers des laitier dans la production des bétons fluides muris dans les conditions normales avec un traitement thermique sous une plage de température varie entre 23 et 60°C .

Le travail est présenté en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons une synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable (définitions, constituants, méthodes de formulations, caractéristiques, utilisations et les ajouts minéraux).

Le deuxième chapitre : Le douzième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux de base, les formulations des composites, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, densité, v- funnel), et à l'état durci (résistance à la compression, absorption capillaire, et gonflement et retrait) des BSF chauffé à haute température.

Le troisième chapitre présente les résultats de la caractérisation des différents bétons obtenus à l'état frais et durci.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur notre projet avec toutes éventualités perspectives et recommandations.

Chapitre 01 :
Synthèse bibliographique

1.1. Le béton de sable

1.1.1. Introduction

Dans cette dernière décennie, Le besoin en granulats a connu une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés en Algérie. Dans le sud d'Algérie, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire.



Figure 1.1. Carte de déserts dans le monde **[1]**

Les déserts de Sahara occupent une grande partie du territoire Algérien, l'idée de promouvoir la valorisation des sables de dune dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique. En Algérie, l'intérêt à la valorisation du sable de dunes dans les bétons, notamment dans le béton de sable (BS) est apparu dans la fin des années 80.

1.1.2. Définition

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué

d'UN granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø<10mm.

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (Dmax = 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimal 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/m^3.

1.1.3. Spécificité du béton de sable

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable(s), l'absence ou le faible dosage de gravillons et l'incorporation d'addition(s).**[2]**

Le béton de sable se distingue d'un mortier par sa composition, le mortier est en général fortement dosé en ciment et ne comporte pas systématiquement d'addition, et surtout par la destination : les bétons de sable sont essentiellement destinés aux usages traditionnels du béton. **[2]**

1.1.4. Historique

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19ème siècle, c'est à dire au début du développement du ciment armé. En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité **[3]**. Il construit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifié en béton aggloméré. En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France.

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m3; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers. **[3]**



Figure 1.2. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) **[3]**

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré. En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie). Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable.



Figure 1.3. Métro de Saint-Pétersbourg **[1]**

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants. Dans les années soixante dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels. A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET **[3]**, pour la promotion et le développement de ce matériau. Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre. Dans les dernières décennies, et vu l'insuffisance des résultats de son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches.

1.1.5. Les composants du béton de sable

Le 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]**

1.1.5.1. Les sables

Par sables en entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il s'agit soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Aucun critère granulaire n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut utiliser aussi bien un sable fin même (homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (0/D) de concassage **[3]**. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Même si des études ont été faites sur les sables- pollués, aucune application n'a été réalisée avec ces sables. Les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance.

1.1.5.2. Les fines d'ajout (ou addition)

Les paramètres essentiels qui jouent sur la compacité du béton sont :

- ✓ La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- ✓ L'énergie de mise en place.

La granulométrie joue un rôle essentiel pour la différence entre le béton classique et le béton de sable. La compacité en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Dans le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) ; ils créent des macro vides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre le besoin en fines et le dosage en ciment est interprétée par la règle suivante :

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

Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

Tableau 1.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	**1.904**	**290**	**370**	
0/20	**1.821**	**300**	**385**	
0/16	**1.741**	**315**	**400**	**BETON**
0/8	**1.516**	**360**	**460**	
0/6.3	**1.445**	**380**	**480**	
0/4	**1.320**	**415**	**530**	
0/2	**1.149**	**480**	**610**	**MORTIER**
0/1	**1.000**	**550**	**700**	

La quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable est influée par la forme des grains et la nature géologique des fillers. Ainsi, des fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Fig.1.4 et 1.5). On distingue des fines actives (laitiers moulus et cendres volantes) et des fines passives, résultant du broyage de roches massives (fillers calcaires et fillers siliceux).

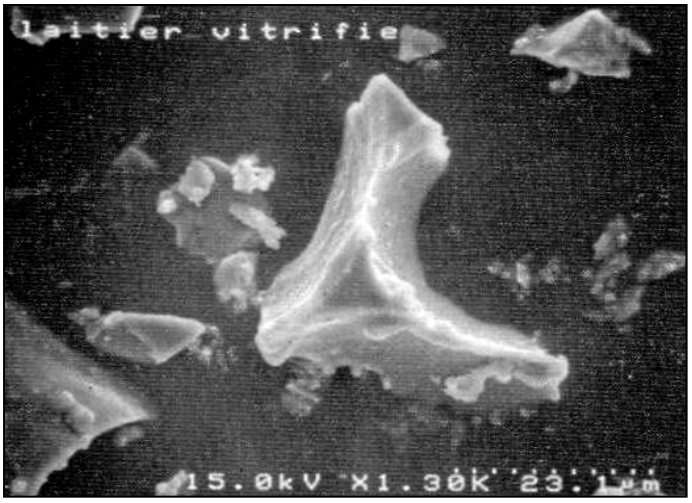


Figure 1.4. Fines anguleuses

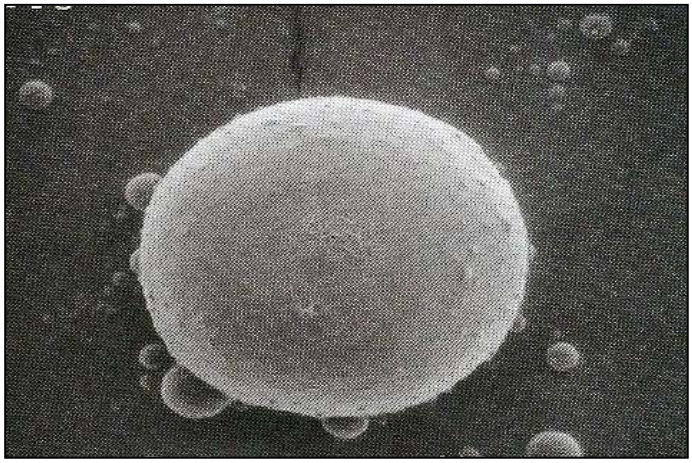


Figure 1.5. Fines sphériques

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 200 kg/m^3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente.
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

1.1.5.3. Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de

résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. **[3]**

1.1.5.4. L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables. **[3]**

1.1.5.6. Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier 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. Les adjuvants employés pour le cas de béton de sable devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 **[3].**

1.1.5.7. Autres ajouts

- **Les fibres**

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout. On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe **[3].**

- **Les gravillons**

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70 (**G/S< 0,70*)* [3].**

- **Les colorants**

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps **[3].**

1.1.6. Domaines d'emploi des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé bien avant le béton traditionnel et présente sous sa forme actuelle certaines propriétés spécifiques par rapport au béton classique, et peut procurer des économies dans certaines régions et pour certains usages.

Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable, établis sur ces données sont les suivants :

1.1.6.1. Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place **[3]**.



Figure 1.6. Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite) **[3]**

1.1.6.2. Bâtiment

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique **[3].**

1.1.6.3. La préfabrication

Le béton de sable est plus adapté à la préfabrication, on constate que les performances recherchées en préfabrication sont réunies dans le béton de sable (facilité en moulage, la montée en résistance, démoulage rapide, aspect de surface exceptionnel) **[3].**

- **Toiture à plis**

Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m (Fig.1.7 et 1.8).

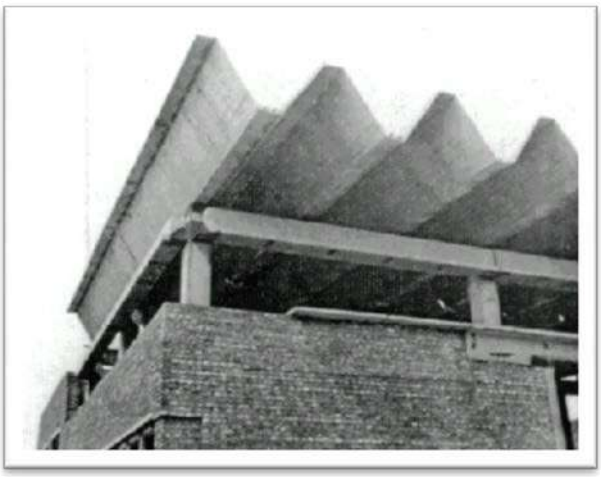


Figure 1.7. Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable **[3]**

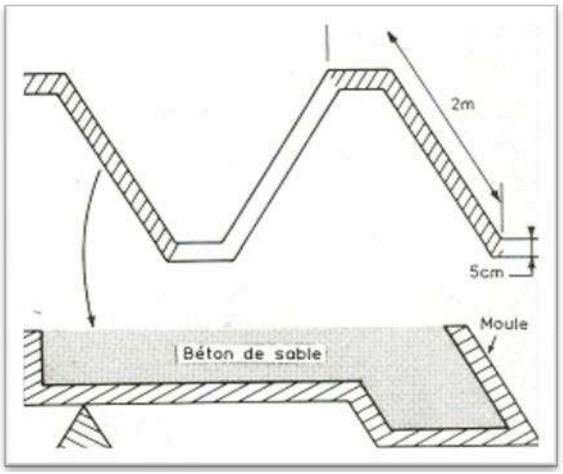


Figure 1.8. Moulage d'un élément Préfabriqué en béton de sable **[3]**

- **Ombrelles d'étanchéité**

La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité (Fig.1.9) ; il s'agit d'une voûte à caractère autoporteur constituée de plusieurs éléments (généralement trois) assemblés sur place et réalisés dans une usine de préfabrication (Fig.1.10).

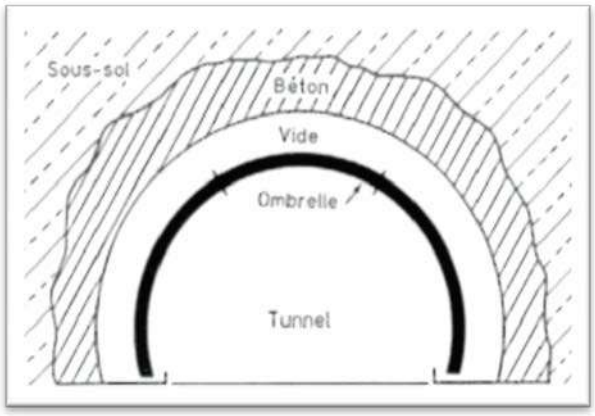


Figure 1.9. Ombrelles d'étanchéité en place



Figure1.10. Tunnel du métro de Leningrad

1.1.6.4. Routes, chaussé et dallage

Dans le domaine des routes et autoroutes (Fig.1.11 et 1.12), dans les aérodromes et en bâtiment, les BS peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.)**[3].**

L'utilisation de BS dans ces domaines se trouve en premier lieu justifiée par l'économie sur le coût des matériaux, la facilité de mise en œuvre et la qualité esthétique des produits. Dans le cas des structures de chaussées ou des dallages utilisant le BS, une étude de dimensionnement est nécessaire. Les calculs doivent être réalisés en respectant les normes et les règles en vigueur, notamment celles des performances mécaniques.



Figure 1.11. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface **[3]**

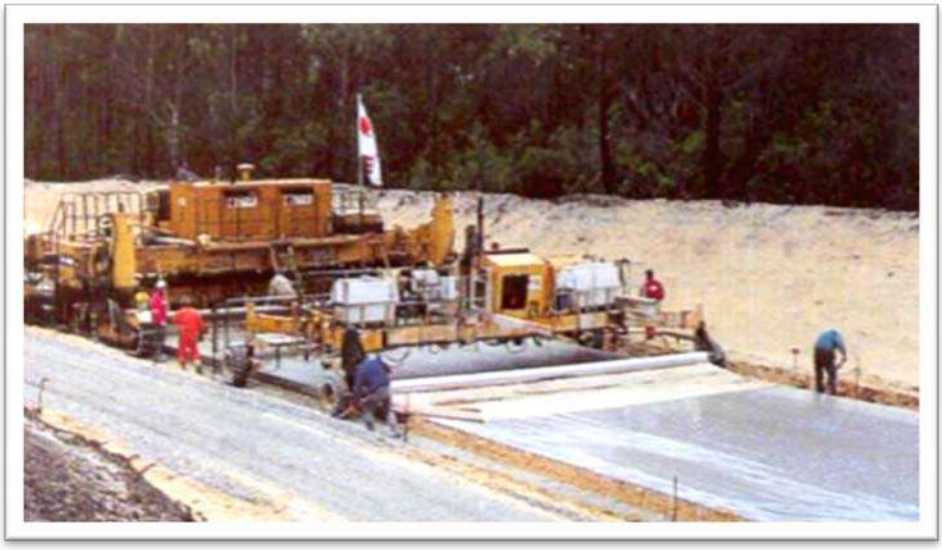


Figure 1.12. Déroulement d'un film polyane (cure) **[3]**

1.1.7. Intérêts et limites des bétons de sables

1.1.7.1. Intérêt des bétons de sable

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Cependant il exige, parfois, des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques :

- ✓ **La maniabilité** : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.
- ✓ **La cohésion et l'absence de ségrégation**: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.
- ✓ **La petite granulométrie et la faible dimension des grains** : le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferraillage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.
- ✓ **Le transport** : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport faible ce qui permet son transport à des distances lointaines.

- ✓ **L'aspect de surface**: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines.

1.1.7.2. 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.

1.1.8. Béton de sable projeté

La technique de la projection de béton est apparue au début de vingtième siècle aux Etats-Unis et en France. 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 **[1].**

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (Fig.1.13). 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 **[1].**

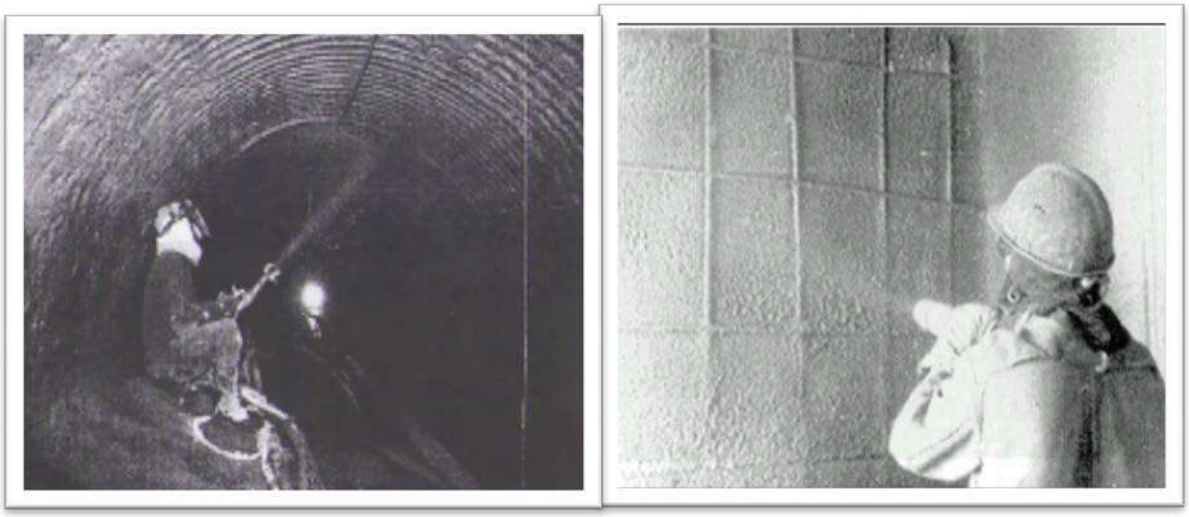


Figure 1.13. Le béton de sable en projection **[1]**

1.1.9. 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 **[4].**

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-nivelle ment 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 préjudiciables ;

- 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 **[4,5].**

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.

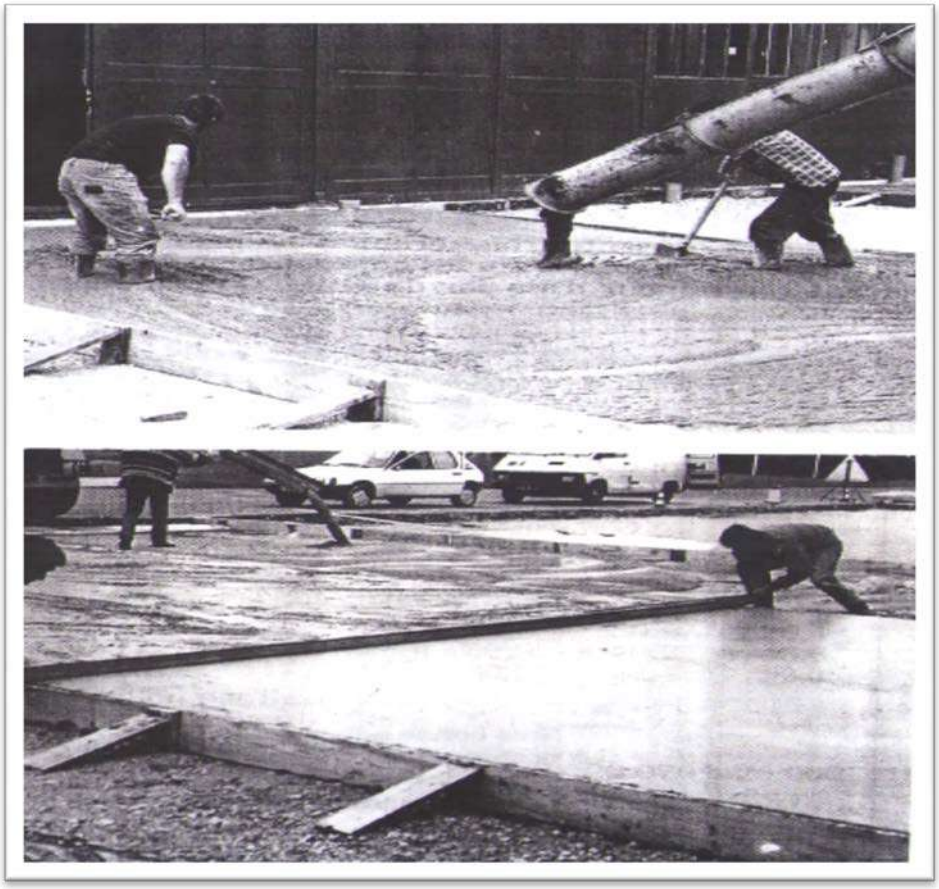


Figure 1.14. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon**) [3]**

1.9.1. Limites des bétons de sable

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques **[6].**

- **Raisons économiques :** l'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

- **Raisons techniques :** On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut-être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

1.9.2. Méthodes de formulation des bétons de sable

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques. **[3]**

Dans le cas du BS (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment.
Deux types d'approches de formulation sont présentées : une approche théorique, basée essentiellement sur l'optimisation de la compacité du BS en partant de la relation de Caquot et une méthode expérimentale, basée sur la réalisation de gâchées**. [3]**

1.9.3. Approche théorique de la formulation des bétons de sable

Les agrégats 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, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et 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 **[7]** 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/Dmax).

$$V=V_0\left(\frac{d}{D}\right)^{1/5} \text{.....(Equation 2.1)}$$

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 ;

Dmax: La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

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

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 m m et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.
2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80m m 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 80m m et l'étendue du sable comprise entre 80 m m et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)^{1/5} \quad \text{.....(Equation 2.2)}$$

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80m m et D_{max}

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V0) 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 la coupure 80m m, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille 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 (< 80m m) et le volume des vides associé a 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.

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.

$$[Fines] = 0.38\ (0.08/D_{max})^{1/5} \quad \text{.....(Equation 2.3)}$$

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 (Fig.1.15).

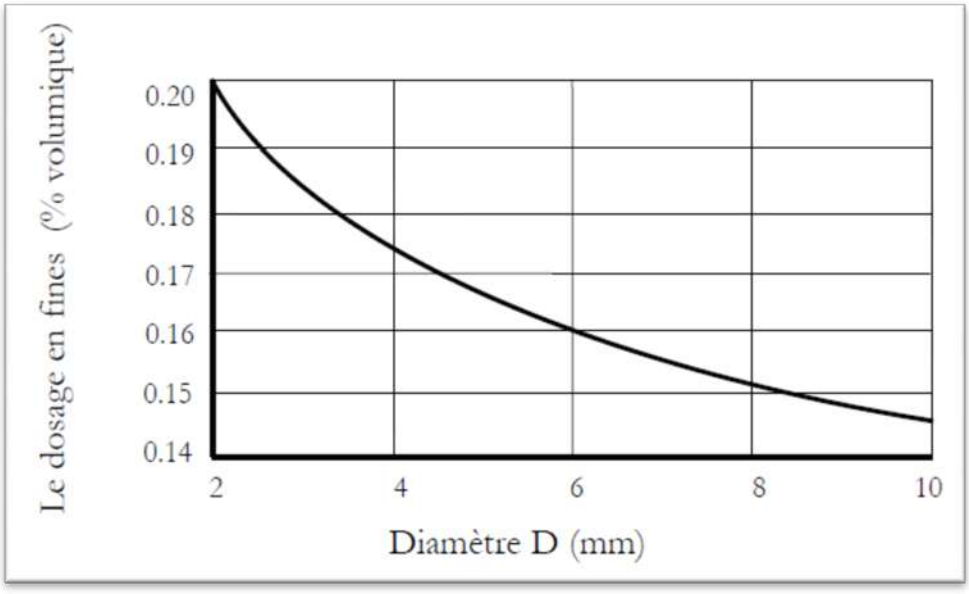


Figure 1.15. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines **[3]**

❖ **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

$$(e + v)_{min} = 0.8\ (d/D_{max})^{1/5} \quad \text{……..…..(Equation 2.4)}$$

Cette formule 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 :

$$d = (\ 60 / (f))\ \text{mm} \quad \text{……(Equation 2.5)}$$

Avec:

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

d : 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 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la Figure 1.16 le montre :

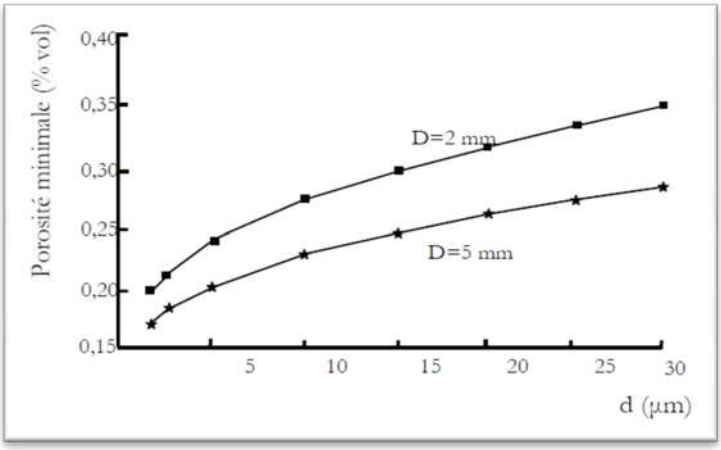


Figure 1.16. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable **[3]**

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v).

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la Figure 1.17 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

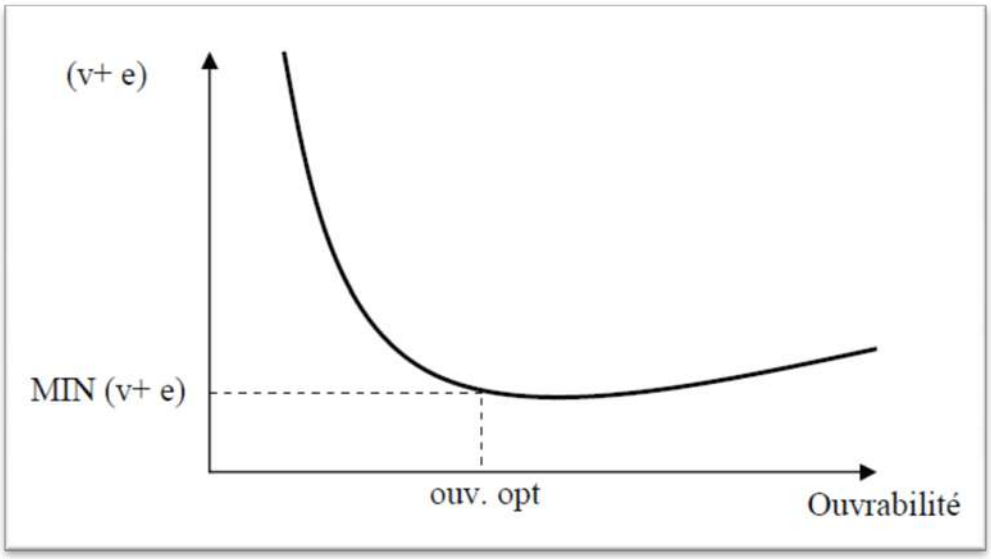


Figure 1.17. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée **[3]**

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera 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 celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée.

Dans les 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%.

$$[\text{Vides}] = K\,[\text{eau}] \quad \text{…… (Equation 2.6)}$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

❖ **Dosage en sable**

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, ($1m^3$), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide).

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m^3).

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

❖ **Estimation de la résistance en compression**

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.
Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET **[8]** a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf \times Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad \text{……. (Equation 2.7)}$$

Avec:

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;
E : dosage en eau total (l/m^3) ;
V : air piégé (l/m^3) ;
C : dosage en ciment (kg/m^3) ;
Rb : 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= Kfil (Fil/C) ;

0<Kfil £ 0.4 K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique .

K2 : coefficient d'activité du fillers calcaire. (Voir figure 1.18.)

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

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. 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 **[8] ,** alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

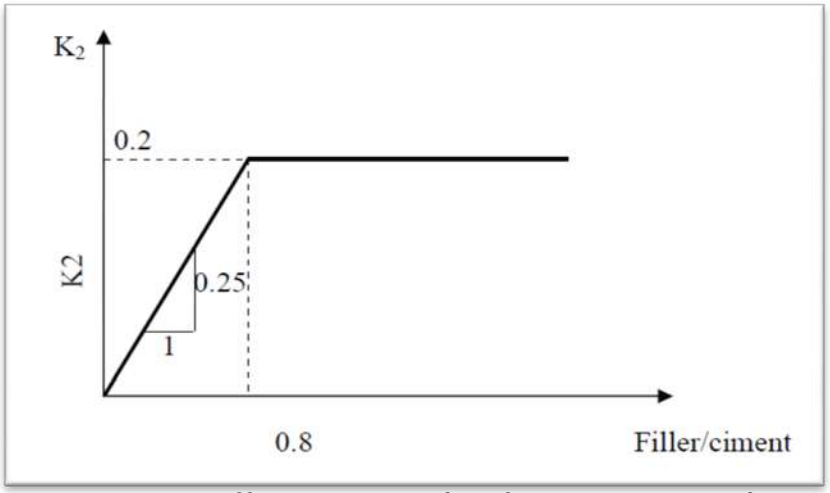


Figure 1.18. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) **[3]**

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en termes de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples

· Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.

· Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulation 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.

Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

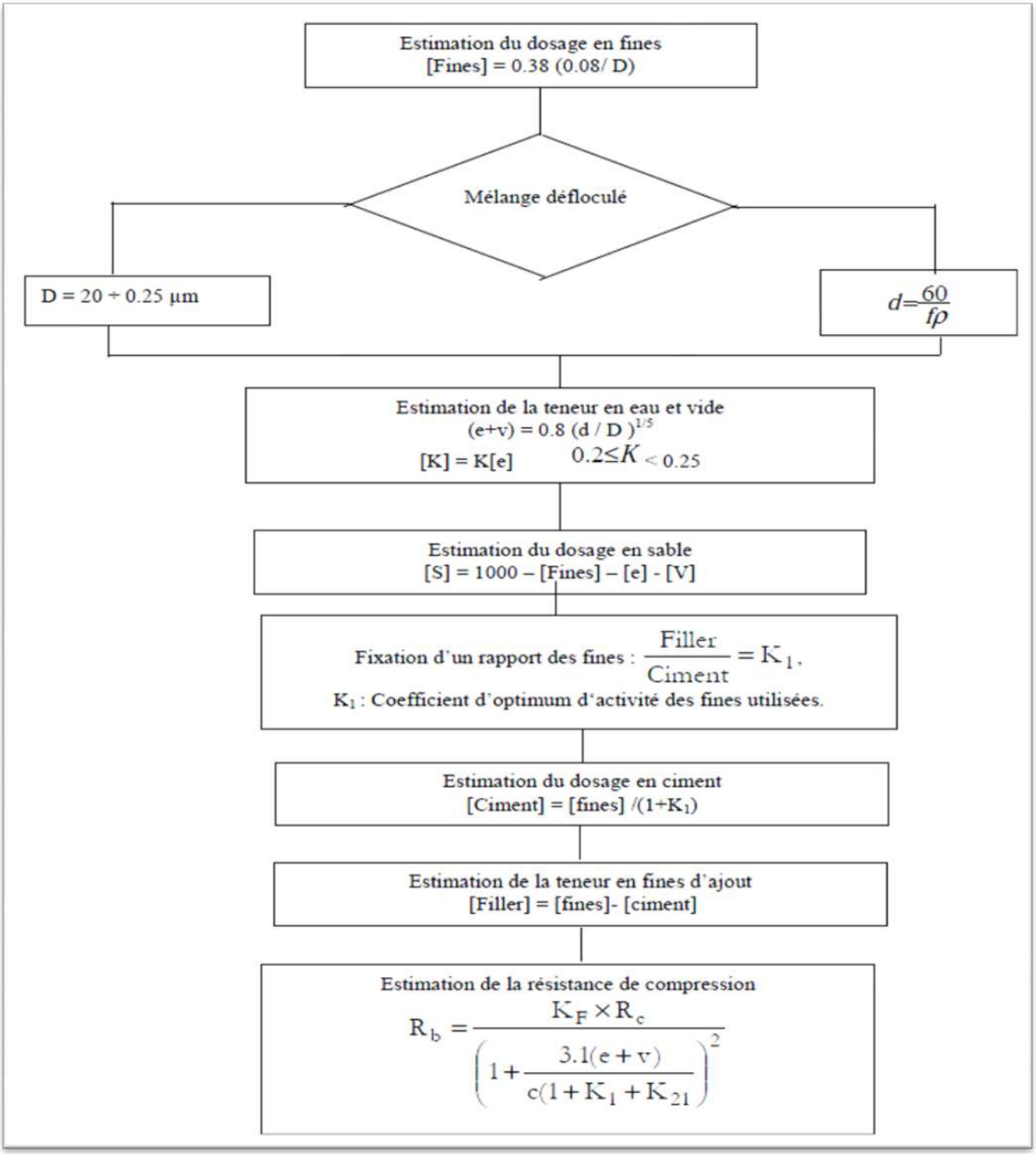


Figure 1.19. Organigramme de la méthode théorique

1.9.4. Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilitémètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction **[3]** .

1.9.5. Les différentes étapes de la formulation

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

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

a) Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m^3).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de

défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ; on aboutit à la relation suivante :

$$V_{air} + V_C + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litres). } \ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.8)}$$

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

$$Msable = MVA * Vsable\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.9)}$$

Msable: masse nécessaire pour 1 m^3 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 m^3).

$$MVAT = m_{ciment} + m_{eau} + m_{adj} + m_{sable}\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.10)}$$

d) 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 (1)
- 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).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{sable}\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.11)}$$

Où

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.

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 2). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 2) 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**

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule d'un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1}-(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad \text{(Equation 2.12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable 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 1.20 et 1.21)
- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité 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 60 et 90 Kg/m3de fines.

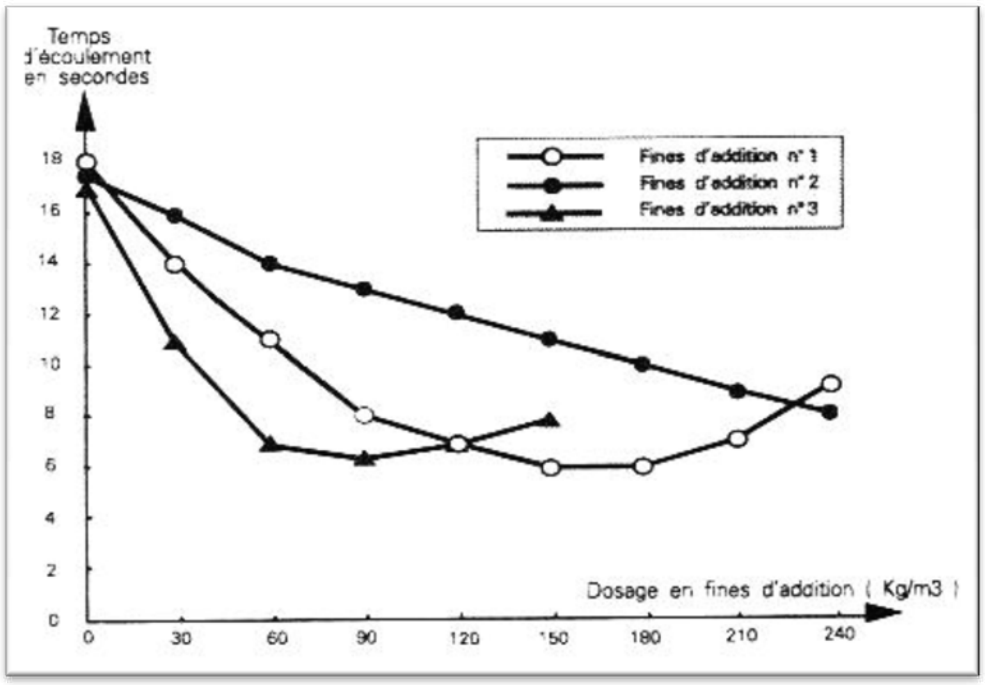


Figure 1.20. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition **[3]**

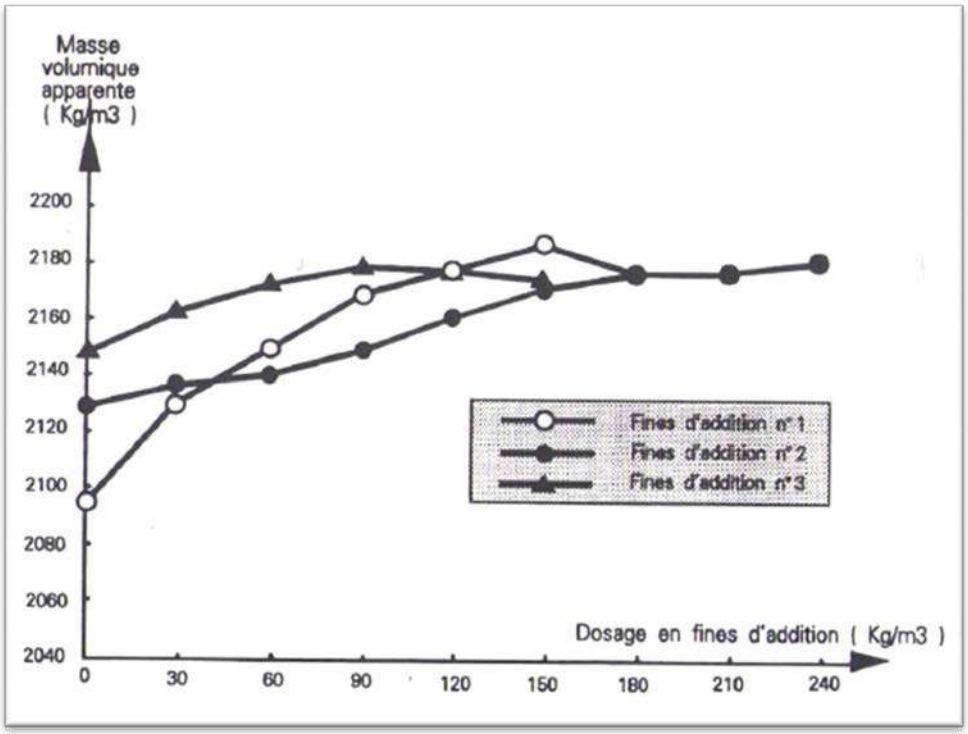


Figure 1.21. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition **[3]**

1.2 Les ajouts minéraux

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives. **[9]**

1.2.1. Fillers calcaires

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'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 et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition 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 dolomitiques.

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci (figure 1.22) **[10]**.

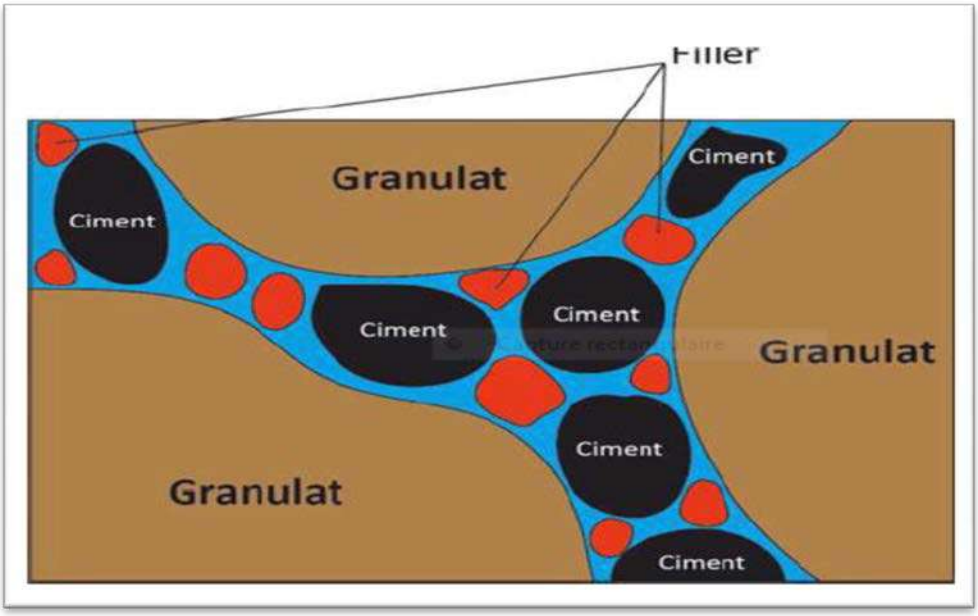


Figure 1.22. Effet des fillers calcaires dans une pâte cimentaire **[10]**.

1.2.1.1. Effet sur les caractéristiques des bétons frais

A. Etat frais

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue **[11]**. Cet effet bénéfique est expliqué par SCHMIDT **[12]** :« Les particules fines déplacent une partie d'eau des vides entre les particules les plus grosses, la rendant disponible comme lubrifiant interne additionnel. Ainsi le béton est moins ferme et la conservation d'eau est améliorée », les fines calcaires contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons en augmentant la cohésion et en s'opposant à la ségrégation **[13]**.

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0,40. Il a été rapporté que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m2/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité **[14]**.

En gardant le même pourcentage d'eau, on constate que jusqu'à 20% de taux de remplacement, les fines calcaires, de diamètre médian inférieur à celui du ciment, jouent le rôle d'un fluidifiant **[15]**. Au-delà de ce pourcentage, ces fines ont un effet épaississant **[15]**. Pour le même volume de substitution, le besoin en eau est identique à celui d'un ciment ordinaire pour de faibles taux de substitution et ne devient important qu'à partir de 10% **[16]**.

Puisque les fillers calcaires sont composés de particules de dimensions inferieures a 125fÊm, leur surface spécifique va jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement en suspension **[17]**.

Selon Nehdi M. **[18]**, Neto et Campitelli observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire.

B-Etat durci

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de la modification de la microstructure. L'addition du CaCO3 accélère l'hydratation au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pate, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de

10% **[19, 20]**. Au-delà, l'effet du filler n'entraine pas de modification des résistances ou alors entraine une diminution. On observe une chute de résistance allant jusqu'à 45% pour 40% de calcaire dans le ciment.

Plusieurs études **[21, 22]** ont observé que cette amélioration est à jeune âge et que les résistances diminuent à 28 jours. Kakali et al. **[22]**, ont montré que la teneur en eau liée (non évaporé), déterminée par essai de thermogravimétrie est plus élevée dans les pattes de ciment avec ajout calcaire en comparaison au ciment sans ajout calcaire. Ceci indique que le calcaire améliore la réactivité du clinker et exploite son potentiel hydraulique. D'autre part, le contenue de Ca(OH)2 dans la pâte de ciment au calcaire est plus élève que de celle sans calcaire. Cette augmentation indique une accélération d'hydratation de silicates de calcium.

Certains de ces résultats ont étés confirmés par EZZIANE **[23]** qui a trouvé que l'incorporation des fillers ayant des surfaces spécifiques élevées (3600 et 3100 cm2/g) améliore sensiblement les résistances à la compression surtout pour des valeurs de substitution de l'ordre de 10%. Au-delà de cette valeur, une chute de résistance a été observée allant jusqu'à 45% pour 40% de calcaire dans le ciment

1.2.2. Fillers de brique

La brique est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, a une température appropriée (la température de frittage). Les particules d'argile commencent alors a fondre et s'agglomèrent pour former une masse à caractère pierreux. Après la cuisson, la brique conserve une certaine porosité, qui lui confère d'ailleurs des propriétés spécifiques et la distingue des autres matériaux de construction. En réalité, la brique de terre offre une isolation thermique, phonique et hydrométrique bien supérieure au parpaing béton et une résistance à la compression également supérieure au parpaing (fig.1.23) **[24]**



Figure .1.23. Brique coccacée

1.2.2.1. Propriétés des briques

A. les propriétés thermo- physico -mécaniques de brique

Les propriétés thermiques physico –mécaniques de brique sont indiquées dans le tableau 1.2

Tableau 1.2. Les propriétés physico –mécaniques des Briques creuses et Perforées **[25, 26,27]**

	Briques creuses	**Briques perforées**
Masse volumique (kg/ m^3)	1750-2050	1750-2050
Absorption d'eau	< 15%	30 - 80 %
Isolation acoustique	41 -58 dB	41 - 54 dB
Résistance à la Compression	4 - 8 MPa	12.5 - 40 MPa

1.2.2.2. Effet sur les caractéristiques des bétons frais

a) Etat frais

Aouni.M et al. **[28]** ont réalisés un mortier à base des déchets de brique cuite (MBr) en faisant substituer une partie du poids de ciment par une quantité similaire en poudre et comparées au mortier témoin. Les taux de remplacement des poudres recyclées, sont choisis de 0 à 30 % avec une marge de 5%. Ils ont remarqué que les déchets de brique influent négativement sur l'ouvrabilité du mortier, et également que plus le pourcentage des déchets s'augmente, le temps d'écoulement du mortier augmente aussi. Les résultats d'ouvrabilité sont présentés sur un histogramme (Figure I.24)qui permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différents mortiers a base de déchets de brique (MBr) au mortier témoin.

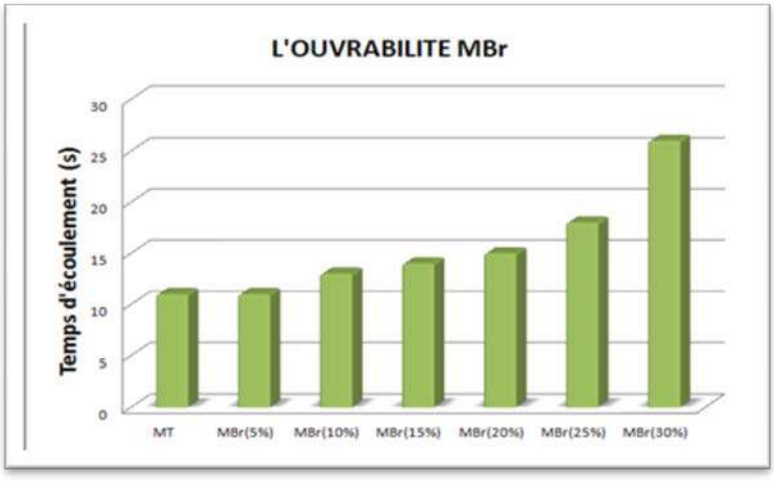


Figure 1.24 .Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr) **[28].**

Pour les bétons de granulats de brique concassée, le rapport eau-ciment optimum est 0,55 ; bien que si la haute ouvrabilité soit exigée, alors les mélanges puissent être faits avec un rapport eau - ciment jusqu'à 0,7 **[29].**

Benakli.S**[30]** et al ont réalisent un BAP à base de déchet de brique pour l'objective d'étudie l'influence d'ajout 10% de poudre de déchet de brique broyée sur le comportement a l'état frais.

b) Etat durci

NIGRI.G. et al. **[31]** Ont cherché à élaborer un nouveau ciment composé à base de déchets de briques. Des résultats préliminaires montrent que l'incorporation de 5 à 15% de déchets de briques dans un broyeur à haute énergie, permet une amélioration des principales caractéristiques physiques (retrait, densités, expansion à chaud, etc.) du nouveau liant, avec des propriétés mécaniques comparables aux ciments portlands composés de classe de résistance normale de 42,5 MPa. Les meilleures valeurs des caractéristiques et des propriétés physico-mécaniques ont été obtenues pour un ciment contenant les proportions en masses suivantes : 85% de clinker + 10% de déchets de briques + 5% de gypse.

Les travaux de Dina M. S. **[32]** ont pour but d'étudie les propriétés physico-mécaniques des mortiers de ciment à base du déchet de brique d'argile broyées comme granulats recyclés.

Quatre séries de mélanges dont la teneur en ciment de 100, 150, 200 et 300 kg/m3 ont été préparés. Dans chaque série, les granulats naturels fins, ont été remplacés par des agrégats de briques concassées (ABC) à avec des taux de substitution de 0%, 50% et 100% en volume.

Les résultats expérimentaux ont montré une diminution du poids et des résistances mécaniques des mortiers avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés. En plus ils ont remarqué que l'absorption d'eau par capillarité augmente en augmentant le taux de remplacement des granulats recyclés des granulats naturels.

F.Bektas et al. **[33]** ont examiné les effets du recyclage de la brique d'argile sur la durabilité du mortier. La brique a été utilisée par remplacement du poids de sable avec des taux de Substitution de 5% à 30%. Concernent l'état durci (Résistance à la compression), les auteurs ont trouvé une augmentation graduelle avec le vieillissement (B0, B5%, B10% et B20%). Au-delà ils ont remarqué une réduction de 5% à 10% pour un pourcentage de 25% de brique.

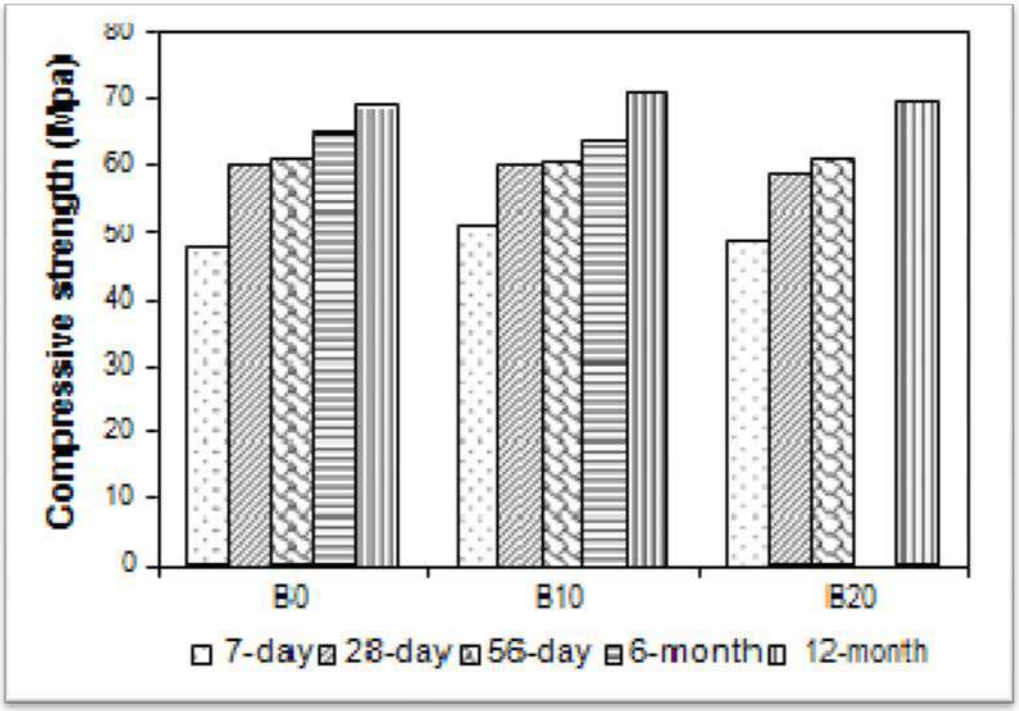


Figure 1.25. Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de Déchets de brique **[33].**

Aouni.M.et al **[28]** ont réalisés un mortier à base des déchets de brique cuite (MBr) enfaitant substituer une partie du poids de ciment par une quantité similaire en poudre et comparées au mortier témoin. Les taux de remplacement des poudres recyclées, sont choisisse 0 à 30 % avec une marge de 5% concernent l'état durci la résistance à la compression des Mortiers MBr 5%, MBr 10%, MBr 15%, dépasse celle du mortier de référence, les résultats sont présentent sous forme d'histogramme (Figure 1.26), ainsi que les résistances à la traction augmentent en fonction de l'âge quel que soit le type du mortier Les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15%dépassent celle du mortier témoin pour les trois âgés et il est de l'ordre de 7,51 MPa, 7.21 MPa et 7,23 MPa respectivement à 28 jours, et la plus faible valeur de l'ordre de 3.30 MPa est remarquée pour le mortier MBr 30% La traction par flexion nous donne à peu près une idée sur la résistance à la traction, on constate alors qu'on a un gain de résistance de 11%les résultats sont présenté sous forme d'histogramme donné par la Figure 1.27.

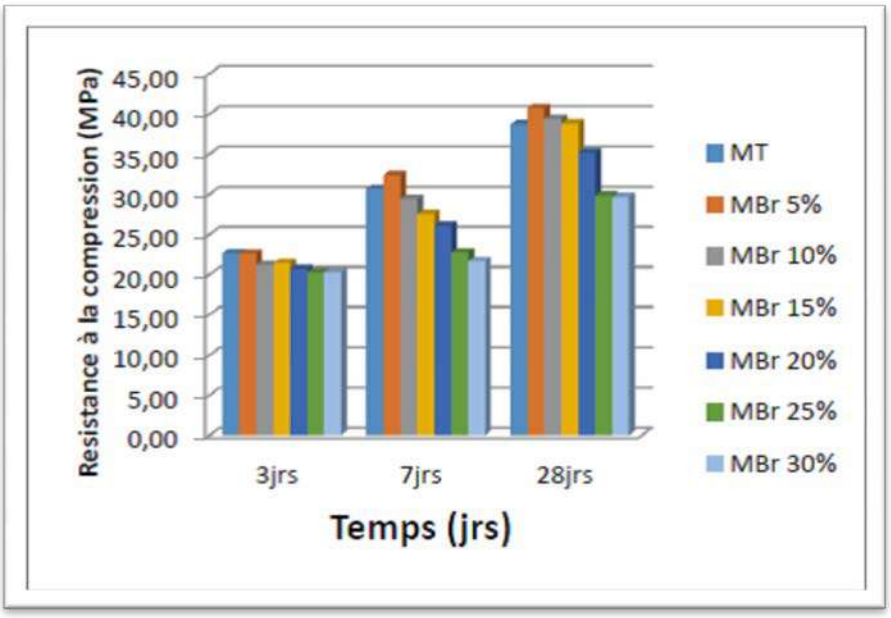


Figure 1.26 . Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr**[28]**

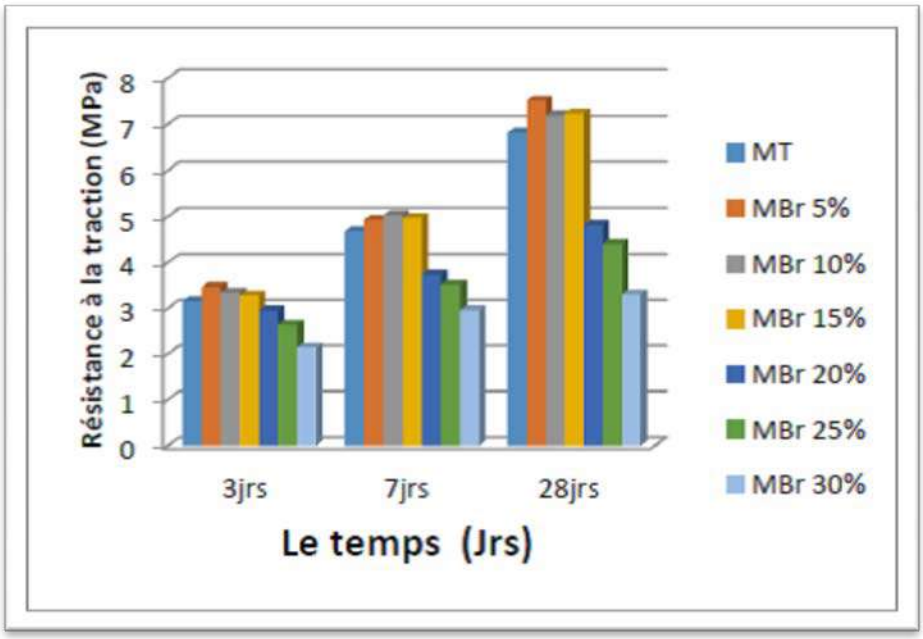


Figure 1.27 . Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr **[28]**.

HADJOUDJA M. et BEDERINA M. **[34]** ont étudié la possibilité de récupération des Déchets de briques dans le béton de sable de dunes. Leur étude a pour objet d'étudier l'effet Du dosage en filler des déchets de briques sur la capacité d'absorption de l'eau du béton de Dunes, ses cycles de séchage–ré-humidification et l'évolution de sa résistance sous l'effet gel dégel.

Leur travail a permis d'observer l'intérêt et l'efficacité de l'ajout des fillers sur le comportement physico-mécanique du béton de sable dunaire à base de déchets de brique.

Néanmoins les résultats de cette étude ont montré l'importante absorption capillaire avec L'augmentation du dosage en filler de brique (Figure 1.28).En ce qui concerne la résistance augel-degel, ils ont remarqué que l'augmentation de la teneur en fillers de briques provoque une nette diminution des taux de variations en poids, elle semble présenter un optimum pour la composition avec 200 Kg/ de fillers de brique (Figure 1.29).

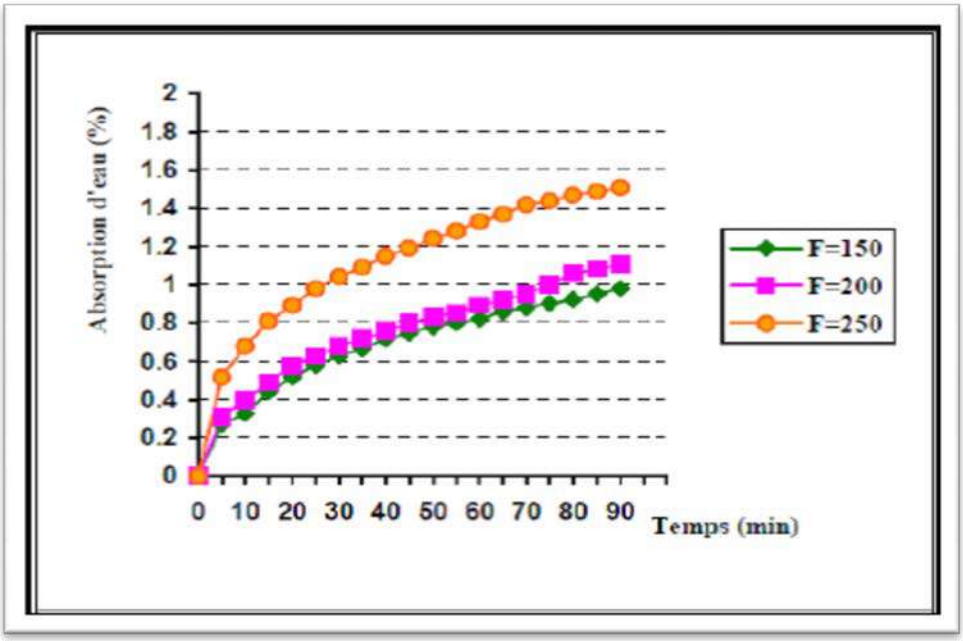


Figure 1.28. Absorption d'eau des bétons a base de déchets de brique **[34]**

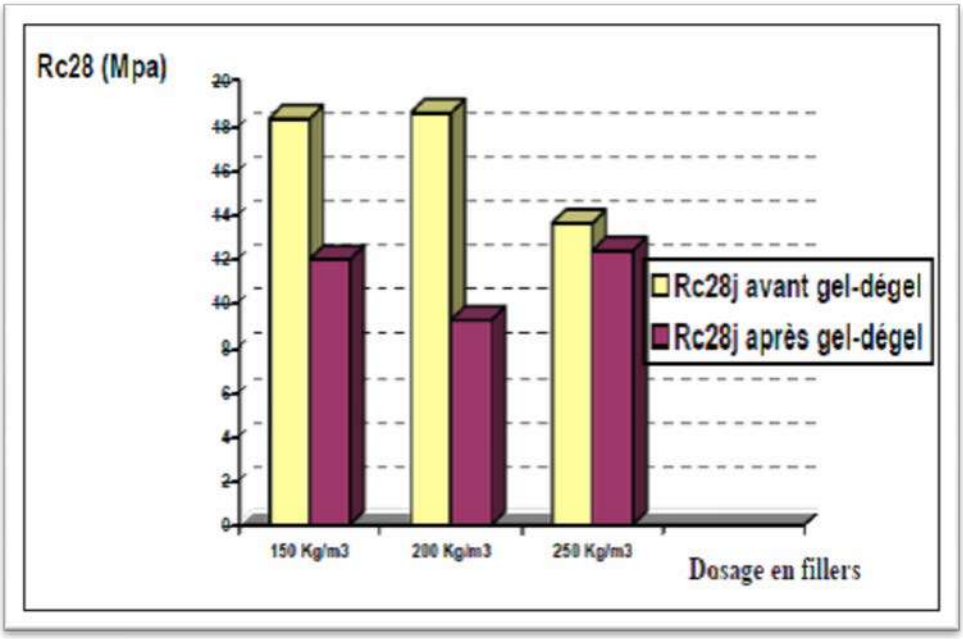


Figure 1.29. Variation de la résistance à la compression des bétons à base de déchet de brique sous l'action du Gel-Dégel **[34].**

Lan Z. et al **[35]**, ont utilise des déchets de brique provient d'un site de construction et ont une résistance à la compression plus de 10 MPa. Ces déchets sont introduits dans la fabrication D'un béton a base de 15% de cendre volante, avec des taux de remplacement de 0, 30, 40 et 50% des granulats concassées. Les résultats de cette étude ont montré que les granulats recyclés (déchets de brique) ont une porosité très élevée par rapport aux granulats concassés. Et que les résistances mécaniques du béton sont diminuées avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés (Figure 1.30).

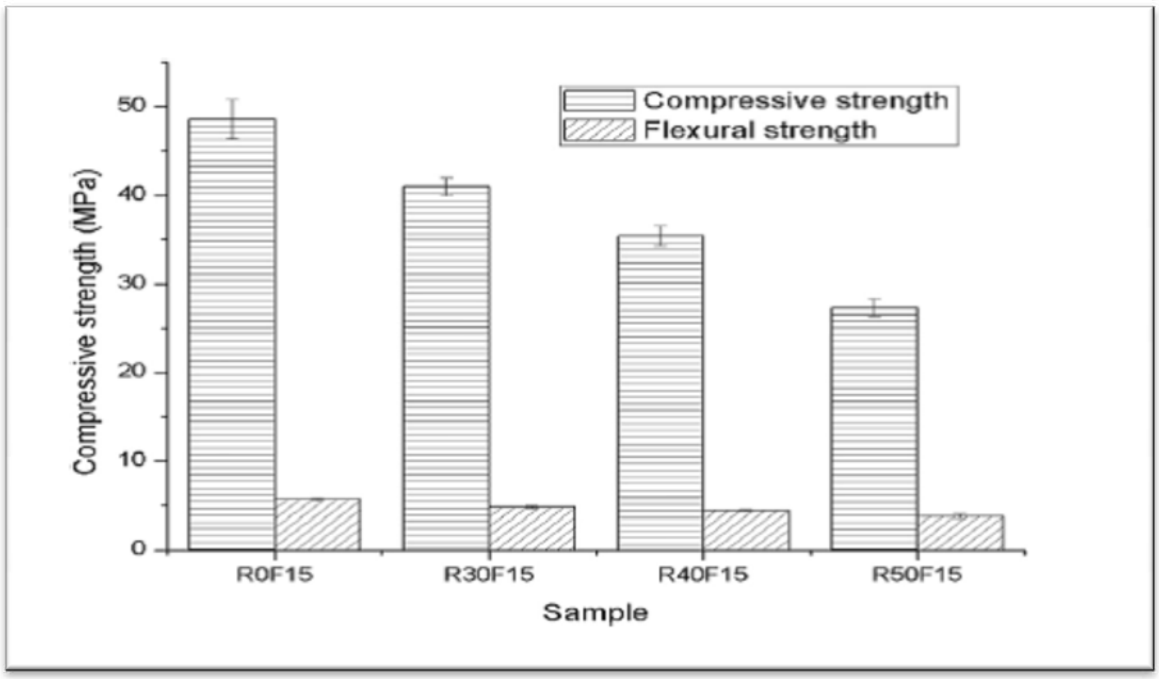


Figure 1.30. La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés. **[35]**.

1.2.3. Fillers de marbre

En géologie le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite. En architecture, sculpture et marbrerie ce terme peut désigner n'importe quelle pierre difficile à tailler et capable de prendre un beau poli, dont les plus courantes sont les « vrais » marbres. **[36]**

Le marbre est classé selon son type et son type varie de pierre en pierre. Il existe trois Classifications de marbre : la Dolomite, le Magnésium et la Calcite.

- la Dolomite contient plus de 40% de carbonate de magnésium.
- le Magnésium contient entre 5% et 40% de magnésium.
- la Calcite contient moins de 5% de carbonate de magnésium.



Figure.1.31. Pierre de marbre



Figure.1.32. Poudre de marbre

1.2.3.1. Propriétés de marbre

La sensation de froid que l'on a en touchant du marbre, bien qu'étant à la température ambiante, est due à sa forte effusivité thermique. **[37]**

1.2.3.2. Types La classification des marbres

Outre le marbre blanc, il existe des variétés bleues, roses, beiges, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires, etc. On classe aussi les roches marbrières géologiquement **[38]**

* BRÈCHE : roche formée de fragments anguleux, enrobés de ciment naturel.

*TRAVERTIN : calcaire d'origine lacustre présentant des trous.

* ONYX : (souvent translucide) marbre constitué de carbonate ou sulfate de chaux s'accumulant par infiltrations à travers les couches du sol.

* ARDOISE : schistes argileux ayant subi un léger métamorphisme, ils se fendent naturellement en couches minces.

* LAVE : basalte de couleur gris foncé pouvant contenir des petits trous dus à la présence de gaz dans la lave, souvent rebouchés.

1.2.3.3. Influence de déchets marbre sur le comportement des matériaux à base cimentaire

- **L'ouvrabilité**

Pandey et al.[**39**] ont trouvée que l'affaissement augmente d'environ 44 (%) en fonction de substitution de 15% de ciment par le déchet de marbre en fonction d'augmentation de substitution de ciment par la poudre de marbre

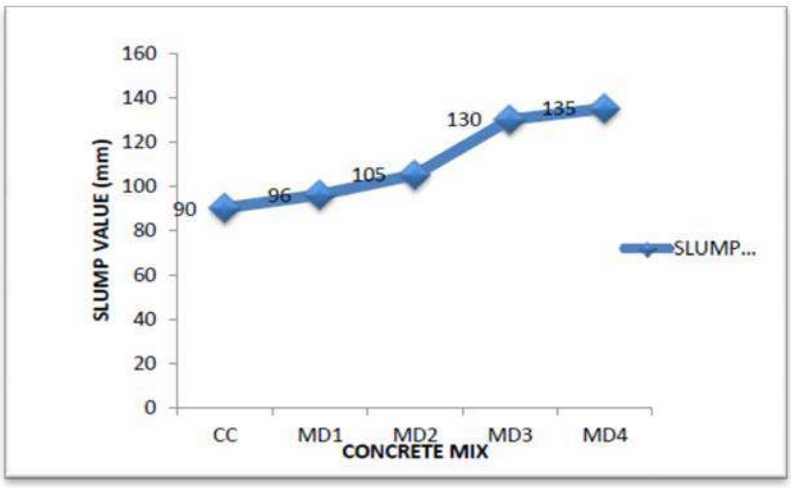


Figure.1.33. Effet de substitution de ciment par la poudre de marbre sur affaissement du béton **[39]**

- **Densité**

Houria Hebhoub et al. **[40]** Ont étudié l'influence d'incorporation du (25%,50%,75% et 100%) de poudre de marbre sur la densité du béton vibré. Ils ont trouvé que la densité est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de marbre (Figure.1.34). C'est mêmes résultats trouvées par Naamaoui et al **[41]**.

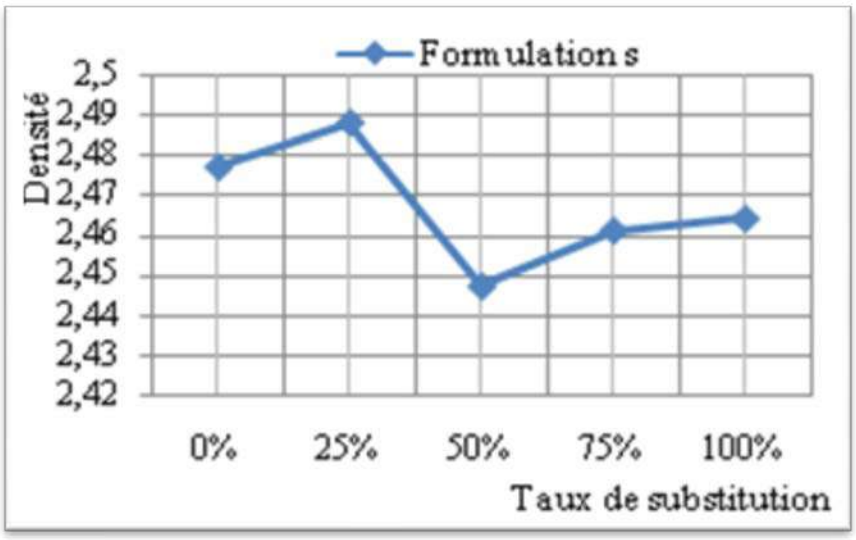


Figure 1.34. Variation de la densité en fonction du taux de substitution à poudre de marbre **[40].**

- **Résistance a compression**

Pandey et al.**[39]** ont constaté que la résistance à la compression du béton ordinaire augmente en fonction d'augmentation de substitution de ciment par le déchet de marbre. Ils ont trouvé que la résistance à la compression passe par un optimum de 26% l'âge de 28 jours en fonction de substitution de 15 % de ciment par la poudre de marbre ce résultat est en concordance avec les résultats de Anitha et al. **[42]**

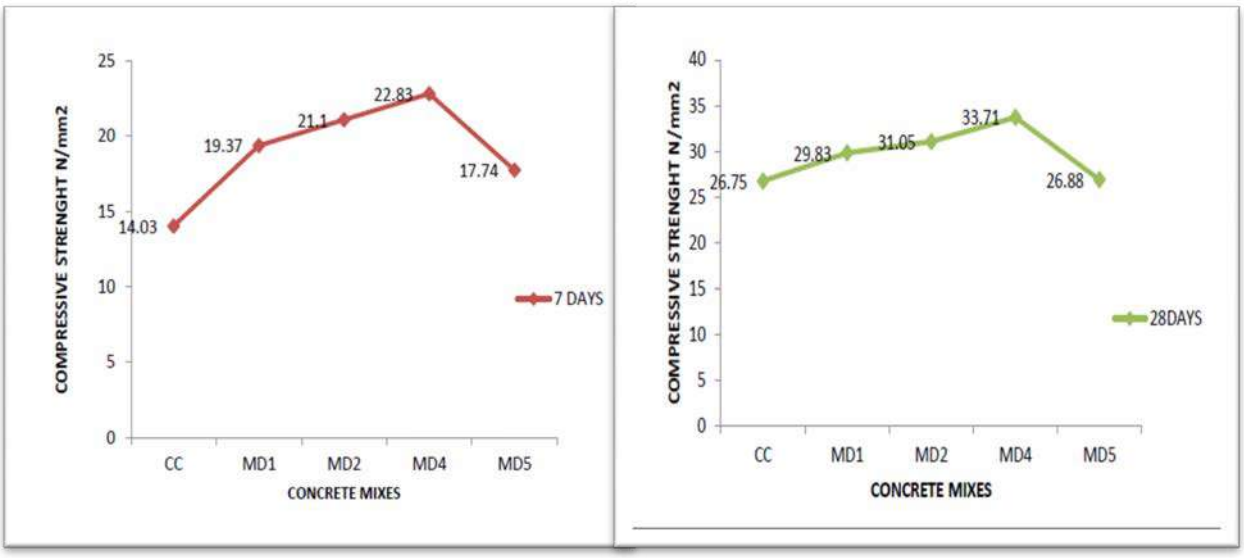


Figure.1.35. Effet de substitution de ciment par la poudre de marbre sur la résistance à la compression du béton **[39]**

Mohamadien **[43]** a étudié l'influence de substitution du ciment par la poudre de marbre sur la résistance à la compression de mortier ordinaire. Il a constaté que la compression est augmentée d'environ 31.5% en fonction de substitution de 15% du ciment par la poudre de marbre (Figure.1.36)

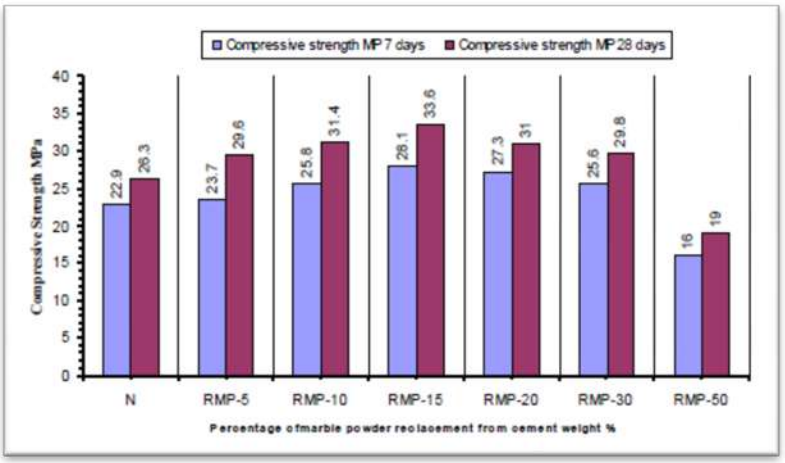


Figure.1.36 Effet de substitution de ciment par la poudre de marbre sur la résistance à la compression du béton **[43]**

1.2.4. Fillers de Pouzzolane

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques scoriacées. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer ; présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. Elle est essentiellement composée de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer **[44]**. Actuellement en Algérie, le gisement de BOUHAMIDI, situé à 2.5 km de Beni-Saf, demeure l'unique gisement exploité. La production est estimée de 1000 à 1400 tonne/jour. La quasi-totalité de cette quantité est destinée aux cimenteries ERCO de l'Est et de L'ouest du pays **[44]**.



Figure.1.37. Roche de pouzzolane



Figure.1.38. Poudre de pouzzolane

1.2.4.1. Effet de la pouzzolane naturelle sur les bétons

A. Etat frais

Pour des finesses proches, le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires quel que soit la nature du ciment utilisé dans le mélange **[45]**.

L'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés des pâtes de ciments à l'état frais a été étudié par AICHOUBE et al. **[46]**. Il a été montré que la substitution du ciment par 10% à 30% de pouzzolane, engendre une augmentation de la consistance normale (diminution de l'ouvrabilité) et une diminution du temps de prise de la pâte de ciment. En effet, il a été montré que l'addition de la pouzzolane naturelle en grandes quantités engendre une accélération de la prise de la pâte de ciment générée par une importante consommation d'eau par l'hydratation.

B. Etat durci

La lenteur de la réactivité de la pouzzolane engendre un retard de sa prise. Les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la quantité substituée au ciment. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique retardée et par la faible quantité de CSH formé au très jeune âge. Ce retard devient plus important, notamment pour 40 et 50 % de taux de substitution. Pour 20% de pouzzolane, les temps de début et de fin de prise se sont prolongés respectivement de 35 et 77 minutes **[47]**. De même, le début de prise a diminué d'une heure en allant d'une finesse de 3500 à 5700 g /cm2 de la pouzzolane **[48]**.

La plus grande partie de l'évolution des résistances se produit à partir de l'âge de 7 jours. Toutefois, à 28 jours les résistances du mortier contenant de la pouzzolane sont comparables à celles du mortier témoin, et à 45 jours elles deviennent supérieures. Pour 30% de pouzzolane

les résistances sont comparables et deviennent supérieures à celles du ciment ordinaire en augmentant sa surface spécifique **[48]**.

Des améliorations dans les performances mécaniques des mortiers ont été constatées **[49]** avec l'ajout de l'addition siliceuse pour les dosages 5 à 10 % de fumée de silice au ciment Portland contenant 15 % de pouzzolane naturelle en comparaison avec le mortier témoin. Ceci donne des résistances mécaniques supérieures à celle du mortier témoin **[50]** Pour le même taux de substitutions par la Pouzzolane naturel de béni-saf (15%) à un ciment (CPJ 32.5), il a été remarqué une augmentation importante de la résistance à la compression et à la flexion dès le 28ième jour pour les Béton auto plaçant.

1.2.5. Filler de laitier

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulat pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant **[51]**. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m^3.



Figure.1.39. Poudre de laitier

Tableau 1.3. Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
% SiO2	29 à 36	33 à 42	38 à 42
% AI2O3	13 à 19	10 à 16	8 à 12
% CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
% Fe2O3	4	0.3 à 20	2.0
% MgO	6	3 à 12	4.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.

-Chaleur (étuvage, autoclavage).

-Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse) **[52]**

1.2.5.1. Propriétés de béton au ciment au laitier

A. Influence de l'ajout de laitier sur les propriétés de béton frais

Temps de prise : pour des températures moins de (26 C°), le temps de prise du béton contenant du laitier peut être plus long que celui du béton de ciment portland, en particulier par temps froid, la prise plus lente dépendra de la réactivité du laitier et de son pourcentage dans le mélange. **[53]**

Plus les températures ambiantes sont basses, plus le temps de prise et plus lent (figure1.40). Le pourcentage de laitier utilisé peut également affecter le temps de début de prise, cependant, les taux de remplacement de moins de 30% généralement n'affecteront pas le temps de prise de manière significative. **[53]**

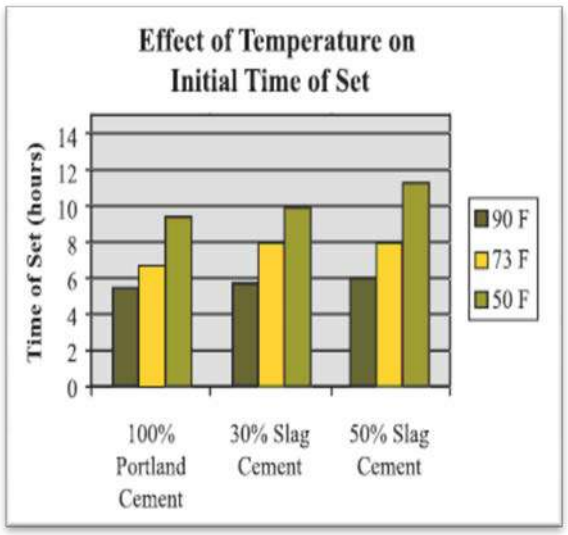


Figure 1.40.L'effet de température sur le prise temps de début de prise de ciment avec ajout de laitier **[53]**

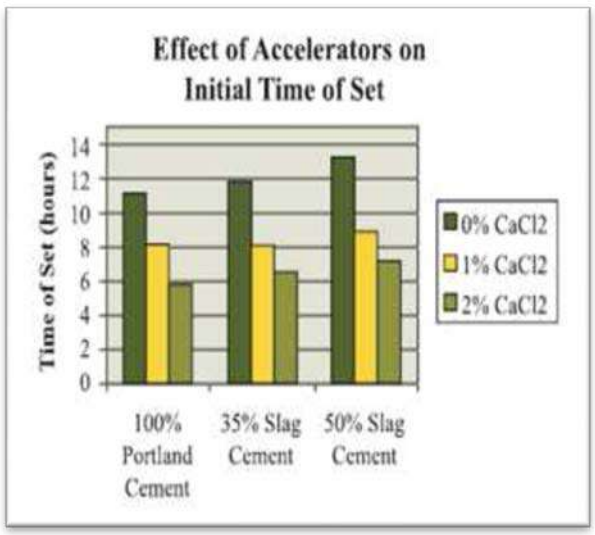


Figure 1.41.L'effet d'accélérateur de temps de prise de début de prise de ciment avec ajout de laitier **[53]**

B. Influence de l'ajout de laitier sur les propriétés du béton durci

- **Résistance a la compression**

En général, la résistance du béton contenant du laitier se développe plus lentement, est plus faible initialement et égale ou supérieure à long terme à celle du béton de ciment Portland et de résistance à la compression à 28 jours semblable **[54].**Pour des taux de substitution plus élevé de ciment par de laitier fait diminué la résistance en compression pour tous les âges Ceci semble être dû auteneur non-optimum de gypse en particulier pour dosage de remplacement au-dessus de 50% **[55]**.

1.2.6. Les fillers de verres

Plusieurs définitions ont été proposées pour un verre. On peut le considérer comme un solide non cristallin obtenu par figeage d'un liquide surfondu. Lors de ce refroidissement, il acquiert les propriétés d'un solide sans pour autant présenter un ordre cristallin à longue distance et sans périodicité dans l'arrangement des atomes. Cette définition n'est pas générale car il existe des solides qui ne sont pas des verres comme par exemple les gels et répondent à cette définition. Ce qui a permis à Tammann (1939) **[56]** de postuler l'existence d'un état vitreux, et on peut définir le verre comme un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse.

Ce phénomène de transition vitreuse est caractéristique des matériaux indépendamment de leur formulation chimique ou de leur mode de préparation. On notera que, quelle que soit la température, l'enthalpie du verre est toujours supérieure à celle du cristal. L'état vitreux est

donc un état métastable de la matière et seules des barrières cinétiques empêchent l'évolution du matériau vers un état stable.



Figure.1.42. Poudre de verre

1.2.6.1. La composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de …) et par élévation à une très haute température.
Ces oxydes sont appelés oxydes **formateurs** car ils forment le squelette du verre. On les combines avec d'autres éléments dits «**modificateurs** » qui sont :
* Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice dont la température de fusion est 1730°C).
*Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant. **[57].**

A. Les oxydes formateurs (les vitrifiants)

- **La silice : (dioxyde de silicium SiO2)**

C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant. **[58].**

- **L'anhydride borique : (le bore ou borax anhydre B2O3)**

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est

aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.

- **L'anhydride phosphorique : (le phosphore P2O5)**

Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois.

B. Les oxydes modificateurs :

- **Les fondants : (oxydes alcalins)**

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge.

1.2.6.2. Les différents types de verre

- Les verres sodocalciques **;**
- Les verres borosilicates **;**
- Les verres au plomb **;**
- Le verre de silice.

1.2.6.3. Effet de la poudre de verre

Très peu de données concernant l'effet du verre sur le seuil de cisaillement et la viscosité existent dans la littérature. Cependant, des essais sur coulis additionnés de poudre de verre de 10 et 20% en substitution du ciment D'autres essais d'étalement au mini-cône on été effectués par le même auteur sur des coulis avec 10, 20, 30 et 40% en remplacement du ciment, il conclut que de forts pourcentages de verre favorisent le maintien de la maniabilité et qu'il existe une interaction entre le verre et le superplastifiant, ce dernier étant moins actif lorsqu'il y a du verre.

Rapportent que l'étalement d'un béton diminue avec l'ajout de poudre de verre pour une taille des particules qui varient entre 38 et 300μm, en raison de la forme angulaire des particules. Le superplastifiant devrait donc être utilisé lorsque la teneur en verre en substitution au ciment est supérieure à 30% afin d'éviter le phénomène de ségrégation. **[9]**

B. La résistance à la traction

KiangHwee Tan et al. **[59]**ont trouvés que la résistance à la traction est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de verre (Figure.1.43)

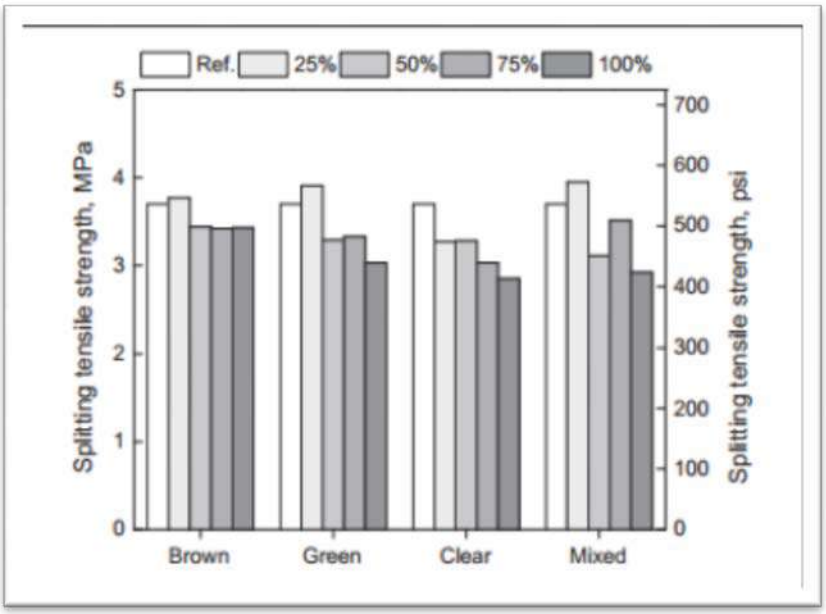


Figure.1.43. Fractionnement la résistance à la traction de mortier de verre. **[60]**

Park et all, **[61]** ont conclue qu'il y a une légère diminution de la résistance à la traction par fendage de mortier en fonction d'augmentation du pourcentage de déchet de verre.

1.3. Effet de la température de cure sur les propriétés des bétons

1.3.1. Introduction

La préfabrication d'éléments en béton se présente actuellement comme une branche d'activité indispensable au secteur de la construction moderne grâce à une optimisation des coûts, à une réduction des délais et à une gamme de solutions variées. Ainsi, en 2005, la production de béton relative à la préfabrication représente 30 millions de tonnes sur 145 millions de tonnes au total soit plus de 20% **[62]**. De plus, les délais limités de fabrication en usine, la disponibilité et la facilité de mise en œuvre sont des atouts qui apportent aux clients une certaine garantie sur la qualité et des performances contrôlées à un coût global compétitif.

Dans des conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton. L'interaction entre les conditions atmosphériques ambiantes et la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, engendre un gradient de

température et une dessiccation qui peuvent conduire à une chute de résistance, à une fissuration ou à une détérioration de la durabilité **[63]**.

Le ciment est très affecté par l'élévation de température qui joue un rôle fondamental dans la microstructure de la pâte et dans l'évolution des résistances mécaniques. Les qualités du ciment durcissant sous une température élevée sont souvent dépendantes du type de ciment, de sa finesse et du rapport E/C. Les résistances mécaniques au jeune âge sont souvent améliorées tandis que les valeurs ultimes sont réduites par rapport à celles correspond à une température normale **[64]**.

L'élévation de température affecte le système d'hydratation du ciment en altérant la période dormante et le changement de la morphologie des hydrates formés ainsi que la quantité d'ettringite. Cette formation a des conséquences négatives sur la microstructure par une importante porosité et une distribution non uniforme des hydrates. En plus, pour des températures supérieures à 70°C sous une humidité relative élevée, les bétons sont soumis à une expansion causée par la formation retardée d'ettringite **[65]**.

1.3.2. Effet de température sur les résistances mécaniques

Un béton qui durcit sous une température élevée se caractérise par une accélération de son hydratation au jeune âge donnant lieu à des résistances élevées pour tous les types de bétons, vibré, autoplaçant ou de haute performance, avec ou sans ajout. Cet effet bénéfique n'est liée à aucune grandeur que la température, plus elle est élevée, plus la vitesse d'hydratation est rapide plus la résistance au jeune âge est élevée aussi **[66-67]. C**ette augmentation ne dure pas pour tous les types de bétons, les résultats des recherches se diffère entre une diminution, stabilisation et même une augmentation de la résistance par rapport à celles d'un béton durci sous une température ambiante de 20°C et cela fonction du type de béton, type et le taux d'additions et l'humidité de cure.

L'amélioration des résistances au jeune âge est due à une formation accélérée des CSH et à une dissolution rapide des cristaux. A long terme, les hydrates formés n'ont pas eu le temps de s'arranger convenablement ce qui engendre une chute des résistances finales. De plus, les recherches actuelles confirment que l'élévation de la température a un effet négatif sur la microstructure du ciment durci par l'augmentation de sa porosité, la diminution de ses résistances ultimes et la détérioration de sa durabilité **[68, 69]**.

Plusieurs chercheurs ont prouvé une diminution de la résistance soit à 7, 28 jours ou à long terme. Au fait, ils y'a plusieurs explications de la chute des résistances, Pour certain elle est prévisible en raison de la perte d'humidité dans les pores capillaires par évaporation d'eau due

à l'augmentation de la température où l'hydratation dissipée peut entrainer une réduction d'hydratation après les trois premiers jours**[70, 71]**. Bakharev et al. **[72]** et Mirza et al. **[73]** attribuent cette chute au nombre important d'hydrates précipités sous une température élevée et qui constituent des barrières contre la diffusion des ions ce qui cause une hétérogénéité dans la pâte et une réduction des résistances.

D'autre explique cette diminution qu'au départ la réaction d'hydratation est thermoactive et le degré d'hydratation évolue rapidement, Ensuite parce que les hydrates formés lorsque la température augmente sont plus faibles mécaniquement et leur distribution est non uniforme, la résistance à long terme devient plus faible **[74-75]**. D'autres parts Dent et al. **[76]** ont trouvé qu'une augmentation de la température n'entraîne pas de modifications significatives de la nature des hydrates formées (pour une température inférieure à 80°C environ), mais surtout une modification de leur arrangement, À un âge plus avancé, le nombre important des hydrates formés n'ont pas le temps d'organiser convenablement, et cela engendre une perte de résistance. **[77, 78]**.

1.3.3. Effet combiné des additions minérales et des températures sur les propriétés des bétons

Neville **[79]** a précisé que le béton qui est soumis à la haute température affectera la structure de la pâte qui implique la formation de produits avec la structure ouverte, mais ce fait est empêché par la présence des additions. Turkel et al. **[80]** ont rapporté que les ciments composites fonctionnent bien sous traitement thermique.

Videla et al. **[81]** ont étudié le comportement de ciment Portland et de ciment avec additions à diverses températures de durcissement (5, 20 et 30 °C) ont observé que la résistance du ciment mélangé montre des courbes croissantes avec l'augmentation de la température.

Mirza et al. **[73]** a révélé que les mortiers avec additions pouzzolaniques tels que la poudre de tuf, le laitier et les fumées de silice permet d'améliorer les performances des mortiers et la résistance du béton à l'exposition à une température plus élevée que la normale, en particulier dans la plage de 35 à 50°C.

Les résultats des essais effectués par Wainwright et al. **[82]** sur un béton avec un rapport E/C de 0.41incorporé de 0, 50 et 70% de laitiers et soumis à une élévation de température, montrent clairement que, tous les bétons dans la condition cyclique ont montré des résistances à jeune âge supérieures que celles du béton dans les conditions ordinaires. À partir du septième jour l'élévation de la température mène à une diminution des résistances des bétons

sans additions, mais avec l'incorporation de laitier les bétons gardent des résistances similaires à celles des bétons dans les conditions ordinaires.

Berkani A. **[14]** à étudier l'effet des additions minérales (laitier granulé, pouzzolane naturelle et fillers calcaires) sur le comportement des mortiers normales sous des températures de cures allant de 20 à 80°C. Les résultats de ce travail montrent l'effet néfaste des hautes températures sur le comportement du mortier quel que soit la nature de l'addition incorporée. Par ailleurs les résultats démontrent que le laitier s'avère le matériau qui supporte le mieux les températures élevés notamment 60°C où il développe les meilleures résistances.

D'autres travaux ont été réalisés par Bachène S. **[83]** sur l'effet du traitement thermique dans le comportement d'un béton autoplaçant incorporé des additions minérales de nature différente (laitier granulé, pouzzolane naturelle et fillers calcaires). Les résultats de cette étude montrent que la température de murissement de 40°C, est considérée comme optimale dans le cas des BAP, en effet la cure à cette température engendre une amélioration dans les propriétés mécaniques et celles du transport de tous les BAP et dans tous les âges mais au-delà de cette température, ces caractéristiques commencent à s'affaiblir à long terme. Et que le laitier granulé est l'addition la plus convenable dans le cas des BAP subissent un murissement à des températures élevées.

1.4. Conclusion

L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie alimentaire. Certes, l'industrie de production reste un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité, mais il est également reconnu qu'une réduction de la pollution et l'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie, constituent des impératifs de développement durable et rendent fréquemment les coûts unitaires des produits moins élevés.

Nous avons présenté dans ce chapitre des notions sur le béton de sable fluide (définition, composition chimique, utilisation…) et les différents types d'ajouts (marbre, brique, laitier, calcaire).

Malgré l'insuffisance des résultats auxquels ont aboutissent les différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans certains éléments porteurs. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès.

Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance.

Chapitre 02 :
Matériaux et essais

2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés et les techniques expérimentales réalisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux utilisés dans la composition de béton de sable, à savoir : le sable ,le ciment, les fillers (calcaires, marbres, briques, laitiers) , l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des bétons de sable fluide ainsi la technique suivie pour le traitement thermique. Nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude et leurs modes opératoires (état frais et durci).

Les différents essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'université de Médéa et celui de laboratoire de MAZZAD de Médéa au cours de cette étude sont les suivants :

- **A l'état frais**
  - ✓ Essais d'étalement au mini cône ;
  - ✓ Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel) ;
  - ✓ Densité.

- **A l'état durci**
  - ✓ Essai de compression sur demi prisme d'éprouvettes 4*4*16 cm3 à l'âge de 7 et 28 jours ;
  - ✓ Essai de variation dimensionnel (retrait et gonflement) ; sur des éprouvettes prismatiques 4*4*16 cm3 à l'âge de 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 et 56 jours ;
  - ✓ Essai d'absorption d'eau par capillarité sur demi prisme d'éprouvette 4*4*16 cm3 à l'âge de 28 jours.

2.2 Matériaux utilisés

Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées pour la confection des Bétons de sable sont présentés ci-après.

2.2.1. Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable de carrière d'OUED SOUF situé à 500 Km au sud est de la capital d'Alger , sa classe granulaire est 0/3. La figure 2.1 suivante donne un aperçu sur la nature du sable utilisé. L'analyse granulométrique de sable utilisée est présentée sur la figure.2.2 et Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont regroupées dans le tableau 2.1.



Figure 2.1. Sable utilisée.

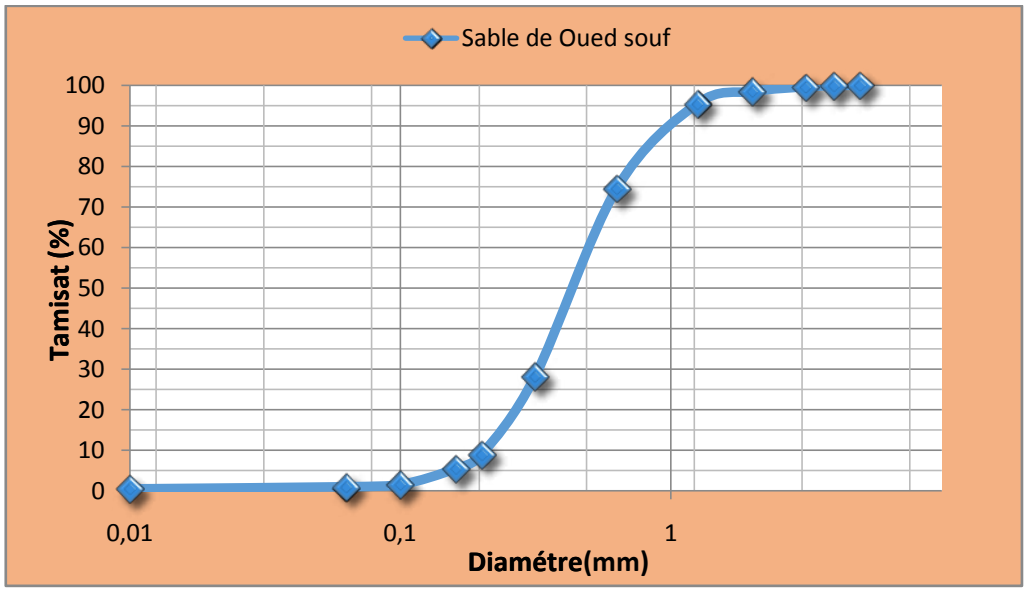


Figure 2.2. La courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau 2.1. Caractéristiques physiques des sables utilisés.

Caractéristiques	**Sable**	**Normes**
Classe granulaire	**0/3**	NF EN 933-1 **[84]**
Module de finesse	2.2	NF EN 933-1 **[84]**
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.64	NF EN 1097-6 **[85]**
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.63	NF EN 1097-3 **[87]**
La compacité (%)	62	NF EN 1097-3 **[87]**
La porosité (%)	38	NF EN 1097-3 **[87]**
Equivalent de sable (%)	81.9	NF EN 933-8 **[85]**
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.42	NF EN 1097-6 **[86]**

2.2.2. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment portland composé ''MATINE'' CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie CIBA-LAFARGE à M'sila en Algérie dont l'ajout est le calcaire. MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al ₂O3) et le fer (Fe_2O3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C. En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physicochimiques on forme à la norme NA 442 **[88].**



Figure 2.3. Le ciment utilisé.

- **Analyse et caractérisation de ciment utilisé**

A. Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker

Selon la fiche technique du ciment (Annexes 1). Le Tableau. (2.2) résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker,

Tableau 2.2. Analyse chimique du ciment et composition du clinker**. [89]**

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition Hypothétique du Clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C3A (%)	6.00-8.00

B. 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] **[96].**

➢ **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] **[97].**

➢ **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 **[98].**

Le Tableau 2.3 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau 2.3. Caractéristique physiques du ciment. **[89]**

Caractéristique	**Valeur**
Masse volumique absolue (g /cm^3)	0.99
Masse volumique apparent (g/cm^3)	3.04
Consistance normale de la pâte de ciment(%)	25.5-28.00
Prisométrie(Min) - **Début de prise** - **Fin de prise**	 120-180 210-280
Classe de résistance(MPa)	≥ 42.5& 62.5
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Finesse (BLAINE) (cm^2/g)	4300-4800
Expansion (mm)	0.50– 2.50

C. 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 [93] sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ 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. Le Tableau 2.4 résume l'évolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

Tableau 2.4. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge. **[89]**

Ages (jour)	Résistance à la compression (MPa)
2	>20
28	≥42.5 et 62.5

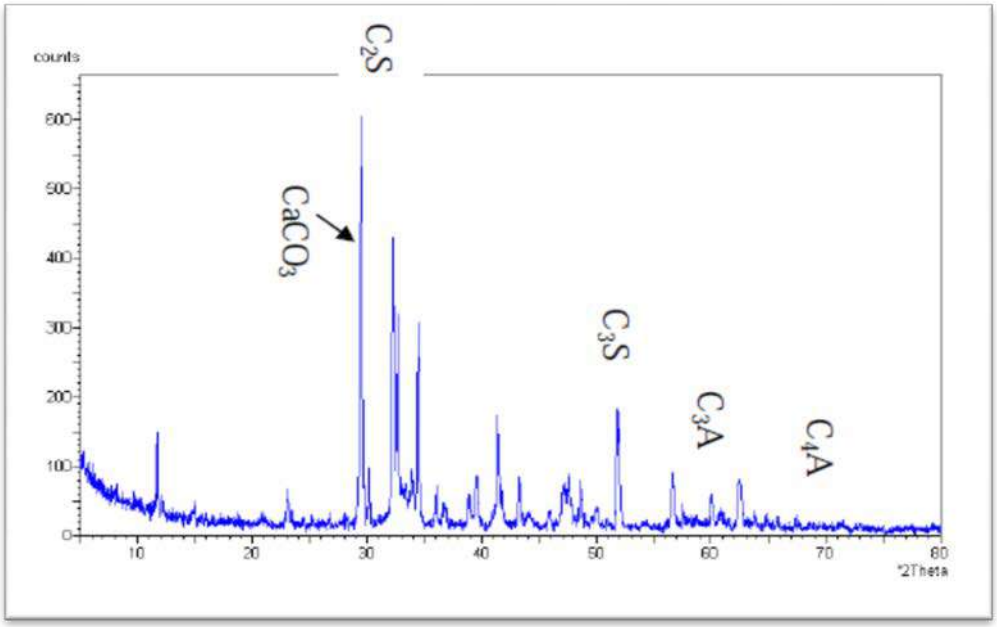


Figure 2.4. Diagramme de DRX appliqué sur le ciment utilisé. **[89]**

2.2.3. Fillers

Ce sont des poudres minérales dont le diamètre maximal n'excède pas 80µm. Dans notre étude, nous allons utiliser quatre types de fillers différents par leurs finesses et leurs natures minéralogiques à savoir, les fillers de marbre, les fillers de calcaire, les fillers de brique, les fillers de laitier. Ils sont destinés à combler les vides intergranulaires du sable, améliorant ainsi sa compacité et permettant l'augmentation des performances du béton de sable fluide.



Figure 2.5. Broyeur à disque utilisé.

2.2.3.1. Filler de marbre:

Les fillers de marbre utilisent dans notre étude (Fig.2.6). Ils sont obtenus par broyage des déchets de concassage d'une carrière de Skikda abandonnée se trouvant dans l'usine de marbre de Zawya wilaya de Blida**.** Leurs caractéristiques physiques sont mentionnées dans le Tableau.2.5.



Figure 2.6. Fillers de marbre utilisé.

Tableau.2.5. Caractéristiques physiques des fillers de marbre utilisées.

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.083
La masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.73
La compacité (%)	39.6
La porosité (%)	60.3
La finesse	3200

Les résultats de l'analyse minéralogique de fillers de marbre utilisé, qui sont montres sur la figure 2.7, indiquent que cette poudre est constituée principalement de calcite avec quelques traces de quartz et de dolomite.

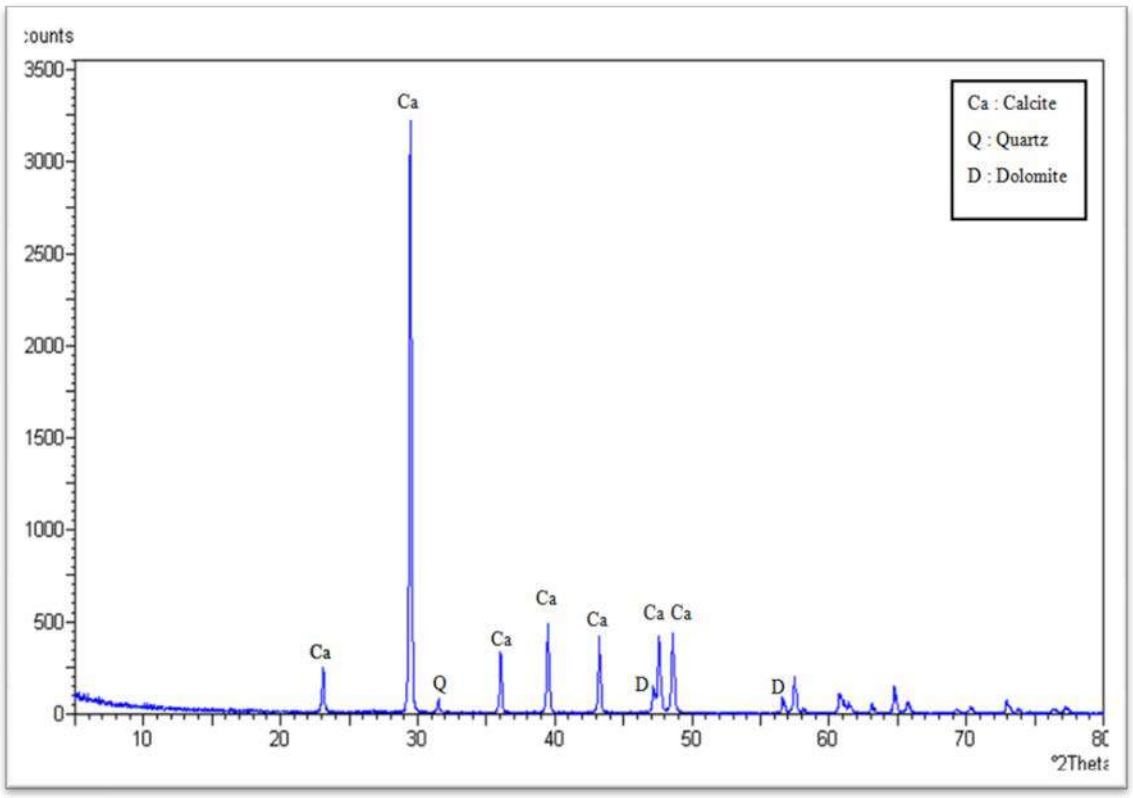


Figure 2.7. Analyse minéralogique de la poudre de marbre.

2.2.3.2. Fillers de calcaire

Les fillers calcaires utilisée au court de ce travail proviennent des déchets de concassage de carrière dans la montagne dit "djebel-el Dakhla" à la sortie Nord de la ville de LAGHOUAT vers la commune d'ELASSAFIA. Ces fillers sont obtenus par tamisage manuel (tamis de 0.80µm de maille) dont les caractéristiques physiques de ces type de fillers de roche calcaire sont récapitulées dans le Tableau 2-6.



Figure 2.8. Fillers de calcaire utilisé.

Tableau 2.6. Caractéristiques physiques des fillers calcaires utilisées

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique (g/cm^3)	**2.83**
Poids spécifique (g/cm^3)	**2.5**
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	**2314**

2.2.3.3. Fillers de briques

Les fillers de briques utilisés proviennent des déchets de la briqueterie SOFABRIL située à la sortie de la ville de Boumerdes et qui fabrique la brique cuite.

Ces fillers sont obtenus par concassage suivi d'un broyage de ces déchets à l'aide d'un concasseur à marteaux, le broyage se fait sur les graviers issus du concassage en utilisant un broyeur à boulet (Los-Angles).Ces opérations sont suivies d'un tamisage automatique du produit broyé et les fines récupérées ont un diamètre (Ømaille= 80µm) dont les caractéristiques physiques sont récapitulées dans le Tableau 2-7.



Figure 2.9. Fillers brique utilisé.

Tableau 2.7. Caractéristiques physiques des fillers des briques utilisées.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique (g/cm^3)	**3.21**
densité	**2.56**
Surface spécifique Blaine (cm^2/g) Fine=80 um	**3247**

2.2.3.4. Fillers de Laitier

Le laitier utilisé dans notre étude expérimentale comme ajout est récolté de la société ARCELOR METALE ANNABA. (fig2.10). Le laitier utilisé dans cette recherche provient de cette source après son broyage à une finesse d'environ 3150 cm2/g. Ces opérations sont suivies d'un tamisage manuel du produit broyé et les fines récupérées ont un diamètre (Ømaille= 80µm).La composition chimique du laitier utilisé est donnée dans le tableau 2.8



Figure 2.10. Laitier de haut Fournaux utilisé.

Tableau 2.8. Composition chimique de laitier utilisé.

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	CL	P.F
39.5	38.11	8.32	1.97	4.01	1.49	0.77	0	0.02	0

2.2.4. Adjuvant

L'adjuvant utilisé au court de ce travail est un Super plastifiant-Haut réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne GRANITEX, commercialisé sous l'appellation 'MEDAFLOW30', de forme liquide ; de couleur brun clair ; d'un PH égal à 6-6,5, de densité 1,07 ± 0,01 et d'une teneur en chlore<0,1g/L et extrait sec de 30% (Fig.2.11).



Figure 2.11. D'adjuvant utilisé.

2.2.5. Eau de gâchage

L'eau qui utilisée pour le gâchage est une eau potable de distribution de notre laboratoire, exempte d'impuretés, et sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

2.3. Composition des mélanges :

La composition du béton de sable fluide pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode expérimentale de projet de SABLOCRETE 1994 **[3]**. Les familles du béton de sable fluide obtenu sont répertoriées comme suit:

BSF FM : Béton de sable fluide à base de fillers de marbre.

BSF FL : Béton de sable fluide à base de fillers de laitier.

BSF FB : Béton de sable fluide à base de fillers de brique.

BSF FC : Béton de sable fluide à base de fillers de calcaire.

La composition de chaque famille du béton est codifiée et mentionné dans le tableau 2.9 suivant :

Tableau 2.9. Compositions des Béton de sable fluide ($1m^3$)

Béton	Sable (Kg/m^3)	Ciment (Kg/m^3)	Fillers (Kg/m^3)	Eau (l/m^3)	Adj (Kg/m^3)
BSF FM	1400	400	200	240	3.3
BSF FL	1400	400	200	240	7.8
BSFFB	1400	400	200	240	9
BSFFC	1400	400	200	240	7.8

2.4. Malaxage et conservation

Le malaxage des bétons de sable se fait en malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L, pour la confection des éprouvettes 4*4*16 cm^3. L'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. 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. Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- Malaxer à sec le ciment, sable et addition afin d'homogénéiser le mélange pendant 30 seconde ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (w1 = 60% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (w2 = 40% Eau) mélangé avec le super plastifiant ;
- .Malaxer le mélange pendant 3 minutes ;
- En laisse le mélange reposé 3 minutes ;
- Malaxer le mélange pendant 1minutes et 30secondes.



Figure 2.12. Le malaxage de béton au laboratoire.

On procède à un malaxage suivant la séquence présentée à la figure 2.13 et résumée comme suit :

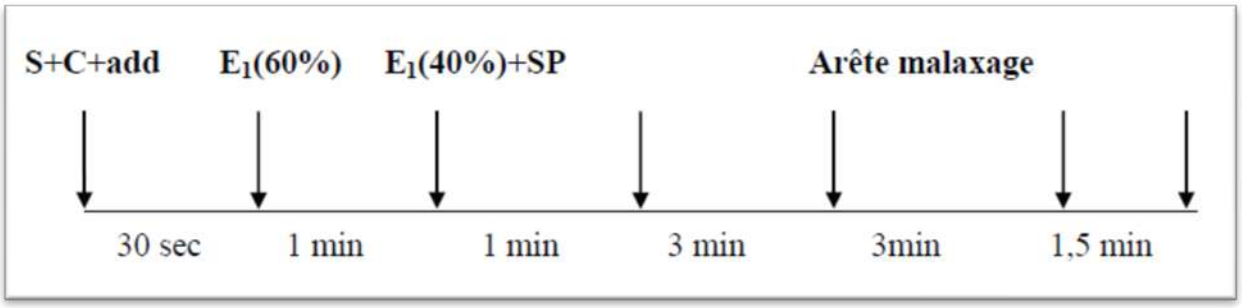


Figure 2.13. Séquence de malaxage du mortier

2.5. Préparation des éprouvettes

Les différents types des bétons fluides sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le coulage des éprouvettes est réalisé sans vibration ni compactage dans des moules métalliques de forme prismatique 4x4x16 cm destinés aux différents essais programmés à l'état durci. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 72 éprouvettes divisées pour différents modes de cure.



Figure 2.14. Fabrication des éprouvettes.

2.6. Cycles du traitement thermique

Après une profonde recherche sur l'effet de la durée et le degré de la température du traitement thermique sur les performances du béton on a choisi une durée de 16 à la température élevée basant sur les résultats de la recherche de Ferhat Bingol et al. **[94]**.



Figure 2.15. Enceinte climatique pour le traitement thermique des éprouvettes.

Les températures de cure ont été choisies pour le cas du traitement thermique : 60 °C. Pour chaque cycle les moules sont conservés à l'air du laboratoire pondant 4h puis entrés dans l'enceinte climatique afin d'accélérer leur hydratation et prise par l'élévation de la

température de murissement (figure 2.15). L'augmentation de température dans la chambre doit être régulières et de façon graduelle de raison de 10°C/h afin d'éviter le choc thermique sur le matériau. Les deux cycles adoptés pour le cas du traitement thermique sont présentés à la figure 2.16 suivante. Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai.

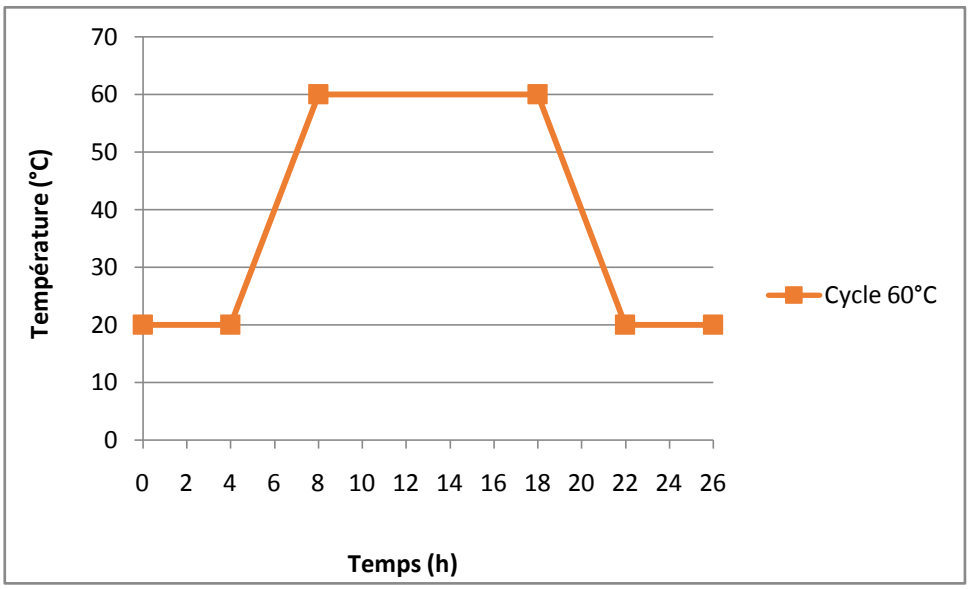


Figure 2.16. Cycles adoptés pour le cas du traitement thermique.

2.7. Protocole expérimental

2.7.1. Essai sur béton de sable fluide à l'état frais

Les différents essais réalisés sur le béton de sable auto plaçant obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.10. Essais sur bétons frais.

Essais	Appareil	Nombre d'essais
Etalement	Moule tronconique	16
Temp d'écoulement	V-funnel	6
Densité	Moule (1L) + balance	16

2.7.1.1. L'étalement

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du mortier est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure 2.17 montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône.



Figure 2.17. Mesure de l'étalement du béton de sable fluide.

2.7.1.2. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V-FUNNEL

La norme NBN EN 12350-9 Essai d'écoulement à l'entonnoir en (V-funnel) **[95]** décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BSF à travers l'ouverture d'un entonnoir en V (figure 2.18). 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 2.18. Essai de mesure de temp d'écoulement (V-Funnel).

2.7.1.3. La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[96]** NA436 **[97].**



Figure 2.19. Mesure de la densité du béton de sable Fluide.



Figure2.20. Fabrication des éprouvettes.

2.7.2. Essais sur béton de sable fluide à l'état durci

Les essais effectués sur le béton durci sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2.11. Essais sur bétons de sable durci.

Essais	Appareil	Dimension (cm)
Compression	La presse hydraulique	4x4x16
Retrait + gonflement	déformètre	4x4x16
Capacité d'absorption d'eau	Essaie d'absorption	demi-prisme 4x4x16

2.7.2.1. Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] **[98]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à l'âge 3,7 et 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme a la norme [NF P 18-412] **[99]** (fig.2.21) 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).

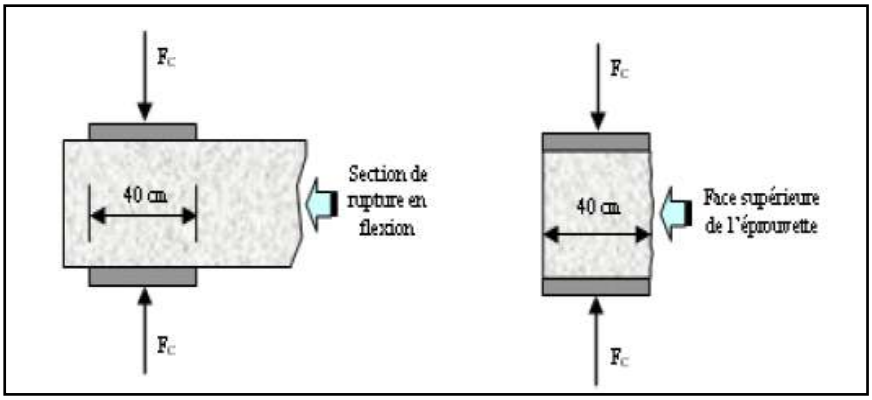


Figure 2.21 : Dispositif de rupture à la compression.

La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$R_C = \frac{F_C}{b^2}$ …… (Equation 2.1)

R_C : Résistance à la compression en (MPa) ;

F_C: Charge de rupture en (N) ;

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



Figure 2.22. Essais de compression.

2.7.2.2. Essai du retrait et gonflement

Le retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. La présence des éléments fins engendre des modifications dans le squelette solide vis-à-vis de la déformation (retrait) du béton.

Cet essai consistera à mesurer le retrait et le gonflement sur le béton à base de différents déchets de carrelage. Les mesures du retrait à l'air libre et gonflement sous l'eau ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm^3 conformément à la norme [NF P 18-404] **[100]**

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un déformètre (fig.2.23) 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)



Figure 2.23. Mesure des variations dimensionnelles à l'aide de déformètre.

- **Principe de mesure du retrait et gonflement**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 160 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

…… $l = L + dl(t)$

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

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{…….. (Equation 2.3)}$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{……..…… (Equation 2.4)}$$

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).

Avec :

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

L_0: 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.

2.7.2.3. Absorption capillaire :

Dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de béton de sable déjà utilisé puis sécher. On le pesé (m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5mm d'eau) (figure.2.24), et pendant chaque intervalle de temps (12 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h) on remesure les morceaux (m_1), le différent de poids entre m_1 et m_0c'est le poids de l'eau absorbé (m_1- m_0) (NBN NE 13057) **[101]**

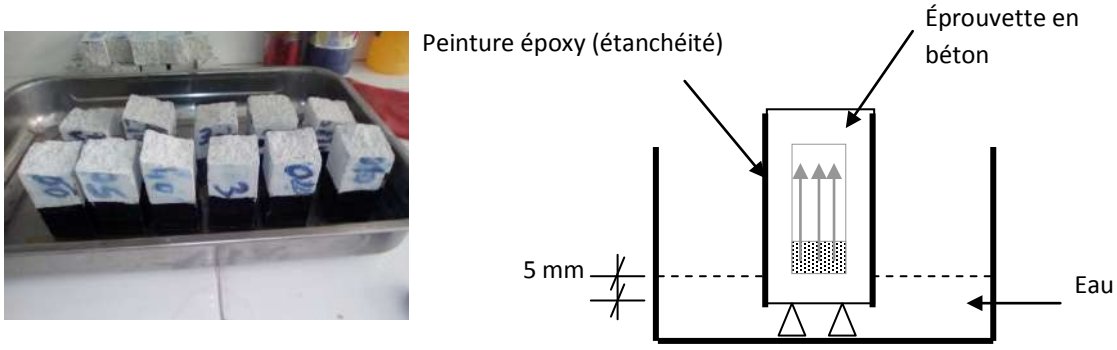


Figure 2.24. Absorption d'eau par succion capillaire.

2.8. Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumées dans la figure suivant :

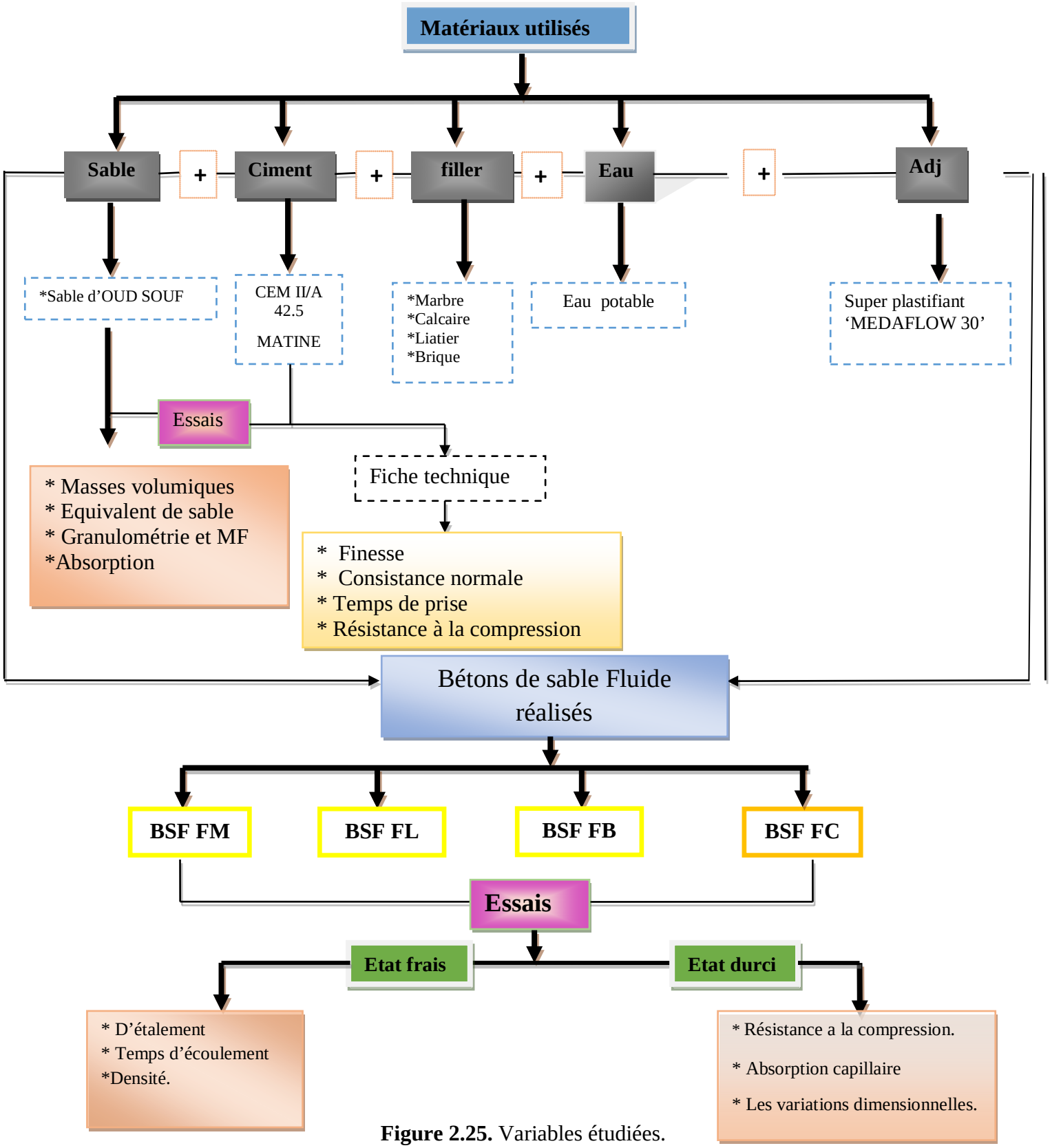


Figure 2.25. Variables étudiées.

2.10. Conclusion

L'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels recyclés dans la fabrication du BSF constitue une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de les fillers sur les propriétés frais et durci des bétons de sables fluide.

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés dans les compositions des BSF

- La méthode de formulation utilisée, est appelée méthode théorique SABLOCRETE.;

- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents bétons de sable fluide à base des fillers à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.

- Pour évaluer la durabilité du BSF à base des différents types des fillers, nous avons choisi les essais d'absorption d'eau et les variations dimensionnelles (retrait et gonflement).

Chapitre 03 :
Rèsultats et interprétations

3.1. Influence de déchets de marbre sur les caractéristiques du béton de sable fluide

3.1.1. Introduction

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable fluide à base de différents de fillers 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 BSF à l'état frais

3.2.1 Etalement

L'étalement des bétons de sable fluide obtenus est résumé sur la figure 3.1 suivant :

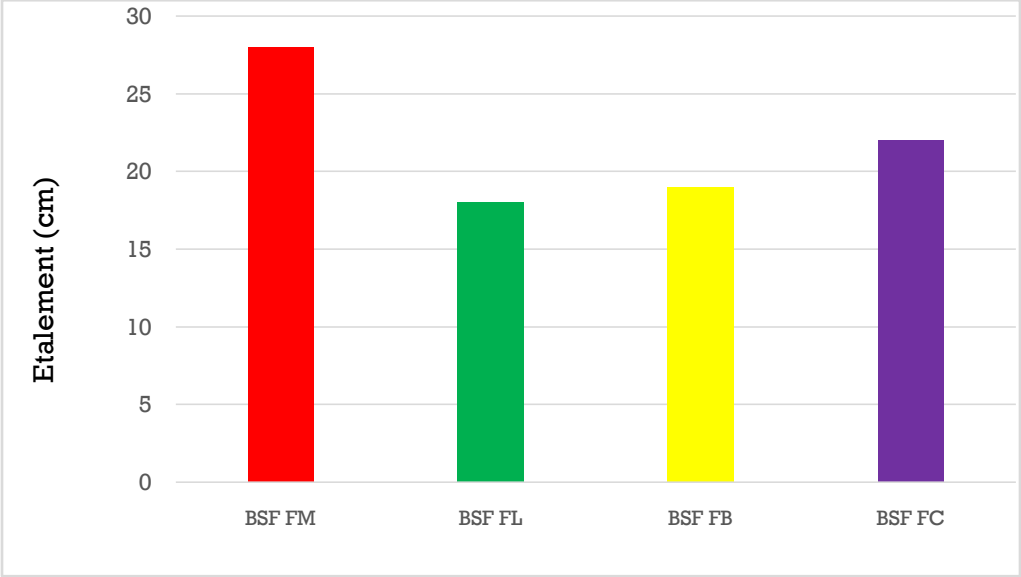


Figure.3.1. Etalement des BSF à base de différents fillers avant réglage

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

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 28 (cm) est visé) comme indiquent la figure suivante :

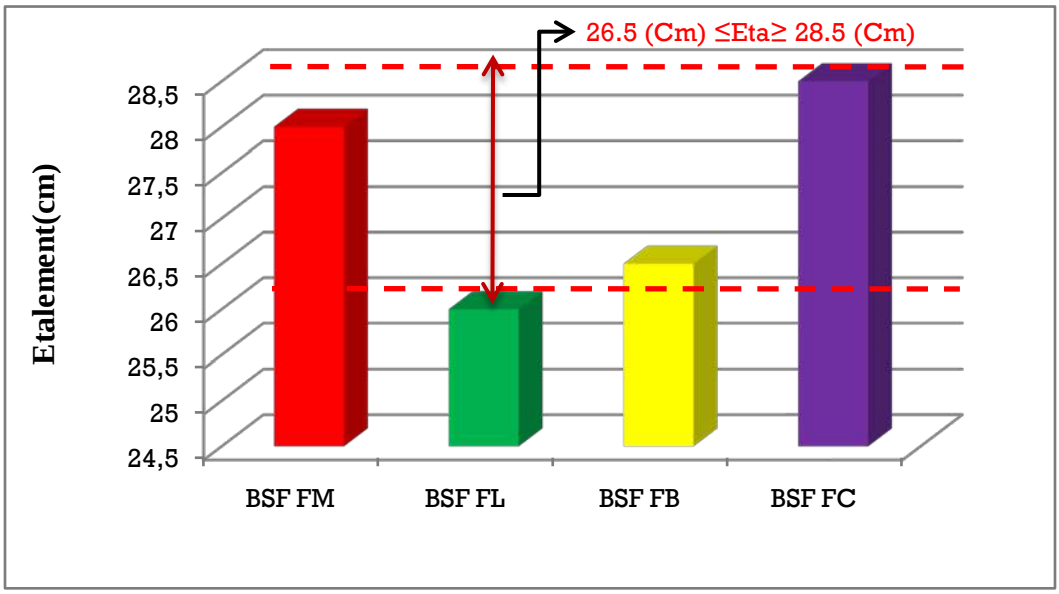


Figure.3.2. Etalement des BSF à base de différent type de fillers après réglage.

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

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

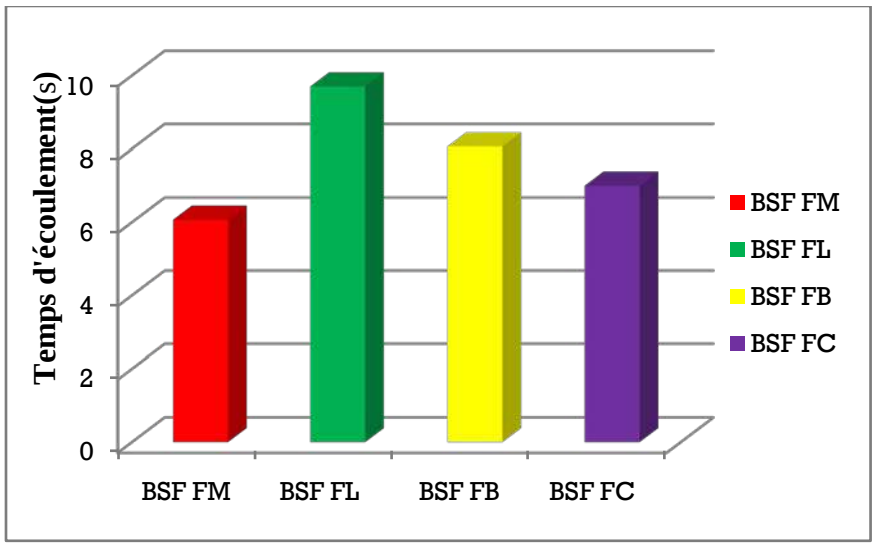


Figure.3.3. Temps d'écoulement des BSF à base de différents fillers après réglage

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 types de fillers. Cette variation est liée à la forme et à l'absorption de chaque type de fillers incorporé qui joue un rôle d'obstacle.

3.2.1. Densité

La densité des différents bétons de sable fluide fabriqué est résumée dans les figures ci-dessous :

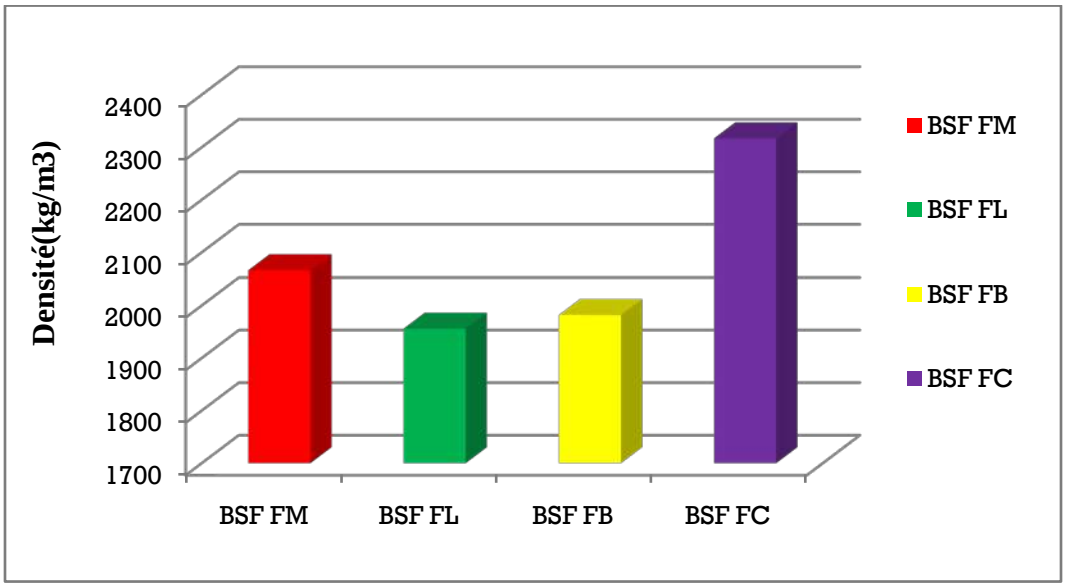


Figure.3.4. Densité des BSF à base de différents types de fillers.

La figure précédente montre que la densité de BSF varie d'un béton à un autre. Cette variation est liée à la densité et à la porosité de chaque type de fillers incorporé. Le béton de sable fluide à base de fillers calcaire présente le BSF le plus dense avec une densité de 2317 Kg/m^3.Par contre le BSF à base de fillers de laitier donne le béton le plus léger avec une densité de 1956 Kg/m^3.

3.3. Caractéristiques du BSF 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 :

3.3.1. Résistances 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 7 et 28 jours sous une température de cure de 23C° et 60C°. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

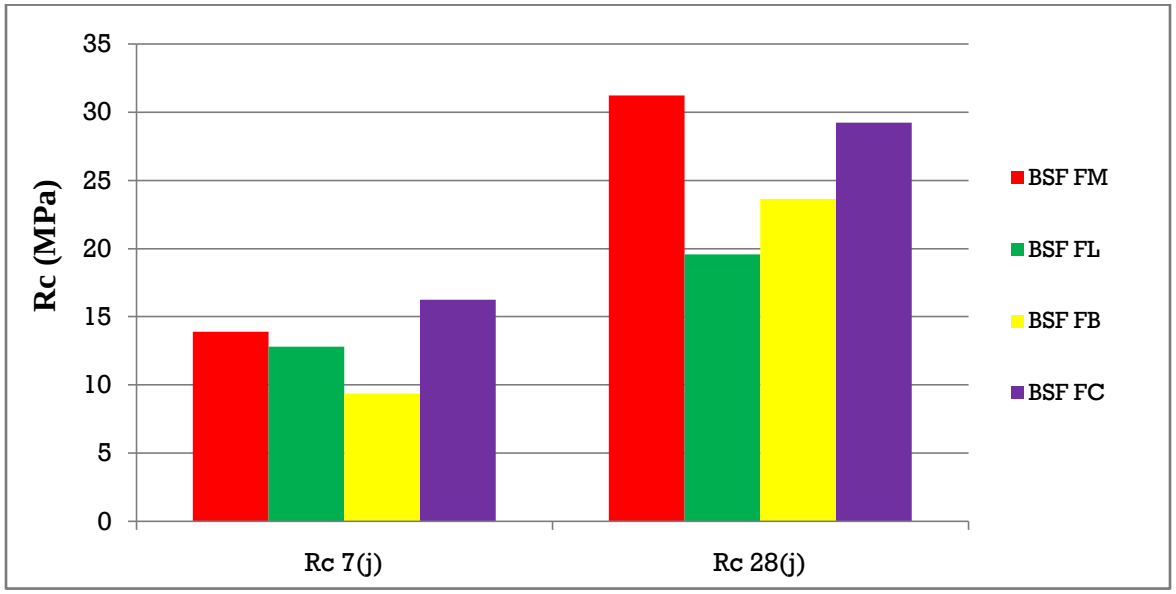


Figure.3.5. Résistance à la compression des BSF à base de différents fillers conservé sous une température de 23C°

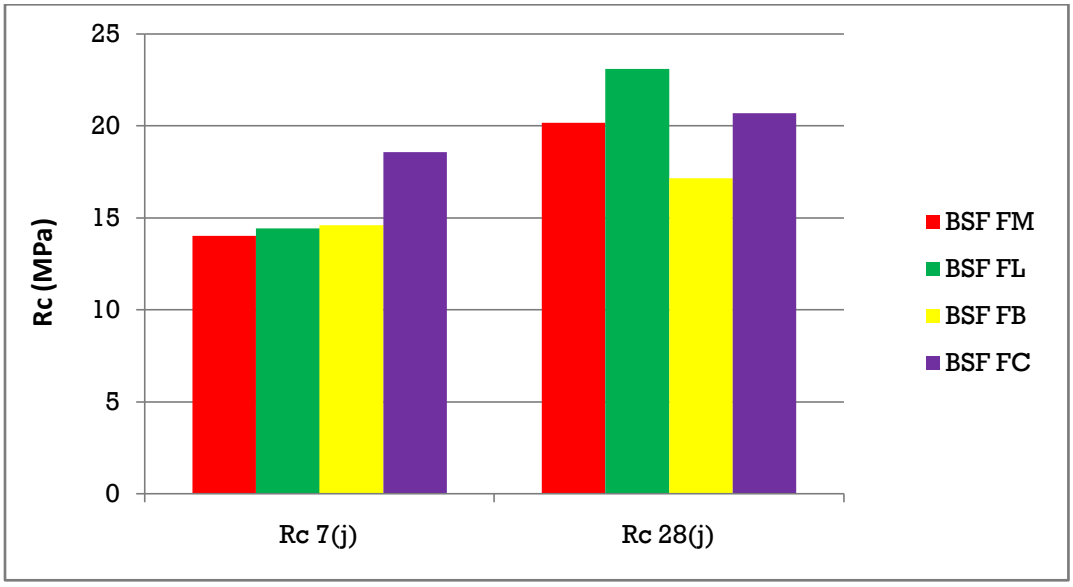


Figure.3.6. Résistance à la compression des BSF à base de différents fillers conservé sous une température de 60C°

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des différents bétons de sable fluide augmente en fonction de l'âge et suit les mêmes cinétiques d'évolution. La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression variée d'un béton de sable fluide à un autre suivant le type de fillers incorporé et suivant chaque température thermique (23 C° et 60C°). Á 23C°, le béton de sable fluide à base de fillers de marbre présente la meilleure valeur de la résistance à la

compression (environ 32MPa) à l'âge de 28 jours. Par ailleurs, le BSF à base de fillers de verre présente la Rc le plus faible. Á 60 C°, la résistance à la compression augmente en fonction d'augmentation de température. Á cette température le meilleur résultat est présenté par le BSF à base de fillers de laitier. Ces résultats est confirme les résultats de berkani et al. **[14]**

3.4. Approche de durabilité

3.4.1. Absorption capillaire

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

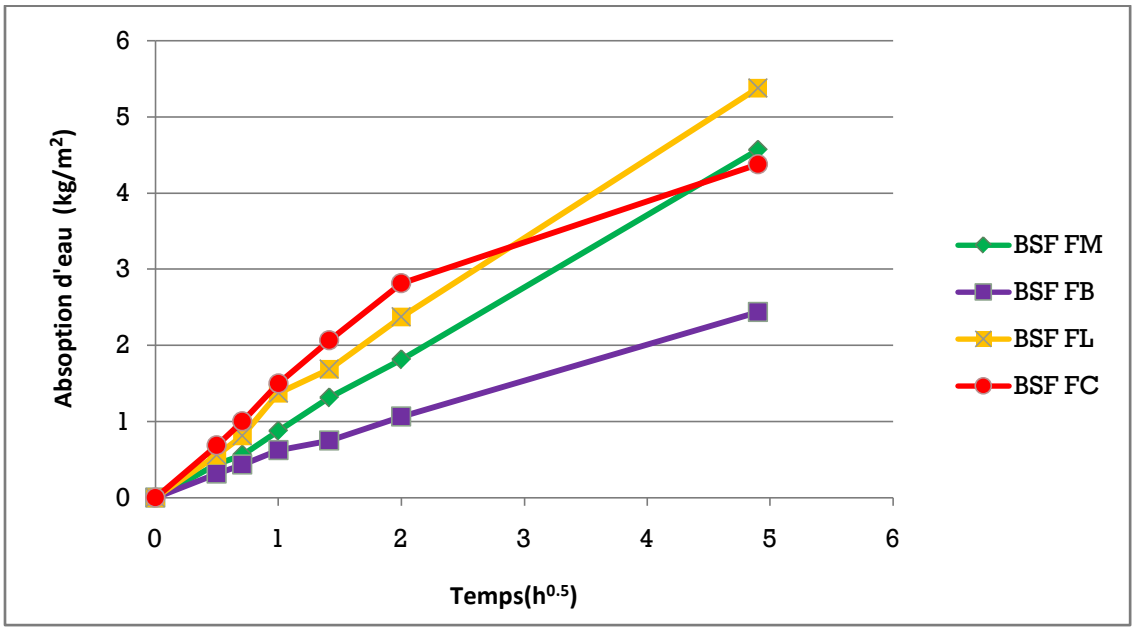


Figure.3.7. Absorption capillaire des BSF à base à base de différents fillers

A partir des résultats précédents on constate que l'absorption capillaire de tous les bétons de sable fluide à base de différents types de fillers augmente en fonction du temps. Les valeurs de coefficient d'absorption capillaire varient d'un béton de sable à un autre suivant l'absorption capillaire de chaque type de fillers incorporé. Cependant, la porosité continue induit par l'addition de chaque type de fillers a aussi une influence majeure sur les variations de coefficient d'absorption capillaire de chaque type de BSF. Les BSF à base de fillers de verre et de laitier présentent les coefficients d'absorption capillaire le moins important. Par contre le BSF à base de

fillers de brique présente un coefficient d'absorption d'eau le moins important par rapport aux autres types de béton. Ce qui confirme les résultats de Hadjouja et al **[34]**

3.4.2. Retrait

Dans notre travail, et pour les différents pourcentages en déchets de marbre, les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par les courbes présentées dans la figure suivante :

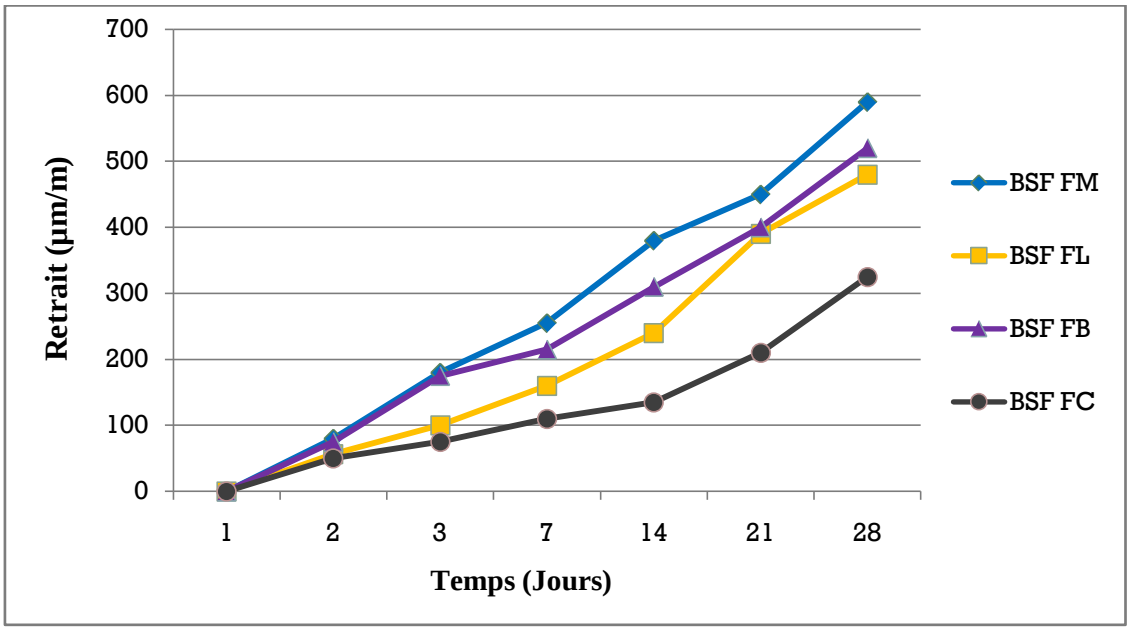


Figure.3.8. Retrait des BSF à base à base de différents types de fillers.

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de béton de sable fluide à base de différents types de fillers augment en fonction du temps. On remarque aussi que le retrait varie d'un béton à un autre. Cette variation est liée à la chaleur d'hydratation de chaque type de fillers ajouté qu'est plus importante dans les fillers de marbre et de verre par rapport aux autres types d'ajouts ce qui donne un retrait plus important. Finalement, sur les résultats obtenus, pour minimiser le phénomène de retrait dans le BSF, l'ajout de fillers calcaire est conseillé.

3.4.3. Gonflement

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 :

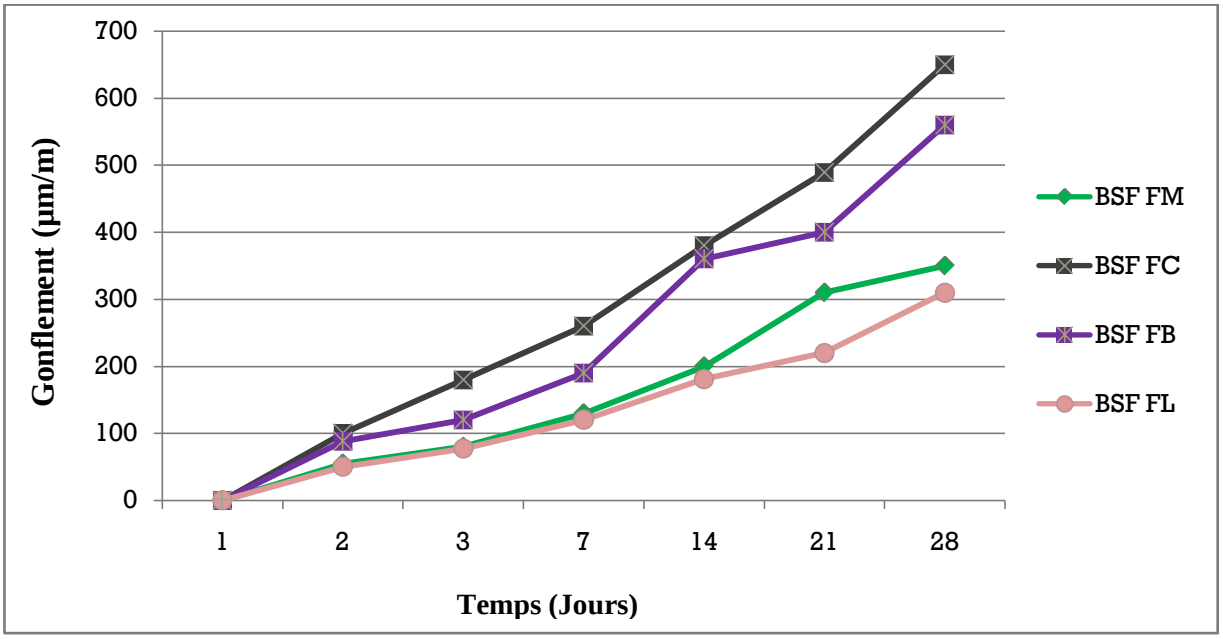


Figure.3.9. Gonflement des BSF à base de différents types fillers.

D'après les figures ci-dessus, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable fluide augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que le gonflement sous eau de chaque type de BSF fabriqué dépend la forme, l'absorption capillaire de chaque type de fillers. La porosité continue de chaque type de BSF a aussi une influence sur le gonflement sous eau de chaque béton. Le béton de sable fluide à base de fillers calcaire présente le taux le gonflement le plus important .Par contre, le taux de gonflement le moins important a été présenté par le BSF à base de laitier.

3.5. Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de déchets de marbre sur le comportement du BSF peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement et le temps d'écoulement de BSF varie en fonction de la morphologie de chaque type de fillers.
- Le BSF à base de fillers calcaire présente le plus dense et le BSF à base de fillers de laitier le plus légers.
- Le BSF à base de fillers de marbre présente le BSF le plus résistant par rapport aux autres types de BSF sous une température thermique de 23C°.Par ailleurs, le BSF à base de

laitier de haut fourneau présente la résistance la plus importante sous une température de 60C°.

- Le BSF à base de fillers de brique présente un coefficient d'absorption le moins important par rapport aux autres types de BSF.
- Le BSF à base de fillers calcaire présente le retrait le moins important, et le BSF à base de fillers de marbre le retrait le plus important.
- Le BSF à base de fillers de laitier présente le retrait le moins important et le BSF à base de fillers de calcaire le plus important.

Conslusions générales et Recommandations

Conclusions générales

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de différents types de fillers sur le comportement du BSF peut mener aux quelques conclusions suivantes

- L'étalement et le temps d'écoulement de BSF varie en fonction de la morphologie de chaque type de fillers.
- Le BSF à base de fillers calcaire présente le plus dense et le BSF à base de fillers de laitier le plus légers.
- Pour avoir une meilleure compacité et meilleurs résistance mécanique les choix de fillers de marbre et de laitier sont conseillés sous une température de cure 23 C° et à 60 C° respectivement.
- Le BSF à base de fillers de brique présente un coefficient d'absorption le moins important par rapport aux autres types de BSF.
- Pour minimiser le phénomène de retrait et de gonflement sous eau l'utilisation de fillers calcaire et de laitier sont recommandée.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des fillers de : marbre, calcaire, laitier et brique comme un ajout 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 la rhéologie du béton de sable fluideà base de différent type de fillers.

-Valorisation d'autres types de fillers comme un liant dans le BSF.

- Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BSF à base des ajouts minéraux.

- Etude du pompage de BSF à base de liant binaire, ternaire et quartenaire.

- Durabilité de BSF à base de différents types de fillers.

-Influence de haute température sur le comportement de BSF à base desdifférents types de fillers.

Références Bibliographique

Référence bibliographique

[1]Desert-Map, 2012 Carte des déserts du monde, téléchargeable du site Internet:

http://fr.mapsofworld.com/world-desert-map.htm#

[2] AFNOR, ″Bétons- Bétons de sable″;*Projet P 18-500*

[3] SABLOCRETE, (1994) « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts etchaussées, Paris, France.

[4]Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussés. "Les pieux forés : recueil des

règles de l'art", Décembre 1979.

[5]Coquillat G., "Béton de sable à haute performance", Centre Expérimental de Recherches

et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, Juin 1992.

[6]Chanvillard G. et Basuyaux O., "Une méthode de formulation des bétons de sable à

maniabilité et résistance fixées", Bulletin de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,

LCPC, Paris, 205 (1996): 49-63.

[7]DREUX G. et FESTA J.: « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », EyrollesHuitième édition, Paris 1998.

[8] CHAUVIN, J.J. « Béton de sable en Union Soviétique », Bulletin de liaison deslaboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°174, juill. - août 1991.

[9] Tahar ALI – BOUCETTA, contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances, thèse de DOCTORAT , Université de ANNABA,2014.

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

[11] JONES M. R., ZHENG L., NEWLANDS MD.,2003« Estimation of the filler content required to minimizevoids ratio in concrete », Magazine of ConcreteResearch, Vol.55, N° 2, pp.193- 202.

[12] SCHMIDT M.,1992 «Cementwithinterground additives capabilities and environmental relief, Part 1 » Zement-Kalk-Gips, Vol. 45, N° 2, pp. 64-69.

[13] HABBOUCHE A.,2002 « Propriété mécaniques et durabilité du béton a base de sable de concassage » Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université de SAAD DAHLEB Blida, Algérie.

[14] BERKANI Akila, Etude de l‟activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d‟un mortier de ciment normalisé, Mémoire de Master, Université de Médéa, Algérie, 2015.

[15] Bouali R., *"Contribution à l'étude d'un ciment Portland artificiel et d'un béton avec ajout calcaire"*, Mémoire de fin d‟étude, INFSB, Alger, 1993, 81p.

[16]Guemadi Z., Escadeillas G., Toumi B., Houari H., Clastres P., *"Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment"*, CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai 2004, 8p.

[17] LEGRAND C., 1971 « Contribution à l‟étude de la rhéologie du béton frais », Thèse de Doctorat de l‟Université Paul Sabatier de Toulouse, France.

[18] NEHDI M., 2000 « Whysome carbonate fillers cause rapidincreases of viscosity in dispersedcement-basedmaterials », Cement and ConcreteResearch J., Vol. 30, pp. 1603-1669.

[19] FELEKOGLU B., 2007 « Utilization of high volumes of limestonequarrywastes in concreteindustry (self-compactingconcrete case) », Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791.

[20] MICHEL F., PIERARD J., COURARD L., POLLET V., 2007 « Influence of physic-chemicalcharacteristics of limestone fillers on fresh and hardenedmortar performances », Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, pp. 205-210.

[21] BORGHOLM H., DUNCAN H., RASMUSSEN S., 1995 « A new blendedcementbased on mineralised ». World CementResearch and Development, pp. 27-33.

[22] KAKALIG., 2000 « Hydrationproducts of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO3 » Cement and ConcreteResearchj., Vol. 30, pp. 1073-1077.

[23] EZZIANE K., 2006, « Etude des Modifications Physico-Mécaniques apportées par les Ajouts Minéraux aux Bétons ». Thèse de Doctorat, **U**niversité de **S**ciences et de la **T**echnologie d**'O**ran, Algérie.

[24] BOURMATTE N., 2004, Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, thèse de magister, Université de Constantine, Algérie.

[25] DELEBECQUE R.,"Éléments de Construction Bâtiment", Edition Delagrave; 1990.

[26] VENUAT M., "Produits Silico–calcaire "Techniques de l'Ingénieur ; 1994.

[27] RENAUD H.,"Murs Poutres Planchers", Edition Eyrolles ; 2002.

[28] Aouni M, ≪valorisation de la poudre recyclée dans le mortier de ciment ≫, Memoire de Master , Université de medea, 2014.

[29] Devenny A. et Khalaf F.M., "The Use of Crushed Brick as CoarseAgregate in Concrete ", Masonry International, Vol. 12, N° .3, 1999, p.81-84.

[30] : BENAKLI S, « Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction », Mémoire de magister, Université de Tizi-ouzou.

[31] : Ramachandran V. S., „Utilisation des dechets et Sous-produits comme Granulats du Béton ', Conseil National de Recherches Canada,[en ligne], 2004,Disponible sur http://irc.nrccnrc.

gc.ca/cbd/cbd215f.html, (consulté en 2004).

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

[33] BektasF.Wang K. et Ceylan H.2008,Effects of crushedclay brick aggregate on mortardurability, Civil Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, United States.

[34] NF P 15-452, 1988, ≪Essai pour beton frais, Mesure du temps d'ecoulement des beton et de mortier aux maniabilimètre, AFNOR.

[35] Al-Manaseer, A.A., T.R., Dalal.,1 997. “Concerte containg plastic agregats”, Concret International, 47– 52.

[36]B.E.D ImportBlog sur la pierre naturelle.

[37] https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_marbres_modernes

[38] BRAHMA.A«Le béton», Office des publications universitaires, **Alger, 1996.**

[39]RochakPandey , Prof. M.C.Paliwal, Jatin Mehta, Jeet N Tiwari, Optimum partial replacement of cement in concrete with waste marble dust in conjunction with super plasticizers, international journal of engineering sciences &research,Technology, 5(8):August, 2016

[40]DUPAIN.R, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux degénie civil par les essais de laboratoire »,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.

[41]BATAYNEH, M., MARIE, I. et ASI, I. Use of selectedwastematerialsInconcrete mixes, Waste Management, vol. 27, n°.12, p.1870-1876 (2007).

[42]Anitha .P, Arjun .S, Ashwiin Kumar S.V, Ashikur Rahman .A, Arun Kumar .R, Experimental Investigation on Partially Replacement of Cement with Marble Wastes, International Journal of Engineering Science and Computing, Volume 8 Issue No.3 ,March 2018

[43]W.H. ZACHARIASEN, the atomic arrangement in glass, journal of the American chemical society, vol.54. 1932.

[44] STITIS., 1999 « Le pari des ciments Algérien » Habitat et construction, Alger, N°05, pp.32-39.

[45] BOUDCHICHA A., 2007, « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l‟amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons », Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Algérie.

[46] AICHOUBE A., GHRICI M., BENAISSA A., 2005« Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d‟un ciment à base de calcaire », Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, pp. 6-7.

[47]Mebrouki A., Belaribi N.B., Bouhamou N., Cyr M., *"Contribution à l'étude de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers"*, CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai 2004, 9p.

[48]Khelafi H., Kerdal D., *"Etude expérimentale sur le comportement mécanique des mortiers contenant des fillers pouzzolaniques"*, Proceedings du Séminaire International sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, 22-24 Mars 1994, pp.313-321.

[49] KAZI A., B., SEMCHA A., KERDALD.,Influence des additions minérales sur la résistance mécanique des mortiers, Université d‟Oran, Algérie.

[50] KRACHAÏ M, BOUABDALLAHA,ABDELHADI H., HAMOUK., Influence de la pouzzolane de beni –saf sur les performances mécaniques des bétons autoplacant.

[51] RAMACHANDRAN V-S :utilisation des déchets et sous-produits comme granulats

du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.

[52]Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, France.

[53] SLAG CEMENT " concert time of set ,reducing thermal stress in mass concrete" Not:3,9 ; slagcement association 2002

[54] Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo « Utilisation de cendres volantes et de laitier dans le

béton » guide des règles de l'art, laboratoire de la technologie des matériaux, p15

[55] Cook DJ, Hinczak I and Duggan R, "Volume Changes in Portland Blast-furnaceSlagCementConcrete", Second International Conference on Use of Fly Ash, Silica Fume,

Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain, 1986

[56]G. Tammann "Der Glaszustand", Voss (Leipzig), (1933)

[57] Bouriahsihem.Hamdanenassima faisabilité d utilisation de verre dans un mortier de ciment mémoire de master univ de Médéa 2015

[58] Fédération de industrie du verre asbl ver bond van glas industrie de vzw avenue Louise 89, Bte 1/ Louizalaan 89, Bus 1 1050 BRUXELLES/ BRUSSEL.

[59]BONAVETTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F., "Limestone filler cement in low w/c concrete:a rational use of energy", Cement and Concrete Research, 33(6): 865–71, 2003.

[60]TOPÇU I B, BILIR T, UYGUNOGLU T, "Effect of wastemarbledust content as filler Onproperties of selfcompactingconcrete", Construction Building Materials, 23(5): 1947–53, 2009.

[61]LANE R. O, BEST J F, "Properties and use of flyash in Portland cementconcrete",Concrete International, 4(7): 81–92, 1982.

[62]« http://www.fib.org » Site internet de la Fédération Internationale du Béton, 2007.

[63]Wojcik G.S., *"The influence of the atmosphere on curingconcrtetemperature and maturity, Advances in Cement and Concrete"*, Proceedings of the Engineering Conferences International, Copper Mountain, CO, August 10-14, 2003, pp.491-500.

[64]Erdogdu S., Kurbetci S., *"Influence of cement composition on the earlyageflexuralstrength of heat-treatedmortarprisms"*, Cement and Concrete Composites, Vol 27, N°7-8, 2005, pp.818–822.

[65]Ramlochan T., Zacarias P., Thomas M.D.A., Hooton R.D., *"The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortarscuredatelevatedtemperature Part I: Expansive behaviour"*, Cement and ConcreteResearch, Vol 33, N°6, 2003, pp.807-814.

[66] BINGOL A. F., TOHUMCUI.,2013« Effects of differentcuringregimes on the compressive strengthproperties of self-compactingconcreteincorporatingflyashandsilica fume », Materials and Design J., Vol. 5, pp.12–18.

[67] MARTINEZ et al a mis en évidence que la température de cure joue un rôle fondamental sur l‟évolution de l‟hydratation du ciment, tel qu‟après 9 jours sous 60°C il a pu obtenir le même degré d‟hydratation à 90 jours sous 20°C.

[68] Ma W., Sample D., Martin R., Brown P.W., *"CalorimetricStudy Of CementBlendsContaining Fly Ash, Silica Fume And SlagAtElevatedTemperatures"*, Cement And Concrete And Aggregates, CCAGPD, Vol 16, N°2, Dec 1994, pp.93-99.

[69]Escalante-Garcia J.I.; Sharp J.H., "*The microstructure and mechanicalproperties of blendedcementshydratedatvarioustemperatures*", CementConcreteResearch, Vol 31, N°5, 2001, pp.695-702.

[70] FERHAT BINGOL A., TOHUMCU I., 2013 « Effects of differentcuringregimes on the compressive strengthproperties of self-compactingconcreteincorporatingflyash and silica fume », Material and Design J., Vol. 51, pp.12–8.

[71] MANNAN M. A., BASRI H. B., ZAIN M. F. M., ISLAM M. N., 2002« Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete ». Build Environ j., Vol.37, pp1167–71.

[72]Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.B., *"Effect of elevatedtemperaturecuring on properties of alkali activatedslagconcrete"*, Cement and ConcreteResearch, Vol 29, N°10, 1999, pp.1619-1625.

[73] MIRZA WH, NOURY SI, BEDAWI WH., 1991 « Temperature on strength of mortars and concretecontainingblendedcements ». Cement and ConcreteComp J., Vol. 13, pp.197–202.

[74]HANSEN W.C.,«Studiesrelating to the mechanism by which alkali-aggregatereactionproduces expansion in concrete », Proc. Amer. Concr. Inst. Vol.40, 1944, pp. 213-227.

[75]Specification for Portland blast furnacecement, British Standards Institution, London, Part 2, 1973, pp. 7.

[76] DENT GLASSER I.S., KATAOKA, 1981 « The Chemistry of Alkali-AggregateReaction », Cement and concreteResearch J., Vol.11, pp. 1-9.

[77] ESCALANTE-GARCIA J. I., SHARP J. H., 2001 « The microstructure and mechanicalproperties of blendedcementshydratedatvarioustemperatures ». Cement and ConcreteResearchJ.,Vol. 31, pp.695–702.

[78] BROOKS J. J., KAISI A. F., 1990 « Earlystrengthdevelopment of Portland and slagcementconcretescuredatelevatedtemperature ». ACI Mater J., Vol.87, N°5, pp.503–7.

[79] NEVILLE D.M. «Properties of concrete», 3rd Edt. Pitman, London, 1981.

[80] TURKEL S., ALABS V.,2005«Theeffect of excessive steamcuring on Portland composite cementconcrete», Cement and CconcreteRresearch J., Vol.35, N°2, pp.405-411.

[81] VIDELA C. C., COVARRUNBIAS J. P. T., PASCAL J. M. D., 1996 « Behavior in extremeclimates of concrete made withdifferent types of cement » In:DhiRK, McCarty MJ, editors. Appropriateconcretetechnology, pp. 213–241.

[82] WAINWRIGHT P.J., TOLLOCZKO J.J.A., 1986 « The early and laterageproperties of temperaturecycled OPC concrete », 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Ottawa, Vol.2, pp. 1293-1321.

[83]Bachène Sara, 2015, Effet couplé de la température et des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants, Mémoire de magister, Université Yahia Farèse de Médéa, Algérie.

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

[85] 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.

[86] 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.

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

[88] NA 442, Normes Algérienne : "Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants", 1994, 2000.

[89]Fiche technique ciment CEM II/A El Mâtine http://www.lafarge.dz/cimentmatine/ fp_matine.pdf.

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

[91]NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des, essais détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[92] NF P 15-473, Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[93]NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.j.

[94] PRATAS J.D., 1978 « Earlyagestrengthdevelopment of slagcementconcretes », Msc. Dissertation, university of Leeds, England.

[95] 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.

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

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

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

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

[100][NF P 18-404], Normes AFNOR : « *Essais pour béton durci - Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules* », Décembre 1989.

[101] 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.

Annex

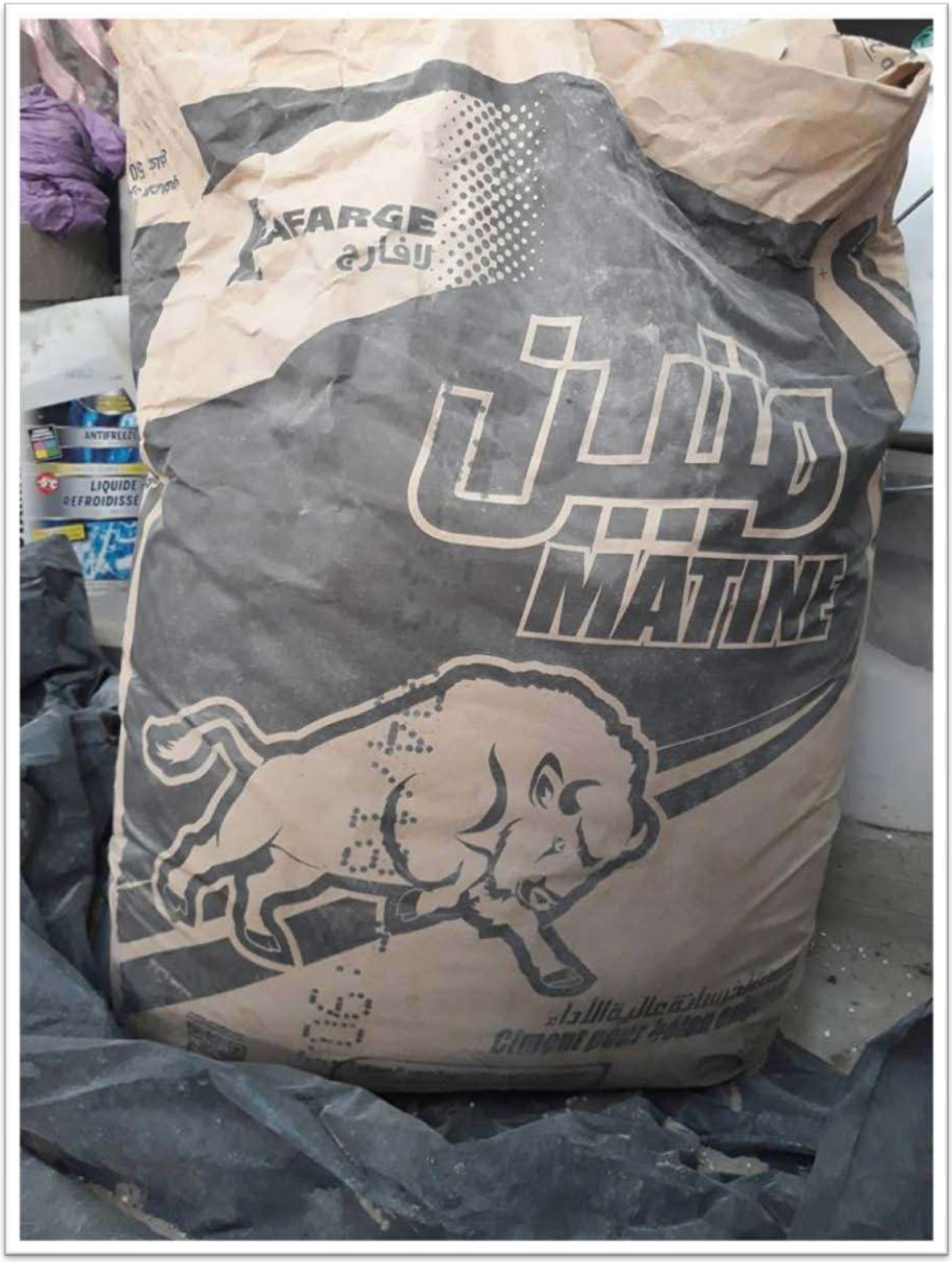


Figure A. 1. Ciment MATINE utilisé

LAFARGE
لافارج

MATINE Ciment pour béton exigeant CEM II/A 42.5 R NA 442	FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

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

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A-L 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

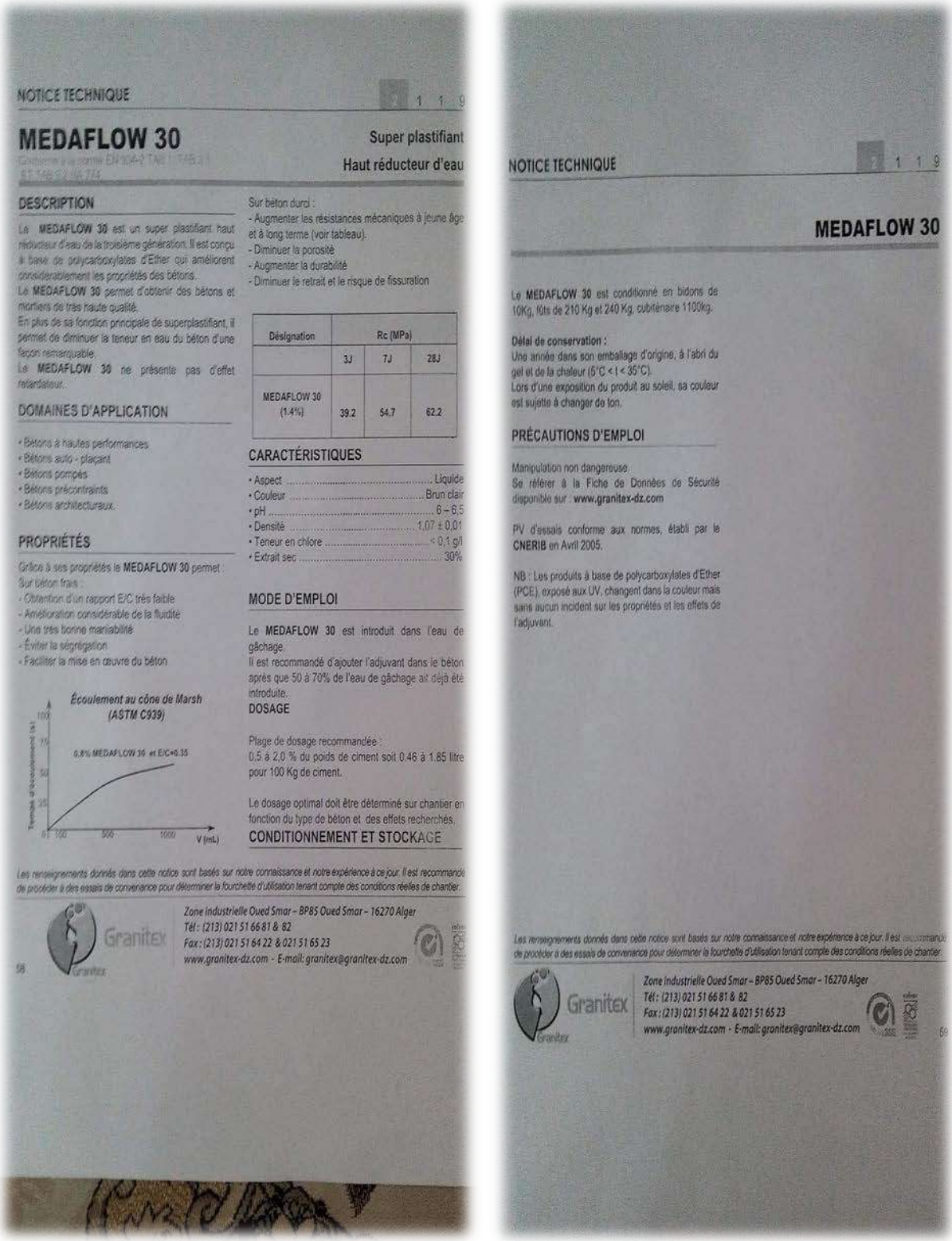
MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

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

Figure A.2 La fiche technique ciment.



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

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
- Éviter 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
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

58

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 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
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

59

Figure A.3. Fiche technique d'adjuvante utilisée.



BSF FL



BSF FM



BSF FB



BSF FC

Figure A.5. Les différents fillers incorporés au béton de sable fluide



Figure A.6. Tamiseuse électrique



Figure A.7. Malaxeur